

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Объект авторского права
УДК 621.391.83:621.376

БЕЛЕНКЕВИЧ
Наталья Ивановна

**МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ
И ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения**

Минск 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Ильинков Валерий Андреевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Костромицкий Сергей Михайлович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, директор РПУП «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси»

Солонар Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник службы фундаментальных и прикладных исследований ОАО «КБ Радар» - управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»

Защита состоится «29» февраля 2024 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «24» января 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



Т.А. Пулко

ВВЕДЕНИЕ

Основным инструментом проектирования и разработки систем радиоэлектроники (СР) является математическое и физическое моделирование (структурно- и схемотехническое). Важнейшая составляющая структурнотехнического моделирования – разработка обоснованных требований к частотным и временным характеристикам отдельных функциональных блоков и системы в целом. Ее выполняют моделированием линейных искажений, применяя в качестве моделей блоков (каналов) линейные функциональные звенья. Известные средства математического моделирования линейных свойств сигналов и звеньев СР обладают (целиком или частично) следующими существенными недостатками: отсутствие автоматизированных процедур формирования, преобразования моделей и расчета частотных, временных, энергетических характеристик и, как следствие, недостаточная для многих приложений точность моделирования; большой объем подготовительной работы и значительное время моделирования. Известные средства физического моделирования не обеспечивают необходимую для многих применений точность моделирования из-за отсутствия источников требуемого множества сигналов (воздействий) различной формы в широком диапазоне частот и времен; требуют вложения весьма значительных материальных затрат.

Оптимальным решением указанных недостатков является применение относительно недорогих программно-аппаратных комплексов (ПАК) математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев, имеющих развитые библиотеки моделей сигналов и звеньев, эффективные процедуры формирования, преобразования моделей и расчета частотно-временных характеристик, генерирующих множество сигналов и реакций разных типов и форм в широком диапазоне частот и реализующих виртуальные физические модели исследуемых звеньев и устройств. Такой ПАК, помимо области проектирования и разработки СР, может успешно применяться также в составе информационно-измерительных систем и комплексов, в качестве самостоятельных устройств генерирования сигналов, при подготовке специалистов в области СР. Создание ПАК с указанными свойствами представляет актуальную и сложную научно-техническую задачу.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 (пункт 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: радиоэлектронные системы и технологии, приборостроение»).

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР).

1. «Исследование принципов построения многофункциональных систем измерения и контроля параметров телекоммуникационных систем и устройств», ХД № 99-3134, № ГР 19994623.

2. «Разработка программно-аппаратных средств математического и физического моделирования радиоэлектронных систем», ХД № 00-3096, № ГР 2000877.

3. «Разработать и освоить серийное производство многофункциональной компьютерной системы генерирования-имитации сигналов сложной формы в диапазоне частот до 1 ГГц», ХД № 03-1066, № ГР 20033833.

4. «Разработка принципов формирования, обработки и передачи информации цифровыми методами в современных системах телекоммуникаций», ГБ 01-2013, № ГР 2004329.

5. «Совершенствование беспроводных и проводных систем телекоммуникаций и создание для них информационно-измерительных систем», ГБ 06-2013, № ГР 20066218.

6. «Синтез и оптимизация беспроводных и проводных систем телекоммуникаций», ГБ 11-2013, № ГР 20122255.

7. «Исследование путей повышения эффективности систем телекоммуникаций», ГБ 16-2013, № ГР 20162386.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы – повышение точности и расширение возможностей математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев систем радиоэлектроники. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие *задачи*.

1. Разработать математическую модель сигналов, звеньев и реакций (СЗР) на комплексной плоскости, описывающую все типы применяемых при моделировании континуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций СР, обеспечивающую необходимые преобразования моделей сигналов и звеньев и создание их развитых библиотек.

2. Разработать математические модели частотных и временных характеристик используемых при моделировании сигналов, линейных звеньев и реакций, обеспечивающие создание эффективных процедур моделирования СЗР в частотной и временной областях.

3. Разработать методы и (на их основе) систему генерирования электрических сигналов различной формы в широком диапазоне частот, обеспечивающие во всем диапазоне высокую стабильность несущей частоты и имеющие расширенные возможности применения.

4. Синтезировать структуру ПАК математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев СР, обеспечивающего улучшение характеристик точности и расширение возможностей применения.

Объект исследования – средства математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев. *Предмет исследования* – математические модели частотных и временных характеристик сигналов и звеньев СР, методы и устройства генерирования сигналов различной формы в широком диапазоне частот.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель СЗР на комплексной плоскости, которая, в отличие от известных, задает все типы применяемых при моделировании континуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций, обеспечивает необходимые преобразования используемых моделей сигналов и звеньев и создание их развитых библиотек.

2. Разработаны математические модели нормирования/денормирования, реактансных преобразований, перемножения и нормализации операторных передаточных функций минимально- и неминимально-фазовых линейных звеньев, которые, в отличие от известных, обеспечивают формирование моделей звеньев с различными видами частотных характеристик, включая фильтры с несколькими полосами пропускания или (и) задерживания, значительно уменьшают объем подготовительной работы.

3. Разработана (на основе модифицированного операционного метода) математическая модель временных характеристик СЗР, которая, в отличие от известных, являясь результатом разложения по конечной неортогональной системе собственных функций (звена и воздействия), представляет любую из временных характеристик точным аналитическим выражением из конечного числа слагаемых. В модели, справедливой и при кратных полюсах передаточной функции звена и изображения воздействия, количество операций сложения и умножения определяется только числом этих полюсов, что обеспечивает предельную точность (не зависящую от количества точек дискретизации по времени и определяемую только точностью вычисления элементарных функций в используемой системе программирования), устраняет проблемы оценки точности и сходимости решения, уменьшает объем вычислений и время моделирования, позволяет реализовать эффективную процедуру моделирования СЗР во временной области. В отличие от разработанной модели, в известном методе ДПФ при некорректном выборе количества точек дискретизации по времени и частоте относительная среднеквадратическая погрешность может достигать десятков процентов. Установлено, что для минимизации ошибки наложения спектров частота дискретизации по времени должна на порядок превышать ширину основного лепестка спектра видеоимпульса и еще больше в случае радиоимпульса. Для последующей минимизации ошибки наложения реакций и достижения высокой точности моделирования (относительная среднеквадратическая погрешность менее 1 %) период повторения должен превышать длительность моделируемого видеоимпульса (радиоимпульса) в 10 и более раз.

4. Разработаны (на основе классического операционного метода) математические модели частотных характеристик СЗР, которые, в отличие от известных, описывают амплитудно- и фазочастотные характеристики всех типов линейных звеньев, амплитудные и фазовые спектры непериодических (финитных, бесконечно протяженных), периодических сигналов и соответствующих им реакций, имеют простую реализацию и обеспечивают построение эффективной процедуры моделирования всех частотных и энергетических характеристик СЗР.

5. Разработаны два метода и система генерирования стабильных электрических сигналов различной формы в широком диапазоне частот (подтверждены патентами Республики Беларусь на изобретения), которые, в отличие от известных методов и устройств, обеспечивают во всем диапазоне одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную относительной нестабильности задающего генератора. При генерировании известными методами сигналов в диапазоне 1–1000 МГц несущих частот и промежуточной частоте 100 МГц относительная нестабильность формирования сигналов на частотах вблизи 1000, 100, 10 и 1 МГц увеличивается, по сравнению с предлагаемыми методами и системой, соответственно в 1,2, 3, 21 и 200 раз.

6. Синтезирована структура ПАК математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев СР, который: обеспечивает предельную точность моделирования временных характеристик; реализует эффективные процедуры формирования, преобразования моделей СЗР и расчета их частотных, энергетических и временных характеристик; реализует процедуры генерирования множества сигналов и реакций различных типов и форм в диапазоне до 1 ГГц и формирования в реальном масштабе времени виртуальных физических моделей исследуемых звеньев и устройств; имеет расширенные возможности применения.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель СЗР на комплексной плоскости, задающая все типы применяемых при моделировании континуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций и обеспечивающая необходимые преобразования используемых моделей сигналов и звеньев.

2. Математические модели нормирования, денормирования, реактансных преобразований, перемножения и нормализации операторных передаточных функций минимально-фазовых и неминимально-фазовых линейных звеньев, обеспечивающие формирование моделей звеньев с различными видами частотных характеристик.

3. Математическая модель временных характеристик СЗР, справедливая и при кратных полюсах передаточной функции звена и изображения воздействия, представляющая любую из временных характеристик точным аналитическим выражением из конечного числа слагаемых, обеспечивающая предельную точность (не зависимую от количества точек дискретизации по времени и определяемую только точностью вычисления элементарных функций в используемой системе программирования), позволяющая реализовать эффективную процедуру моделирования СЗР во временной области.

4. Математические модели частотных характеристик СЗР, описывающие амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики всех типов линейных звеньев, амплитудные и фазовые спектры непериодических и периодических сигналов и реакций, обеспечивающие построение эффективной процедуры моделирования СЗР в частотной области.

5. Два метода и система генерирования стабильных электрических сиг-

налов различной формы в широком диапазоне частот, обеспечивающие во всем диапазоне одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную относительной нестабильности опорного генератора.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо соискателем, либо с его непосредственным участием. Вклад научного руководителя Ильинкова В.А. связан с постановкой цели и задач исследования, анализом принципов построения ПАК математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев СР, механизмов генерирования модулированных сигналов в широком диапазоне частот, анализом методов моделирования и моделей описания сигналов, линейных звеньев и реакций СР. Романов В.Е. является соавтором патентов, принимал участие в разработке структур и физического моделирования заявленных устройств и системы генерирования. Вклад других соавторов в совместно опубликованных работах – Романова В.Е., Румянцева А.В., Силина А.А., Василевского В.В., Коваля К.А., Цветкова В.Ю., Войтенкова А.С., Яркова Я.М., Кухмара Д.А. – связан с оформлением материалов, обсуждением характеристик и параметров моделирующего комплекса и возможностей его внедрения. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на 15 международных и республиканских научно-технических (НТК) и научно-методических (НМК) конференциях и семинарах, в том числе на: III, IV, V и VIII международных НТК «Современные средства связи» (Нарочь, 1998, 1999, 2000, 2003); I республиканской НТК «Цифровое телевизионное и радиовещание» (Минск-Раубичи, 1999); Белорусско-Польском научно-практическом семинаре (Брест, 2002); II, VI, VII и VIII международных НМК «Высшее техническое образование: проблемы и пути развития» (Минск, 2004, 2012, 2014, 2016); VIII международной НМК вузов и факультетов телекоммуникаций (Россия, Уфа, 2004); IV международной НМК «Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века» (Минск, 2004); международном научно-техническом семинаре «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, 2005); международной НТК, посвященной 45-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 2009); международном научно-техническом семинаре «Цифровая обработка сигналов и теория кодирования» (Минск, 2018).

Использование результатов диссертационной работы отражено в соответствующих отчетах о НИР (ОКР) и актах внедрения и использования, приведенных в приложениях к диссертации.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликовано 29 работ, в том числе: восемь статей в рецензируемых отечественных и иностранных научных журналах, рекомендованных ВАК, общим объемом 3,625 авторского листа; 15 статей в сборниках материалов научных конференций и три тезиса докладов научных конференций в объеме соответственно 2,22 и 0,28 авторского листа. Получены три патента Республики Беларусь на изобретения (в том числе два патента на способы и один на систему). Результаты работы отражены в семи научно-технических отчетах.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и трех приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 162 страницы, включая 30 рисунков на 15 страницах, четыре таблицы на четырех страницах, список использованных библиографических источников из 262 наименований на 17 страницах, список публикаций автора по теме диссертации из 29 наименований на четырех страницах, три приложения на шести страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** проведен сравнительный анализ методов, моделей, алгоритмов и программ математического моделирования сигналов и линейных звеньев СР, исследованы методы, устройства и системы их физического моделирования.

В разделе 1.1 проведен сравнительный анализ известных методов описания линейных звеньев во временной, частотной областях и на комплексной плоскости. Показано: для расширения возможностей моделирования целесообразно описывать звенья операторной передаточной функцией $K_Z(p)$ в форме дробно-рациональной функции комплексного переменного. Такое представление удовлетворяет условиям физической реализуемости и устойчивости, задает (не)минимально-фазовые звенья с различными формами частотных характеристик, обеспечивает использование справочной литературы, все виды и простоту преобразования моделей. Проведен сравнительный анализ известных методов описания континуальных детерминированных сигналов во временной, частотной областях и на комплексной плоскости. Показано: для расширения возможностей моделирования линейных искажений целесообразно описывать сигналы преобразованием Лапласа, которое не накладывает ограничений на вид моделируемых сигналов, обеспечивает простоту формирования и преобразования моделей, хорошо согласуется с выбранным методом описания звеньев.

Моделирование линейных искажений основано на нахождении реакции исследуемого звена (канала) на континуальное детерминированное воздействие. Показано (раздел 1.1): это возможно выполнить разными методами

(численного решения дифференциальных уравнений; интеграла Дюамеля; разностных рекуррентных соотношений; спектральным методом; классическим и модифицированным операционными методами), каждый из которых отличается используемым математическим аппаратом, имеет свои преимущества и недостатки, определяемые конкретными условиями применения. Оптимальное решение задачи моделирования во многом зависит от правильного выбора метода моделирования и его согласования с методами описания сигналов и звеньев. Доказано: при моделировании в частотной области (основанном на исследовании амплитудно-фазовых спектров реакций) целесообразно применять классический операционный, а при моделировании во временной области (где исследуются сами реакции) – модифицированный операционный методы. Методы оптимально согласуются с описанием сигналов и линейных звеньев на комплексной плоскости.

Проведен сравнительный анализ возможных программных средств моделирования СР (раздел 1.1): пакетов прикладных программ (ППП) общего применения – систем компьютерной математики (СКМ), используемых при моделировании в разных областях науки и техники, и специализированных ППП моделирования СР на структурно- и схмотехническом уровнях. Установлено: применение СКМ требует от исследователя, помимо инженерных знаний в области СР и понимания физических процессов в моделируемой системе, также основательной математической подготовки. Это существенно усложняет процесс моделирования, влечет большой объем подготовительной работы (по формированию, преобразованию моделей и выбору методов вычислений), значительно увеличивает время моделирования. Описание сигналов и линейных звеньев на комплексной плоскости (на структурном уровне) делает практически непригодными специализированные схмотехнические ППП решения указанной задачи, по сравнению с СКМ и специализированными структурнотехническими ППП. В целом анализ показал, что возможные программные средства моделирования СР обладают (полностью, частично) следующими существенными недостатками: отсутствие развитых библиотек моделей сигналов и линейных звеньев; отсутствие эффективных процедур формирования, преобразования моделей и расчета частотно-временных характеристик; большой объем подготовительной работы; значительное время моделирования.

Для обеспечения физического моделирования исследуемых сигналов и звеньев в разделе 1.2 проведен сравнительный анализ известных методов, систем и устройств генерирования электрических сигналов. Установлено: с учетом компромиссных требований к расширению возможностей физического моделирования и упрощению аппаратной реализации в качестве системы генерирования (СГ) целесообразно использовать высокочастотную (широкодиапазонную широкополосную автономную двухканальную) систему, обеспечивающую одновременное формирование относительно низкочастотного модулирующего и высокочастотного модулированного сигналов различной формы. Показана актуальность и сложность решения задачи генерирования сигналов различной формы в широком диапазоне частот. Доказано, что известные методы обеспечивают недостаточную для многих примене-

ний стабильность несущей частоты модулированных сигналов. Установлена необходимость построения СГ на основе специальных методов генерирования стабильных сигналов различной формы, которые во всем широком частотном диапазоне обеспечивают относительную нестабильность несущей частоты, сравнимую с аналогичной высокостабильного опорного генератора.

Во **второй главе** разработана математическая модель (ММ) на комплексной плоскости континуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций СР, разработаны ММ преобразований операторных передаточных функций (не)минимально-фазовых линейных звеньев.

В разделе 2.1 для расширения возможностей моделирования предлагается описывать линейные звенья операторной передаточной функцией $K_Z(p)$ специального вида, содержащей кратные (вещественные, комплексно-сопряженные) нули и полюсы. Моделирование линейных искажений включает различные процедуры преобразования ММ: (де)нормирование; преобразование модели ФНЧ-прототипа в модели ФВЧ, ПФ, ЗФ и фильтра с несколькими полосами пропускания или (и) задерживания; перемножение и нормализация моделей. Эти процедуры, за исключением (де)нормирования, известные программные средства не реализуют вследствие недостатков используемого описания звеньев. В результате их выполняют вручную, что представляет громоздкий и трудоемкий процесс, особенно при высоких порядках передаточной функции. С учетом изложенного разработаны ММ упомянутых преобразований. Доказано, что при всех преобразованиях вновь образуемая функция $K_{Zd}(p)$ по виду совпадает с исходной $K_Z(p)$. Предлагаемая модель полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям: описывает все типы (не)минимально-фазовых звеньев, включая фильтры с несколькими полосами пропускания или (и) задерживания, обеспечивает использование справочной литературы, построение эффективных процедур формирования, преобразования моделей, расчета частотно-временных характеристик и создание развитых библиотек ММ линейных звеньев.

В разделе 2.2 показано, что при моделировании линейных искажений в качестве воздействий применяют непериодические бесконечно протяженные $\alpha_0(t)$, $\alpha_{1(2)}(t)$, непериодические финитные $\varphi_{0T}(t)$, $\varphi_{1(2)T}(t)$ и периодические $\varphi_0(t)$, $\varphi_{1(2)}(t)$ сигналы, задаваемые на интервалах соответственно $[0, \infty)$, $[t_{1(2)}, \infty)$, $[t_1, t_2)$, $[0, t_{1(2)})$, $[t_1 + nT, t_2 + nT)$, $[nT, t_{1(2)} + nT)$ ($0 \leq t_1 < t_2 \leq T$; $n = \overline{-\infty, \infty}$). Установлено: они описываются лапласовскими изображениями, содержащими операторные функции $S_i(p)$ ($i = 0, 1, 2$), которые аналитичны в области $|p| > L$ и стремятся к нулю при $p \rightarrow \infty$ равномерно относительно $\arg p$. Предложено эти функции задавать в форме, аналогичной $K_Z(p)$. При формировании сигналов, как и в случае звеньев, широко используют процедуры преобразования ММ, обычно реализуемые с помощью известных теорем преобразования Лапласа. Показано, что все эти преобразования приводят к моделям сигналов, представляемым теми же по виду функциями $S_{0(1,2)}(p)$. Следует: описание функциями $S_{0(1,2)}(p)$ задает все применяемые при моделировании типы сигналов, обеспечивает необходимые преобразования ММ и создание их развитых библиотек, полностью согласуется с описанием $K_Z(p)$ линейных звеньев.

В разделе 2.3, учитывая одинаковые свойства упомянутых функций $K_Z(p)$ и $S_{0(1,2)}(p)$, на основе классического и модифицированного операционных методов разработана ММ на комплексной плоскости непрерывных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций СР

$$R(p) = (R_{2Z}(p)e^{-pT} - R_{1Z}(p)e^{-pT}) (1 - e^{-pT})^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{где } R_{00}(p) = \frac{A(p)}{CB(p)} = \frac{\prod_{x=1}^{N_3} (p + a_{3x})^{n_{3x}} \prod_{y=1}^{N_4} (p^2 + 2a_{4y}p + a_{4y}^2 + \omega_{4y}^2)^{n_{4y}}}{C \prod_{s=1}^{N_1} (p + a_{1s})^{n_{1s}} \prod_{l=1}^{N_2} (p^2 + 2a_{2l}p + a_{2l}^2 + \omega_{2l}^2)^{n_{2l}}} - \quad (2)$$

базовая операторная функция специального вида, при этом

$$R_{00}(p) = \begin{cases} R_Z(p) = K_Z(p) & (h_Z = 1, h_0 = h_1 = h_2 = N_{0i} = N_{1j} = N_{2j} = 0) \\ R_{0(1,2)}(p) = S_{0(1,2)}(p) & (h_{0(1,2)} = 1, h_Z = h_{1(0,0)} = h_{2(2,1)} = N_{Zi} = N_{1(0,0)j} = N_{2(2,1)j} = 0) \\ R_{0(1,2)Z}(p) = S_{0(1,2)}(p)K_Z(p) & (h_Z = h_{0(1,2)} = 1, h_{1(0,0)} = h_{2(2,1)} = N_{1(0,0)3} = N_{1(0,0)4} = N_{2(2,1)3} = N_{2(2,1)4} = 0) \end{cases},$$

($i = \overline{1, 4}, j = \overline{3, 4}$). Функция (2) образована операцией объединения соответствующих коэффициентов функций $K_Z(p)$ и $S_{0(1,2)}(p)$. Модель (1) задает все типы применяемых при моделировании сигналов, линейных звеньев и реакций СР, полно описывает их частотные, временные свойства и характеристики. Подстановкой $p = j\omega$ выполняется переход к функции $R(j\omega)$. Она по своей сути является обобщенной моделью СЗР в частотной области, поскольку при разных сочетаниях параметров $h_Z, h_i, N_{Zi} - N_{Z4}, N_{i1} - N_{i4}$ ($i = 0, 1, 2$) и дополнительных переходах $t_1 \rightarrow 0, t_2 \rightarrow \infty$ и $T \rightarrow \infty$ описывает комплексную передаточную функцию $K_Z(j\omega)$ моделируемого звена, спектральные характеристики непериодических (финитных $\varphi_{0T}(t), \varphi_{2T}(t)$, бесконечно протяженных $\alpha_0(t), \alpha_1(t)$), периодических ($\varphi_0(t), \varphi_2(t)$) воздействий и спектральные характеристики всех реакций. Детальная реализация модели $R(j\omega)$ позволяет построить математический алгоритм и на его основе эффективную процедуру расчета частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ, ХРЗ, ХГВЗ) линейных звеньев, амплитудных и фазовых спектров сигналов и реакций. Для моделирования во временной области рекомендован модифицированный операционный метод. Применяя его, с учетом свойств функций $R_{1(2)Z}(p)$ выполнен переход к обобщенной модели СЗР во временной области. Аналогично модели $R(j\omega)$ в частотной области, она при различных сочетаниях параметров и дополнительных временных переходах описывает временные характеристики (ВХ) линейного звена, все воздействия и реакции на последние. Детальная реализация этой модели позволяет построить математический алгоритм и на его основе эффективную процедуру расчета временных характеристик СЗР.

В **третьей главе** разработаны ММ и (на их основе) алгоритм расчета частотных и энергетических характеристик СЗР, модель и (на ее основе) алгоритм расчета временных характеристик СЗР, проведен сравнительный количественный анализ точности моделирования методом ДПФ.

В разделе 3.1 в основу построения ММ частотных характеристик (ЧХ) положена модель (1). Предельным переходом $T \rightarrow \infty$ в (1) образуется функция

$$R_T(p) = R_{2Z}(p)e^{-pt_2} - R_{1Z}(p)e^{-pt_1} = A_{2Z}(p)e^{-pt_2} / (C_{2Z}B(p)) - A_{1Z}(p)e^{-pt_1} / (C_{1Z}B(p)), \quad (3)$$

которая при необходимых сочетаниях параметров N_{Zi} , N_{ki} , h_Z , h_k и предельных переходах $t_1 \rightarrow 0$, $t_2 \rightarrow \infty$ задает на комплексной плоскости множество линейных звеньев, непериодических (финитных $\varphi_{kT}(t)$, бесконечно протяженных $\alpha_k(t)$) сигналов и соответствующих им реакций $\psi_{kT}(t)$ и $\beta_k(t)$ ($k = \overline{0, 2}$). Для нахождения их ЧХ выполнены следующие процедуры: переход (заменой $p = j\omega$) к комплекснозначной функции $R_T(j\omega)$; последующие преобразования в базисе комплексных чисел; представление результата в показательной форме $R_T(j\omega) = R_T(\omega)e^{j\theta_T(\omega)}$. Модуль $R_T(\omega)$ и аргумент $\theta_T(\omega)$ являются искомыми ЧХ. Модели $R_T(\omega)$ и $\theta_T(\omega)$ описывают ЧХ на частотах ω , которым соответствуют точки $p = j\omega$ на мнимой оси комплексной плоскости, где функция $R_T(p)$ (3) не имеет особенностей. Известно, лапласовские изображения непериодических финитных сигналов и соответствующих им реакций, являясь аналитическими функциями при $\text{Re } p \geq 0$, могут содержать на мнимой оси так называемые устранимые особые точки. Анализ функций (2) показывает, что одна из них ($p_{1r} = j\omega_{1r} = 0$) является корнем того полинома $(p + a_{1r}) \in (p + a_{1s})$ ($s = \overline{1, N_1}$), в котором $a_{1r} = (a_{1s})_{s=r} = 0$. Другие точки ($p_{2q} = \pm j\omega_{2q}$) – корни тех полиномов $(p^2 + 2a_{2q}p + a_{2q}^2 + \omega_{2q}^2) \in (p^2 + 2a_{2l}p + a_{2l}^2 + \omega_{2l}^2)$ ($l = \overline{1, N_2}$), в которых $a_{2q} = (a_{2l})_{l=q} = 0$. В устранимой точке функция $R_T(p)$ имеет неопределенность типа $0^m / 0^m$, где m – кратность корня p_{1r} (p_{2q}), равная $n_{1r} = (n_{1s})_{s=r}$ ($n_{2q} = (n_{2l})_{l=q}$). Для устранения указанной неопределенности использовано правило Лопиталья. Следуя ему, выполнен переход от функции (3) к функции

$$R_T^M(p) = \left(C_{1Z}A_{2Z}(p)e^{-pt_2} - C_{2Z}A_{1Z}(p)e^{-pt_1} \right)^{(m)} / \left(C_{1Z}C_{2Z}B(p) \right)^{(m)}. \quad (4)$$

Далее, выполняя последовательно дифференцирование по переменной p , замену $p = j\omega$ и необходимые преобразования в базисе комплексных чисел, получены модели $R_T^I(\omega)$, $\theta_T^I(\omega)$ ($R_T^{II}(\omega)$, $\theta_T^{II}(\omega)$) ЧХ в точках первого (второго) порядка (на частотах $\omega_{1r} = 0$ и ω_{2q}). Модели $R_T(\omega)$ и $R_T^{I(II)}(\omega)$ при разных сочетаниях параметров N_{Zi} , N_{ki} , h_Z , h_k , t_1 , t_2 описывают на всей частотной оси АЧХ линейных звеньев, модули спектральных плотностей (непрерывные по свойствам амплитудные спектры (АС)) непериодических (финитных, бесконечно протяженных) сигналов и соответствующих им реакций, а модели $\theta_T(\omega)$ и $\theta_T^{I(II)}(\omega)$ – ФЧХ звеньев, аргументы спектральных плотностей (непрерывные фазовые спектры (ФС)) упомянутых сигналов и реакций.

Операторная функция $R(p)$ (1) при значениях параметров $h_Z = \overline{0, 1}$, $T < \infty$ и $0 \leq t_1 < t_2 \leq T$ задает множество периодических сигналов и соответствующих им реакций. С учётом свойств периодических сигналов и устойчивых линейных звеньев особыми точками функции $R(p)$ являются бес-

конечное число простых (однократных) полюсов $p_n = j2\pi n/T$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), лежащих на мнимой оси комплексной плоскости. Для нахождения ЧХ рассматриваемых сигналов и реакций использован известный механизм вычисления вычетов в простых полюсах (с помощью обобщенной теоремы разложения). В результате получено представление сигналов $\varphi_k(t)$ и реакций $\psi_k(t)$ ($k = \overline{0, 2}$) рядом Фурье в инженерной тригонометрической форме, в которой амплитуды A_n и начальные фазы Θ_n ($n = \overline{0, \infty}$) выражены через упомянутые функции $R_T(\omega)$, $R_T^{I(II)}(\omega)$, $\theta_T(\omega)$, $\theta_T^{I(II)}(\omega)$ и представляют собой соответственно дискретные АС и ФС периодических сигналов $\varphi_k(t)$ и реакций $\psi_k(t)$ ($k = \overline{0, 2}$).

В разделе 3.2 на теоретической базе построенных математических моделей ЧХ разработан алгоритм расчета всех частотных и энергетических характеристик СЗР, реализующий следующие последовательные этапы: выбор предмета исследования, определение сочетания параметров N_{Zi} , N_{ki} , h_z , h_k , t_1 , t_2 и T ($k = \overline{0, 2}$, $i = \overline{1, 4}$); выбор (под)диапазона частот и шага расчета; выбор механизма разбиения (под)диапазона частот; расчет частотных характеристик СЗР; расчет энергии (мощности), относительной доли энергии (мощности) непериодических (периодических) сигналов и реакций в любом исследуемом частотном поддиапазоне.

В разделе 3.3, реализуя процедуры вычисления вычетов в обобщенной модели СЗР во временной области, построена ММ $\psi_0(t)$, которая, в отличие от известных, описывает реакцию в замкнутом виде, справедлива при кратных полюсах передаточной функции звена и изображения воздействия, представляет любую из ВХ точным аналитическим выражением из конечного числа слагаемых и обеспечивает предельную точность моделирования:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \psi_L(t) \\ \psi_M(t) \\ \psi_U(t) \end{pmatrix} &= \sum_{s=1}^{N_{Z1}} \left(\begin{pmatrix} D_{1Z1s} \\ D_{1Z1s}^T \\ D_{1Z1s}^T \end{pmatrix} e^{-a_{1s}(t-t_1)} - \begin{pmatrix} D_{2Z1s} \\ D_{2Z1s} \\ D_{2Z1s}^T \end{pmatrix} e^{-a_{1s}(t-t_2)} \right) + \\ &+ \sum_{l=1}^{N_{Z2}} \left(\begin{pmatrix} D_{1Z2l} \\ D_{1Z2l}^T \\ D_{1Z2l}^T \end{pmatrix} e^{-a_{2l}(t-t_1)} - \begin{pmatrix} D_{2Z2l} \\ D_{2Z2l} \\ D_{2Z2l}^T \end{pmatrix} e^{-a_{2l}(t-t_2)} \right) - \\ &- \sum_{s=N_{Z1}+1}^{N_{Z1}+N_{01}} \begin{pmatrix} 0 \\ D_{0Z1s} \\ 0 \end{pmatrix} e^{-a_{1s}t} - \sum_{l=N_{Z2}+1}^{N_{Z2}+N_{02}} \begin{pmatrix} 0 \\ D_{0Z2l} \\ 0 \end{pmatrix} e^{-a_{2l}t}, \quad \psi_0(t) = \begin{cases} \psi_L(t), & (0, t_1) \\ \psi_M(t), & (t_1, t_2), \\ \psi_U(t), & (t_2, T) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

где D_{0Z1s} , $D_{1(2)Z1s}$, $D_{1(2)Z1s}^T$, D_{0Z2l} , $D_{1(2)Z2l}$, $D_{1(2)Z2l}^T$ – дробные функции, вид которых зависит от кратности полюсов передаточной функции звена и изображения воздействия. При необходимых временных переходах модель (5) описывает реакции на непериодические (финитные, бесконечно протяженные) и периодические сигналы. В случае воздействия $\alpha_0(t)$ в виде функций

Дирака $\delta(t)$ и Хевисайда $\gamma(t)$ реакция $\beta_0(t)$ представляет соответственно импульсную $g(t)$ и переходную $h(t)$ характеристики звена. В результате, выражение $\psi_0(t)$ (5) по сути является ММ всех временных характеристик СЗР.

В разделе 3.4 на теоретической базе ММ (5) разработан алгоритм расчета временных характеристик СЗР, реализующий следующие последовательные этапы: выбор предмета исследования; формирование базовой операторной функции $R_{00}(p)$; определение сочетания параметров N_{Zi} , N_{ki} , h_z , h_k , t_1 , t_2 и T ($k = \overline{0, 2}$, $i = \overline{1, 4}$); выбор временного интервала и шага расчета; расчет ВХ сигналов и реакций в любом заданном временном интервале.

В разделе 3.5 отмечено, что на практике при моделировании широко применяется метод ДПФ, часто реализуемый в форме БПФ. В этих методах при недостаточном количестве точек дискретизации по времени возникает эффект наложения спектров в основной полосе частот и в частотных полосах вокруг гармоник частоты дискретизации, влекущий так называемую ошибку наложения спектров. Дискретизация по частоте соответствует тому, что методы по сути рассчитывают реакцию на периодическое воздействие. При недостаточном количестве точек дискретизации по частоте возникает эффект наложения реакции рассматриваемого и предыдущих импульсов периодической последовательности, приводящий к так называемой ошибке наложения реакций. В итоге при расчете указанными методами реакции $\psi_{kT}(t)$ на непериодическое финитное воздействие $\varphi_{kT}(t)$ возникают ошибки наложения спектров и реакций, а в случае вычисления реакции $\psi_k(t)$ на периодическое воздействие $\varphi_k(t)$ – ошибка наложения спектров. Величины указанных погрешностей могут быть весьма значительными, существенно зависят от вида воздействия (видеоимпульс, радиоимпульс), определяются корректностью выбора количества точек дискретизации. С учетом изложенного для количественной оценки возможной погрешности выполнен вычислительный эксперимент, который показал: в отличие от разработанной модели, при некорректном выборе количества точек дискретизации (по времени и частоте) относительная среднеквадратическая погрешность метода ДПФ может достигать десятков и более процентов. Доказано: для минимизации ошибки наложения спектров частота дискретизации по времени должна на порядок превышать ширину основного лепестка спектра видеоимпульса и еще больше в случае радиоимпульса. Для последующей минимизации результирующей ошибки и достижения высокой точности моделирования (относительная среднеквадратическая погрешность менее 1 %) период повторения должен превышать длительность моделируемого видеоимпульса (радиоимпульса) в 10 и более раз.

В четвертой главе разработаны методы, реализующие их устройства и система генерирования стабильных электрических сигналов различной формы в широком диапазоне частот.

В разделе 4.1 показаны актуальность и сложность решения задачи генерирования сигналов различной формы в широком диапазоне частот.

Доказано, что известные методы обеспечивают недостаточную для многих применений относительную нестабильность несущей частоты f_c модулированных сигналов, которая тем выше, чем ниже значение f_c . Учитывая изложенное, разработан новый метод генерирования стабильных модулированных электрических сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот (патент на изобретение 9561 С1 ВУ, МПК (2006) Н 03 L 7/00), синтезирована структура реализующего его устройства. Метод допускает как аналоговое, так и цифровое формирование модулирующих сигналов. Выполнена оценка стабильности несущей частоты генерируемых модулированных сигналов. Доказано, что на любой частоте f_c (независимо от её абсолютного значения) обеспечивается одинаковая относительная нестабильность, равная относительной нестабильности колебаний задающего опорного генератора и существенно меньшая, чем в известных методах.

В разделе 4.2 отмечено, что развитие цифровых технологий существенно повлияло на реализацию известных методов генерирования модулированных сигналов, которые теперь дополнительно используют цифровой синтез модулирующих колебаний. Учитывая изложенное, разработан еще один новый метод генерирования стабильных модулированных электрических сигналов различной формы в широком диапазоне несущих частот (патент на изобретение 9563 С1 ВУ, МПК (2006) Н 03 L 7/00), синтезирована структура реализующего его устройства. Метод использует цифровой синтез модулирующих колебаний, обеспечивает во всем диапазоне одинаковую нестабильность несущей частоты, равную таковой задающего высокостабильного генератора (существенно меньшую, чем в известных методах), не накладывает ограничений на выбор промежуточной частоты.

В разделе 4.3 на основе второго предложенного метода и известного метода формирования опорных колебаний синтезирована структура трехканальной высокочастотной широкодиапазонной широкополосной автономной СГ сигналов различной формы (патент на изобретение 9564 С1 ВУ, МПК (2006) Н 03 L 7/00). Предлагаемая СГ обеспечивает одновременное формирование двух относительно низкочастотных (в диапазоне до 70 МГц) модулирующих и одного высокочастотного модулированного (в диапазоне до 1000 МГц) сигналов различной формы, причем, в качестве модулирующих могут выступать сигналы $U_{M1}(t)$ и $U_{M2}(t)$ различной формы и разных (в общем случае не кратных) периодов (частот) повторения либо одинаковые сигналы $U_{M1}(t)$ и $U_{M2}(t) = U_{M1}(t - \tau)$, смещенные по времени (фазе). Отмеченные свойства делают СГ многофункциональной, позволяют использовать ее в составе ПАК математического и физического моделирования СР и в составе информационно-измерительных систем. Показано, что, по сравнению с предложенными методами и системой, при генерировании сигналов известными методами в диапазоне до 1 ГГц несущих частот и промежуточной частоте 100 МГц относительная нестабильность на частотах вблизи 1000, 100, 10 и 1 МГц увеличивается соответственно в 1,2, 3, 21 и 200 раз.

В пятой главе разработана структура ПАК математического и физичес-

кого моделирования сигналов и линейных звеньев СР, определены области его возможного применения.

В разделе 5.1 проведен содержательный анализ этапов математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев. На его основе предложена структура ПАК, которая имеет в своем составе систему 1 математического моделирования, библиотеку 2 виртуальных систем, систему 3 подготовки формального описания, ПЭВМ 4, систему 5 генерирования сигналов и реакций и систему 6 измерения и контроля. Определены назначение и свойства образующих комплекс систем. Ядром всего ПАК является система 1, которая обеспечивает выполнение всех этапов математического моделирования линейных свойств сигналов и звеньев СР. Показана целесообразность ее реализации в виде многофункциональной программы (МП) математического моделирования, не требующей от пользователя глубоких знаний по совокупности дисциплин и предназначенной для широкого круга специалистов в области СР. Система 5 генерирования, входящая в структуру ПАК, обеспечивает формирование физических моделей – генерирование в реальном масштабе времени (по отсчетным значениям, образуемым в МП) сигналов (воздействий) и реакций. Функции системы генерирования выполняет разработанная высокочастотная широкодиапазонная широкополосная автономная трехканальная система генерирования двух относительно низкочастотных (в диапазоне до 70 МГц) модулирующих и одного высокочастотного (в диапазоне до 1000 МГц) модулированного сигналов различной формы. Система 6 измерения и контроля обеспечивает шестой (ключевой этап) математического и физического моделирования СР: измерение, количественный и качественный анализ характеристик физических моделей СЗР в частотной и временной областях. Она включает в себя осциллограф, анализатор спектра, частотомер и, при необходимости, другие измерительные приборы (в расширенном варианте). Система 3 подготовки формального описания реализует быстрое построение и графическое отображение структурной (функциональной) схемы моделируемой системы, задание моделей сигналов (воздействий, реакций) во всех точках структурной схемы, текстовое описание свойств каждого структурного компонента, формирование массивов отсчетных значений (для системы генерирования) и графическое отображение сигналов. Дополнительное привлечение системы генерирования позволяет реализовать виртуальную физическую модель исследуемой системы. Библиотека 2 виртуальных систем предназначена для хранения разработанных и доступных пользователям проектов виртуальных физических моделей различных СР.

Синтезирована структура МП, включающая следующие модули: стационарную и оперативную библиотеки моделей сигналов; стационарную и оперативную библиотеки моделей линейных звеньев; модуль формирования моделей модулированных сигналов; модуль преобразования моделей линейных звеньев; модуль расчета частотных характеристик; модуль расчета временных характеристик. Такая структура моделирующей программы позволяет до минимума сократить объем черновой подготовительной работы, а саму процедуру математического моделирования многократно упростить и свести к выполнению четырех этапов: формирование и преобразование математических моделей (не)минимально-фазовых линейных звеньев; формирование и преобразование математи-

ческих моделей простых и составных (компонентных, композитных) сигналов; расчет, количественный и качественный анализ характеристик СЗР в частотной области; расчет, количественный и качественный анализ характеристик СЗР во временной области.

В разделе 5.2 проанализированы возможные области эффективного применения предлагаемого ПАК: проектирование и разработка СР; информационно-измерительные системы и комплексы; системы и устройства генерирования сигналов; (пере)подготовка специалистов в области СР и смежных областях. Отмечено, что полноформатная аппаратная и программная реализация ПАК требует больших материальных и интеллектуальных ресурсов. Учитывая это, в БГУИР на кафедре инфокоммуникационных технологий (ИКТ) пока разработан и внедрен в учебный процесс в качестве обучающего комплекса упрощенный вариант предлагаемого ПАК. В его структуре отсутствует система 3 подготовки формального описания. В качестве СГ используется генератор сигналов сложной формы Г6-45/1 – совместная разработка кафедры ИКТ и ОАО «Амкодор-Белвар». Рассматриваемый генератор представляет упрощенный одноканальный вариант предлагаемой трехканальной СГ. Система 1 математического моделирования для упрощения реализована в виде двух самостоятельных программ: программы моделирования частотных характеристик; программы моделирования временных характеристик. При этом программа моделирования ЧХ частично совмещает функции оперативной библиотеки звеньев, модуля преобразования моделей звеньев и модуля расчета ЧХ предлагаемой МП, а программа моделирования ВХ частично совмещает функции оперативной библиотеки сигналов, оперативной библиотеки звеньев и модуля расчета ВХ предлагаемой МП. С целью оптимизации учебного процесса и экономии материальных ресурсов разработан технический проект унифицированной учебной лаборатории, обеспечивающей подготовку и проведение фронтальных циклов лабораторных работ и практических занятий по совокупности дисциплин специальностей СР.

В приложениях содержатся акты внедрения и использования результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана математическая модель на комплексной плоскости, задающая все типы применяемых при моделировании континуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций, обеспечивающая необходимые преобразования используемых моделей сигналов и звеньев и создание их развитых библиотек [6-А, 9-А, 12-А].

2. Разработаны математические модели нормирования, денормирования, реактансных преобразований, перемножения и нормализации операторных передаточных функций (не)минимально-фазовых линейных звеньев, обеспечивающие формирование моделей звеньев с различными видами частотных характеристик (включая фильтры с несколькими полосами пропуска-

ния или (и) задерживания), значительно уменьшающие объем подготовительной работы [1-А, 6-А].

3. Разработана математическая модель временных характеристик СЗР, которая, являясь результатом разложения по конечной неортогональной системе собственных функций, представляет любую из временных характеристик точным аналитическим выражением из конечного числа слагаемых [8-А]. В модели, справедливой также при кратных полюсах передаточной функции звена и изображения воздействия, количество операций сложения и умножения определяется только числом этих полюсов, что обеспечивает предельную точность (не зависящую от числа точек дискретизации по времени), устраняет проблемы оценки точности и сходимости решения, уменьшает объем вычислений и время моделирования, позволяет реализовать эффективную процедуру моделирования СЗР во временной области. Проведен сравнительный количественный анализ разработанной модели и метода ДПФ. Показано: при некорректном выборе числа точек дискретизации по времени и частоте относительная среднеквадратическая погрешность метода ДПФ может достигать десятков процентов. Установлено: для минимизации ошибки наложения спектров частота дискретизации по времени должна на порядок превышать ширину основного лепестка спектра видеоимпульса и еще больше в случае радиоимпульса. Для последующей минимизации результирующей ошибки и достижения высокой точности моделирования (среднеквадратическая погрешность менее 1 %) период повторения должен превышать длительность моделируемого видеоимпульса (радиоимпульса) в 10 и более раз [8-А].

4. Разработаны математические модели частотных характеристик СЗР, описывающие амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики всех типов линейных звеньев, амплитудные и фазовые спектры непериодических (финитных, бесконечно протяженных), периодических сигналов и соответствующих им реакций, имеющие простую реализацию и обеспечивающие построение эффективной процедуры моделирования всех частотных и энергетических характеристик СЗР [7-А].

5. Разработаны два метода и система генерирования стабильных сигналов различной формы в широком диапазоне частот [2-А–4-А, 26-А, 27-А–29-А], которые обеспечивают во всем диапазоне одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную таковой задающего опорного генератора. Показано: при генерировании сигналов известными методами в диапазоне 1–1000 МГц несущих частот и промежуточной частоте 100 МГц относительная нестабильность на частотах вблизи 1000, 100, 10 и 1 МГц увеличивается, по сравнению с предлагаемыми методами и системой, соответственно в 1,2, 3, 21 и 200 раз [2-А–4-А, 27-А–29-А].

6. Синтезирована структура ПАК моделирования сигналов и линейных звеньев СР, который: обеспечивает предельную точность моделирования временных характеристик; реализует эффективные процедуры формирования, преобразования моделей СЗР и расчета их частотных, энергетических и временных характеристик; реализует процедуры генерирования множества сигналов и реакций разных типов и форм в диапазоне до 1 ГГц и формирования в реальном масштабе времени виртуальных физических моделей исследуе-

мых звеньев и устройств; имеет расширенные возможности применения [5-А, 10-А–13-А, 15-А–19-А, 21-А–26-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в НИР и ОКР по разработке программно-аппаратных средств математического и физического моделирования СР. Разработан и внедрен в учебный процесс в качестве обучающего комплекса упрощенный вариант предлагаемого ПАК, образующий основу учебно-лабораторной базы лаборатории моделирования систем. Одноканальный (упрощенный) вариант входящей в комплекс СГ реализован в виде генератора сигналов сложной формы Г6-45/1 (ОАО «Амкодор-Белвар») [4-А, 5-А]. Синтезирована структура системы математического моделирования СЗР, определены свойства ее модулей, реализуемые ими процедуры [5-А, 14-А, 20-А], разработан упрощенный вариант системы. Разработан (на базе обучающего ПАК) технический проект унифицированной учебной лаборатории моделирования сигналов и систем, которая обеспечивает подготовку и проведение фронтальных циклов лабораторных работ и практических занятий по совокупности дисциплин [5-А, 22-А].

Предлагаемый ПАК может использоваться в системах проектирования и разработки СР, в информационно-измерительных системах и комплексах, в системах и устройствах генерирования сигналов, при подготовке (переподготовке) специалистов в области СР и смежных областях. Для его полноформатной разработки необходимо выполнить: аппаратную реализацию предложенной трехканальной СГ; программную реализацию многофункциональной программы математического моделирования и системы подготовки формального описания.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1-А. Ильинков, В.А. Формирование, преобразование и расчет характеристик математических моделей линейных звеньев радиоэлектронных систем / В.А. Ильинков, В.Е. Романов, Н.И. Беленкевич // Радиотехника и электроника: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск: БГУИР, 1999. – Вып. 23. – С. 81–86.

2-А. Ильинков, В.А. Генерирование стабильных модулированных сигналов в широком диапазоне несущих частот / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // Доклады БГУИР. – 2012. – № 4 (66). – С. 82–88.

3-А. Ильинков, В.А. Метод и устройство генерирования измерительных сигналов в широком диапазоне несущих частот / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // Наука и техника. – 2013. – № 1. – С. 46–52.

4-А. Ильинков, В.А. Метод и система генерирования сигналов различной формы в широком диапазоне частот / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // Электросвязь. – 2013. – № 9. – С. 42–46.

5-А. Комплекс моделирования сигналов и систем / Н.И. Беленкевич, В.В. Василевский, В.А. Ильинков, К.А. Коваль, В.Ю. Цветков // Компоненты и технологии. – 2017. – № 5. – С. 133–136.

6-А. Беленкевич, Н.И. Совместное математическое описание сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники / Н.И. Беленкевич, В.А. Ильинков // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 4. – С. 93–104.

7-А. Беленкевич, Н.И. Моделирование сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники в частотной области / Н.И. Беленкевич, В.А. Ильинков, Д.А. Кухмар // Доклады БГУИР. – 2018. – № 4 (114). – С. 29–36.

8-А. Беленкевич, Н.И. Математическое моделирование сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники во временной области / Н.И. Беленкевич, В.А. Ильинков // Доклады БГУИР. – 2021. – том 19 (7). – С. 22–30.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9-А. Ильинков, В.А. Математическое моделирование линейных звеньев телекоммуникационных систем / В.А. Ильинков, В.Е. Романов, Н.И. Беленкевич // III Международная научно-техническая конференция. 21-25 сентября 1998 г. Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. Материалы конференции. – 1998. – № 2 (6)/1. – С. 78–79.

10-А. Ильинков, В.А. Математическое моделирование систем телекоммуникаций с различными видами амплитудной модуляции / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // IV Международная научно-техническая конференция. 20-24 сентября 1999 г. Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. Материалы конференции. – 1999. – № 1(7)/1. – С. 32.

11-А. Ильинков, В.А. Математическая модель в частотной области системы с амплитудной модуляцией / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // V Международная научно-техническая конференция. 25-29 сентября 2000 г. Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. Материалы конференции. – 2000. – № 1(9)/1. – С. 16–18.

12-А. Ильинков, В.А. Математическое моделирование сигналов систем телекоммуникаций / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // V Международная научно-техническая конференция. 25-29 сентября 2000 г. Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. Материалы конференции. – 2000. – № 1(9)/1. – С. 126.

13-А. Современные тенденции построения информационно-измерительных телекоммуникационных систем / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич, В.Е. Романов, А.А. Силин // VIII Международная научно-техническая конференция. 29 сентября-3 октября 2003 г. Известия

Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. Материалы конференции. – 2003. – № 1(15)/3. – С. 66–68.

14-А. Ильинков, В.А. Структура и свойства программы моделирования радиоэлектронных систем и устройств на функциональном уровне / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // VIII Международная научно-техническая конференция. 29 сентября-3 октября 2003 г. Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. Материалы конференции. – 2003. – № 1(15)/3. – С. 75–76.

15-А. Программно-аппаратный комплекс математического и физического моделирования радиоэлектронных систем / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич, В.Е. Романов, А.А. Силин // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития: материалы Междунар. науч.-метод. конф., Минск, 17–18 марта 2004 г. – Мн.: БГУИР, 2004. – С. 180–181.

16-А. Использование программно-аппаратных комплексов в учебном процессе подготовки специалистов радиоэлектронного профиля / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич, В.Е. Романов, А.А. Силин // VIII Международная научно-методическая конференция вузов и факультетов телекоммуникаций: труды конф., Россия, Уфа, 23–24 июня 2004 г. – М.: МТУСИ, 2004. – С. 139–141.

17-А. Использование в учебном процессе программно-аппаратных комплексов / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич, В.Е. Романов, А.А. Силин // Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века: Материалы IV Международной научно-методической конференции. 10-12 ноября 2004 г. – Мн.: БГУИР. – 2004. – С. 301–303.

18-А. Беленкевич, Н.И. Математическое моделирование системы с амплитудной модуляцией / Н.И. Беленкевич // Международный научно-технический семинар «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» 1 января-31 октября 2005 г. – Мн.: Доклады БГУИР, 2005. – № 6. – С. 79–84.

19-А. Ильинков, В.А. Обучающие программно-аппаратные комплексы как эффективное средство интенсификации учебного процесса / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития. Материалы VI международной научно-методической конференции, 28–29 ноября 2012 г., Минск. – Минск: БГУИР. – 2012. – С. 213.

20-А. Ильинков, В.А. Многофункциональная программа математического моделирования сигналов и систем / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития. Материалы VI международной научно-методической конференции, 28–29 ноября 2012 г., Минск. – Минск: БГУИР. – 2012. – С. 214.

21-А. Ильинков, В.А. Дальнейшее развитие теории и практики применения обучающих программно-аппаратных комплексов / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития. Материалы VII международной научно-методической конференции, 20–21 ноября 2014 г., Минск. – Минск: БГУИР. – 2014. – С. 162–163.

22-А. Ильинков, В.А. Комплексы моделирования сигналов и систем в учебном процессе подготовки специалистов / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития. Материалы VIII международной научно-методической конференции, 17–18 ноября 2016 г., Минск. В 2 частях. Ч. 1. – Минск: БГУИР. – 2016. – С. 190–194.

23-А. Программно-аппаратный комплекс генерирования сигналов различных форм и видов модуляции / Н.И. Беленкевич, А.С. Войтенков, В.А. Ильинков, В.Ю. Цветков, Я.М. Ярков // Цифровая обработка сигналов и теория кодирования: материалы науч.-техн. семинара (Минск, 26 апреля 2018). – Минск: БГУИР, 2018. – С. 52–55.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

24-А. Многофункциональная автоматизированная система контроля и измерения параметров телекоммуникационных систем и устройств / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич, В.Е. Романов, А.В. Румянцев // I Республиканская научно-техническая конференция «Цифровое телевизионное и радиовещание»: тезисы докладов. 14-16 апреля 1999 г. Минск-Раубичи. – 1999. – С. 35–36.

25-А. Многофункциональная компьютерная система генерирования-имитации сложных измерительных видео и радиосигналов / В. А. Ильинков, Н.И. Беленкевич, В.Е. Романов, А.А. Силин // Белорусско-польский научно-практический семинар. Тезисы докладов. – Брест, БГТУ. – 2002. – С. 58–59.

26-А. Ильинков, В.А. Новый способ генерирования модулированных электрических сигналов в широком диапазоне несущих частот / В.А. Ильинков, Н.И. Беленкевич, В.Е. Романов // Международная науч.-техн. конференция, посвященная 45-летию МРТИ-БГУИР: тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19 марта 2009. – Минск: БГУИР, 2009. – С. 70–71.

Патенты

27-А. Способ генерирования модулированных электрических сигналов в широком диапазоне несущих частот: пат. ВУ 9561 / В. А. Ильинков, В. Е. Романов, Н. И. Беленкевич. – Оpubл. 19.04.2007.

28-А. Способ генерирования модулированных электрических сигналов в широком диапазоне несущих частот: пат. ВУ 9563 / В. А. Ильинков, В. Е. Романов, Н. И. Беленкевич. – Оpubл. 19.04.2007.

29-А. Система генерирования электрических сигналов в широком диапазоне частот: пат. ВУ 9564 / В.А. Ильинков, В. Е. Романов, Н. И. Беленкевич. – Оpubл. 19.04.2007.



РЭЗІЮМЭ

Белянкевіч Наталля Іванаўна

Метады, мадэлі і сістэмы мадэліравання сігналаў і лінейных звёнаў сістэм радыёэлектронікі

Ключавыя словы: сігнал, сістэма, звяно, рэакцыя, лінейнасць, метады, мадэль, генерыраванне, мадуляцыя, мадэліраванне, дакладнасць.

Мэта працы: павышэнне дакладнасці і пашырэнне магчымасцяў матэматычнага і фізічнага мадэліравання сігналаў і лінейных звёнаў сістэм радыёэлектронікі.

Метады даследавання: метады функцый камплекснага пераменнага, тэорыі сігналаў і звёнаў, тэорыі фарміравання і мадуляцыі сігналаў, метады аналізу частотна-часовых характарыстык сігналаў і звёнаў, метады лічбавага аналізу, матэматычнае мадэліраванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны сумесная матэматычная мадэль на камплекснай плоскасці, якая задае ўсе тыпы ўжываемых пры мадэліраванні кантынуальных дэтэрмінаваных сігналаў, лінейных звёнаў і рэакцый, матэматычныя мадэлі (дэ)нарміравання, рэактансных пераўтварэнняў, перамнажэння і нармалізавання перадатачных функцый лінейных звёнаў, адзіная (для сігналаў, звёнаў і рэакцый) матэматычная мадэль часовых характарыстык, якая прадстаўляе кожную з іх дакладным аналітычным выяўленнем з канечнай лічбай складаемых, адзіныя матэматычныя мадэлі частотных характарыстык, якія апісваюць амплітудна- і фазачастотныя характарыстыкі ўсіх тыпаў лінейных звёнаў, амплітудныя і фазавыя спектры непэрыядычных (фінітных, бясконца працяглых), перыядычных сігналаў і суадносных ім рэакцый; распрацаваны два метады і сістэма генерыравання стабільных сігналаў адвольнай формы ў шырокім дыяпазоне частот, якія забяспечваюць аднолькавую адносную нестабільнасць нясухай частаты, роўную такой задаючага генератара, а таксама структура праграма-апаратнага комплексу матэматычнага і фізічнага мадэліравання сігналаў і лінейных звёнаў, якая забяспечвае павышэнне дакладнасці і пашырэнне магчымасцяў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: спрошчаны варыянт комплексу ў якасці навучаючага ўкаранён у навучальны працэс кафедры ІКТ БДУР; аднаканальны варыянт сістэмы генерыравання комплексу – у прамысловую вытворчасць у выглядзе генератара сігналаў складанай формы Г6-45/1 (ААТ «Амкадор-Белвар»).

Вобласць ужывання: праектаванне і распрацоўка сістэм радыёэлектронікі; сістэмы і ўстройства генерыравання сігналаў; падрыхтоўка спецыялістаў у галіне сістэм радыёэлектронікі; інфармацыйна-вымяральныя сістэмы і комплексы.

РЕЗЮМЕ

Беленкевич Наталья Ивановна

Методы, модели и системы моделирования сигналов и линейных звеньев систем радиоэлектроники

Ключевые слова: сигнал, система, звено, реакция, линейность, метод, модель, генерирование, модуляция, моделирование, точность.

Цель работы: повышение точности и расширение возможностей математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев систем радиоэлектроники.

Методы исследования: методы теории функций комплексного переменного, теории сигналов и звеньев, теории формирования и модуляции сигналов, методы анализа частотно-временных характеристик сигналов и звеньев, методы численного анализа, математическое моделирование.

Полученные результаты и их новизна: разработаны совместная математическая модель на комплексной плоскости, задающая все типы применяемых при моделировании континуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций, математические модели (де)нормирования, реактансных преобразований, перемножения и нормализации передаточных функций линейных звеньев, единая (для сигналов, звеньев и реакций) математическая модель временных характеристик, представляющая любую из них точным аналитическим выражением из конечного числа слагаемых, единые математические модели частотных характеристик, описывающие амплитудно- и фазочастотные характеристики всех типов линейных звеньев, амплитудные и фазовые спектры непериодических (финитных, бесконечно протяженных), периодических сигналов и соответствующих им реакций; разработаны два метода и система генерирования стабильных сигналов различной формы в широком диапазоне частот, обеспечивающие одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную таковой задающего генератора, а также структура программно-аппаратного комплекса математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев, обеспечивающая повышение точности и расширение возможностей.

Рекомендации по использованию: упрощенный вариант комплекса в качестве обучающего внедрен в учебный процесс кафедры ИКТ БГУИР; одноканальный вариант системы генерирования комплекса воплощен в промышленное производство в виде генератора сигналов сложной формы Г6-45/1 (ОАО «Амкодор-Белвар»).

Область применения: проектирование и разработка систем радиоэлектроники; системы и устройства генерирования сигналов; подготовка специалистов в области систем радиоэлектроники; информационно-измерительные системы и комплексы.

SUMMARY

Belenkevich Natalia

Methods, models and systems for modeling signals and linear links of radioelectronics systems

Keywords: signal, system, link, response, linearity, method, model, generating, modulation, modeling, accuracy.

Purpose of the work: increasing the accuracy and capabilities of mathematical and physical modeling of signals and linear links of radioelectronics systems.

Research methods: methods of the theory of functions of a complex variable, of the theory of signals and links, of the theory of formation and modulation of signals, as well as methods of the analysis of frequency- and time-response characteristics of signals and links, methods of the numerical analysis, mathematical modeling.

The results obtained and their novelty: a joint mathematical model on the complex plane, specifying all types of continuous deterministic signals, linear links and responses used in modeling; mathematical models of normalization, reactance transformations and multiplication of transfer function of linear links have been developed. A single mathematical model (for signals, links and responses) of time characteristics, representing any of them with an accurate analytical expression from a finite number of terms; single mathematical models of frequency characteristics describing the amplitude and phase-frequency characteristics of all types of linear links as well as amplitude and phase spectrums of no periodic (finite, eternal), periodic signals and the responses corresponding to them have been suggested. Two methods and a system for generating stable signals of different shapes in a wide frequency range providing the same relative instability of the carrier frequency equal to the relative frequency instability of oscillations of the main oscillator, as well as the structure of the hardware and software complex for mathematical and physical modeling of signals and linear links providing increased accuracy and expanded capabilities have been developed.

Recommendations for use: a simplified version of the above mentioned research is introduced as a training complex into the educational process at the Department of Infocommunication Technologies of BSUIR; a single-channel version of the complex generation system is implemented in industrial production in the form of a complex-shaped signal generator G6-45/1 (OAO "Amcodor-Belvar").

Scope: design and development of radioelectronics systems; signal generation systems and devices; training of specialists in the field of radioelectronics systems; data-measuring systems.

Научное издание

**Беленкевич
Наталья Ивановна**

**МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ
И ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения**

Подписано в печать 19.01.2024. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 2.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,
№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск