

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию Беленкевич Н.И. “Комплекс моделирования сигналов и линейных звеньев систем радиоэлектроники”, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук

Современное информационное общество характеризуется в том числе стремительным развитием систем радиоэлектроники (СР). Основным инструментом их проектирования и разработки является математическое и физическое моделирование: структурнотехническое и схмотехническое, выполняемые на уровне соответственно структурной (функциональной) и принципиальной схем. Важнейшая составляющая структурнотехнического моделирования, определяющая динамические свойства создаваемой СР, – разработка обоснованных требований к частотным и временным характеристикам функциональных блоков и системы в целом. Ее выполняют исключительно моделированием линейных искажений, используя в качестве моделей блоков (каналов, устройств) линейные функциональные звенья.

Известные средства математического и физического моделирования линейных свойств сигналов и звеньев обладают общими существенными недостатками: отсутствие автоматизированных процедур формирования, преобразования моделей и расчета их частотных, временных и энергетических характеристик; недостаточная для многих применений точность моделирования; большой объем подготовительной работы и значительное время моделирования (математическое моделирование); недостаточная точность моделирования вследствие отсутствия источников требуемого множества сигналов (воздействий) различной формы в широком диапазоне частот (времен); весьма значительные материальные затраты (физическое моделирование). Оптимальным решением по устранению отмеченных недостатков является использование относительно недорогих программно-аппаратных комплексов (ПАК) математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев, которые: имеют развитые библиотеки математических моделей (ММ) сигналов и звеньев, эффективные процедуры формирования, преобразования ММ и расчета их характеристик; генерируют множество сигналов и реакций разных типов и форм в широком диапазоне частот (времен); реализуют виртуальные физические модели исследуемых звеньев и устройств. Подобные комплексы, помимо области проектирования и разработки СР, могут успешно применяться также в качестве самостоятельных устройств генерирования сигналов (реакций), в составе информационно-измерительных систем и комплексов, в (пере)подготовке специалистов в области СР и смежных областях. Создание ПАК с приведенными выше свойствами представляет весьма актуальную и сложную научно-техническую проблему.

Успешное решение проблемы создания рассматриваемого ПАК основывается на исследовании: ММ и алгоритмов расчета частотных и временных характеристик сигналов и звеньев СР; методов и устройств генерирова-

ния сигналов различной формы в широком диапазоне частот. Поэтому логично, что перечисленные вопросы и составляют предмет исследования в диссертационной работе.

Диссертация содержит введение, общую характеристику работы, пять глав с выводами по каждой главе, заключение, список использованных источников и три приложения общим объемом 164 страницы.

В полном соответствии с требованиями ВАК: во введении показана актуальность темы диссертации; в общей характеристике работы отражена связь ее с научными программами и темами, сформулированы цель, задачи, объект и предмет проведенного исследования, сформулированы научная новизна полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту, рассмотрены опубликованность, апробация и использование результатов диссертации, приведены структура и объем диссертации.

Учитывая сложность и многогранность решаемой проблемы, в первой главе диссертации проведен глубокий сравнительный анализ известных средств математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев СР: методов, моделей, алгоритмов и программ математического моделирования (в разделе 1.1); методов, устройств и систем физического моделирования (в разделе 1.2). В результате: показана целесообразность описания моделируемых линейных звеньев операторной передаточной функцией $K_z(p)$ в форме дробно-рациональной функции комплексного переменного, а континуальных детерминированных сигналов одно-, двусторонним преобразованием Лапласа; показана целесообразность применения классического операционного метода при моделировании в частотной области (основанном на исследовании амплитудно-фазовых спектров реакций) и модифицированного операционного метода при моделировании во временной области (основанном на исследовании самих реакций); установлены общие существенные недостатки известных возможных программных средств математического моделирования СР (раздел 1.1); показана целесообразность использования в качестве системы генерирования высокочастотной (широкодиапазонной широкополосной автономной двухканальной) системы, обеспечивающей одновременное формирование относительно низкочастотного модулирующего и высокочастотного модулированного сигналов различной формы в широком диапазоне частот; доказано, что известные методы не обеспечивают требуемую для многих применений стабильность несущей частоты модулированных сигналов; установлена необходимость построения системы генерирования 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 (раздел 1.2).

Понимая, что выявленные существенные недостатки программных средств моделирования СР – во многом следствие отсутствия удобного математического описания сигналов и звеньев, во второй главе диссертации для

расширения возможностей моделирования предложено описывать линейные звенья операторной передаточной функцией $K_z(p)$ специального вида с кратными нулями и полюсами (раздел 2.1).

Очевидно, 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. Известные программные средства указанные процедуры, за исключением (де)нормирования, не реализуют вследствие недостатков используемого описания звеньев. Выполнение их вручную представляет весьма громоздкий и трудоемкий процесс (особенно при высоких порядках передаточной функции). Учитывая изложенное, в разделе 2.1 разработаны ММ отмеченных выше преобразований. Доказано: при всех преобразованиях вновь образуемая функция $K_{zd}(p)$ по виду совпадает с исходной. В результате предложенная модель $K_z(p)$ удовлетворяет всем предъявляемым требованиям: описывает все типы (не)минимально-фазовых линейных звеньев; обеспечивает построение эффективных автоматизированных процедур формирования, преобразования ММ, расчета их частотно-временных характеристик и создание развитых библиотек ММ линейных звеньев.

Известно, при моделировании линейных искажений в качестве воздействий применяют непериодические бесконечно протяженные $\alpha_i(t)$, непериодические финитные $\varphi_{iT}(t)$ и периодические $\varphi_i(t)$ сигналы ($i = 0, 1, 2$). Основываясь на известной теореме, в разделе 2.2 установлено, что все они описываются лапласовскими изображениями, содержащими операторные функции $S_i(p)$. Предложено эти функции задавать в форме, аналогичной $K_z(p)$.

При формировании сигналов, как и в случае звеньев, широко используют процедуры преобразования ММ, реализуемые обычно с помощью известных теорем преобразования Лапласа. Показано, что все эти преобразования приводят к ММ сигналов, содержащим те же (по виду) функции $S_i(p)$. В результате описание функциями $S_i(p)$ задает все применяемые при математическом 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 функций $K_z(p)$ и $S_i(p)$, на основе классического и модифицированного операционных методов разработана совместная ММ $R(p)$ на комплексной плоскости континуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций СР. Модель задает все типы используемых при моделировании сигналов, звеньев и реакций (СЗР), полно описывает их частотные, временные свойства и характеристики. Переходом в частотную область (подстановкой $p = j\omega$) из нее образована функция $R(j\omega)$, которая при различных сочетаниях параметров и дополнительных временных переходах описывает: комплексную передаточную функцию моделируемого звена; спектральные характеристики непериодических (финит-

ных, бесконечно протяженных) и периодических воздействий; спектральные характеристики всех реакций. Очевидно, по своей сути функция $R(j\omega)$ представляет обобщенную модель СЗР в частотной области. Ее детальная реализация обеспечивает построение математического алгоритма и на его основе эффективной процедуры расчета частотных характеристик линейных звеньев, амплитудных и фазовых спектров сигналов и реакций.

Для моделирования во временной области рекомендован модифицированный операционный метод. Применяя его, с учетом свойств совместной ММ $R(p)$ в разделе 2.3 выполнен переход $R(p) \rightarrow \Psi_0(t)$ во временную область. Функция $\Psi_0(t)$ при различных сочетаниях параметров и дополнительных временных переходах описывает временные характеристики линейного звена, все воздействия и реакции на последние, является по своей сути обобщенной моделью СЗР во временной области. Ее детальная реализация позволяет построить математический алгоритм и на его основе эффективную процедуру расчета временных характеристик СЗР.

В третьей главе диссертации (в разделе 3.1) на основе совместной ММ $R(p)$, квалифицированно применяя аппарат и возможности теории функций комплексного переменного, построены ММ частотных характеристик СЗР: АЧХ (ФЧХ) линейных звеньев; модули (аргументы) спектральных плотностей (непрерывные по свойствам амплитудные (фазовые) спектры) непериодических (финитных, бесконечно протяженных) сигналов и соответствующих им реакций; дискретные амплитудные и фазовые спектры периодических сигналов и реакций. Модели имеют простую реализацию, обеспечивают построение эффективной процедуры математического моделирования частотных и энергетических характеристик СЗР. На теоретической базе построенных ММ в разделе 3.2 разработан алгоритм расчета всех частотных и энергетических характеристик СЗР в любом исследуемом частотном диапазоне.

Реализованная в разделе 2.3 обобщенная модель $\Psi_0(t)$ во временной области является формальной, мало пригодна для моделирования. Для перехода к рабочей ММ временных характеристик СЗР необходимо реализовать процедуры вычисления вычетов (с учетом кратности полюсов) в упомянутой формальной модели. Квалифицированно выполняя эти процедуры, в разделе 3.3 построена требуемая ММ временных характеристик СЗР, которая: при необходимых временных переходах описывает реакции на непериодические (финитные, бесконечно протяженные) и периодические сигналы; в случае воздействий в виде функций Дирака и Хэвисайда представляет соответственно импульсную и переходную характеристики звена. Полученная ММ, в отличие от известных, является результатом разложения по конечной неортogonalной системе собственных функций (звена и воздействия), представляет любую из временных характеристик точным аналитическим выражением из конечного числа слагаемых. 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 (независимую от количества точек дискретизации по времени, 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. На теоретической базе построенной ММ в разделе 3.4 разработан алгоритм расчета всех временных характеристик СЗР в любом исследуемом временном интервале.

На практике при моделировании широко применяется метод ДПФ, часто реализуемый в форме БПФ. Известно, 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; при недостаточном количестве точек дискретизации по частоте возникает эффект наложения реакций рассматриваемого и предыдущих импульсов периодической последовательности, приводящий к так называемой ошибке наложения реакций. В итоге, при расчете указанными методами реакции на непериодическое финитное воздействие возникают ошибки наложения спектров и реакций, а при расчете реакции на периодическое воздействие — ошибка наложения спектров. Величины указанных погрешностей могут быть весьма значительными, существенно зависят от вида воздействия (видео-, радиоимпульс), определяются корректностью выбора количества точек дискретизации. С учетом изложенного в разделе 3.5 для количественной оценки возможной погрешности (по специально разработанному сценарию) выполнен вычислительный эксперимент, позволивший получить важные для практики применения ДПФ (БПФ) результаты. Установлено: в отличие от разработанной ММ, при недостаточном количестве 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 более в случае радиоимпульса; для последующей минимизации результирующей ошибки и достижения высокой точности моделирования период повторения должен превышать длительность моделируемого видеоимпульса (радиоимпульса) в 10 и более раз.

В четвертой главе диссертации (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 и запатентован новый метод генерирования стабильных модулированных сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот, синтезирована структура реализующего его

устройства. Метод допускает как аналоговое, так и цифровое формирование модулирующих сигналов. Доказано: на любой несущей частоте f_c обеспечивается одинаковая относительная нестабильность, равная относительной нестабильности колебаний задающего генератора и существенно меньшая, чем в известных методах (раздел 4.1).

Развитие цифровых технологий существенно повлияло на реализацию известных методов генерирования модулированных сигналов, которые теперь дополнительно используют цифровой синтез модулирующих колебаний. Учитывая изложенное, в разделе 4.2 разработан и запатентован новый метод генерирования стабильных модулированных сигналов различной формы в широком диапазоне несущих частот, синтезирована структура реализующего его устройства. Метод использует цифровой синтез модулирующих колебаний, обеспечивает во всем диапазоне одинаковую нестабильность несущей частоты, равную таковой задающего генератора (и существенно меньшую, чем в известных методах), не накладывает ограничений на выбор промежуточной частоты.

На основе второго предложенного метода и известного метода формирования опорных колебания в разделе 4.3 разработана и запатентована трехканальная высокочастотная широкодиапазонная широкополосная автономная система генерирования (СГ). Предлагаемая СГ обеспечивает одновременное формирование двух (в общем случае разных по форме и частоте повторения) относительно низкочастотных (в диапазоне до 70 МГц) модулирующих и одного высокочастотного модулированного (в диапазоне до 1000 МГц) сигналов различной формы. Отмеченные свойства делают СГ многофункциональной, позволяют использовать ее в составе ПАК моделирования СР и в составе информационно-измерительных систем. Выполнена сравнительная количественная оценка стабильности несущей частоты модулированных сигналов при их генерировании известными методами и предложенными методами и СГ.

В пятой главе диссертации (в разделе 5.1) проведен содержательный анализ этапов математического и физического моделирования сигналов и линейных звеньев. На его основе предложена структура ПАК, определены назначение и свойства образующих ПАК систем, показана целесообразность реализации системы математического моделирования комплекса в виде многофункциональной программы (МП), не требующей от пользователя глубоких знаний по совокупности дисциплин и предназначенной для широкого круга специалистов в области СР. Синтезирована структура МП, определены процедуры, выполняемые ее модулями.

В разделе 5.2 проанализированы возможные области эффективного применения предлагаемого ПАК. Рассмотрены состав, свойства, характеристики и функционирование разработанного и внедренного в учебный процесс (в качестве обучающего комплекса) упрощенного варианта предлагаемого ПАК. С целью оптимизации учебного процесса и экономии материальных

ресурсов разработан технический проект унифицированной учебной лаборатории, построенной на основе ПАК, обеспечивающей подготовку и проведение фронтальных циклов лабораторных работ и практических занятий по совокупности дисциплин специальностей СР и смежных областей.

В заключении диссертации сформулированы основные научные и практические результаты.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация представляет собой цельную и законченную научно-исследовательскую работу, выполнена на высоком научно-техническом уровне с привлечением современных методов и средств исследования, включая методы теории функций комплексного переменного, методы численного анализа и математическое моделирование. Научные и практические результаты являются новыми и полезными, получены соискателем самостоятельно или при его непосредственном участии. Основные научные результаты достаточно отражены в опубликованных работах, известны научно-технической общественности, докладывались и обсуждались на 15 международных и республиканских НТК. По материалам диссертации опубликовано 36 работ, в том числе восемь статей в (рекомендованных ВАК) рецензируемых отечественных и иностранных научных журналах, 18 статей в сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров. По результатам исследования получены три патента Республики Беларусь на изобретения (два патента на способы и один на систему генерирования сигналов произвольной формы).

Диссертантка является состоявшимся квалифицированным научным и педагогическим работником. Она свободно владеет математическим аппаратом и методами теории функций комплексного переменного, теорией сигналов и цепей, методами математического моделирования и численного анализа, технологией прикладного программирования, способна самостоятельно ставить и решать сложные научно-технические задачи.

Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в НИР и ОКР по разработке программно-аппаратных средств математического и физического моделирования СР, использованы на практике в УП "Завод СВТ" и ОАО "АГАТ-СИСТЕМ", внедрены в учебный процесс БГУИР в качестве обучающего ПАК, что отражено в соответствующих отчетах и актах внедрения и использования.

На основании изложенного считаю, что диссертация соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к подобным работам, а ее автор, Беленкевич Н.И., заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" за:

разработку совместной математической модели СЗР на комплексной плоскости, описывающей все типы используемых при моделировании конти-

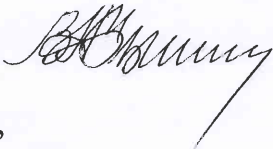
нуальных детерминированных сигналов, линейных звеньев и реакций, обеспечивающей необходимые преобразования математических моделей сигналов и звеньев;

разработку математических моделей (де)нормирования, реактансных преобразований, перемножения и нормализации операторных передаточных функций (не)минимально-фазовых линейных звеньев, обеспечивающих формирование моделей звеньев с различными видами частотных характеристик;

разработку математической модели временных характеристик СЗР, представляющей любую из временных характеристик точным аналитическим выражением из конечного числа слагаемых, обеспечивающей предельную (не зависящую от количества точек дискретизации по времени) точность моделирования, позволяющей реализовать эффективную процедуру моделирования СЗР во временной области;

разработку математических моделей частотных характеристик СЗР, описывающих АЧХ и ФЧХ всех типов линейных звеньев, амплитудные и фазовые спектры непериодических и периодических сигналов и реакций, обеспечивающих построение эффективной процедуры моделирования СЗР в частотной области;

разработку двух методов и системы генерирования стабильных электрических сигналов различной формы в широком диапазоне частот, обеспечивающих во всем диапазоне одинаковую нестабильность несущей частоты, равную относительной нестабильности опорного генератора.

Научный руководитель диссертации  В.А. Ильинков
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, доцент,
доцент кафедры инфокоммуникационных
технологий учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

