

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ”

УДК 621.373.1:621.396.6(043.3)

Романов  
Вячеслав Евгеньевич

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ  
СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Специальность 05.12.04 “Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения”.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск, 2005

Работа выполнена на кафедре систем телекоммуникаций учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

кандидат технических наук, доцент  
Ильинков В.А. (БГУИР, каф. СТК)

доктор технических наук, профессор  
Конопелько В.К. (БГУИР, каф. СиУТ)

кандидат технических наук, профессор  
Шаров Д.А. (Военная Академия РБ)

Оппонирующая организация: Научно-исследовательское  
конструкторско-технологическое  
республиканское УП  
“Белмикросистемы” НПО “Интеграл”

Защита состоится 9 июня 2005 г. в 14<sup>00</sup> 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, комн. 232, тел. 239-89-89.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы диссертации.*

Дальнейшее развитие радиоэлектронных систем (РЭС) характеризуется использованием новых диапазонов частот, расширением функциональных возможностей, повышением качественных характеристик, совместным применением широкополосных и узкополосных сигналов, многообразием методов и устройств их формирования и обработки. Это делает все более актуальной проблему создания генераторов различных электрических сигналов. С учетом весьма развитой номенклатуры выпускаемых РЭС, их существенного различия в методах построения, видах и характеристиках сигналов указанная проблема в настоящее время решается в основном посредством разработки большого количества специализированных генераторов сигналов требуемых формы и диапазона частот (времен), что влечет значительные материальные, интеллектуальные и временные затраты. Учитывая это, в мире все большее внимание уделяют проблеме создания многофункциональных систем генерирования (МГС) сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот и уровней. Актуальность этой проблемы также обусловлена необходимостью обновления существующего парка генераторов, возможностью использования МГС в составе многофункциональных измерительных систем, в системах контроля и функциональной диагностики, в обучающих программно-аппаратных комплексах математического и физического моделирования РЭС.

Формирование с высоким качеством сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот и уровней представляет сложную научно-техническую задачу, что подтверждает анализ литературных источников и длительные сроки создания МГС различными фирмами-изготовителями. Успешное ее решение связано с оптимальным использованием как известных, так и новых методов и устройств генерирования стабильных опорных колебаний, методов и устройств генерирования модулированных сигналов и методов анализа их искажений. Актуальность разработки этих методов и устройств дополнительно возрастает вследствие возможности их широкого применения в различных радиоэлектронных, телекоммуникационных и измерительных системах.

### *Связь работы с крупными научными программами, темами.*

Результаты диссертационной работы использованы в нескольких НИР и ОКР, выполненных в Белорусском государственном уни-

верситете информатики и радиоэлектроники:

“Разработка методов и алгоритмов математического описания линейных устройств с произвольными характеристиками”. — ХД № 96-3017, № ГР 19962921, 1996;

“Разработка математических моделей испытательных сигналов с расширенными функциональными возможностями для интегральной оценки качества ТВ изображения”. — ХД № 97-3031, № ГР 1993049, 1999;

“Исследование принципов построения многофункциональных систем измерения и контроля параметров телекоммуникационных систем и устройств”. — ХД № 99-3134, № ГР 19994623, 2000;

“Разработка программно-аппаратных средств математического и физического моделирования радиоэлектронных систем”. — ХД № 00-3096, № ГР 2000877, 2001;

“Разработка многофункционального генератора электрических сигналов сложной формы”. — ХД № 01-1002, 2001-2004.

В настоящее время по тематике диссертационной работы в рамках государственной научно-технической программы “Приборы, средства измерений и техническая диагностика” выполняется ОКР “Разработать и освоить серийное производство многофункциональной компьютерной системы генерирования-имитации сигналов сложной формы в диапазоне частот до 1 ГГц” (ХД № 03-1066).

### *Цель и задачи исследования.*

#### *Цель работы.*

Исследование и разработка принципов построения многофункциональных систем генерирования сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот.

#### *Задачи исследования.*

1. Исследование и разработка методов и устройств генерирования опорных колебаний и модулированных сигналов в широком диапазоне частот.
2. Исследование и разработка алгоритмов формирования и преобразования математических моделей линейных звеньев РЭС, алгоритмов расчета их частотных характеристик и реакций на испытательные воздействия.
3. Разработка на базе построенных математических моделей пакета прикладных программ для имитации функциональных звеньев РЭС.
4. Разработка многофункциональной системы генерирования сигналов произвольной формы.

## ***Объект и предмет исследования***

### **Объект исследования.**

Системы генерирования сигналов произвольной формы.

### **Предмет исследования.**

Методы генерирования опорных колебаний и модулированных сигналов, математические модели линейных свойств функциональных звеньев РЭС.

### ***Методология и методы проведенного исследования.***

В работе использованы методы теории функций комплексного переменного, теории цепей и сигналов, теории генерирования и модуляции, частотные и временные методы анализа звеньев и устройств РЭС, математическое моделирование.

### ***Научная новизна и значимость полученных результатов.***

Разработан новый метод генерирования нескольких стабильных колебаний некратных частот однопетлевой системой ФАПЧ, предложен простой алгоритм нахождения оптимальных по его аппаратурной реализации устройств. Разработана методика проектирования широкодиапазонного синтезатора частот, обеспечивающая квазиоптимальный выбор основных технических параметров.

Разработан новый метод генерирования модулированных сигналов в широком диапазоне частот, который допускает аналоговое и цифровое формирование модулирующих сигналов и обеспечивает во всем диапазоне высокую стабильность несущей частоты.

Разработан новый метод генерирования модулированных колебаний в широком диапазоне частот, основанный на цифровом синтезе модулирующих колебаний. Метод не накладывает ограничений на выбор значения промежуточной частоты и обеспечивает во всем диапазоне высокую стабильность несущей частоты.

Разработано удобное математическое описание линейных звеньев РЭС, упрощающее математические и машинные алгоритмы преобразования моделей и расчета их характеристик. Разработаны алгоритмы преобразования и расчета частотных характеристик математических моделей линейных звеньев РЭС, позволяющие полностью автоматизировать процесс моделирования, включая и подготовительный этап формирования моделей.

*Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов.*

Разработаны два новых метода генерирования модулированных сигналов, новый метод генерирования опорных колебаний и реализующие их устройства, которые имеют широкую область возможного применения: в системах радиоэлектроники, телекоммуникаций и измерений.

Разработана инженерная методика проектирования широкодиапазонного синтезатора частот. В соответствии с ней выполнены проектирование и разработка синтезатора в диапазоне  $10^{-2} - 10^8$  Гц, используемого в серийном генераторе Г6-45 сигналов сложной формы.

На базе предложенного описания и построенных математических моделей разработан пакет прикладных программ математического моделирования линейных свойств звеньев и сигналов, пригодный для самостоятельного применения и в составе МСГ для имитации функциональных звеньев РЭС.

Выполнены проектирование и разработка компьютерной системы генерирования-имитации сигналов произвольной формы в диапазоне частот  $10^{-2} - 10^8$  Гц, вариант которой внедрен в серийное производство в ОАО “Минский приборостроительный завод” в виде генератора Г6-45 сигналов сложной формы.

Выполнены проектирование и разработка первого варианта программно-аппаратного комплекса математического и физического моделирования РЭС, внедренного в учебный процесс БГУИР.

*Реализация результатов.*

Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в НИР и ОКР, при разработке компьютерной системы генерирования-имитации и программно-аппаратного комплекса математического и физического моделирования РЭС, применены на практике в ОАО “Минский приборостроительный завод” при создании новой техники и в учебном процессе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Вариант компьютерной системы генерирования-имитации внедрен в ОАО “Минский приборостроительный завод” в серийное производство в виде генератора Г6-45 сигналов сложной формы. Первый вариант программно-аппаратного комплекса внедрен в учебный процесс БГУИР. Использование результатов диссертационной работы отражено в соответствующих отчетах о НИР (ОКР) и актах внедрения, приведенных в приложении к диссертации.

### ***Основные положения диссертации, выносимые на защиту.***

1. Метод и устройства генерирования нескольких колебаний некратных частот однопетлевой системой ФАПЧ.
2. Методы и устройства генерирования в широком диапазоне частот модулированных сигналов с различными видами модуляции, обеспечивающие во всем диапазоне высокую стабильность несущей частоты.
3. Математическое описание линейных звеньев РЭС, упрощающее алгоритмы преобразования моделей и расчета их характеристик.
4. Алгоритмы преобразования и расчета частотных характеристик математических моделей линейных звеньев РЭС, позволяющие полностью автоматизировать процесс моделирования, включая подготовительный этап формирования моделей.
5. Структура многофункциональной системы генерирования сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот.
6. Методика проектирования широкодиапазонного синтезатора частот, обеспечивающая квазиоптимальный выбор основных технических параметров.
7. Компьютерная система генерирования-имитации сигналов произвольной формы, пакет прикладных программ для имитации функциональных звеньев, программно-аппаратный комплекс математического и физического моделирования РЭС.

### ***Личный вклад соискателя.***

Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо соискателем, либо с его непосредственным участием. Вклад научного руководителя доцента Ильинкова В.А. связан с постановкой задачи и целей исследования, анализом принципов построения широкодиапазонных синтезаторов частот, механизмов генерирования нескольких опорных колебаний однопетлевой системой ФАПЧ и модулированных сигналов в широком диапазоне частот, анализом методов и моделей описания сигналов и звеньев РЭС.

### ***Апробация результатов диссертации.***

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на 15 международных и республиканских научно-технических конференциях (НТК), в том числе на: I, IV, V, и VIII международных НТК “Современные средства связи” (Нарочь, 1995, 1999, 2000, 2003); международной НТК “Автоматизация проектирования дискретных систем”

(Минск, 1995); III Сибирском конгрессе по прикладной и промышленной математике, посвященном памяти С.Л. Соболева (Россия, Новосибирск, 1998), II международной НТК “Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество” (Минск, 1998); I республиканской НТК “Цифровое телевизионное и радиовещание” (Минск-Раубичи, 1999); Белорусско-Польском научно-практическом семинаре (Брест, 2002); международной научно-методической конференции “Высшее техническое образование: проблемы и пути развития” (Минск, 2004); VIII международной НМК вузов и факультетов телекоммуникаций (Россия, Уфа, 2004).

Макетный образец системы генерирования-имитации демонстрировался на 15 международных и республиканских научно-технических выставках, в том числе на: международных выставках “Milex 2001” и “Milex 2003” (Минск, 2001, 2003); межгосударственной выставке, посвященной 10-летию образования СНГ (Москва, 2001); международной специализированной выставке “ТІВО-2002” (Минск, 2002); Белорусско-Польском научно-практическом семинаре и выставке инновационных разработок (Брест, 2002); IV международной специализированной выставке “PTS 2002: перспективные технологии и системы (информатика, телекоммуникации, безопасность)” (Минск, 2002); выставке научно-технических разработок университета, посвященной 40-летию БГУИР (Минск, 2004); выставке результатов инновационной деятельности в РБ (Витебск, 2004).

#### ***Опубликованность результатов.***

По материалам диссертации опубликовано 29 работ, в том числе 7 статей в научно-технических журналах и сборниках, 12 статей в сборниках материалов НТК и 5 тезисов докладов. Подано 5 заявок на изобретения, на настоящий момент получено одно положительное решение на выдачу патента РБ. Результаты работы отражены в 4 научно-технических отчетах.

#### ***Структура и объем диссертации.***

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемых источников, приложения. Общий объем диссертации составляет 145 страниц, включая 35 рисунков на 30 страницах, 7 таблиц на 8 страницах, библиографический список из 171 наименований на 13 страницах, приложения на 6 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

***В первой главе*** исследованы известные методы и устройства генерирования стабильных опорных колебаний, методы и устройства генерирования различных по свойствам сигналов, проведен сравнительный анализ системных интерфейсов, исследованы известные методы математического моделирования линейных свойств звеньев и сигналов РЭС.

С целью систематизации и упрощения исследования предложена общая классификация известных методов и устройств генерирования стабильных опорных колебаний. В соответствии с ней проанализированы синтезаторы частот каждой группы. Установлено, что общими недостатками методов (устройств) прямого синтеза являются: сложность аппаратной реализации, вытекающая в основном из необходимости использования значительного количества трудно реализуемых (особенно в широком частотном диапазоне) преобразователей (умножителей, делителей, смесителей) частоты и фильтров; применение большого числа нелинейных преобразований и, как следствие, невозможность обеспечения малого уровня побочных продуктов (менее минус 60дБ). Показано, что, в отличие от методов (устройств) прямого синтеза, синтезаторы на основе системы ФАПЧ характеризуются возможностью работы в широком диапазоне частот, в том числе в диапазоне СВЧ, более высокой чистотой спектра выходного колебания и высокой технологичностью – возможностью реализации большинства узлов синтезатора на интегральных схемах. С учетом упрощения аппаратной реализации рекомендовано использовать в МСГ синтезаторы частот на основе однопетлевой системы ФАПЧ.

Показано, что известная классификация методов и устройств генерирования сигналов, регулируемая соответствующими нормативными документами, не отражает многообразие свойств и тенденции развития этого вида техники, существенно затрудняет сравнительный анализ. Учитывая это, предложена общая классификация методов и устройств генерирования сигналов: по форме выходного сигнала; по диапазону частот; по виду модуляции; по ширине полосы частот выходного сигнала; по виду обработки сигнала; по коэффициенту перекрытия по частоте; по способу управления; по количеству выходных каналов. В соответствии с ней проанализированы методы (устройства) генерирования сигналов каждой группы, включая низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные генераторы гармонических (с разными видами модуляции) и шумовых сигналов, генераторы сигналов специальной формы, в том числе качающейся частоты, и генераторы сигналов произвольной формы. Показано, что с учетом цели и задач диссертационной работы и в соответствии с предложенной классификацией разрабатываемая МСГ относится к высо-

кочастотным широкополосным автономным многоканальным комбинированным системам генерирования сигналов произвольной формы.

Важным аспектом проектирования и разработки МСГ сигналов, содержащей в своем составе ПЭВМ, является правильный выбор интерфейса, который существенно влияет на возможности системы в целом. Учитывая это, рассмотрены свойства и основные характеристики системных интерфейсов: магистралей ISA и PCI, интерфейсов КОП, Centronics, RS-232C (и усовершенствованных стандартов), USB и Fire Wire, собственных интерфейсов измерительных систем VXI и PXI. Показано, что проектируемая МСГ не предъявляет жестких требований к скорости информационного обмена ПЭВМ. Это делает возможным использованием в МСГ параллельного интерфейса Centronics.

Для обеспечения возможности использования МСГ в сложных измерительных системах, в системах контроля и функциональной диагностики необходимо, чтобы она также выполняла функцию имитации функциональных звеньев РЭС: формировала реакции звеньев на испытательные воздействия. Математическое моделирование частотно-временных свойств нелинейных звеньев в широком диапазоне частот является очень сложной самостоятельной задачей, которая актуальна по настоящее время. С целью упрощения на первом этапе целесообразно ограничиться имитацией только линейных звеньев, что достаточно для решения многих задач. Для её выполнения необходимо располагать алгоритмами и программами формирования и преобразования математических моделей линейных звеньев, расчета их частотных характеристик и реакций на испытательные воздействия. Учитывая, это проведен сравнительный анализ методов описания линейных звеньев РЭС и методов моделирования линейных искажений сигналов. Показана целесообразность совместного применения метода описания линейных звеньев дробно-рациональной функцией комплексного переменного специального вида и модифицированного метода моделирования на основе операционного исчисления (метода Ильинкова).

**Во второй главе** разработаны методика проектирования широкодиапазонного синтезатора частот, метод и оптимальные по его реализации устройства генерирования нескольких колебаний некротных частот и широкодиапазонный синтезатор частот с расширенными функциональными возможностями.

Свойства МСГ сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот существенно зависят от входящего в её состав синтезатора стабильных опорных колебаний, который, как показано в главе 1, целесообразно строить на основе системы ФАПЧ. Устройства косвенного синтеза широко используют в радиоэлектронных, телекоммуникационных и измерительных системах, при этом наиболее сложными из них являются имен-

но широкодиапазонные синтезаторы частот. Учитывая это, разработана инженерная методика проектирования широкодиапазонного синтезатора. Она обеспечивает квазиоптимальный выбор основных технических параметров: способа разбиения диапазона рабочих частот на поддиапазоны; шага сетки частот; изменения шага по поддиапазнам; диапазона перестройки управляемого генератора; границ изменения коэффициентов деления делителей частоты; значения опорной частоты. В соответствии с разработанной методикой выполнены проектирование и разработка широкодиапазонного синтезатора (с коэффициентом  $10^{10}$  перекрытия по частоте в диапазоне  $10^{-2}$ - $10^8$  Гц), используемого в серийном генераторе Г6-45 сигналов сложной формы.

Метод формирования с помощью однопетлевой системы ФАПЧ позволяет получить одно стабильное колебание с практически любым требуемым шагом сетки частот, что достаточно в большинстве случаев. Однако в ряде технических приложений, например в телекоммуникационных и измерительных системах и устройствах, возникает необходимость наличия одновременно  $K$  (чаще двух) стабильных колебаний с произвольными (некратными) частотами, что требует применения  $K$  синтезаторов частот и существенно усложняет аппаратную реализацию. С учетом этого разработан метод генерирования нескольких колебаний некратных частот однопетлевой системой ФАПЧ, отличающийся от известного введением  $(K+1)$  дополнительных операций деления частоты колебания с перестраиваемой частотой. Показано, что в случае синтеза  $K$  стабильных колебаний существует  $P=K!$  равноправных вариантов, оптимальных по его аппаратной реализации. Предложен простой алгоритм для нахождения этих вариантов. Рассмотрены варианты построения синтезаторов для случаев  $K=2$  и  $K=3$ . В разработанном методе все  $K$  выходных колебаний образуются из колебания одного перестраиваемого генератора. Поэтому при последующем их нелинейном взаимодействии образуются продукт(ы) с той же относительной нестабильностью частоты, что и в колебании перестраиваемого генератора. Это исключительно важно для многих приложений и принципиально невозможно при формировании колебаний несколькими синтезаторами.

Реализация перестраиваемого генератора с большим коэффициентом перекрытия по частоте представляет самостоятельную достаточно сложную проблему. Ее решают либо способом построения перестраиваемого генератора (со значительно меньшим коэффициентом перекрытия), работающего в более высоком диапазоне частот, и последующего переноса частоты колебаний в требуемый диапазон, либо с помощью нескольких генераторов, каждый из которых перекрывает свою часть частотного диапазона. Оба способа характеризуются сложностью аппаратной реализа-

ции, что существенно усложняет построение синтезатора в целом. Учитывая это, на базе метода генерирования нескольких колебаний некратных частот разработан широкодиапазонный синтезатор частот с расширенными функциональными возможностями. Он обеспечивает возможность одновременно сформировать четыре колебания на частотах  $f_1$ - $f_4$ , причем, в общем случае частоты  $f_1$  и  $f_3$ ,  $f_2$  и  $f_4$  - попарно некратны, а частоты  $f_1$  и  $f_2$ ,  $f_3$  и  $f_4$  - попарно кратны. При этом коэффициент перекрытия по частоте перестраиваемого генератора, входящего в синтезатор, не превышает значения  $K_f=2$  при любых вариантах разбиения на поддиапазоны рабочего диапазона частот.

**В третьей главе** разработаны методы и реализующие их устройства генерирования модулированных сигналов в широком диапазоне частот.

Рассмотрен известный метод формирования модулированных (по тому или (и) иному параметру) сигналов в широком диапазоне несущих частот, основанный на модуляции неизменной промежуточной частоты. Показано, что использование этого метода сопровождается увеличением относительной нестабильности  $\delta_n$  несущей частоты  $f_n$ , которая тем выше, чем ниже значение  $f_n$ . При этом генерирование сигналов на частотах  $f_n$ , сравнимых с промежуточной частотой  $f_{п}$ , повышает относительную нестабильность в 3 раза, а на частотах  $f < f_{п}$  - в десятки и сотни раз. Для устранения отмеченного существенного недостатка разработан новый метод генерирования модулированных сигналов в широком диапазоне частот, допускающий аналоговое и цифровое формирование модулирующих сигналов. Он отличается от известного введением операций: деления в  $V$ ,  $W$  и  $Z$  раз частоты  $f_r$  колебания с перестраиваемой частотой для образования соответственно колебания  $U_{ВП}(t)$  вспомогательной промежуточной частоты, вспомогательного опорного  $U_{ВО}(t)$  и опорного  $U_{\alpha}(t)$  колебаний; формирования модулированного (по тому или (и) иному параметру) сигнала  $U_{ВПМ}(t)$  вспомогательной промежуточной частоты; образования сигнала  $U_{ВПП}(t)$  посредством балансной амплитудной модуляции сигналом  $U_{ВПМ}(t)$  вспомогательного опорного колебания  $U_{ВО}(t)$ . Разработано устройство, реализующее предложенный метод генерирования. Выполнена оценка стабильности несущей частоты формируемых модулированных сигналов. Показано, что во всем диапазоне частот метод обеспечивает одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную относительной нестабильности частоты колебаний перестраиваемого генератора и существенно меньшую, чем в известном методе генерирования модулированных сигналов.

Современной тенденцией является переход к формированию сигналов специальной и произвольной формы цифровым синтезом отсчетных значений. Учитывая это, рассмотрен известный метод формирования мо-

дулированных сигналов, основанный на цифровом синтезе модулирующих колебаний. Показано, что он, позволяя генерировать модулированные сигналы в широком диапазоне частот, не обеспечивает необходимую для многих применений стабильность их несущей частоты. Для устранения этого недостатка разработан новый метод генерирования модулированных колебаний в широком диапазоне частот, основанный на цифровом синтезе модулирующих колебаний. Он отличается от известного введением операций: деления в  $W$ ,  $Z$  и  $X$  раз частоты  $f_r$  колебания с перестраиваемой частотой для образования вспомогательного опорного  $U_{BO}(t)$ , опорного  $U_O(t)$  колебаний и колебания  $U_T(t)$  тактовой частоты; образования сигнала  $U_{ВПП}(t)$  посредством балансной амплитудной модуляции модулированным сигналом  $U_{ВПМ}(t)$  вспомогательной промежуточной частоты вспомогательного опорного колебания  $U_{BO}(t)$ . Разработано устройство, реализующее предложенный метод генерирования. Выполнена оценка абсолютной погрешности  $\Delta f_{HB}$  воспроизведения требуемого значения  $f_H$  несущей частоты и абсолютной погрешности  $\Delta f_{ПВ}$  воспроизведения выбранного значения  $f_{П}$  промежуточной частоты. Показано, что  $\Delta f_{HB} = 1/(2PT_M)$  и  $\Delta f_{ПВ} = (1 + X/Z)\Delta f_{HB}$  ( $P$  – количество запоминаемых периодов  $T_M$  синтезируемого модулирующего колебания), т.е. имеют малые значения и могут быть дополнительно уменьшены посредством увеличения параметра  $P$ . Выполнена оценка стабильности несущей частоты генерируемых модулированных сигналов. Показано, что разработанный метод, не накладывая никаких ограничений на выбор значения промежуточной частоты, обеспечивает во всем диапазоне частот одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную относительной нестабильности частоты колебаний перестраиваемого генератора и существенно меньшую, чем в известном методе генерирования модулированных сигналов.

**В четвертой главе** разработаны алгоритмы формирования и преобразования математических моделей линейных звеньев РЭС, алгоритмы расчета их частотных характеристик и реакций на испытательные воздействия.

Важным положительным свойством МСГ, существенно расширяющим её возможности, является имитация функциональных звеньев РЭС. Имитация линейных звеньев выполняется с помощью математического моделирования линейных свойств звеньев и сигналов. Ответственным этапом, во многом определяющим конечные результаты моделирования, является выбор способа описания и формирования моделей линейных звеньев разного вида: ФНЧ, ФВЧ, ПФ, ЗФ, фильтров с несколькими полосами пропускания (задерживания). Сформулированы необходимые требования к математическому описанию линейных звеньев. С их учетом разработано удобное математическое описание линейных звеньев подробно

рациональной функцией комплексного переменного специального вида, позволяющее построить простые обобщенные алгоритмы преобразования моделей и расчета их характеристик.

Моделирование линейных искажений включает различные преобразования моделей. Известные моделирующие программы их не реализуют (за исключением денормирования) из-за недостатков используемого описания звеньев. В результате эти процедуры приходится выполнять вручную, что представляет весьма громоздкий и трудоемкий процесс, особенно в случае высоких порядков операторной передаточной функции  $K(p)$ . Поэтому автоматизация процедур преобразования является актуальной проблемой при создании эффективных моделирующих программ. Учитывая это, применительно к предложенному описанию линейных звеньев разработаны математические алгоритмы денормирования и реактансного преобразования (типов  $\Phi НЧ \rightarrow \Phi ВЧ$ ,  $\Phi НЧ \rightarrow П\Phi$  и  $\Phi НЧ \rightarrow З\Phi$ ) моделей. Показано, что эти преобразования приводят к совпадающим по форме операторным передаточным функциям. Последнее превращает операцию перемножения произвольного числа (де)нормированных моделей с характеристиками  $\Phi НЧ$ ,  $\Phi ВЧ$ ,  $П\Phi$  и  $З\Phi$  в элементарную операцию объединения соответствующих одномерных и двумерных массивов исходных звеньев и поэтому позволяет полностью автоматизировать процесс моделирования линейных звеньев, включая подготовительный этап формирования моделей.

Имитация линейных звеньев с требуемыми свойствами обязательно предусматривает расчет и анализ их частотных характеристик. С учетом этого применительно к предложенному описанию построены математические модели частотных характеристик линейных звеньев: АЧХ, ФЧХ, характеристики рабочего затухания и характеристики группового времени запаздывания. Модели хорошо перекладываются на алгоритмический язык, являются легко программируемыми, а вычислительная процедура не требует сколь-нибудь значительных объемов оперативной памяти.

Для имитации линейных звеньев МСГ должна формировать в реальном масштабе времени их реакции на разные испытательные воздействия, что достигается с помощью математического моделирования линейных искажений сигналов (воздействий). Его, как показано в главе 1, целесообразно выполнять модифицированным методом моделирования на основе операционного исчисления. В связи с этим рассмотрена процедура моделирования по данному методу. Показано, что метод, являясь практически универсальным, предполагает нахождение для каждого испытательного сигнала своих характеристических функций  $S_n(p)$ , что требует определенной подготовительной работы и на данном этапе пока не позволяет полностью автоматизировать процесс моделирования. Учитывая послед-

нее, с применением модифицированного метода моделирования построенная математическая модель составного испытательного сигнала сложной формы и математическая модель реакции линейного звена на это воздействие. Использование этой модели, хотя и ограничивает возможности моделирования, однако до минимума сокращает объем подготовительной работы.

С учетом автоматизации процесса моделирования выработаны минимальные требования к пакету прикладных программ для имитации функциональных звеньев РЭС. Показано, что известные моделирующие пакеты и программы не удовлетворяют этим требованиям, в частности, не выполняют процедуры преобразования и перемножения моделей, у большинства отсутствуют развитые библиотеки моделей звеньев и воздействий. На основе предложенного математического описания звеньев, построенных математических алгоритмов преобразования моделей, расчета их частотных характеристик и реакций разработан (в среде *Turbo Pascal*) пакет прикладных программ для имитации линейных функциональных звеньев, пригодный для самостоятельного использования, состоящий из 17 программ (процедур). Для демонстрации его возможностей рассмотрены различные примеры моделирования линейных свойств звеньев и сигналов. Важным положительным свойством разработанного пакета программ является возможность перемножения математических моделей. Это позволяет сформировать операторную передаточную функцию  $K_{\Sigma}(p)$ , соответствующую последовательному соединению произвольного числа линейных звеньев разного вида, а затем, используя соответствующие программы пакета, рассчитать частотные характеристики и реакции такого сложного соединения.

**В пятой главе** предложена МСГ сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот, рассмотрено построение многофункциональных измерительных систем, выполнены проектирование и разработка компьютерной системы генерирования-имитации сигналов произвольной формы и программно-аппаратного комплекса математического и физического моделирования РЭС.

С учетом цели и задач диссертационной работы, основываясь на разработанных методе генерирования нескольких колебаний некротных частот и методе генерирования модулированных колебаний, предложена структура трехканальной МСГ сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот, которая способна работать как самостоятельно, так и под управлением ПЭВМ. МСГ обеспечивает: одновременное формирование двух синтезированных сигналов  $U_{M1}(t)$  и  $U_{M2}(t)$  различной (произвольной) формы и разных (в общем случае некротных) периодов (частот) повторения либо двух одинаковых сигналов  $U_{M1}(t)$  и  $U_{M2}(t) = U_{M1}(t - \tau)$ ,

смещенных друг относительно друга по времени (фазе); формирование модулированных (с разными видами модуляции) сигналов в широком диапазоне несущих частот; имитацию линейных свойств РЭС (с помощью разработанного пакета программ). Это существенно расширяет возможности применения МСГ, делает ее многофункциональной. Структура разработанной МСГ инвариантна к последующему расширению диапазона рабочих частот.

Важной современной тенденцией развития радиоизмерительной техники является проектирование и разработка многофункциональных измерительных систем (приборов), обеспечивающих формирование различных (произвольных) измерительных сигналов, измерение параметров качества различных устройств (систем) и пригодных для целей функциональной диагностики. С учетом этого рассмотрено построение многофункциональной измерительной системы, которая состоит из пяти управляемых компьютером подсистем: подсистемы математического моделирования; подсистемы генерирования; подсистем измерения частотно-динамических, время-динамических и квазистатических параметров. При этом подсистема генерирования (совместно с подсистемой моделирования) должна обеспечивать возможность формирования измерительных сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот (времен) и уровней и возможность имитации функциональных звеньев РЭС. Выработаны минимальные технические требования к подсистеме генерирования.

Основываясь на полученных результатах исследования, в соответствии с выработанными требованиями к подсистеме генерирования и пакету прикладных программ для имитации функциональных звеньев РЭС выполнены проектирование и разработка компьютерной системы генерирования-имитации сигналов произвольной формы в диапазоне частот  $10^{-2}$ - $10^8$  Гц, которая структурно состоит из подсистемы генерирования, ПЭВМ, подсистемы математического моделирования и подсистемы управления, при этом подсистема генерирования представляет собой упрощенный (одноканальный) вариант предложенный МСГ, а подсистема математического моделирования – разработанный пакет прикладных программ для имитации линейных функциональных звеньев РЭС. Разработанная система генерирования-имитации выполняет следующие функции: генерирование гармонических, импульсных, аналого-импульсных, функциональных, цифровых и модулированных детерминированных сигналов, включая полные цветковые телевизионные и комплексные стереофонические сигналы; генерирование псевдослучайных и псевдошумовых испытательных сигналов; электрическая имитация в реальном масштабе времени линейных функциональных звеньев РЭС; электрический построчный анализ и синтез испытательных цветных и черно-белых изображений. Упрощенный вари-

ант компьютерной системы генерирования-имитации (без подсистемы математического моделирования) в виде генератора Г6-45 сигналов сложной формы внедрен в серийное производство в ОАО “Минский приборостроительный завод”. На генератор получен сертификат № 2945 РБ. Готовится в серийное производство новая модель генератора Г6-45.

Перспективным направлением является применение МСГ в обучающих программно-аппаратных комплексах. Учитывая это, на базе компьютерной системы генерирования-имитации разработан первый вариант недорогого обучающего программно-аппаратного комплекса математического и физического моделирования РЭС, который структурно состоит из ПЭВМ, подсистемы генерирования, подсистемы математического моделирования, библиотеки виртуальных систем (лабораторных работ), подсистемы управления и осциллографа, аппаратно – из генератора Г6-45 и осциллографа. Комплекс внедрен в учебный процесс на кафедре систем телекоммуникаций БГУИР, где создан класс из 7 программно-аппаратных комплексов. Это обеспечивает возможность реализации (быстро перестраиваемых) фронтальных циклов лабораторных работ по различным дисциплинам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрены принципы построения многофункциональных систем генерирования сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот. Получены следующие основные результаты.

1. Разработаны новый метод и оптимальные по его реализации устройства генерирования нескольких стабильных колебаний некратных частот однопетлевой системой ФАПЧ. Разработана методика проектирования широкодиапазонного синтезатора частот, обеспечивающая квазиоптимальный выбор основных технических параметров. Выполнены проектирование и разработка широкодиапазонного синтезатора (с коэффициентом  $10^{10}$  перекрытия по частоте в диапазоне  $10^{-2}$ - $10^8$  Гц), используемого в серийном генераторе Г6-45 сигналов сложной формы. Предложен широкодиапазонный синтезатор частот с расширенными функциональными возможностями, который обеспечивает одновременное формирование четырех колебаний кратных и некратных частот [5-7, 14, 25-26].

2. Разработан новый метод генерирования в широком диапазоне частот модулированных сигналов, который допускает аналоговое и цифровое формирование модулирующих сигналов и обеспечивает во всем диапазоне одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную относительной нестабильности частоты колебаний перестраиваемого генератора. Разработан новый метод генерирования в широком диапазоне час-

тот модулированных (с различными видами модуляции) колебаний, основанный на цифровом синтезе модулирующих колебаний, не накладывающий никаких ограничений на выбор значения промежуточной частоты и обеспечивающий во всем диапазоне одинаковую относительную нестабильность несущей частоты, равную относительной нестабильности частоты колебаний перестраиваемого генератора. Разработаны устройства, реализующие предложенные методы [11, 13, 15, 24, 27-28].

3. Разработано удобное математическое описание линейных звеньев радиоэлектронных систем, позволяющее построить простые обобщенные алгоритмы преобразования моделей и расчета их характеристик. Разработаны математические алгоритмы денормирования, реактансного преобразования и перемножения математических моделей, математические алгоритмы расчета их частотных характеристик. Построены математическая модель составного испытательного сигнала сложной формы и математическая модель реакции линейного звена на это воздействие. [2, 4, 8, 20-22].

4. На базе построенных моделей разработан пакет прикладных программ математического моделирования линейных свойств звеньев и сигналов, пригодный для самостоятельного применения и в составе многофункциональной системы генерирования для имитации функциональных звеньев РЭС [1, 4, 8-9, 20-22].

5. На основе предложенных метода генерирования нескольких колебаний некратных частот и метода генерирования модулированных колебаний разработана трехканальная многофункциональная система генерирования сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот, которая способна работать как самостоятельно, так и под управлением ПЭВМ. Структура разработанной системы инвариантна к последующему расширению диапазона рабочих частот [11, 15, 24, 29].

6. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований выполнены проектирование и разработка компьютерной системы генерирования-имитации сигналов произвольной формы в диапазоне частот  $10^2$ - $10^8$  Гц, вариант которой внедрен в серийное производство в виде генератора Г6-45 сигналов сложной формы в ОАО "Минский приборостроительный завод", и первого варианта программно-аппаратного комплекса математического и физического моделирования РЭС, внедренного в учебный процесс в БГУИР [3, 10-13, 16-19, 23].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научно-технических журналах и сборниках

1. Tkantchenko P.A., Kapuro A.P., Romanov E.W. Circuit modeling for the luminance and chrominance signal separation // Electrotechniques. Mathematics. Pristina, — 1996. — № 1. — P. 9-12.
2. Ильинков В.А., Романов В.Е., Беленкевич Н.И. Математическое моделирование линейных звеньев телекоммуникационных систем // Известия Белорусской инженерной академии. — 1998. — № 2(6)/1. — С. 78-79.
3. Ильинков В.А., Романов В.Е., Румянцев А.В. Многофункциональная автоматизированная система контроля и измерения параметров телекоммуникационных систем и устройств // Известия Белорусской инженерной академии. — 1998. — № 2(6)/1. — С. 86-88.
4. Ильинков В.А., Романов В.Е., Беленкевич Н.И. Формирование, преобразование и расчет характеристик математических моделей линейных звеньев радиоэлектронных систем // Радиотехника и электроника: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. — Мн.: БГУИР, 1999. — Вып. 23. — С. 81-86.
5. Ильинков В.А., Романов В.Е. Проектирование широкодиапазонного синтезатора частот // Доклады БГУИР. Электроника, материалы, технологии, информатика. Минск, —2003. — № 4(4). С. 53-58.
6. Ильинков В.А., Романов В.Е. Параметрическая оптимизация широкополосного синтезатора частот на основе системы ФАПЧ // Известия Белорусской инженерной академии. —2003. — № 1(15)/3. — С. 72-74.
7. Ильинков В.А., Романов В.Е. Формирование нескольких колебаний некротных частот однопетлевой системой ФАПЧ // Доклады БГУИР. Электроника, материалы, технологии, информатика. — 2004. — № 4(8). С. 54-58.

### Статьи в сборниках материалов конференций

8. Ильинков В.А., Романов В.Е., Румянцев А.В. Методология моделирования линейных искажений в телекоммуникационных системах // Современные средства связи: Материалы научно-технической конференции. — Мн.: БГУИР, 1995. — С. 34-35.
9. Ильинков В.А., Романов В.Е., Румянцев А.В. Многофункциональная программа моделирования искажений в телекоммуникационных системах // Автоматизация проектирования дискретных систем: Материалы международной конференции. — Мн.: БГУ, 1995. — С. 166.

10. Ильинков В.А., Романов В.Е., Румянцев А.В. Отраслевая научно-исследовательская лаборатория информационно-измерительных телекоммуникационных технологий: целесообразность создания, направления научных исследований // Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: Материалы 2-й международной научно-практической конференции (14-16 окт. 1998 г., Минск): В 2 ч. Ч.1 / Под ред. В.Н. Попка. — Мн.: БГУ, 1998. — 165 с., С. 132-136.

11. Ильинков В.А., Романов В.Е. Компьютерная система генерирования аналоговых и цифровых электрических сигналов // IV Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции / Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. — 1999. — № 1(7)/1. — С. 34

12. Романов В.Е., Румянцев А.В. Интерфейсы измерительных систем // IV Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции / Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. — 1999. — № 1(7)/1. — С. 62-64.

13. Романов В.Е. Генератор комплексных стереосигналов // IV Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции / Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. — 1999. — № 1(7)/1. — С. 40-41.

14. Ильинков В.А., Романов В.Е. Формирование стабильных колебаний некротных частот // V Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции / Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. — 2000. — № 1(9)/1. — С. 42.

15. Романов В.Е. Сравнительный анализ методов и устройств генерирования сигналов различной формы // V Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции, / Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. — 2000. — № 1(9)/1. — С. 45-47.

16. Ильинков В.А., Романов В.Е., Беленкевич Н. И., Силин А.А. Современные тенденции построения информационно-измерительных телекоммуникационных систем: Материалы конференции // Известия Белорусской инженерной академии. Современные средства связи. — 2003. — № 1(15)/3. — С. 66-68.

17. Ильинков В.А., Романов В.Е., Беленкевич Н. И., Силин А.А. Использование программно-аппаратных комплексов в учебном процессе подготовки специалистов радиоэлектронного профиля // VIII Международная научно-методическая конференция вузов и факультетов телекоммуникаций: Труды конференции (Россия, Уфа, 23-24 ию-

ня 2004 г.) — М.: МТУСИ, 2004. — С 139-141.

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

19. Ильинков В.А., Романов В.Е., Беленкевич Н. И., Силин А.А. Программно-аппаратный комплекс математического и физического моделирования радиоэлектронных систем // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития: Материалы Междунар. научно-методической конференции (17–18 марта 2004 г., Минск). – Мн.: БГУИР, 2004. – С. 180 – 181.

#### **Тезисы докладов**

20. Ильинков В.А., Романов В.Е., Румянцев А.В. Преобразование математических моделей линейных звеньев // Современные проблемы радиотехники, электроники и связи: Тезисы докладов научно-технической конференции (Минск, 4-5 мая 1995 г.) —Мн.: БГУИР, 1995. — С. 78-79.

21. Ильинков В.А., Романов В.Е., Румянцев А.В. Моделирование линейных искажений в телекоммуникационных системах // Современные проблемы радиотехники, электроники и связи: Тезисы докладов научно-технической конференции, Минск, 4-5 мая 1995 г. / БГУИР. — Минск, 1995. — С. 80-81.

22. Ильинков В.А., Романов В.Е. Моделирование искажений систем связи на комплексной плоскости // Третий сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике, посвященный памяти С.Л. Соболева: Тезисы докладов Ч. 5 / Издательство института математики СО РАН. — Новосибирск, 1998. — С. 165.

23. Ильинков В.А., Романов В.Е., Беленкевич Н.И., Румянцев А.В. Многофункциональная автоматизированная система контроля и измерения параметров телекоммуникационных систем и устройств // 1-я Республиканская научно-техническая конференция “Цифровое телевизионное радиовещание”: Тезисы докладов (14-16 апреля 1999 г., Минск-Раубичи). — С. 35-36.

24. Ильинков В.А., Романов В.Е., Беленкевич Н. И., Силин А.А. Многофункциональная компьютерная система генерирования имитации сложных измерительных видео и радиосигналов // Белорусско-Польский научно-практический семинар: Тезисы докладов (Брест, 9-11 октября 2002 г.). — Брест: БГТУ, 2002. — С. 58-59

**Заявки на изобретения, патенты**

25. Ильинков В.А., Романов. В.Е. Заявка № а 20000048 (ВУ) МКИ<sup>6</sup> H03L 7/00. Способ синтеза стабильных электрических колебаний некратных частот. — Официальный бюллетень. 2001. — №3. — С.62.

26. Ильинков В.А., Романов. В.Е. Заявка № а 20010367 (ВУ) МПК<sup>7</sup> H03L 7/00. Синтезатор стабильных электрических колебаний в широком диапазоне частот. — Официальный бюллетень. 2002. — №4. — С.60.

27. Ильинков В.А., Романов. В.Е. Беленкевич Н.И. Заявка № а 20040405 (ВУ) МПК<sup>7</sup> H03L 7/00. Способ генерирования модулированных электрических сигналов в широком диапазоне несущих частот. — Заявлено 2004.05.07.

28. Ильинков В.А., Романов. В.Е. Беленкевич Н.И. Заявка № а 20040831 (ВУ) МПК<sup>7</sup> H03L 7/00. Способ генерирования модулированных электрических сигналов в широком диапазоне несущих частот. — Заявлено 2004.09.03.

29. Ильинков В.А., Романов. В.Е. Беленкевич Н.И. Заявка № а 20040837 (ВУ) МПК<sup>7</sup> H03L 7/00. Система генерирования электрических сигналов в широком диапазоне частот. — Заявлено 2004.09.07.



## РЭЗЮМЭ

Раманаў Вячаслаў Еўгенавіч

### Многафункцыянальная сістэма генерыравання сігналаў адвольнай формы

**Ключавыя словы:** сістэма, сігнал, метады, устройства, генерыраванне, сінтэзатар, мадуляцыя, мадэль, пераўтварэнне, мадэліраванне, праграма.

**Аб'ект даследавання:** сістэмы генерыравання сігналаў адвольнай формы; **прадмет даследавання:** метады генерыравання апорных хістанняў і мадуляваных сігналаў, матэматычныя мадэлі лінейных уласцівасцяў функцыянальных звёнаў радыёэлектронных сістэм.

**Цель работы:** даследаванне і распрацоўка прынцыпаў пабудовы многафункцыянальных сістэм генерыравання сігналаў адвольнай формы ў шырокім дыяпазоне частот.

**Метады даследавання:** метады тэорыі функцый комплекснай пераменнай, тэорыі ланцугоў і сігналаў, тэорыі генерыравання і мадуляцыі, частотныя і часовыя метады аналізу звёнаў і ўстройстваў радыёэлектронных сістэм, матэматычнае мадэліраванне.

Распрацаваны новы метады генерыравання некалькіх стабільных хістанняў някратных частот аднапільнай сістэмай ФАПЧ, прапанаваны простыя алгарытмы знаходжання аптымальных па яго апаратурнай рэалізацыі ўстройстваў. Распрацавана метадыка праектавання шырокадыяпазоннага сінтэзатара частот, якая забяспечвае квазіаптымальны выбар асноўных тэхнічных параметраў.

Распрацаваны новы метады генерыравання мадуляваных сігналаў у шырокім дыяпазоне частот, які дапускае аналогавае і лічбавае фарміраванне мадулюючых сігналаў, забяспечвае ва ўсім дыяпазоне высокую стабільнасць нясучай частаты. Распрацаваны новы метады генерыравання мадуляваных хістанняў ў шырокім дыяпазоне частот, які заснаваны на лічбавым сінтэзу мадулюючых хістанняў, не накладае абмежаванняў на выбар значэнняў праемнай частаты і забяспечвае ва ўсім дыяпазоне высокую стабільнасць нясучай частаты.

Распрацавана зручнае матэматычнае апісанне лінейных звёнаў радыёэлектронных сістэм. Распрацаваны алгарытмы пераўтварэння і разліку частотных характэрыстык матэматычных мадэляў лінейных звёнаў, якія дазваляюць поўнасьцю аўтаматызаваць працэс мадэліравання.

На аснове праведзеных тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў выкананы праектаванне і распрацоўка камп'ютарнай сістэмы генерыравання-імітацыі сігналаў адвольнай формы, якая укаранёна ў серыйную вытворчасць у выглядзе генератара Г6-45 сігналаў складанай формы, а таксама першага варыянта праграма-апаратнага комплексу матэматычнага і фізічнага мадэліравання радыёэлектронных сістэм.

## РЕЗЮМЕ

Романов Вячеслав Евгеньевич

### Многофункциональная система генерирования сигналов произвольной формы

**Ключевые слова:** система, сигнал, метод, устройство, генерирование, синтезатор, модуляция, модель, преобразование, моделирование, программа.

**Объект исследования:** системы генерирования сигналов произвольной формы; **предмет исследования:** методы генерирования опорных колебаний и модулированных сигналов, математические модели линейных свойств функциональных звеньев радиоэлектронных систем.

**Цель работы:** исследование и разработка принципов построения многофункциональных систем генерирования сигналов произвольной формы в широком диапазоне частот.

**Методы исследования:** методы теории функций комплексного переменного, теории цепей и сигналов, теории генерирования и модуляции, частотные и временные методы анализа звеньев и устройств радиоэлектронных систем, математическое моделирование.

Разработан новый метод генерирования нескольких стабильных колебаний некратных частот однопетлевой системой ФАПЧ, предложен простой алгоритм нахождения оптимальных по его аппаратурной реализации устройств. Разработана методика проектирования широкодиапазонного синтезатора частот, обеспечивающая квазиоптимальный выбор основных технических параметров.

Разработан новый метод генерирования модулированных сигналов в широком диапазоне частот, допускающий аналоговое и цифровое формирование модулирующих сигналов, обеспечивающий во всем диапазоне высокую относительную нестабильность несущей частоты. Разработан новый метод генерирования модулированных колебаний в широком диапазоне частот, основанный на цифровом синтезе модулирующих колебаний, не накладывающий ограничений на выбор значения промежуточной частоты и обеспечивающий во всем диапазоне высокую относительную нестабильность несущей частоты.

Разработано удобное математическое описание линейных звеньев радиоэлектронных систем. Разработаны алгоритмы преобразования и расчета частотных характеристик математических моделей линейных звеньев, позволяющие полностью автоматизировать процесс моделирования.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований выполнены проектирование и разработка компьютерной системы генерирования-имитации сигналов произвольной формы, внедренной в серийное производство в виде генератора Г6-45 сигналов сложной формы, и первого варианта программно-аппаратного комплекса математического и физического моделирования радиоэлектронных систем.

## SUMMARY

**Romanov Vyacheslav Evgenjevich**

### **The multifunctional system of generation of signals of the arbitrary form**

**Keywords:** the system, a signal, a method, the device, generation, the synthesizer, modulation, model, transformation, simulation, the program.

The object of research: systems of generation of signals of the arbitrary form; subject of research: methods of generation of basic oscillations and the modulated signals, mathematical models of linear properties of the functional parts of radio-electronic systems.

The purpose of operation: research and development of principles of construction of multifunctional systems of generation of signals of the arbitrary form in a wide range of frequencies.

Methods of research: methods of the theory of functions complex variable, theories of chains and signals, theories of generation and modulation, frequent and temporary methods of the analysis of parts and devices of radio-electronic systems, mathematical simulation.

The new method of a generating of several stable oscillations of not multiple frequencies is developed by one-loopback PLL system, the simple algorithm of a finding of optimum devices on his hardware realization is offered. The procedure of design of the wide-range synthesizer of the frequencies, providing almost optimum choice of the fundamental technical parameters is developed.

The new method of generation of the modulated signals in a wide range of the frequencies, admitting analog and digital formation of the modulating signals, providing in all a range high relative instability of a carrier is developed. The new method of generation of the modulated oscillations in a wide range of the frequencies, based on digital synthesis of the modulating oscillations, not imposing restrictions on a choice of value of an intermediate frequency and providing in all a range high relative instability of a carrier is developed.

The convenient mathematical description of linear parts of radio-electronic systems is developed. Algorithms of transformation and calculation of frequency characteristics of mathematical models of the linear parts are developed, allowing to fully automate process of simulation.

On the basis of carried out theoretical both experimental researches designing and development of computer system of generation - imitation of signals of the arbitrary form introduced into a batch production as generator G6-45 of signals of the complex form, and the first variant of a hardware-software complex of mathematical and physical simulation of radio-electronic systems are executed.

Романов Вячеслав Евгеньевич

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ  
СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ**

05.12.04 — “Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения”.

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать	28.04.2005.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».		Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,3.		Тираж 60 экз.	Заказ 287.

---

Полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.  
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6.