

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.372.512

**Пегасин
Михаил Владимирович**

**Параметрический синтез четырехполюсников
при моделировании элементов высокочастотного тракта
на основе теории линейных операторов
в векторном пространстве**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Минск 2010

Работа выполнена в учреждении образования «Военная академия
Республики Беларусь»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: ОНИЩУК Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор, ведущий
научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории ПВО научно-исследовательской
части учреждения образования «Военная ака-
демия Республики Беларусь».

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КИРИЛЛОВ Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор, профес-
сор кафедры метрологии и стандартизации уч-
реждения образования «Белорусский государ-
ственный университет информатики и радио-
электроники»;

ЗАНЕВСКИЙ Дмитрий Валентинович,
кандидат технических наук, доцент, профессор
кафедры радиотехники учреждения образова-
ния «Военная академия Республики Беларусь»

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

Минский научно-исследовательский институт
радиоматериалов.

Защита состоится «10» февраля 2011 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите
диссертаций Д 02.15.02. при учреждении образования «Белорусский государст-
венный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу 220013,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп.1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail:
dissovet@bsuir.by

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

Автореферат разослан «28» декабря 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
к.т.н., доцент



КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Проектирование высокочастотных трактов передачи радиосигналов с оптимальными энергетическими характеристиками является одной из важнейших радиотехнических проблем, значимость которой возрастает в связи с освоением новых диапазонов частот и широким внедрением в современные системы радиолокации, радионавигации, телевидения и мобильной связи гибридных интегральных схем. Сложность указанной проблемы вызывает необходимость применения средств автоматизированного проектирования при построении современных систем передачи сигналов. Традиционно в каждой задаче автоматизированного проектирования выделяют три основных составляющих: моделирование, анализ и оптимизацию. Моделирование является базовым этапом проектирования и обычно заключается в математическом описании элементов, которое позволяет получить необходимые числовые модели, обеспечивающие выполнение анализа и детального расчета.

Различные подходы к решению задачи моделирования представлены в работах К. Гупты, Р. Гарджа, Р. Чадхи, Л.И. Бабака, Жи-Шен Хона (Jia-Sheng Hong), Б.С. Ярмана (Yarman), В.Ю. Бабкова, Ю.К. Муравьева.

Создание и развитие современной системы автоматизированного проектирования высокочастотных устройств требует наличия библиотеки моделей различных элементов, которые могут быть построены с помощью любой из известных методик. При этом актуальным вопросом является разработка новых методик моделирования, обладающих высокой точностью и ориентированных на решение различных задач проектирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Работа имеет связь со следующими крупными научными программами (проектами) и темами:

1) пункт 3 Государственной научно-технической программы создания современных средств и систем радиосвязи и развития их производства в Республике Беларусь на 2007–2010 гг.; 2) разработка усилителя высокой частоты, включенного в состав аппаратуры модернизированного зенитного ракетного комплекса «Печора», в СКБ-2 УП «Тетраэдр»; 3) НИР «Геометрическое решение задач согласования систем передачи информации» шифр «ГБЦ 05-3179» (БГУИР, 2005–2006 гг., №ГР 20051425); 4) НИР «Поле-2009» (УО «ВАРБ», 2009 г.).

Цель и задачи исследования

Цель: повышение эффективности автоматизированного проектирования радиотехнических устройств.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

проведен анализ существующих методов математического описания и моделирования высокочастотных элементов;

разработаны математические и физические модели недиссипативных трансформирующих высокочастотных элементов;

разработаны канонические математические и физические модели двухполюсных элементов высокочастотных трактов, исполняющих роль антенн и пассивных нагрузок;

разработаны канонические математические и физические модели активных элементов (высокочастотных полевых и биполярных транзисторов), обеспечивающих усиление сигналов;

разработаны методики параметрического синтеза схем замещения высокочастотных элементов различных типов;

проведено моделирование ряда типовых высокочастотных элементов, имеющих широкое практическое применение, для проверки адекватности разработанных моделей и оценки работоспособности и эффективности разработанных методик.

Объект исследования – высокочастотные элементы различных типов.

Предмет исследования – методики синтеза моделей элементов высокочастотного тракта.

Положения, выносимые на защиту

1. Математические модели двухполюсных элементов высокочастотного тракта в классе линейных алгебраических уравнений, отличающиеся представлением элемента в виде соединения двухполюсника, согласованного с линией передачи, и трансформирующей цепи, позволяющие повысить точность (уменьшить среднеквадратичное значение ошибки) параметрической оптимизации в 1,5-2 раза.

2. Математические модели активных элементов проходного типа одноканального высокочастотного тракта в классе линейных алгебраических уравнений, отличающиеся представлением элементов в виде соединения активного четырехполюсника, согласованного по входу и выходу, а также входной и выходной трансформирующих цепей, позволяющие повысить точность (уменьшить среднеквадратичное значение ошибки) параметрической оптимизации в 3-4 раза.

3. Методика параметрического синтеза схем замещения минимальнофазовых элементов высокочастотного тракта, отличающаяся использованием прямого преобразования Гильберта амплитудно-частотной характеристики, что позволило в 2 раза сократить необходимое число экспериментальных данных и уменьшить время, затрачиваемое на расчет, в 1,5-2 раза.

4. Результаты исследований по оценке адекватности разработанных моделей, работоспособности и эффективности полученных методик.

Личный вклад соискателя

Результаты, связанные со структурным анализом двухполюсников и четырехполюсников, получены соискателем совместно с научным руководителем. Лично соискателем выполнены: теоретический анализ существующих и пер-

спективных методов моделирования высокочастотных элементов, разработка новых моделей и методик моделирования высокочастотных элементов различных типов, подготовка и проведение расчетов и компьютерных экспериментов.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований по теме диссертации докладывались на 9 конференциях и семинарах: IV Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Нижний Новгород, октябрь 2005 г. [6-А]; VII военно-научная конференция Военной академии Республики Беларусь, Минск, 26–27 января 2005 г. [7-А]; V Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Самара, 11–17 сентября 2006 г. [8-А, 9-А]; X Республиканская конференция студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях», Гомель, 12–14 марта 2007 г. [10-А, 11-А]; IX военно-научная конференция Военной академии Республики Беларусь, Минск, 29–30 марта 2007 г. [12-А, 13-А]; VI Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Казань, 17–23 сентября 2007 г. [14-А]; II Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы развития и интеграции науки, профессионального образования и права в глобальном мире», Красноярск, 21–22 ноября 2007 г. [15-А]; VII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Самара, 15–21 сентября 2008 г. [16-А]; VIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Самара, 15–18 сентября 2010 г. [17-А].

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 18 печатных работах: 5 – публикации, соответствующие пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (1,7 авторского листа), 1 – статья в сборнике материалов конференции, 11 – тезисы докладов, 1 – патент на полезную модель. Имеется 2 акта о практическом использовании результатов исследования.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка, приложения.

В первой главе приведены результаты аналитического обзора литературы по теме исследования, изложена общая концепция исследования. Во второй главе изложены результаты разработки математических моделей высокочастотных элементов различных типов. В третьей главе приведены результаты разработки методик расчета параметров математических моделей высокочастотных элементов различных типов. В четвертой главе изложены результаты моделирования типовых высокочастотных элементов для проверки адекватно-

сти полученных моделей и оценки работоспособности и эффективности разработанных методик.

Общий объем диссертации составляет 118 страниц, текст иллюстрируется 66 рисунками, диаграммами и схемами на 52 страницах, 4 таблицами на 4 страницах. Список использованных источников состоит из 75 наименований на 6 страницах, список авторских публикаций состоит из 18 наименований на 3 страницах. Объем приложения составляет 2 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе приведены результаты аналитического обзора работ, посвященных проблеме моделирования высокочастотных (ВЧ) устройств различных типов. По результатам анализа литературных источников можно выделить следующие представления элементов, используемые при проектировании ВЧ трактов: а) представление элемента в виде совокупности конструкционных и электрофизических параметров, б) представление элемента в виде структурной эквивалентной схемы, в) представление ВЧ элемента в виде схемы замещения, г) представление в виде бесструктурных эквивалентных схем.

Составлена схема, которая отражает взаимосвязь между представлениями элементов в виде совокупности методик, позволяющих перейти от одного представления к другому. Такая схема, во-первых, дает возможность системного взгляда на состояние и развитие современных подходов к моделированию ВЧ элементов; во-вторых, позволяет определить в этой системе место предлагаемых в настоящей работе методик.

Анализ известной литературы показывает, что в области моделирования пассивных двухполосников (ДП) (в частности, антенн) с позиций теории синтеза линейных электрических цепей актуальной является задача расчета эквивалентных схем по экспериментальным данным. В области моделирования активных четырехполосников (ЧП) актуальной задачей является расчет модели, отражающей потенциальные возможности элементов по передаче действительной мощности и путей реализации этих возможностей. Такая модель позволит уже на этапе выбора элементной базы отдать предпочтение элементу с лучшими потенциально достижимыми энергетическими характеристиками, а также определить зоны потенциальной неустойчивости.

При решении задачи согласования элементов ВЧ тракта показал свою эффективность подход, основанный на применении геометрических аналогий и получивший название геометрической теории согласования. Основные принципы данного подхода изложены в ряде печатных работ и материалах международных конференций: а) представление множества однородных сигналов в виде линейного пространства; б) введение метрики пространства с помощью выражений для действительной мощности сигнала; в) отождествление между собой изометрических (сохраняющих метрику линейного пространства) и трансформационных (не приводящих к потерям действительной мощности) преобразований. Важным разделом геометрической теории согласования является структурный анализ, в ходе которого устанавливается структура изомет-

рических операторов, соответствующих элементам различных типов. Таким образом, существует возможность применения геометрических аналогий для решения задачи моделирования ВЧ элементов, в частности, посредством перехода от изометрического оператора к эквивалентной схеме.

Во второй главе диссертации приведены результаты разработки моделей элементов различных типов. Проведен структурный анализ с целью раскрытия структуры линейных операторов векторного пространства, соответствующих различным типам элементов.

Структурный анализ недиссипативного ЧП (НЧП) лежит в основе раскрытия структуры операторов, соответствующих линейному ДП (ЛДП) и линейному ЧП (ЛЧП). НЧП соответствует изометрический оператор в линейном пространстве с гиперболической метрикой. Этот оператор может характеризоваться, например, классической матрицей передачи вида

$$\dot{A} = \begin{pmatrix} m \cos(\beta - \varphi) & jn \sin(\beta - \varphi) \\ jn \sin(\alpha - \varphi) & n \cos(\alpha - \varphi) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $n = \frac{|1 - \dot{S}_{11}|}{\sqrt{1 - S_{11}^2}}$, $m = \frac{|1 + \dot{S}_{11}|}{\sqrt{1 - S_{11}^2}}$ – коэффициенты трансформации;

$\alpha = -\arctg \frac{S_{11} \sin \varphi_{11}}{1 - S_{11} \cos \varphi_{11}}$, $\beta = \arctg \frac{S_{11} \sin \varphi_{11}}{1 + S_{11} \cos \varphi_{11}}$ – фазы входного сопротивления и

входной проводимости; φ – переменный аргумент, $\dot{S}_{11} = S_{11} e^{j\varphi_{11}}$ – входной коэффициент отражения из состава матрицы рассеяния.

Преобразование сигнала в линии передач (ЛП) с помощью ЛДП аналогично действию изометрического оператора на *ненулевой* вектор в линейном пространстве. Каноническая форма ЛДП включает в себя ДП, согласованный с ЛП, и трансформирующий ЧП без потерь, преобразующий параметры идеального в параметры реального ДП. Такое представление полностью согласуется с теоремой Дарлингтона, играющей важную роль при решении задач согласования.

Отличительной чертой канонической формы является то, что нормировка активного сопротивления производится *относительно волнового сопротивления ЛП*.

ЛЧП аналогичен системе, состоящей из изометрических операторов и растягивающих (сжимающих) операторов. Каноническая форма ЛЧП характеризуется последовательным действием изометрических и растягивающего (сжимающего) операторов в линейном пространстве, что аналогично каскадному соединению идеально согласованного ЧП и входного и выходного трансформирующих ЧП (см. рисунок 1).

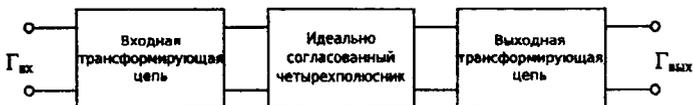


Рисунок 1 – Каноническая форма четырехполюсника

Характер трансформирующих ЧП (пассивный, недиссипативный, активный, активно-пассивный) определяется характером цепей, обеспечивающих «полное согласование» ЛЧП. Поскольку в настоящее время наибольшую практическую ценность представляет согласование с помощью цепей без потерь, в работе рассматривается система НЧП. При этом действие оператора передачи \hat{T} в векторном пространстве может быть представлено в виде совокупности действий операторов

$$\hat{T} = \hat{T}_1 \hat{T}_0 \hat{T}_2 = \begin{pmatrix} \operatorname{ch} \alpha e^{j\varphi} & \operatorname{sh} \alpha e^{-j(\varphi - \varphi_\alpha)} \\ \operatorname{sh} \alpha e^{j(\varphi - \varphi_\alpha)} & \operatorname{ch} \alpha e^{-j\varphi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{t}_{011} & 0 \\ 0 & \dot{t}_{022} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \operatorname{ch} \beta e^{j\psi} & -\operatorname{sh} \beta e^{-j(\psi - \varphi_\beta)} \\ -\operatorname{sh} \beta e^{-j(\psi - \varphi_\beta)} & \operatorname{ch} \beta e^{-j\psi} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где α, β – гиперболические углы поворота; $\varphi_\alpha, \varphi_\beta$ – евклидовы углы поворота; φ, ψ – переменные аргументы, $\dot{t}_{011}, \dot{t}_{022}$ – элементы волновой матрицы передачи идеально согласованного ЧП.

Каждый трансформирующий ЧП в составе канонической формы ВЧ элемента в общем случае может быть представлен в виде соединения n физически реализуемых базовых элементов. Это дает возможность на основе канонических форм ВЧ элементов получать их эквивалентные схемы в диапазоне частот. Известно, что минимальное число реактивных элементов, необходимое для моделирования произвольного элемента, равно трем. В этом случае взаимный НЧП представляется в виде каскадных соединений элементов с сосредоточенными параметрами, простейшие из которых приведены на рисунке 2.

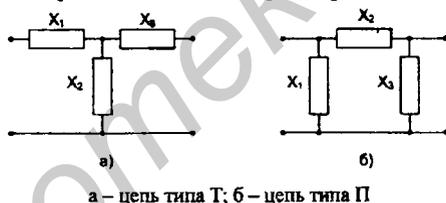


Рисунок 2 – Каскадные соединения базовых элементов

Эквивалентные схемы произвольного ДП в диапазоне частот могут быть получены путем представления изометрического оператора (эквивалента Дарлингтона), входящего в состав их канонической формы, в виде каскадного соединения базовых элементов. Эквивалентные схемы ЛЧП могут быть получены путем представления изометрических операторов, характеризующих входной и выходной трансформирующие ЧП из состава канонической формы, в виде каскадных соединений базовых элементов (см. рисунок 3).

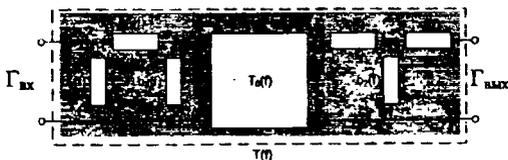


Рисунок 3 – Вариант эквивалентной схемы линейного ЧП в диапазоне частот

Содержанием третьей главы диссертации стали результаты разработки методик расчета параметров моделей ВЧ элементов различных типов: отражательного типа, проходного типа, недиссипативных ВЧ элементов. Результатами расчетов, предусмотренных методиками, являются эквивалентные схемы, наилучшим образом удовлетворяющие критерию минимума функции ошибки ε в рассматриваемом диапазоне частот

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^Q \frac{W_n}{Q_n} |G_n(\omega_q) - M_n(\omega_q)|^{L_n}, \quad (3)$$

где N – количество целей оптимизации, Q_n – количество частотных точек, попавших внутрь целевого диапазона; $\omega_1 < \omega_q < \omega_2$ – частоты, на которых проводится анализ; G_n – целевая функция; M_n – оптимизируемый параметр; $|G_n - M_n|$ – ошибка параметра; W_n – вес параметра; L_n – порядок нормировки, определяющий норму вектора ошибки. Идеальная эквивалентная схема удовлетворяет условию $\varepsilon = 0$.

Методика параметрического синтеза схем замещения ВЧ элементов отражательного типа включает в себя следующие этапы.

1. Расчет реактивных сопротивлений элементов эквивалентной схемы (см. рисунок 2) по формулам:

для цепи Т-типа

$$x_1(\xi, \omega_0, R_0) = \frac{\sqrt{R_1(\omega_0)R_0} - \sqrt{R_1^2(\omega_0) + X_1^2(\omega_0)} \cos \xi}{\sin(\delta_1 + \xi)};$$

$$x_2(\xi, \omega_0, R_0) = \frac{\sqrt{R_1(\omega_0)R_0}}{\sin(\delta_1 + \xi)}; \quad x_3(\xi, \omega_0, R_0) = \frac{\sqrt{R_1(\omega_0)R_0} - R_0 \cos(\delta_1 + \xi)}{\sin(\delta_1 + \xi)};$$

для цепи П-типа

$$x_1(\xi, \omega_0, R_0) = \frac{\sqrt{(R_1^2(\omega_0) + X_1^2(\omega_0))R_0} \sin \xi}{\sqrt{R_0} \cos(\delta_1 + \xi) - \sqrt{R_1(\omega_0)}};$$

$$x_2(\xi, \omega_0, R_0) = \frac{\sqrt{R_0}}{\sqrt{G_1(\omega_0)}} \sin \xi; \quad x_3(\xi, \omega_0, R_0) = \frac{R_0 \sin \xi}{\cos \xi - \sqrt{G_1(\omega_0)R_0}},$$

где ξ – переменный аргумент; ω_0 – рабочая частота; R_0 – резистивное сопротивление, входящее в состав эквивалентной схемы; R_1 ($G_1 = R_1(R_1^2 + X_1^2)^{-1}$) – активное сопротивление (проводимость) исходного ДП; $\delta = \sqrt{G_1 R_1}$; X_1 – реактивное сопротивление исходного ДП.

2. Расчет параметров элементов эквивалентной схемы на рабочей частоте

$$\text{elem}_i = \begin{cases} x_i(\xi, \omega_0, R_0)(\omega_0)^{-1} & \text{если } x_i(\xi, \omega_0, R_0) \geq 0; \\ (\omega_0 x_i(\xi, \omega_0, R_0))^{-1} & \text{если } x_i(\xi, \omega_0, R_0) < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $i = (1, 2, 3)$.

3. Расчет характеристики эквивалентной схемы, являющейся целевой функцией, для рассчитанных параметров элементов.

Расчет сопротивлений элементов в полосе частот

$$X_i(\xi, \omega_0, R_0) = \begin{cases} \frac{\omega}{\omega_0} x_i(\xi, \omega_0, R_0) & \text{если } x_i(\xi, \omega_0, R_0) \geq 0; \\ \frac{\omega_0}{\omega} x_i(\xi, \omega_0, R_0) & \text{если } x_i(\xi, \omega_0, R_0) < 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $i = (1, 2, 3)$; ω – текущая частота.

Расчет входного сопротивления Z эквивалентной схемы в полосе частот и характеристики, являющейся целевой функцией. Проверка эквивалентной схемы на предмет соответствия критерию минимума функции ошибки (3).

4. Если эквивалентная схема не удовлетворяет выбранному критерию, необходимо изменить значения параметров ξ , ω , R_0 и повторить шаги 1-4. Изменение параметра ξ осуществляется в пределах от 0 до 360° с некоторым шагом $\Delta\xi$; ω и R_0 – в пределах диапазона значений исходных данных.

Исходными данными для параметрического синтеза схем замещения ВЧ элементов проходного типа с потерями служит одна из систем параметров (волновая матрица передачи \dot{T} , например), характеризующая этот элемент, а также величины волновых сопротивлений на его входе ρ_1 и выходе ρ_2 . Методика расчета схемы замещения, аналогичной приведенной на рисунке 3, состоит из следующих этапов:

1. Расчет параметров идеально согласованного ЧП, через характеристические числа пучка квадратичных форм действительной мощности λ_1 , λ_2

$$\dot{i}_{110} = \sqrt{\lambda_1} e^{j\varphi_{11}}, \quad \dot{i}_{220} = \sqrt{\lambda_2} e^{j\varphi_{22}}. \quad (6)$$

Характеристические числа могут быть рассчитаны по формуле

$$\lambda_{1,2} = 0.5 \left((r_{11} - r_{22}) \pm \sqrt{(r_{11} - r_{22})^2 + 4 \det(R)} \right), \quad (7)$$

где $\dot{R} = \begin{pmatrix} \dot{r}_{11} & \dot{r}_{12} \\ \dot{r}_{21} & \dot{r}_{22} \end{pmatrix}$ – эрмитова матрица Грама скалярных произведений трансформированных базисных векторов в линейном пространстве, отражающая передаточные свойства ЧП в прямом направлении. $\dot{R} = \dot{T}^* J \dot{T}$, $J = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$.

Аргументы элементов идеально согласованного четырехполосника могут быть рассчитаны с помощью следующих выражений:

$$\arg(\dot{S}_{210}) = \arg(\dot{S}_{21}) - \arg(1 - \text{th}(\alpha) e^{j\varphi_\alpha} \dot{S}_{11} - \text{th}(\beta) e^{j\varphi_\beta} \dot{S}_{22} + \text{th}(\alpha) \text{th}(\beta) e^{j(\varphi_\alpha + \varphi_\beta)} \dot{\Delta}_S) + \varphi + \psi; \quad (8)$$

$$\arg(\dot{S}_{120}) = \arg(\dot{S}_{210}) + \arg(\dot{S}_{12}) - \arg(\dot{S}_{21}) + \varphi + \psi, \quad (9)$$

где \dot{S}_{210} , \dot{S}_{120} – параметры рассеяния идеально согласованного ЧП; \dot{S}_{ij} – пара-

метры рассеяния исходного элемента ($i=1,2; j=1,2$); $\dot{\Delta}_S$ – детерминант матрицы \dot{S} ; φ , ψ – соответственно входной и выходной переменные аргументы.

2. *Расчет параметров входной и выходной трансформирующих цепей с волновыми матрицами передачи T_1 и T_2 , входящими в состав выражения (2).*

$$\beta = \text{arth} \left(\frac{r_{11} - \lambda_1}{r_{12}} \right); \varphi_\beta = \pi - \varphi_{R12}; \alpha = \text{arth} \left(\frac{1_{11}\lambda_2 - 1}{1_{12}\lambda_2} \right); \varphi_\alpha = \pi - \varphi_{L12}, \quad (10)$$

где $\dot{L} = \begin{pmatrix} i_{11} & i_{12} \\ i_{21} & i_{22} \end{pmatrix}$ – эрмитова матрица Грама скалярных произведений трансформированных базисных векторов в линейном пространстве, отражающая передаточные свойства ЧП в обратном направлении; $\dot{L} = \dot{D}^* \dot{J} \dot{D}$,

$$\dot{D} = \frac{1}{\det \dot{T}} \begin{pmatrix} i_{11} & -i_{21} \\ -i_{12} & i_{22} \end{pmatrix}; \text{знак «+» означает эрмитово сопряжение.}$$

3. *Оптимизация модели в соответствии с заданным критерием.* Под оптимизацией модели ЛЧП в данном случае понимается нахождения таких значений аргументов φ и ψ в выражении (2), при которых модель наилучшим образом соответствует критерию (3). Целевая функция (или их набор), входящая в состав критерия, может быть выбрана в зависимости от решаемой задачи.

Методика параметрического синтеза схем замещения минимально-фазовых ВЧ элементов.

1. *Расчет значения переменного аргумента φ_{opt}* , при котором модель наилучшим образом удовлетворяет критерию (3), когда в качестве целевой функции используется коэффициент передачи

$$\varphi_{\text{opt}} = \frac{\omega_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln(1 - \Gamma_1^2(\omega))}{\omega^2 - \omega_0^2} d\omega. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет рассчитать значение φ_{opt} , если известен только модуль входного коэффициента отражения минимально-фазового НЧП, т.е. при минимуме исходных данных. В том случае, когда интеграл в выражении (11) является не решаемым, его вычисление целесообразно производить одним из численных методов.

2. *Расчет классической матрицы передачи трансформирующего ЧП на рабочей частоте в соответствии с выражением (1) при $\varphi = \varphi_{\text{opt}}$:*

$$\dot{A}_1 = \begin{pmatrix} m_1 \cos(\beta_1 - \varphi_{\text{opt}}) & j m_1 \sin(\beta_1 - \varphi_{\text{opt}}) \\ j n_1 \sin(\alpha_1 - \varphi_{\text{opt}}) & n_1 \cos(\alpha_1 - \varphi_{\text{opt}}) \end{pmatrix}.$$

3. *Выбор структуры эквивалентной схемы и расчет параметров ее элементов в соответствии с пунктами 1-3 методики моделирования ВЧ элементов отражательного типа.*

В четвертой главе диссертации приведены результаты моделирования типовых ВЧ элементов. В среде Visual Studio.NET разработано программное обеспечение, реализующее методики, описанные в главе 3. Основным назначе-

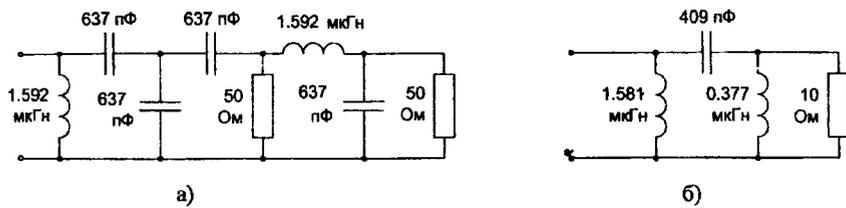
нием программы является проверка работоспособности и анализ эффективности разработанных методик. С этой целью проведено моделирование типовых ВЧ элементов, обладающих различными свойствами по передаче действительной мощности: ЧП без потерь (на примере неоднородностей в микрополосковых ЛП), пассивных ДП (на примере антенн) и активных ЧП (на примере транзисторов). В качестве исходных данных для расчета эквивалентных схем могут быть использованы как результаты измерений, так и расчетные параметры.

С целью многосторонней оценки эффективности разработанных методик использованы: а) результаты машинного моделирования (неоднородности типа «разрыв» и «изгиб под прямым углом», вибраторная антенна); б) тестовая нагрузка; в) полунатурный эксперимент (спиральная антенна, биполярный транзистор). Сравнительный анализ результатов моделирования типовых неоднородностей в микрополосковой линии проведен с использованием эквивалентных схем, параметры которых рассчитаны с помощью выражений в замкнутой форме, а также с использованием моделей из библиотеки САПР Microwave Office. Исследована возможность экстраполяции внешних параметров неоднородностей с помощью эквивалентных схем.

В работе проведено моделирование неоднородностей типа «разрыв», «скачок по ширине» и «изгиб» микрополоскового проводника. Для рассчитанной эквивалентной схемы неоднородности «скачок по ширине» значение функции ошибки в диапазоне частот 0–10 ГГц составило $9 \cdot 10^{-6}$ против $5.555 \cdot 10^{-5}$ для альтернативной эквивалентной схемы, приведенной в литературе (улучшение приблизительно в 6 раз). При моделировании неоднородности «изгиб под прямым углом с отражателем» выигрыш в уменьшении величины функции ошибки составляет приблизительно 7 раз.

Использование тестовой нагрузки, структура и параметры которой выбраны случайно, позволяет без потери общности оценить эффективность моделирования ДП сложной структуры с помощью трехэлементной схемы замещения. В качестве тестовой нагрузки использована цепь лестничной структуры без резонансных контуров, содержащая как реактивные элементы, так и активные сопротивления. Структура и параметры тестовой нагрузки приведены на рисунке 4а. Параметры тестовой нагрузки, выступившей в качестве «черного ящика», выбраны произвольно. Исходными данными для моделирования послужили значения активной и реактивной составляющих входного комплексного сопротивления «черного ящика» в диапазоне частот 4,5 – 5,5 МГц.

Результатом моделирования стала схема замещения, приведенная на рисунке 4б. Графики сравнения характеристик тестовой нагрузки и ее схемы замещения в диапазоне частот 4,5 – 5,5 МГц приведены на рисунке 5.



а) – тестовая нагрузка; б) – схема замещения
Рисунок 4 – Тестовая нагрузка и ее схема замещения

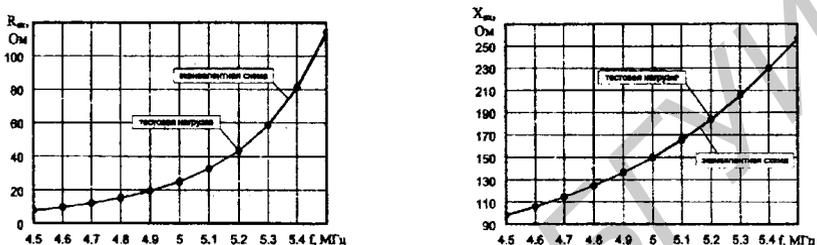


Рисунок 5 – Характеристики тестовой нагрузки и ее эквивалентной схемы в диапазоне частот 4,5 – 5,5 МГц

Поведение характеристик схемы замещения в диапазоне частот, выходящем за рамки исходных данных, отражено на рисунке 6, где приведены графики сравнения характеристик тестовой нагрузки и ее эквивалентной схемы в диапазоне частот 0 – 10 МГц.

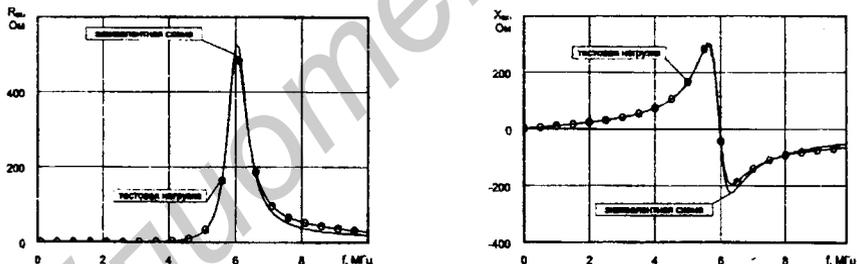


Рисунок 6 – Характеристики тестовой нагрузки и ее эквивалентной схемы в диапазоне частот 0 – 10 МГц

Результаты моделирования тестовой нагрузки показали, что разработанная методика позволяет рассчитывать схемы замещения, содержащие минимально необходимое число элементов, для цепей, обладающих относительно сложной структурой. Величина ошибки параметрической оптимизации не превысила 1,06%.

Полунатурный эксперимент в виде моделирования конической спиральной антенны с малым углом конусности $\beta = 6^\circ$, постоянным шагом намотки $S = 2$ см и количеством витков $n = 6$ проведен на основе результатов экспериментального исследования входного сопротивления антенны в полосе

частот 1,88–3 ГГц, проведенного в кандидатской диссертации Рунова А.В. «Исследования конических спиральных антенн в диапазоне частот» (Минск, 1964). Зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления антенны от частоты, полученные экспериментально, приведены на рисунке 7.

В работе Рунова А.В. исследование активного и реактивного сопротивлений проведено раздельно. Такой подход при построении схем замещения трансформируется в использование различных целевых функций при вычислении критерия.

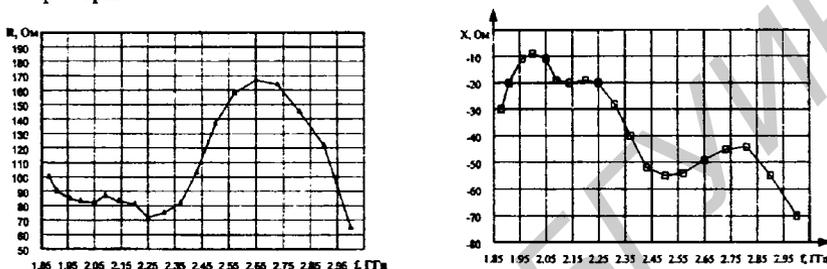


Рисунок 7 – Активная и реактивная составляющие входного сопротивления антенны

Для активного и реактивного сопротивлений функция ошибки определяется соответственно выражениями

$$\epsilon_r = \sum_{q=1}^{Q_n} \frac{1}{Q_n} \left(\left| R_{\text{шт}}(f_q) - R_{\text{мод}}(f_q) \right| \right); \quad (12)$$

$$\epsilon_r = \sum_{q=1}^{Q_n} \frac{1}{Q_n} \left(\left| X_{\text{шт}}(f_q) - X_{\text{мод}}(f_q) \right| \right). \quad (13)$$

По причине сложной зависимости активного и реактивного сопротивлений от частоты возникает необходимость разбиения частотного диапазона, в котором проводится моделирование, на интервалы. Анализ зависимости активного сопротивления от частоты показал целесообразность выделения двух интервалов частот: 1,88–2,25 ГГц, в котором активное сопротивление примерно постоянно, и 2,25–3 ГГц, где оно существенно зависит от частоты. В связи с этим построение схем замещения, оптимальных по критерию (12), проведено в диапазонах частот 1,88–2,25 ГГц и 2,25–3 ГГц. Исходя из аналогичных соображений схемы замещения, оптимальные по критерию (13), разработаны в диапазонах 1,88–2,09 ГГц; 2,09–2,5 ГГц и 2,5–3 ГГц. Схема замещения, оптимальная по критерию (12) в полосе частот 1,88–2,25 ГГц и сравнительный график активных сопротивлений приведены на рисунке 8. Значение функции ошибки в рассматриваемом диапазоне частот равно 3,07 %.

Результаты построения схемы замещения в диапазоне частот 2,25–3 ГГц приведены на рисунке 9. Значение функции ошибки в рассматриваемом диапазоне частот равно 5,56 %. Значение функции ошибки реактивного сопротивления для интервала 1,88–2,09 ГГц равно 1,44 %, для интервала 2,09–2,5 ГГц – 5,46 %, для интервала 2,5–3 ГГц – 1,78 %.

С целью анализа эффективности разработанной методики моделирования активных ЧП проведен расчет схемы замещения биполярного ВЧ транзистора общего назначения АТ-41586 в режиме работы $U_{кэ} = 8 В$, $I_k = 10 мА$. В качестве исходных данных для расчета использованы параметры рассеяния, приведенные в техническом описании транзистора в диапазоне частот 100-2000 МГц. Результаты расчета приведены на рисунке 10.

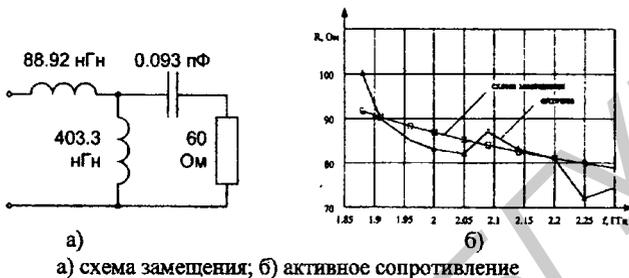


Рисунок 8 – Результаты расчета схемы замещения спиральной антенны в диапазоне частот 1,88 – 2,25 ГГц

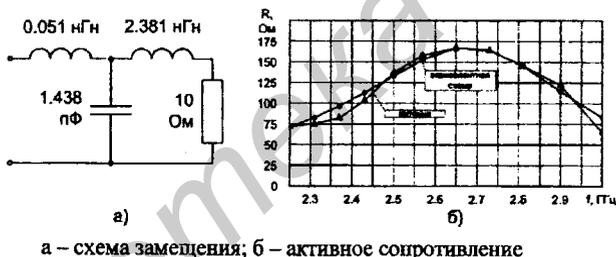


Рисунок 9 – Результаты расчета схемы замещения спиральной антенны в диапазоне частот 2,25 – 3 ГГц

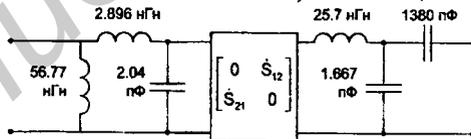


Рисунок 10 – Модель транзистора АТ-41586

Модель транзистора представляет собой его каноническую форму, параметры идеально согласованного четырехполюсника, входящего в ее состав, приведены в таблице 1. В качестве реализации входной и выходной трансформирующих цепей соответственно выбраны цепь типа П и типа Т на элементах с сосредоточенными параметрами. На рисунке 11 отображены зависимости коэффициента передачи S_{21} транзистора и его модели.

Таблица 1 – Параметры идеального ЧП из состава модели транзистора AT41586

Частота, МГц	$ \hat{S}_{21} $	$\arg(\hat{S}_{21})$,		Частота, МГц	$ \hat{S}_{21} $	$\arg(\hat{S}_{21})$,		$ \hat{S}_{12} $	$\arg(\hat{S}_{12})$,	
		град.				град.			град.	
100	49,44	-512,21	0,02	700	13,54	-536,45	0,02	0,02	-574,45	
200	32,79	-482,15	0,02	800	12,30	-536,38	0,03	0,03	-567,38	
300	24,75	-529,32	0,02	900	11,27	-535,21	0,04	0,04	-560,21	
400	20,24	-539,34	0,02	1000	10,45	-536,87	0,05	0,05	-556,87	
500	17,36	-540,70	0,02	1500	7,61	-564,92	0,09	0,09	-569,92	
600	15,16	-541,30	0,00	2000	6,14	-619,02	0,14	0,14	-617,02	

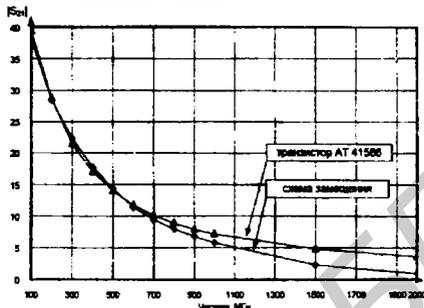


Рисунок 11 – Зависимости коэффициентов передачи транзистора AT-41586 и его эквивалентной схемы от частоты

Значение функции ошибки коэффициента передачи S_{21} в полосе моделирования для эквивалентной схемы, приведенной производителем, равно 1,0659; что составляет приблизительно 0,43% от диапазона значений.

В диссертационной работе проведен расчет схемы замещения для полевого транзистора ATF-54143. Сравнение с эквивалентной схемой, приведенной производителем в технических данных, показало уменьшение среднеквадратичного значения ошибки более чем в 4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В диссертационной работе рассмотрена возможность и показана эффективность применения методов, основанных на применении геометрических аналогий, для моделирования элементов высокочастотного тракта. В работе показано, что математическое моделирование высокочастотных устройств базируется на возможности представления их в канонической форме, характеризующей стационарные свойства моделируемого элемента, а также его рассогласование с линией передачи. В состав канонической формы входят трансформирующие четырехполосники без потерь, их свойства описываются с помощью классической матрицы передачи для элемента с сосредоточенными параметрами и волновых матриц передачи и рассеяния для элемента с распределенными параметрами. Структура вышеперечисленных матриц определяется из условия унитарности волновой матрицы рассеяния произвольного недиссипативного четырехполосника с использованием соответствующих координатных преобразований [1-А, 2-А].

2. Разработаны математические модели двухполосных элементов высокочастотного тракта в классе линейных алгебраических уравнений, отличающиеся представлением элемента в виде соединения двухполосника, согласованного с линией передачи, и трансформирующей цепи. Предложено трансформирующую цепь рассчитывать с помощью выражения для классической матрицы передачи, содержащего коэффициенты трансформации, что позволяет повысить точность (уменьшить среднеквадратичное значение ошибки) параметрической оптимизации в 1,5-2 раза.

Разработаны математические модели активных элементов проходного типа одноканального высокочастотного тракта в классе линейных алгебраических уравнений, отличающиеся представлением элементов в виде соединения активного четырехполосника, согласованного по входу и выходу, а также входной и выходной трансформирующих цепей. Разработанные модели позволили повысить точность (уменьшить среднеквадратичное значение ошибки) параметрической оптимизации в 3-4 раза.

Разработанные математические модели раскрывают возможности высокочастотных элементов по передаче действительной мощности и варианты реализации этих возможностей с помощью недиссипативных согласующих цепей, что позволяет на их основе синтезировать многокаскадные согласующие цепи лестничной структуры [5-А].

3. Разработана методика параметрического синтеза схем замещения минимально-фазовых элементов высокочастотного тракта, отличающаяся использованием прямого преобразования Гильберта амплитудно-частотной характеристики [3-А]. В качестве целевой функции при расчете среднеквадратического значения ошибки параметрической оптимизации выступает коэффициент передачи. Использование преобразования Гильберта позволяет по частотной зависимости только модуля коэффициента передачи рассчитать значение переменного аргумента, выступающего в роли параметра оптимизации, при котором модель наилучшим образом отвечает критерию наименьшей средней разности. Тем самым разработанная методика позволяет сократить необходимое число экспериментальных данных в 2 раза и уменьшить время, затрачиваемое на расчет, в 1,5-2 раза.

4. Разработана методика параметрического синтеза схем замещения пассивных элементов отражательного типа одноканального высокочастотного тракта. Отличие разработанной методики заключается в использовании коэффициентов трансформации в составе классической матрицы передачи, что позволяет моделировать высокочастотные элементы, обладающие более сложной зависимостью характеристик от частоты [4-А].

5. Разработана методика параметрического синтеза схем замещения активных элементов проходного типа одноканального высокочастотного тракта, в том числе в зоне потенциальной неустойчивости. Отличие разработанной методики заключается в том, что при расчете волновой матрицы передачи идеально согласованного четырехполосника из состава модели определяются не только модуль элементов матрицы, но и их аргументы, что позволяет проводить моде-

лирование в диапазоне частот. Для эквивалентной схемы полевого транзистора ATF-54143 достигнуто уменьшение среднеквадратичного значения ошибки более чем в 4 раза.

6. По результатам исследования изометрических свойств трансформирующих цепей с перестраиваемым фазовращателем разработан фильтр с плавной перестройкой полосы пропускания и получен патент на полезную модель [18-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Алгоритм математического моделирования реализован посредством создания открытого программного обеспечения с использованием перспективной технологии .NET, которое может выступать в качестве самостоятельного продукта или входить в состав более крупного программного комплекса. Программа позволяет найти параметры модели, характеристики которой отвечают свойствам моделируемой цепи в заданной полосе частот. С помощью программы проведено моделирование типовых высокочастотных элементов и устройств с использованием различных целевых функций: коэффициента передачи, коэффициента отражения, комплексного сопротивления. Таким образом, на основании разработанных методик может быть создана библиотека моделей высокочастотных элементов, в том числе созданных по отечественным технологиям. Поскольку эквивалентные схемы могут быть получены на основании экспериментальных данных, появляется возможность расширения такой библиотеки самим пользователем. Практическая важность рассмотренных представлений заключается в том, что каноническое представление произвольного четырехполюсника естественным образом порождает структуру согласующих цепей и устройств, реализующих стационарные энергетические свойства высокочастотного элемента. С использованием разработанных моделей источника сигналов и комплексной нагрузки рассчитан преселектор, используемый в синтезаторе частот генератора, управляемого напряжением, в составе опытного образца радиостанции «Сириус-П» в рамках выполнения пункта 3 Государственной научно-технической программы создания современных средств и систем радиосвязи и развития их производства в Республике Беларусь на 2007–2010 гг.

Таким образом, предлагаемые в работе модели целесообразно применять при решении задач построения высокочастотных трактов, согласованных по передаче мощности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и сборниках

1. Пегасин, М.В. Дуальные матричные представления линейных четырехполосников / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, В.Н. Шашок // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2005. – № 2(7). – С. 44–47.
2. Пегасин, М.В. Преобразование волновых матриц линейных многополосников / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, В.Н. Шашок // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2006. – № 2(11). – С. 38–41.
3. Моделирование емкостной неоднородности типа «разрыв» в микрополосковой линии / А.Г. Онищук, Д.В. Пегасин, М.В. Пегасин, В.Н. Шашок // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2007. – № 3(16). – С. 44–48.
4. Пегасин, М.В. Методика расчета эквивалентных схем минимально-фазовых четырехполосников / М.В. Пегасин // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2008. – № 1(18). – С. 50–53.
5. Пегасин, М.В. Методика структурно-параметрического синтеза согласующих устройств с наращиванием каскадов согласования / М.В. Пегасин // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2008. – № 2(19). – С. 60–65.

Статьи в сборниках материалов конференций

6. Пегасин, М.В. Преобразование матричных представлений линейных четырехполосников с сосредоточенными параметрами / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, В.Н. Шашок // VII воен.-науч. конф. Воен. акад. Респ. Беларусь: сб. докл., Минск, 26–27 янв. 2005 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2005. – С. 142–147.

Тезисы докладов

7. Пегасин, М.В. Каноническая структура одноканального тракта передачи сигналов / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, В.Н. Шашок // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. и докл. Междунар. науч.-техн. конф., Нижний Новгород, 3–9 окт. 2005 г. / Нижегородский гос. техн. ун-т; редкол.: В.А. Неганов [и др.]. – Нижний Новгород, 2005. – С. 115.
8. Пегасин, М.В. Матричные представления и группы подстановок в линейном пространстве сигналов / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, В.Н. Шашок // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. и докл. Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 11–17 сент. 2006 г. / Самарское книжное издательство; редкол.: В.А. Неганов [и др.]. – Самара, 2006. – С. 65.
9. Пегасин, М.В. Структурно-параметрическое моделирование квазинедиссипативных элементов ВЧ / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, В.Н. Шашок // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. и докл. Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 11–17 сент. 2006 г. / Самарское книжное издательство; редкол.: В.А. Неганов [и др.]. – Самара, 2006. – С. 136.
10. Пегасин, М.В. Применение преобразования Гильберта к решению задачи структурно-параметрического моделирования / М.В. Пегасин, Д.В. Пегасин // Новые математические методы и компьютерные технологии в проек-

- тировании, производстве и научных исследованиях: тез. докл. республ. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 12–14 марта 2007 г. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2007. – С. 112–113.
11. Пегасин, М.В. Структурно-параметрическое моделирование неоднородностей в микрополосковой линии / М.В. Пегасин, Д.В. Пегасин // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: тез. докл. республ. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 12–14 марта 2007 г. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2007. – С. 113–114.
 12. Пегасин, М.В. Оптимизация параметров моделирующих цепей для ВЧ элементов / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, Д.В. Пегасин // IX воен.-науч. конф. Воен. акад. Респ. Беларусь: сб. тез. докл., Минск, 29–30 марта 2007 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь – Минск, 2007. – С. 304.
 13. Онищук А.Г. Псевдокомплексное представление радиосигналов / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, Д.В. Пегасин // IX воен.-науч. конф. Воен. акад. Респ. Беларусь: сб. тез. докл., Минск, 29–30 марта 2007 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2007. – С. 303.
 14. Пегасин, М.В. Структурный анализ транзисторных модулей / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, Д.В. Пегасин // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. Междунар. науч.-техн. конф., Казань, 17–23 сент. 2007 г. / Казанский гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева. – Казань, 2007. – С. 117.
 15. Пегасин, М.В. Структурно-параметрическое моделирование пассивных двухполосников на ВЧ / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, Д.В. Пегасин // Проблемы развития и интеграции науки, профессионального образования и права в глобальном мире: тез. Всероссийской науч.-техн. конф., Красноярск, 21–22 нояб. 2007 г. / Сибирский федеральный ун-т. – Красноярск, 2007. – С. 305–310.
 16. Пегасин, М.В. Оценка возможностей трехэлементных цепей по согласованию емкостной нагрузки / А.Г. Онищук, Д.В. Пегасин, М.В. Пегасин // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 15–21 сент. 2008 г. / Самарское книжное издательство. – Самара, 2008. – С. 98.
 17. Пегасин, М.В. Канонические представления двухполосников с комплексными параметрами / А.Г. Онищук, Д.В. Пегасин, М.В. Пегасин // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. VIII Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 15-18 сентября 2010 г. / редкол. В.Ф. Дмитриков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 54

Заявки на изобретения, патенты

18. Устройство для плавной регулировки полосы пропускания: пат. 4428 Респ. Беларусь, МПК (2006) Н 03Н 7/00 / А.Г. Онищук, М.В. Пегасин, Д.В. Пегасин; заявитель УО «ВА РБ». – № u20070821; заявл. 21.11.07; опубл. 30.06.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 246–247.



РЭЗІЮМЭ

Пегасін Міхаіл Уладзіміравіч

Параметрычны сінтэз чатырохполюснакаў
пры мадэліраванні элементаў высокачастотнага тракту
на аснове тэорыі лінейных апэратараў у вектарнай прасторы

Ключавыя словы: мадэліраванне, унітарная матрыца, кананічная форма, ізаметрычны апэратар, пераўтварэнне Гільберта, квадратычная форма, рэчаісная магутнасць.

Мэта работы: павышэнне эфектыўнасці аўтаматызаванага прасктавання радыётэхнічных устройстваў.

Асноўныя вынікі работы: на аснове тэорыі лінейных апэратараў у вектарнай прасторы распрацаваны матэматычныя мадэлі і метадыкі параметрычнага сінтэзу схемаў замяшчэння розных высокачастотных элементаў: без страт, пасіўных атражальнага тыпу, пасіўных і актыўных прахаднога тыпу. Мадэлі раскрываюць кананічную форму высокачастотных элементаў, якая атражае іх патэнцыяльныя магчымасці па перадачы рэчаіснай магутнасці, а так сама варыянты рэалізацыі гэтых магчымасцей з дапамогай ланцугой дапасавання, якія не маюць страт. На падставе распрацаваных метадык зроблены разлік схемаў замяшчэння тыпавых высокачастотных элементаў, якія маюць шырокае практычнае прымяненне. Праверка адэкватнасці атрыманых мадэляў, працаздольнасці і эфектыўнасці распрацаваных метадык паказала, што іх выкарыстанне дазваляе павялічыць дакладнасць параметрычнай аптымізацыі (паменшыць сярэньквдратычнае значэнне памылкі) у параўнанні з вядомымі з літаратуры аналагамі ў 1,5-4 разы.

Ступень выкарыстання: навуковыя вынікі работы выкарыстаны пры правядзенні навукова-даследчых і вопытна-канструктарскіх прац па стварэнні вопытнага ўзору радыёстанцыі.

Галіна прымянення: аўтаматызаванае праектаванне сістэм перадачы сігналаў з аптымальнымі энергетычнымі характэрыстыкамі.

РЕЗЮМЕ

Пегасин Михаил Владимирович

Параметрический синтез четырехполосников
при моделировании элементов высокочастотного тракта
на основе теории линейных операторов в векторном пространстве

Ключевые слова: моделирование, унитарная матрица, каноническая форма, изометрический оператор, преобразование Гильберта, квадратичная форма, действительная мощность.

Цель работы: повышение эффективности автоматизированного проектирования радиотехнических устройств.

Основные результаты работы: на основе теории линейных операторов в векторном пространстве разработаны математические модели и методики параметрического синтеза схем замещения различных высокочастотных элементов: без потерь, пассивных отражательного типа, пассивных и активных проходного типа. Модели раскрывают каноническую форму высокочастотных элементов, отражающую их потенциальные возможности по передаче действительной мощности, а также варианты реализации этих возможностей с помощью согласующих цепей без потерь. На основании разработанных методик рассчитаны схемы замещения типовых высокочастотных элементов, имеющих широкое практическое применение. Проверка адекватности полученных моделей, работоспособности и эффективности разработанных методик показала, что их использование позволяет увеличить точность параметрической оптимизации (уменьшить среднеквадратическое значение ошибки) по сравнению с известными из литературы аналогами в 1,5 - 4 раза.

Степень использования полученных результатов: научные результаты работы использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию опытного образца радиостанции.

Область применения: автоматизированное проектирование систем передачи сигналов с оптимальными энергетическими характеристиками.

ABSTRACT

Pegasin Mikhail Vladimirovich

Parametric synthesis of two-port networks
in the high-frequency section elements simulation
on basis of theory of linear operators in vector space

Key words: simulation, unitary matrix, canonical form, isometric operator, Hilbert transform, quadratic form, actual power.

The purpose of this work: is effectiveness increase of wireless devices computer-aided design.

The findings of the research: mathematical models and procedures of parametrical synthesis of high-frequency elements substitution circuits were worked out on the basis of theory of linear operators in vector space. Different types of elements were contemplated, such as lossless elements, passive one-port circuits, passive and active two-port circuits. These models expand the potentiality of the power transfer elements of high frequency channels and ways of realization of this potentiality with lossless matching circuits. On the basis of worked out procedures equivalent circuits are calculated for standard high-frequency elements, having wide practical application. Model verification has been carried out and the procedures have been tested, proving the ability to increase accuracy of parametric optimization (to reduce root-mean-square error) by 50 to 300 percent as compared with common prototypes.

Extent of implementation: the findings of the work have been already used for scientific research as well as experimental design works to create a test sample of a radio station.

Area of application: computer-aided design of transmission systems with optimal energy characteristics.

Научное издание

Пегасин
Михаил Владимирович

**Параметрический синтез четырехполосников
при моделировании элементов высокочастотного тракта
на основе теории линейных операторов
в векторном пространстве**

специальность 05.12.04 – радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 21.12.2010.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 60 экз.	Заказ 866.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6.