

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.372.512

Васильев
Александр Дмитриевич

**Структурно-параметрический синтез четырехполюсников при
широкополосном согласовании и моделировании на основе
аппарата Т-матриц**

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 –

ВОРОПАЕВ Юрий Павлович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиотехники учреждения
образования «Военная академия Республики
Беларусь»

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

МАЛЕВИЧ Игорь Юрьевич,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой радиотехнических систем
учреждения образования «Белорусский
государственный университет информатики и
радиоэлектроники»

АПОРОВИЧ Владимир Андреевич,
кандидат технических наук, начальник сектора
унитарного предприятия «Научно-
исследовательский институт средств
автоматизации»

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

Научно-производственное республиканское
унитарное предприятие «КБ Радар».

Защита состоится «25» ноября 2010 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите
диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп.1, ауд. 232, тел. 293-89-89

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Тенденцией развития современных приемопередающих систем является повышение требований к уровню преобразуемой мощности, ширине полосы рабочих частот, качеству частотных характеристик, надежности и технологичности при одновременном уменьшении веса и габаритов.

Важной частью проблемы создания современных приемопередающих систем является проблема широкополосного согласования элементов тракта с различными частотно-зависимыми иммитансами. Она является сложной в теоретическом плане, но в то же время ее решение представляет большую практическую значимость, так как позволяет обеспечить оптимальное построение широкополосных радиотехнических трактов.

Проблема синтеза широкополосных согласующих устройств является одной из важнейших в теории цепей. Ее решение аналитическими методами наталкивается на существенные трудности. Известные решения ограничиваются чаще всего согласованием источника сигнала и нагрузки, аппроксимированных относительно простыми цепями, которые содержат один или два реактивных элемента. Между тем во многих практически важных случаях измеренные иммитансы источника сигнала и нагрузки могут носить произвольный характер, а представление их простыми эквивалентными схемами зачастую приводит к большим погрешностям, которые не могут быть учтены при расчете согласующего устройства.

В последнее время появились работы, содержащие аналитические методы широкополосного согласования комплексных источника сигнала и нагрузки, описываемых эквивалентами с произвольным конечным числом элементов. Однако методика расчета таких эквивалентов по измеренным данным (структурно-параметрическое моделирование) в известной автору литературе отсутствует. Поэтому исследования, направленные на создание математического аппарата, позволяющего осуществить системный подход в решении различных задач широкополосного согласования и моделирования, представляются достаточно актуальными.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Работа выполнена в соответствии с перечнем направлений исследований в Вооруженных Силах Республики Беларусь для определения тематики диссертационных исследований адъюнктов и докторантов на 2006–2010 годы, определенным командованием ВВС и войск ПВО согласно пункту 53 «Разработка новой методики широкополосного согласования комплексных нагрузок».

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении за-

даний Государственной программы «Разработка физических и технологических основ создания высокоскоростных фотодетекторов для функциональных оптоэлектронных устройств микроволнового диапазона» («Электроника-1.26», № ГР 20064182), Государственной комплексной программы научных исследований «Физические и технологические основы создания новых материалов, элементной базы и разработка устройств опто-, микро-, наноэлектроники, информационно-измерительных систем и приборов» (ГКПНИ «Электроника», утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28.11.2005 г. № 1339).

Материалы диссертации использованы в НИР «Разработка рекомендаций по уменьшению эффективной площади рассеяния слабонаправленных антенн летательных аппаратов» (шифр «Невидимка») [20-А].

Цель и задачи исследования

Целью настоящей диссертационной работы является улучшение частотных и энергетических характеристик радиотехнических трактов радиоэлектронных систем.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Получены аналитически строгие соотношения для расчета в заданных сечениях линейного радиотехнического тракта параметров элементарных каскадов широкополосного согласующего устройства (СУ), оптимальных по выбранному критерию в заданной полосе частот.

2. Разработана методика структурно-параметрического синтеза согласующих устройств в заданных сечениях линейного радиотехнического тракта с учетом тепловых потерь в их элементах, позволяющая оптимизировать коэффициент передачи мощности (КПМ) и оценивать реальные потенциальные характеристики передачи мощности в заданной полосе частот, используя информацию о функциональных узлах тракта без аппроксимации их эквивалентными схемами.

3. Разработана методика структурно-параметрического моделирования двухполосников и четырехполосников цепями лестничного типа в заданных полосах частот в классическом RLC-базисе.

Объектом исследования являются радиотехнические тракты радиоэлектронных систем; *предметом* – новые численно-аналитические методы решения задач широкополосного согласования и структурно-параметрического моделирования элементов радиотехнических трактов на основе использования аппарата волновых T-матриц.

Выбор объекта и предмета исследования обусловлен актуальностью разработки радиотехнических устройств с оптимальной передачей широкополосных и сверхширокополосных сигналов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитический метод расчета в заданных сечениях линейного радио-

технического тракта параметров элементарных каскадов СУ, отличающийся использованием аппарата Т-матриц и отсутствием погрешностей аппроксимации согласуемых элементов тракта эквивалентными схемами, что позволяет учитывать тепловые потери в элементах СУ и обеспечивать передачу максимальной мощности по радиотехническому тракту в заданной полосе частот.

2. Методика структурно-параметрического синтеза согласующих устройств на основе использования аппарата Т-матриц, отличающаяся:

непосредственным использованием измеренных данных о согласуемых устройствах без аппроксимации их эквивалентными схемами;

учетом частотно-зависимых тепловых потерь в элементах СУ;

уни-modalностью критерия качества на всех этапах расчета, позволяющей полностью исключить затратные по времени численные методы многопараметрической оптимизации, что позволяет:

рассчитывать СУ, располагаемые в заданных сечениях оптимизируемого радиотехнического тракта, обеспечивающие среднее значение КПМ всего тракта в заданных полосах частот согласования на 5–9 % большее, чем при использовании существующих методов,

оценивать реальные потенциальные характеристики передачи мощности радиотехнических трактов путем расчета многокаскадных СУ с учетом потерь в их элементах,

получать СУ, составленные из элементов с номиналами стандартных рядов, что позволяет сократить на 45–84 % потери мощности передаваемого сигнала и на 31–96 % ухудшение неравномерности КПМ в полосе частот согласования по сравнению с результатом после простого округления рассчитанных номиналов схем до стандартных значений.

3. Методика структурно-параметрического моделирования двухполосников и четырехполосников, отличающаяся использованием аппарата Т-матриц и позволяющая получать модели в виде лестничных цепей любой сложности в классическом RLC-базисе.

Личный вклад соискателя

Соискателем самостоятельно были разработаны и получены:

аналитический метод расчета параметров элементарных каскадов распределенного по радиотехническому тракту СУ;

методика структурно-параметрического синтеза распределенного по тракту СУ на основе использования аппарата Т-матриц;

методика структурно-параметрического моделирования двухполосников и четырехполосников.

Соавторами основных публикаций являются: научный руководитель – доктор технических наук, профессор Ю.П. Воропаев, который осуществлял определение целей и постановку задач, с ним проводилось обсуждение способов решения поставленных задач, оценка полученных результатов;

И.М. Мещеряков, который принимал участие в выборе методов исследования, обсуждении результатов и формулировке выводов и рекомендаций.

Апробация результатов диссертации

Теоретические и практические результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

V Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Самара (РФ), 11–17 сентября 2006 г.;

VII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Самара (РФ), 15–21 сентября 2008 г.;

X военно-научная конференция учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 9–10 апреля 2009 г.

VIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Санкт-Петербург (РФ), 15–18 сентября 2009 г.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликованы 20 печатных работ, в том числе: 12 статей в научных рецензируемых журналах и сборниках, общим объемом 5,9 авторских листа, 4 публикации в сборниках тезисов докладов международных научно-технических конференций, 3 публикации в сборниках тезисов докладов военно-научных конференций учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», 1 отчет о НИР.

Структура и объем диссертации

В первой главе произведен аналитический обзор научной литературы по теме диссертации, осуществлен анализ методов решения задач широкополосного согласования и структурно-параметрического моделирования. На основе обобщения результатов определены вопросы, требующие дальнейшего разрешения. Во второй главе осуществлены обоснование и выбор критериев качества широкополосного согласования, получены аналитические выражения для расчета параметров элементарных каскадов распределенного СУ с учетом тепловых потерь в его элементах. Третья глава посвящена разработке методики синтеза распределенного по широкополосному радиотехническому тракту СУ и ее проверке решением ряда тестовых и практических задач. В четвертой главе показаны возможности и эффективность разработанного во второй главе математического аппарата при моделировании элементов радиотехнических трактов.

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, основной части из четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 121 страницу, из которых 77 страниц текста, 69 рисунков на 18 страницах, 6 таблиц на 5 страницах, 4 приложения на 9 страницах, список использованных источников из 118 наименований на 9 страницах, список публикаций автора из 20 наименований на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** представлен обзор и анализ существующих методов широкополосного согласования и структурно-параметрического моделирования.

Анализ состояния проблемы синтеза широкополосных согласующих устройств позволяет выделить три основных направления.

Первое направление предполагает аналитическое решение задачи синтеза СУ. Процедура синтеза широкополосной согласующей цепи основана на представлении источника сигнала и нагрузки эквивалентными схемами замещения. Данное направление впервые было исследовано Г. Бодде (1948) и в дальнейшем развито в работах Р.М. Фано (1950), Д.С. Юлы (1964), Ю.Л. Хотунцева, Г.Г. Чавки, Н.З. Шварца и многих других отечественных и зарубежных авторов. В работе В. Кайчень (1976) подводятся некоторые итоги и дается дальнейшее развитие этого направления. Созданные в этот период рядом авторов Ю.Л. Хотунцевым, Н.З. Шварцем, Г.Д. Карлином, Б.С. Ярманом и др. аналитические методы взаимного широкополосного согласования были ориентированы на простейшие иммитансы источника сигнала и нагрузки, содержащие не более двух реактивных элементов. Теория широкополосного согласования на основе обобщенного метода Дарлингтона, развитая в работах Г.А. Филипповича и В.Ф. Белевича (2009), позволила увеличить сложность доступных для аналитических методов согласования нагрузок до шести элементов.

Общими недостатками аналитических методов является отсутствие учета потерь в элементах СУ и погрешности аппроксимации согласуемых элементов тракта простыми эквивалентными схемами, которые не могут быть учтены на последующих этапах синтеза, и при их работе на реальный источник сигнала и нагрузку следует ожидать ухудшения качества согласования относительно расчетных значений. Синтез более сложных эквивалентов (содержащих более двух реактивных элементов) является, по сути, задачей структурно-параметрического моделирования и классическими методами весьма затруднителен, причем сложности резко возрастают с увеличением порядка аппроксимирующей цепи. Поэтому разработка методики расчета моделей согласуемых объектов в виде лестничных цепей любой сложности в классическом RLC-базисе как дополнения к существующим аналитическим методам широкополосного согласования является актуальной.

Второе направление предполагает численное решение задачи синтеза СУ. Процедура синтеза основана, как правило, на численном задании характеристик источника сигнала и нагрузки в диапазоне частот согласования и использовании методов математического программирования (Л.И. Бабак, В.М. Богачев, В.Ю. Бабков, А.Ф. Белецкий, Г.Д. Карлин, Б.С. Ярман и др.). Для численных методов не существует проблемы сложности объектов согласования. Параметрический синтез обычно приводит к определенному результату, однако оценить степень приближения результата к оптимальному и гарантировать выход на

глобальный экстремум не представляется возможным.

Третье направление включает в себя численно-аналитические методы. При этом также используется представление объектов согласования наборами параметров, измеренными в полосе согласования. Однако в отличие от численных методов структура согласующей цепи не является заранее определенной, что не уменьшает область возможных схемных решений в задаче широкополосного согласования. Впоследствии такой подход, получивший название метода вещественных частот, был развит в ряде работ (Г.Д. Карлин, Б.С. Ярман, П.П. Циваллери, Х. Дедью, К. Дехоллейн, Г. Родс и др.), направленных главным образом на совершенствование алгоритмов численных методов.

Таким образом, можно констатировать, что теория широкополосного согласования интенсивно развивается. Большое количество публикаций, как отечественных, так и зарубежных, свидетельствует о ее актуальности. Однако ограниченность системы «источник сигнала – СУ – нагрузка», отсутствие учета потерь в элементах СУ и проблемы аппроксимации стимулируют разработку системного подхода при оптимизации частотных характеристик различных широкополосных радиотехнических трактов и оценке их реальных потенциальных возможностей по передаче мощности в заданном диапазоне частот.

Во второй главе произведено научное обоснование выбора критерия качества широкополосного согласования и описаны основные подходы к расчету параметров элементарных каскадов СУ при использовании разработанных целевых функций.

Начальный этап оптимизации широкополосного радиотехнического тракта представлен на рисунке 1, где известные в заданном частотном диапазоне матрицы передачи T_1, \dots, T_M описывают функционально необходимые четырехполосники (каскады) собственно тракта. Матрицы T_A и T_B описывают части каскадного соединения, которые находятся соответственно слева и справа от рассчитываемого элементарного каскада.

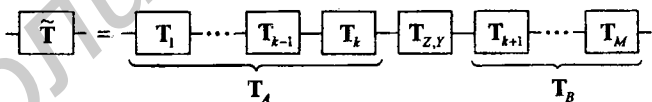


Рисунок 1 – Структурная схема каскадного соединения четырехполосников

Матрицы передачи T_1 и T_M могут учитывать рассогласования источника сигнала и нагрузки каскадного соединения:

$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{1-|\Gamma_1|^2}} \begin{bmatrix} 1 & -\Gamma_1 \\ -\Gamma_1^* & 1 \end{bmatrix}, \quad T_M = \frac{1}{\sqrt{1-|\Gamma_M|^2}} \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_M^* \\ \Gamma_M & 1 \end{bmatrix},$$

где Γ_1 и Γ_M – комплексные коэффициенты отражения, описывающие рассогласования источника сигнала и нагрузки соответственно; * – знак комплексного сопряжения.

Начальный этап оптимизации соединения представлен одним элементарным каскадом $T_{Z,Y}$ (см. рисунок 1), который может описываться матрицами T_Z (Z-каскад) или T_Y (Y-каскад) (рисунок 2) вида

$$T_Z = E + \frac{Z}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad T_Y = E + \frac{Y}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

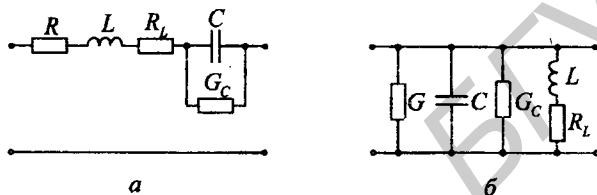
где E – единичная матрица второго порядка;

$$Z = R + \omega Q_L^{-1} L + \omega^{-1} Q_C^{-1} C^{-1} (Q_C^{-2} + 1)^{-1} + i \left[\omega L - \omega^{-1} C^{-1} (Q_C^{-2} + 1)^{-1} \right], \quad (2)$$

$$Y = G + \omega Q_C^{-1} C + \omega^{-1} Q_L^{-1} L^{-1} (Q_L^{-2} + 1)^{-1} + i \left[\omega C - \omega^{-1} L^{-1} (Q_L^{-2} + 1)^{-1} \right], \quad (3)$$

$Q_L = \omega L / R_L$, $Q_C = \omega C / G_C$ – добротности элементов L и C .

Параметры элементов R, G, L, C являются искомыми величинами.



а – Z-каскад; б – Y-каскад

Рисунок 2 – Эквивалентные схемы элементарных каскадов

Результирующие матрицы передачи соединения для схемы рисунка 1 имеют вид

$$\tilde{T}_Z = T_A T_Z T_B = U + Z U_Z, \quad \tilde{T}_Y = T_A T_Y T_B = U + Y U_Y, \quad (4)$$

где обозначено

$$U = T_A T_B = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix}, \quad U_Z = \frac{1}{2} T_A \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} T_B = \begin{bmatrix} U_{11}^Z & U_{12}^Z \\ U_{21}^Z & U_{22}^Z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$U_Y = \frac{1}{2} T_A \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} T_B = \begin{bmatrix} U_{11}^Y & U_{12}^Y \\ U_{21}^Y & U_{22}^Y \end{bmatrix}.$$

Каждый элемент (4) описывается выражениями

$$\tilde{T}_{mn}^Z = U_{mn} + Z(R, L, C^{-1}) U_{mn}^Z, \quad \tilde{T}_{mn}^Y = U_{mn} + Y(G, C, L^{-1}) U_{mn}^Y, \quad m, n = 1, 2, \quad (6)$$

содержащими соответствующие элементы матриц (5).

Отметим особенность соотношений (4) и (6) – они являются линейными функциями от R, L, C^{-1} или G, C, L^{-1} , что принципиально и позволяет определить простые и одновременно эффективные целевые функции (критерии качества) задачи согласования для аналитических расчетов оптимальных значений параметров всех элементарных каскадов СУ.

Остановимся на Z-каскаде и запишем квадратичную форму для квадрата модуля \tilde{T}_{mn}^Z :

$$q_{mn}^z = |\tilde{T}_{mn}^z|^2 = a_{11}R^2 + a_{22}L^2 + a_{33}C^{-2} + 2a_{12}RL + 2a_{23}LC^{-1} + 2a_{13}RC^{-1} + 2a_{14}R + 2a_{24}L + 2a_{34}C^{-1} + a_{44}, \quad (7)$$

где $a_{11} = |U_{mn}^z|^2$, $a_{22} = |U_{mn}^z|^2 \omega^2 (1 + Q_L^{-2})$, $a_{33} = |U_{mn}^z|^2 \omega^{-2} Q_C^2 (Q_C^2 + 1)^{-1}$,
 $a_{12} = |U_{mn}^z|^2 \omega Q_L^{-1}$, $a_{23} = |U_{mn}^z|^2 Q_C (Q_L^{-1} - Q_C) (Q_C^2 + 1)^{-1}$, $a_{13} = |U_{mn}^z|^2 \omega^{-1} Q_C (Q_C^2 + 1)^{-1}$,
 $a_{14} = (U_{mn}^* U_{mn}^z + U_{mn} U_{mn}^{z*})/2$, $a_{24} = \omega [Q_L^{-1} (U_{mn}^* U_{mn}^z + U_{mn} U_{mn}^{z*}) + i(U_{mn}^* U_{mn}^z - U_{mn} U_{mn}^{z*})]/2$,
 $a_{34} = \frac{1}{2} \omega^{-1} [U_{mn}^* U_{mn}^z + U_{mn} U_{mn}^{z*} - i Q_C (U_{mn}^* U_{mn}^z - U_{mn} U_{mn}^{z*})] Q_C (Q_C^2 + 1)^{-1}$, $a_{44} = |U_{mn}^z|^2$.

Выражение (7) является парциальной целевой функцией $q_{mn}^z(R, L, C^{-1}, \omega)$, физический смысл которой следует из известной связи между элементами матрицы передачи T и рассеяния S :

$$q_{11} = |\tilde{T}_{11}^z|^2 = |\tilde{S}_{21}^z|^2, \quad q_{12} = |\tilde{T}_{12}^z|^2 = |\tilde{S}_{22}^z/\tilde{S}_{21}^z|^2, \quad q_{21} = |\tilde{T}_{21}^z|^2 = |\tilde{S}_{11}^z/\tilde{S}_{21}^z|^2. \quad (8)$$

Из парциального критерия (7) составим интегральное, используя простое усреднение по частоте:

$$\tilde{q}_{mn}^z(R, L, C) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\tilde{T}_{mn}^z(\omega_j)|^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

где N – число разбиений частотного диапазона согласования $\omega_{\min} = \omega_1 \leq \omega_j \leq \omega_N = \omega_{\max}$.

Значения аргументов $R = R_0$, $L = L_0$ и $C^{-1} = C_0^{-1}$, при которых величина \tilde{q}_{mn}^z (9) минимальна, находим из равенства нулю частных производных:

$$\partial \tilde{q}_{mn}^z / \partial R = 0, \quad \partial \tilde{q}_{mn}^z / \partial L = 0, \quad \partial \tilde{q}_{mn}^z / \partial C^{-1} = 0, \quad (10)$$

откуда получаем ключевые решения диссертационной работы

$$R_0 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} -b_{14} & b_{12} & b_{13} \\ -b_{24} & b_{22} & b_{23} \\ -b_{34} & b_{23} & b_{33} \end{vmatrix}, \quad L_0 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} b_{11} & -b_{14} & b_{13} \\ b_{12} & -b_{24} & b_{23} \\ b_{13} & -b_{34} & b_{33} \end{vmatrix}, \quad C_0^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & -b_{14} \\ b_{12} & b_{22} & -b_{24} \\ b_{13} & b_{23} & -b_{34} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

где $\Delta = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & b_{22} & b_{23} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{vmatrix}$, $b_{pr} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_{pr}$, $p, r = 1, 2, 3, 4$.

В общем случае значения (11) могут быть как положительными – физически реализуемыми, так и отрицательными – физически нереализуемыми. В первом случае значения $R = R_0$, $L = L_0$, и $C = C_0$ являются подходящими. Во втором общий критерий качества \tilde{q}_{mn}^z необходимо дополнить вытекающими из него шестью частными критериями:

1) при $R = 0$, $L \neq 0$, $C^{-1} \neq 0$

$$L_0 = (b_{23}b_{34} - b_{24}b_{33}) / (b_{22}b_{33} - b_{23}^2), \quad C_0^{-1} = (b_{23}b_{24} - b_{22}b_{34}) / (b_{22}b_{33} - b_{23}^2); \quad (12)$$

2) при $R \neq 0, L = 0, C^{-1} \neq 0$

$$R_0 = (b_{13}b_{34} - b_{14}b_{33}) / (b_{11}b_{33} - b_{13}^2), \quad C_0^{-1} = (b_{13}b_{14} - b_{11}b_{34}) / (b_{11}b_{33} - b_{13}^2); \quad (13)$$

3) при $R \neq 0, L \neq 0, C^{-1} = 0$

$$R_0 = (b_{12}b_{24} - b_{14}b_{22}) / (b_{11}b_{22} - b_{12}^2), \quad L_0 = (b_{12}b_{14} - b_{11}b_{24}) / (b_{11}b_{22} - b_{12}^2); \quad (14)$$

4) при $R = 0, L = 0, C^{-1} \neq 0$

$$C_0^{-1} = -b_{34}/b_{33}; \quad (15)$$

5) при $R = 0, L \neq 0, C^{-1} = 0$

$$L_0 = -b_{24}/b_{22}; \quad (16)$$

6) при $R \neq 0, L = 0, C^{-1} = 0$

$$R_0 = -b_{14}/b_{11}, \quad (17)$$

Из них выбирается физически реализуемый, при котором \tilde{q}_{mn}^z в выражении (9) минимально. В результате общий критерий совместно с шестью частными всегда позволяют найти подходящее физически реализуемое решение задачи.

Соотношения для расчета элементов проводимости (3) схемы рисунка 2, б находим из полученных выше после замен

$$L \leftrightarrow C, \quad R \rightarrow G. \quad (18)$$

При использовании критерия качества \tilde{q}_{mn}^z в исходные данные не входят требования к затуханию вне полосы согласования, к неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), к линейности фазочастотной характеристики (ФЧХ) в полосе согласования. Однако эффективность простого критерия качества \tilde{q}_{mn}^z оказалась настолько высокой, что в большинстве случаев значения указанных выше параметров получаются удовлетворительными [3-А, 7-А, 11-А].

Для синтеза СУ, обеспечивающего АЧХ и ФЧХ, близкие к заданным, разработана модифицированная целевая функция [12-А]:

$$q = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |T_{11}(\omega_j) - T_{11}(\omega_j)|^2 \rightarrow \min, \quad (19)$$

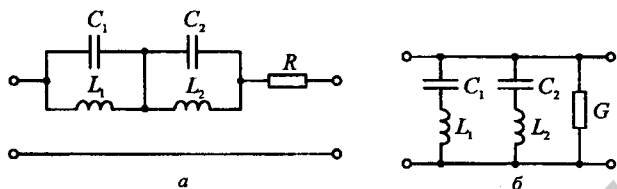
где $T_{11}(\omega_j)$ — элемент волновой матрицы передачи оптимизируемого соединения (рисунок 1) на частоте ω_j ; $T_{11}(\omega_j) = 1/S_{21}(\omega_j) = \exp(-i\varphi_{21}(\omega_j)) / |S_{21}(\omega_j)|$ — требуемое значение элемента волновой матрицы передачи на частоте ω_j .

Применительно к Z-каскаду (2) функция (19) также является квадратичной формой вида (7), но с другими значениями коэффициентов.

Во второй главе разработана обобщенная целевая функция [11-А], позволяющая рассчитывать многополосные СУ.

Также получены аналитические соотношения для расчета параметров усложненных каскадов СУ (рисунок 3), имеющих нули передачи на конечных

частотах $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$, $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$, что существенно расширяет возможности синтеза широкополосных согласующе-фильтрующих схем. При этом неизвестные параметры рассчитываются по формулам (11)–(17), но с другими значениями параметров b_{ij} , $i, j = 1, 2, 3, 4$.



a – Z-каскад; *b* – Y-каскад

Рисунок 3 – Усложненные каскады СУ

Таким образом, полученные в главе аналитические соотношения являются основой математического аппарата разработанной методики синтеза СУ.

В третьей главе изложена методика структурно-параметрического синтеза распределенного по оптимизируемому радиотехническому тракту СУ. Методика включает в себя этапы единого аналитического расчета параметров всех элементарных каскадов и численной циклической итерационной оптимизации схемы СУ в целом. Процедура синтеза состоит из следующих этапов:

1. С использованием аналитических расчетных соотношений главы 2 в выбранном сечении тракта рассчитывается первый Z-каскад СУ.

2. Если второй каскад предполагается устанавливать непосредственно рядом с первым (слева или справа), то это должен быть Y-каскад, и для его расчета используются аналитические соотношения после замен (18). Перед этим влияние первого каскада на схему должно быть учтено в матрице T_A либо T_B .

3. После установки второго каскада параметры оказываются неоптимальными и требуется повторный расчет его параметров при учете параметров второго каскада с использованием пункта 1 данной методики; затем – повторный расчет второго каскада (пункт 2 методики) и т. д. Циклический итерационный процесс является хорошо сходящимся, что проверяется по изменению используемого критерия качества.

В результате характеристики схемы в целом становятся оптимальными и следует переход к расчету третьего – Z-каскада.

4. После учета влияния третьего каскада характеристики первого и второго снова оказываются неоптимальными. Далее выполняется пересчет параметров каскада (первого или второго) с наибольшей относительной чувствительностью используемого критерия качества к его параметрам в заданной полосе частот, затем пересчитывается каскад с меньшей чувствительностью. Далее следует циклическая оптимизация всей трехкаскадной схемы. Каждый цикл на данном этапе состоит из пересчета трех каскадов. Сначала рассчитывается каскад с максимальной чувствительностью, затем оценивается чувствительность

оставшихся двух и пересчитывается тот, который имеет большую чувствительность. После пересчета оставшегося каскада проводится следующий цикл оптимизации, порядок пересчета каскадов в котором может быть уже другим. Таким образом, циклическая оптимизация осуществляется до приемлемой сходимости итерационного процесса по используемому критерию качества.

5. Добавление в схему СУ любого нового элементарного каскада должно сопровождаться повторными циклическими пересчетами всех элементарных каскадов до сходимости их параметров к оптимальным по используемому критерию качества. Какой каскад будет пересчитан первым, вторым и т. д. в каждом цикле, определяется относительной чувствительностью критерия качества к их параметрам (см. пункт 4 методики).

Таким образом, покаскадный итерационный синтез позволяет последовательно получать схемы СУ возрастающей сложности: однокаскадные, двухкаскадные, M -каскадные, причем при каждой из них система в целом будет оптимальной по выбранному критерию качества, что обеспечивается хорошо сходящимися итерационными процедурами.

В процессе итераций происходит адаптация СУ к оптимизируемому соединению, причем структура и параметры элементарных каскадов видоизменяются: часть элементов обнуляется, некоторые из индуктивных становятся емкостными, и наоборот, Γ -схемы превращаются в T -образные, и наоборот. Поэтому описанный выше синтез СУ можно считать структурно-параметрическим, причем не возникает необходимости искать начальное приближение и задавать структуру СУ заранее, поскольку она образуется естественным образом.

В работе рассмотрен синтез линейного усилителя на биполярном транзисторе BFR96 в диапазоне от 200 до 280 МГц для режима $V_{\infty} = 10$ В, $I_c = 10$ мА. Синтезируемые СУ1 и СУ2 (рисунок 4) должны обеспечить коэффициент усиления $K_y > 15$ дБ с неравномерностью не более ± 1 дБ, коэффициенты стоячей волны (КСВ) по входу и выходу $K_{c1}, K_{c2} < 3$. Затухание на частотах 100 и 380 МГц – не хуже 0 и -10 дБ соответственно. Добротности катушек индуктивности $Q_L = 30$. Значения сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов в СУ должны соответствовать номиналам из стандартного ряда E12.



Рисунок 4 – Структурная схема усилителя

Рассчитать СУ с учетом коэффициентов отражения позволяет целевая функция

$$q = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(|\tilde{T}_{11}(\omega_j) - T_{11}(\omega_j)|^2 + \gamma_1 |\tilde{T}_{21}(\omega_j)|^2 + \gamma_2 |\tilde{T}_{12}(\omega_j)|^2 \right) \rightarrow \min, \quad (20)$$

где γ_1, γ_2 – неотрицательные весовые коэффициенты; слагаемое $|\tilde{T}_{11}(\omega_j) - T_{т11}(\omega_j)|^2$ учитывает КПМ и его неравномерность; слагаемые $\gamma_1 |\tilde{T}_{21}(\omega_j)|^2 = \gamma_1 |\tilde{S}_{11}(\omega_j)|^2 / |\tilde{S}_{21}(\omega_j)|^2$ и $\gamma_2 |\tilde{T}_{12}(\omega_j)|^2 = \gamma_2 |\tilde{S}_{22}(\omega_j)|^2 / |\tilde{S}_{21}(\omega_j)|^2$ – коэффициенты отражения по входу и выходу усилителя.

Целевая функция (20) представляет собой линейную комбинацию целевых функций (9) и (19), поэтому ее также можно представить в виде квадратичной формы вида (7), но с другими значениями коэффициентов. При этом элементарные каскады СУ1 и СУ2 рассчитываются по формулам (11)–(17) с этими коэффициентами.

В результате расчета СУ1 и СУ2 по критерию (20) не выполняются требования по затуханию вне полосы согласования. Поэтому на втором этапе полученные СУ пересчитаны с использованием обобщенной целевой функции [11-А], учитывающей КПМ вне полосы согласования.

На рисунке 5 представлены окончательные принципиальные схемы СУ1 и СУ2, обеспечивающие требуемые характеристики. Емкость 66 пФ реализована параллельным соединением двух конденсаторов по 33 пФ, а емкость 24 пФ – двумя конденсаторами по 12 пФ.

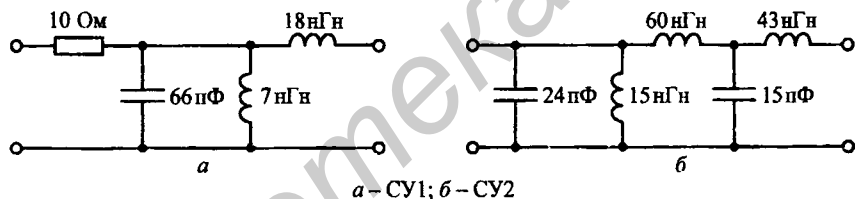
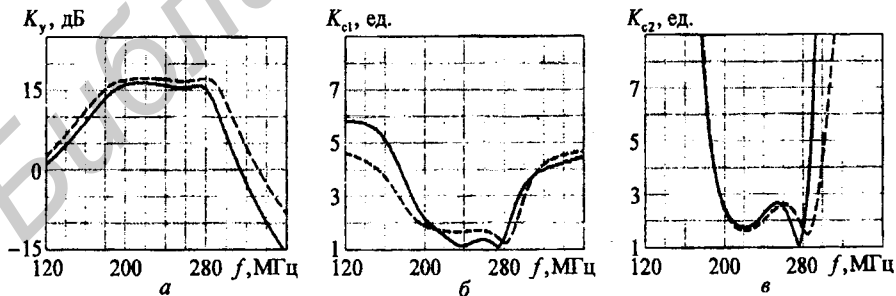


Рисунок 5 – Рассчитанные СУ1 и СУ2

На рисунке 6 представлены частотные зависимости расчетных и экспериментальных характеристик усилителя.



а – коэффициент усиления; б – КСВ по входу; в – КСВ по выходу
Рисунок 6 – Сравнение рассчитанных (пунктир) и измеренных характеристик

Измеренное значение K_y в заданной полосе составило $15,8 \pm 0,6$, на частотах 100 и 280 МГц менее 0 и -10 дБ соответственно, измеренное КСВ по входу $K_{c1} < 2,2$, по выходу - $K_{c2} < 2,7$, что соответствует предъявленным требованиям.

В четвертой главе осуществлены обоснование и выбор критерия качества моделирования элементов радиотехнических трактов, получены аналитические выражения для расчета параметров элементарных каскадов модели, разработана методика структурно-параметрического моделирования двухполосников и четырехполосников.

Исходными данными задачи являются параметры матрицы передачи моделируемого четырехполосника, заданной аналитически $T(\omega)$ или дискретно $T(\omega_j)$ в необходимом диапазоне частот. Общая структурная схема модели, матрица передачи которой $\tilde{T}(\omega) = T_{\text{мод}}$, аналогична представленной на рисунке 1, но состоит из соединения только элементарных Z- и Y-каскадов, описываемых соотношениями (1)–(3).

Для определения критерия качества задачи моделирования берется разность

$$\Delta T = T - \tilde{T} = \begin{bmatrix} T_{11} - \tilde{T}_{11} & T_{12} - \tilde{T}_{12} \\ T_{21} - \tilde{T}_{21} & T_{22} - \tilde{T}_{22} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где T – матрица передачи исходного четырехполосника,

$\tilde{T} = T_{\text{мод}}$ – его модели и одна из стандартных норм разности

$$\|\Delta T\| = |T_{11} - \tilde{T}_{11}|^2 + |T_{12} - \tilde{T}_{12}|^2 + |T_{21} - \tilde{T}_{21}|^2 + |T_{22} - \tilde{T}_{22}|^2 = q_{\text{мод}}(\omega) \quad (22)$$

принимается в качестве парциальной целевой функции.

После аналогичного (9) ее усреднения в полосе частот моделирования

$$\tilde{q}_{\text{мод}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N q_{\text{мод}}(\omega_j) \rightarrow \min \quad (23)$$

получаем критерий качества для аналитического расчета оптимальных значений параметров R_c , L_0 и C_0^{-1} для Z-каскада и G_0 , C_0 и L_0^{-1} – для Y-каскада.

Для расчета оптимальных параметров Z-каскада используются выражения (11)–(17), но с другими значениями элементов.

Методика структурно-параметрического моделирования в целом аналогична методике синтеза широкополосного согласующего четырехполосника. Синтез эквивалентной схемы модели начинается с расчета параметров одного первого Z- или Y-каскада, а далее следуют расчеты второго и т. д. каскадов и, главное, требуются повторные итерационные расчеты параметров всех каскадов. Методика также не имеет формальных ограничений на полосу частот, на число каскадов в эквивалентной схеме, что принципиально и позволяет расчи-

тывать схемы любой сложности.

Частным случаем моделирования четырехполосников является моделирование двухполосников. Для этого используется изложенная выше методика и матрица вспомогательного четырехполосника в виде:

$$T = \frac{1}{\sqrt{1-|S_{11}|^2}} \begin{bmatrix} 1 & S_{11}^* \\ S_{11} & 1 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где S_{11} – заданный коэффициент отражения от моделируемого двухполосника.

Далее рассчитывается эквивалентная схема вспомогательного четырехполосника и после подсоединения к его выходу неотражающей нагрузки получается модель двухполосника с коэффициентом отражения

$$S_{11\text{мод}} = T_{21\text{мод}}/T_{11\text{мод}} \approx S_{11}. \quad (25)$$

В процессе итераций происходит адаптация структуры и параметров схемы модели к исходным данным моделируемого четырехполосника, и при достаточно большом числе элементарных каскадов в схеме погрешности моделирования могут быть сделаны сколь угодно малыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан аналитический метод расчета параметров элементарных каскадов распределенного по радиотехническому тракту СУ на основе использования аппарата T-матриц.

Разработаны модифицированная целевая функция для расчетов параметров элементарных каскадов СУ, обеспечивающих АЧХ и ФЧХ, близкие к заданным [3-А, 7-А, 12-А], и обобщенная целевая функция, позволяющая рассчитывать многополосные согласующе-фильтрующие четырехполосники [11-А].

Использование аппарата T-матриц позволило учесть тепловые потери в элементах СУ [11-А] и получить новые целевые функции, позволяющие рассчитывать межкаскадные СУ широкополосных линейных транзисторных усилителей с оптимальными характеристиками передачи и отражения мощности [8-А].

Получены строгие аналитические соотношения для расчетов параметров элементарных каскадов, имеющих нули передачи на конечных частотах, использование которых в некоторых случаях позволяет получить более приемлемые результаты согласования и фильтрации.

2. Разработана методика структурно-параметрического синтеза распределенного по тракту СУ на основе использования аппарата T-матриц [8-А], основными этапами которой являются: расчет параметров элементарных каскадов СУ [1-А, 2-А, 4-А] и итерационная оптимизация параметров СУ в целом [6-А, 7-А].

Методика позволяет осуществить системный подход при решении различных задач оптимизации широкополосных радиотехнических трактов путем совместного расчета нескольких согласующих четырехполосников, располагаемых в подходящих сечениях [5-А, 6-А], что позволяет обеспечить среднее значение КПМ всего тракта в заданной полосе частот согласования на 5–9 % большее, чем при использовании существующих методов.

Учет тепловых потерь в элементах СУ, отсутствие формальных ограничений на ширину полосы согласования и число элементарных каскадов позволяет численно-аналитическим способом рассчитывать реальные потенциальные или предельно достижимые передаточные характеристики радиотехнических трактов и на основе результата вырабатывать рекомендации, связанные с шириной полосы пропускания и числом элементарных каскадов в составе СУ [5-А, 6-А, 11-А, 12-А].

Унимодальность критерия качества на всех этапах расчета позволяет полностью исключить затратные по времени численные методы многопараметрической оптимизации и снизить вычислительные затраты при расчете СУ.

Разработанная методика позволяет при решении конкретных практических задач получать на конечном этапе оптимальные схемы СУ, составленные из элементов с номиналами стандартных рядов [10-А]. Применение разработанной методики позволяет сократить на 45–84 % потери мощности передаваемого сигнала и на 31–96 % ухудшение неравномерности КПМ в полосе частот согласования по сравнению с результатом, получаемым путем простого округления рассчитанных номиналов синтезированных схем до стандартных значений.

3. Разработана методика структурно-параметрического моделирования двухполосников и четырехполосников лестничными цепями любой сложности в классическом RLC-базисе [8-А, 9-А].

Методика позволяет аппроксимировать заданные численно источник сигнала и нагрузку эквивалентными схемами с минимальными погрешностями, что является полезным дополнением к существующим аналитическим методам широкополосного согласования [9-А]. Таким образом, имеется возможность оценивать потенциальные характеристики передачи мощности от источника сигнала в нагрузку при их задании на ограниченном ряде частот.

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные методики широкополосного согласования и структурно-параметрического моделирования являются новыми инструментами для разработчиков как изделий электроники, так и радиотехнических систем. Для разработчиков аналоговых и цифровых изделий электроники важно повысить их

частотный диапазон и быстроедействие, что невозможно без учета влияния паразитных реактивностей, неизбежных в любой топологии прибора. Учет влияния подобных реактивностей возможен только на основе детальных эквивалентных схем и численно-аналитических методов синтеза.

В результате использования разработанной методики при решении каждой конкретной задачи широкополосного согласования получается линейка СУ возрастающей сложности, из которых разработчик может выбрать наиболее приемлемое, например, по критерию минимальной чувствительности характеристик СУ к изменению параметров его элементов.

2. Разработанная методика может использоваться для оптимизации частотных характеристик линейных транзисторных усилителей (приложение А). Учет добротностей катушек индуктивности и конденсаторов позволяет учитывать тепловые потери в СУ, в результате чего имеется хорошее совпадение рассчитанных и экспериментальных характеристик. Отсутствие ограничений на количество каскадов в СУ дает возможность инженерам-разработчикам оценивать численно-аналитическим способом реальные потенциальные характеристики передачи мощности проектируемых или оптимизируемых широкополосных радиотехнических трактов и принимать решение об оптимальном размещении СУ в них.

3. Разработанная методика широкополосного согласования использована в ходе выполнения научно-исследовательской работы [20-А] при синтезе реактивных четырехполосников, оптимально рассогласующих антенны для снижения их эффективной площади рассеяния, и при создании двухкаскадного малошумящего усилителя для зенитно-ракетного комплекса «Печора-2ТМ».

4. Методика структурно-параметрического синтеза СУ, метод оценки потенциальных характеристик передачи мощности и методика структурно-параметрического моделирования, основанные на использовании аппарата Т-матриц, использованы в рамках заданий Государственной программы «Разработка физических и технологических основ создания высокоскоростных фотодетекторов для функциональных оптоэлектронных устройств микроволнового диапазона» («Электроника-1.26», № ГР 20064182), Государственной комплексной программы научных исследований «Физические и технологические основы создания новых материалов, элементной базы и разработка устройств опто-, микро-, наноэлектроники, информационно-измерительных систем и приборов» (ГКПНИ «Электроника», утверждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28.11.2005 № 1339) при разработке широкополосного согласующего устройства для фотодиодного модуля.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1-А. Воропаев, Ю.П. Метод последовательных приближений и структурно-параметрический синтез при широкополосном согласовании комплексных сопротивлений / Ю.П. Воропаев, И.М. Мещеряков, А.Д. Васильев // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2005. – № 4. – С. 69–76.

2-А. Воропаев, Ю.П. Расчет начального приближения при широкополосном согласовании произвольных иммитансов источника сигнала и нагрузки / Ю.П. Воропаев, И.М. Мещеряков, А.Д. Васильев // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2007. – № 4. – С. 60–66.

3-А. Воропаев, Ю.П. Метод компенсации реактивной составляющей при широкополосном согласовании комплексных сопротивлений с использованием среднего гармонического значения коэффициента преобразования мощности / Ю.П. Воропаев, И.М. Мещеряков, А.Д. Васильев // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2007. – № 4 – С. 101–107.

4-А. Воропаев, Ю.П. Применение референсных сечений для расчета начального приближения при широкополосном согласовании комплексных сопротивлений / Ю.П. Воропаев, И.М. Мещеряков, А.Д. Васильев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. – Т. XI, № 2. – С. 56–60.

5-А. Воропаев, Ю.П. Метод гармонического среднего в задачах широкополосного согласования волноводных трактов РЭС с оценкой потенциальных характеристик / Ю.П. Воропаев, А.Д. Васильев, И.М. Мещеряков // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2009. – № 1 – С. 54–61.

6-А. Васильев, А.Д. Синтез широкополосных распределенных по волноводному тракту согласующих устройств методом среднего гармонического значения коэффициента преобразования мощности / А.Д. Васильев, Ю.П. Воропаев // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2009. – № 16. – С. 78–84.

7-А. Воропаев, Ю.П. Синтез широкополосных согласующих устройств с использованием среднего гармонического значения коэффициента преобразования мощности / Ю.П. Воропаев, А.Д. Васильев, И.М. Мещеряков // Радиотехника и электроника. – 2009. – № 7. – С. 853–862.

8-А. Воропаев, Ю.П. Широкополосное структурно-параметрическое согласование и моделирование различных четырехполосников / Ю.П. Воропаев, А.Д. Васильев, И.М. Мещеряков // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2009. – № 3 – С. 51–61.

9-А. Воропаев, Ю.П. Новая методика структурно-параметрического синтеза эквивалентных схем при широкополосном моделировании четырехполосников / Ю.П. Воропаев, А.Д. Васильев, И.М. Мещеряков // Вестн. Воен. акад.

Респ. Беларусь. – 2009. – № 4 – С. 72–80.

10-А. Мещеряков, И.М. Методика приведения параметров широкополосного согласующего устройства к стандартным рядам индуктивностей и емкостей / И.М. Мещеряков, А.Д. Васильев // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2009. – № 17. – С. 79–83.

11-А. Васильев, А.Д. Структурно-параметрический синтез многополосных согласующе-фильтрующих схем на основе аппарата Т-матриц / А.Д. Васильев // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2010. – № 1. – С. 73–80.

12-А. Васильев, А.Д. Метод синтеза широкополосных согласующих устройств с заданными частотными характеристиками на основе аппарата Т-матриц / А.Д. Васильев // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2010. – № 2. – С. 109–115.

Тезисы докладов

13-А. Воропаев, Ю.П. Метод компенсации реактивной составляющей при широкополосном согласовании комплексных сопротивлений с использованием среднего гармонического значения коэффициента преобразования мощности / Ю.П. Воропаев, И.М. Мещеряков, А.Д. Васильев // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. и докл. Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 11–17 сент. 2006 г. / Поволж. гос. акад. телекоммуникации и информатики; редкол.: В.А. Неганов [и др.]. – Самара, 2006. – С. 76.

14-А. Васильев, А.Д. Метод синтеза широкополосных согласующих устройств, содержащих сосредоточенные и распределенные элементы на СВЧ / А.Д. Васильев, Ю.П. Воропаев // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. и докл. Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 15–21 сент. 2008 г. / Поволж. гос. акад. телекоммуникации и информатики; редкол.: В.А. Неганов [и др.]. – Самара, 2008. – С. 110–111.

15-А. Васильев, А.Д. Метод синтеза ступенчатых трансформаторов для широкополосного согласования элементов тракта СВЧ с произвольными иммитансами / А.Д. Васильев, Ю.П. Воропаев // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. и докл. Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 15–21 сент. 2008 г. / Поволж. гос. акад. телекоммуникации и информатики; редкол.: В.А. Неганов [и др.]. – Самара, 2008. – С. 135–136.

16-А. Воропаев, Ю.П. Метод гармонического среднего в задачах широкополосного согласования волноводных трактов РЭС с оценкой потенциальных характеристик / Ю.П. Воропаев, А.Д. Васильев, И.М. Мещеряков // 10-я воен.-науч. конф. Воен. акад. Респ. Беларусь: сб. тез. докл., Минск, 9–10 апр. 2009 г. / УО «ВАРБ». – Минск, 2009. – С. 335.

17-А. Васильев, А.Д. Метод оптимизации характеристик передачи мощности усилительных трактов РЭС СВЧ-диапазона / А.Д. Васильев,

Ю.П. Воропаев, И.М. Мещеряков // 10-я воен.-науч. конф. Восн. акад. Респ. Беларусь: сб. тез. докл., Минск, 9–10 апр. 2009 г. / УО «ВАРБ». – Минск, 2009. – С. 337.

18-А. Мещеряков, И.М. Применение метода гармонического среднего в задачах оптимизации волноводных трактов РЭС, составленных из стандартных элементов / И.М. Мещеряков, Ю.П. Воропаев, А.Д. Васильев // 10-я воен.-науч. конф. Воен. акад. Респ. Беларусь: сб. тез. докл., Минск, 9–10 апр. 2009 г. / УО «ВАРБ». – Минск, 2009. – С. 346.

19-А. Васильев, А.Д. Синтез многополосных согласующих цепей с использованием метода среднего гармонического значения коэффициента преобразования мощности / А.Д. Васильев // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. и докл. Междунар. науч.- техн. конф., Санкт-Петербург, 15–18 сент. 2009 г. / С.-Петерб. гос. политехн. ун-т; редкол.: В.А. Неганов [и др.]. – СПб., 2009. – С. 103–104.

Отчет по НИР

20-А. Разработка рекомендаций по уменьшению эффективной площади рассеяния слабонаправленных антенн летательных аппаратов: отчет о НИР / УО «ВАРБ»; рук. Ю.П. Воропаев. – Минск, 2007. – 110 с. – № 1242/07.



РЭЗЮМЭ

Васільеў Аляксандр Дзмітрыевіч

СТРУКТУРНА-ПАРАМЕТРЫЧНЫ СІНТЭЗ ЧАТЫРОХПОЛЮСНІКАЎ ПРЫ ШЫРОКАПАЛОСНЫМ ДАПАСАВАННІ І МАДЭЛЯВАННІ НА АСНОВЕ АПАРАТА Т-МАТРЫЦ

Ключавыя словы: шырокапалоснае дапасаванне, структурна-параметрычны сінтэз, каэфіцыент пераўтварэння магутнасці, комплекснае супраціўленне.

Работа прысвечана пытанням шырокапалоснага дапасавання двухполоснікаў і лінейных чатырохполоснікаў, структурна-параметрычнага сінтэзу дапасуючых устройстваў і эквівалентных схем на аснове выкарыстання апарата хвалевых Т-матрыц.

Выкарыстанне распрацаваных мэтавых функцый дазволіла ажыццявіць аналітычны разлік параметраў элементарных каскадаў дапасуючых устройстваў, якія могуць размяшчацца ў любых зададзеных сячэннях аптыміземага тракту.

У рабоце атрыманы наступныя новыя вынікі:

распрацаваны аналітычны метады разліку параметраў элементарных каскадаў дапасуючых чатырохполоснікаў, заснаваны на выкарыстанні матэматычнага апарата Т-матрыц, які дазволіў выключыць этап апраксімацыі дапасуемых элементаў тракту эквівалентнымі схемамі, улічыць цэплавая страты ў элементах дапасуючага чатырохполосніка і забяспечыць перадачу максімальнай магутнасці па радыётэхнічным тракце ў зададзенай паласе частот;

распрацавана метадыка структурна-параметрычнага сінтэзу размеркаваных па радыётэхнічным тракце дапасуючых чатырохполоснікаў, заснаваная на аналітычным разліку параметраў іх элементарных каскадаў і іх цыклічнай ітэрацыйнай аптымізацыі, што дазваляе аптымізаваць частотныя характарыстыкі тракту ў зададзенай паласе частот;

распрацавана метадыка структурна-параметрычнага мадэлявання двухполоснікаў і чатырохполоснікаў лясвічнымі ланцугамі ў класічным RLC-базісе.

Вынікі дысертацыйнай работы рэкамендуюцца да прымянення ў арганізацыях, якія займаюцца распрацоўкай новых і мадэрнізацыяй існуючых узораў радыёэлектроннай тэхнікі, пры паляпшэнні характарыстык, звязаных з павышэннем каэфіцыента пераўтварэння магутнасці ўзмацняльных трактаў радыёперадаючых устройстваў, паніжэннем каэфіцыента шуму, павышэннем адчувальнасці радыёпрыёмных устройстваў, выраўноўваннем амплітудна-частотных характарыстык у шматканальных устройствах.

РЕЗЮМЕ

Васильев Александр Дмитриевич

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЧЕТЫРЕХПОЛОСНИКОВ ПРИ ШИРОКОПОЛОСНОМ СОГЛАСОВАНИИ И МОДЕЛИРОВАНИИ НА ОСНОВЕ АППАРАТА T-МАТРИЦ

Ключевые слова: широкополосное согласование, структурно-параметрический синтез, коэффициент передачи мощности, комплексное сопротивление.

Работа посвящена вопросам широкополосного согласования двухполосников и линейных четырехполосников, структурно-параметрического синтеза согласующих устройств и эквивалентных схем на основе использования аппарата волновых T-матриц.

Использование разработанных целевых функций позволило осуществить аналитический расчет параметров элементарных каскадов согласующих устройств, которые могут располагаться в любых заданных сечениях оптимизируемого тракта.

В работе получены следующие новые результаты:

разработан аналитический метод расчета параметров элементарных каскадов согласующих четырехполосников, основанный на использовании математического аппарата T-матриц, позволившего исключить этап аппроксимации согласуемых элементов тракта эквивалентными схемами, учесть тепловые потери в элементах согласующего четырехполосника и обеспечить передачу максимальной мощности по радиотехническому тракту в заданной полосе частот;

разработана методика структурно-параметрического синтеза согласующих четырехполосников, основанная на аналитическом расчете параметров их элементарных каскадов и их циклической итерационной оптимизации, позволяющая оптимизировать частотные характеристики тракта в заданной полосе частот;

разработана методика структурно-параметрического моделирования двухполосников и четырехполосников лестничными цепями в классическом RLC-базисе.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к применению в организациях, занимающихся разработкой новых и модернизацией существующих образцов радиоэлектронной техники, при улучшении характеристик, связанных с повышением коэффициента передачи мощности усилительных трактов радиопередающих устройств, снижением коэффициента шума, повышением чувствительности радиоприемных устройств, выравниванием амплитудно-частотных характеристик в многоканальных устройствах.

SUMMARY

Vasilev Alexandr Dmitrievitch

STRUCTURALLY-PARAMETRICAL SYNTHESIS OF QUADRIPOLES AT THE BROADBAND MATCHING AND MODELING ON THE BASIS OF THE MEANS OF T-MATRIXES

Keywords: the broadband matching, the structurally-parametrical synthesis, the power transmission efficiency, the complex resistance.

The operation is devoted to the problems of the broadband matching of dipoles and linear four-terminal networks, the structurally-parametrical synthesis of matching devices and the dual circuits on the basis of usage of the means of undular T-matrixes.

The usage of the developed criterion functions has allowed to realize the analytical account of parameters of the elementary stages of matching devices which can be placed in any preset sections of an optimized tract.

In the operation the following new results are gained:

the analytical computational method of parameters of the elementary stages of the matching quadruples, is developed and grounded on the use of the mathematical apparatus of the T-matrixes, allowed to exclude an approximation stage of matching devices of the tract by the dual circuits, to consider thermal losses in the devices of a the matching quadruple and to ensure maximum rating transmission on a radio engineering tract in the preset frequency band;

the procedure of structurally-parametrical synthesis of the matching quadruples proportioned on the radio engineering tract, grounded on the analytical account of parameters of their elementary stages and their cyclical iterative optimization is developed, allowing to optimize the tract frequency characteristics in the preset frequency band;

the procedure of the structurally-parametrical modeling of dipoles and quadruples by the ladder circuits in the classical RLC-base is developed.

The results of dissertational operation are recommended to the application in the organizations which are engaged in the development of the new ones and updating of existing samples of the radio electronic engineering, at the improving of the performances related to a raise of transmission efficiency of power of intensifying tracts of the radio-transmitting devices, a drop of the figure of noise, a sensitization of the radio-receiving devices, the alignment of the amplitude-frequency characteristics in the multichannel devices.

Научное издание

Васильев Александр Дмитриевич

**Структурно-параметрический синтез четырехполюсников
при широкополосном согласовании
и моделировании на основе аппарата Т-матриц**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 14.10.2010.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 718.

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.