

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники»

Объект авторского права

УДК 621.372.512

ЯНЦЕВИЧ
Михаил Александрович

**ШИРОКОПОЛОСНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ОБОБЩЕННЫМ
МЕТОДОМ ДАРЛИНГТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ С УЛУЧШЕННЫМИ
ВАРИАТИВНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

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

Минск, 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь»

Научный руководитель

Филиппович Геннадий Александрович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизирующей радиолокации и приемо-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Официальные оппоненты

Забеньков Игорь Иванович, доктор технических наук, профессор.

Дмитренко Алесь Александрович, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры радиоэлектронной техники ВВС и войск ПВО учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Оппонирующая организация

учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации».

Защита состоится «18» января 2024 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, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

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

Автореферат разослан «18» декабря 2023 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

ВВЕДЕНИЕ

Получение конечного ожидаемого результата проектирования радиотехнической системы с требуемыми параметрами практически всегда достигается за счёт решения ряда задач схемотехники, важнейшее место среди которых отводится задачам широкополосного согласования (ШПС). ШПС, как самостоятельная научно-практическая область исследований, представляет большую значимость, поскольку результат согласования отражается на характеристиках радиотехнической системы. Целью согласования является максимизация передаваемой мощности от источника в нагрузку в некоторой полосе частот.

Методы конструирования согласующих устройств (СУ) в настоящее время решают достаточно сложные задачи, используя при этом возможности электронных вычислительных машин. Особое место среди них занимают аналитические методы, обеспечивающие строгое решение задач согласования. Общей проблемой этой группы методов следует считать выбор аппроксимирующей функции (АФ) передачи мощности в нагрузку. Используемые в теории ШПС классические АФ обладают малым количеством вариативных параметров, что создает проблемы в обеспечении системы ограничений даже для относительно простых нагрузок. Расширение области аппроксимации частотных характеристик (ЧХ), является актуальной задачей исследований в согласовании сопротивлений. Интерес к этим исследованиям обусловлен требованиями, которые предъявляются к техническим характеристикам радиотехнических трактов систем радиолокации, телекоммуникации и других областей радиотехники.

Среди аналитических методов синтеза согласующих цепей (СЦ) особое внимание заслуживает обобщенный метод Дарлингтона. Системный подход этого метода, внедренный в инженерные методики, достаточно эффективно решает задачи согласования повышенной сложности. Однако проблема аппроксимации ЧХ передачи мощности значительно ограничивает возможности данного метода.

Настоящая диссертация посвящена поиску новых методов аппроксимации и созданию принципиально новых аналитических методик ШПС посредством дальнейшего развития возможностей обобщенного метода Дарлингтона.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

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

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка математической модели адаптивного согласующего устройства» (№ госрегистрации 583907).

Результаты диссертационного исследования применялись для разработки патч-антенн, используемых в геолокационных комплексах АО НПП «РадиоСигнал» (Российская Федерация, г. Москва) и КБ «Беспилотные вертолёты» (Республика Беларусь, г. Минск).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель – улучшение параметров широкополосного согласования сложных комплексных нагрузок в радиотехнических системах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– разработаны новые аппроксимирующие функции с дополнительными вариативными параметрами, наличие которых способствует расширению области аналитических решений задач широкополосного согласования;

– разработана методика широкополосного согласования сложных комплексных нагрузок (нагрузок, для которых отсутствует аналитическое решение широкополосного согласования при использовании классических аппроксимаций Баттерворта, Чебышева 1-го рода) в сосредоточенном элементном базисе на основе обобщенного метода Дарлингтона с использованием аппроксимирующих функций с улучшенными вариативными свойствами в сравнении с классическими аппроксимациями Баттерворта и Чебышева 1-го рода;

– разработаны подходы к синтезу многополосных и квазидвухполосовых согласующих цепей при использовании обобщенного метода Дарлингтона;

– разработана методика широкополосного согласования в распределенном элементном базисе на основе математического аппарата обобщенного метода Дарлингтона с использованием предлагаемых функций;

– произведена оценка значимости проведенных исследований, путём сравнения с известными результатами согласования и экспериментально подтверждена эффективность разработанных методик.

Объект исследования – широкополосное согласующее устройство для высокочастотного тракта радиотехнических систем.

Предмет исследования – обобщенный метод Дарлингтона при использовании аппроксимирующих функций с улучшенными вариативными свойствами.

Научная новизна

1. Аппроксимирующие функции коэффициента передачи мощности, отличающиеся улучшенными вариативными свойствами (большим количеством варьируемых параметров) в сравнении с классическими

аппроксимациями (Баттерворта, Чебышева 1-го рода), что обеспечивает разрешимость системы ограничений, накладываемых сложной комплексной нагрузкой, а также позволяет синтезировать на основе известных полиномов (Баттерворта, Чебышева 1-го рода) переходные аппроксимирующие функции, область применения которых может не ограничиваться задачами классического синтеза радиотехнических устройств (синтез электрических фильтров дробного порядка).

2. Методика синтеза согласующих цепей на основе обобщенного метода Дарлингтона, отличающаяся использованием аппроксимирующих функций с улучшенными вариативными свойствами, что позволяет находить решения для сложных комплексных нагрузок. В частности, при согласовании тестовой RLC нагрузки удалось расширить диапазон значений индуктивности (по сравнению с результатами согласования обобщенным методом Дарлингтона при использовании чебышевской и баттервортовской функцией передачи мощности) на **30%**.

3. Методика синтеза согласующих устройств с распределенными параметрами, отличающаяся использованием математического аппарата теории синтеза фильтров на однородных линиях передачи (нагрузка представлена комбинацией отрезков однородных линий одинаковой длины, что впервые делает возможным использовать эту теорию для синтеза патч-антенн). При помощи разработанной методики синтеза удалось расширить полосу согласования при заданном уровне $K_{СВ} \leq 2$ для патч-антенны, рассчитанной на 1,2 ГГц до 15% (подтверждено результатами моделирования) и рассчитанной на 869 МГц до 17% (подтверждено результатами моделирования и натурального эксперимента), что в 2.14 - 2.43 раза больше по сравнению с известными методами согласования (выбора точки возбуждения антенны и использования четвертьволновых трансформаторов), которые обеспечивают полосу согласования для патч-антенн, при тех же условиях, не более 7%.

Положения, выносимые на защиту

1. Аппроксимирующие функции коэффициента передачи мощности, представляющие собой взвешенные суммы классических аппроксимаций (Баттерворта, Чебышева 1-го рода), **отличающиеся** от классических аппроксимаций наличием дополнительных вариативных параметров, которые **позволяют**:

– добавить к двум вариативным параметрам классических аппроксимаций n вариативных параметров, пределы изменения которых ограничены только областью вещественных чисел (n – порядок аппроксимации);

– осуществлять контролируемый плавный переход между различными порядками и функциями аппроксимации;

– расширять диапазон изменения параметров нагрузки, при котором возможно аналитическое решение задачи широкополосного согласования.

2. Методика синтеза широкополосных согласующих цепей на основе обобщенного метода Дарлингтона, *отличающаяся* использованием аппроксимирующих функций с улучшенными вариативными свойствами, *позволяющая* получать аналитические решения для задач согласования сложных комплексных нагрузок и расширить диапазон значений индуктивности RLC нагрузки на **30%** по сравнению с использованием классических аппроксимирующих функций.

3. Методика синтеза микрополосковых согласующих устройств на основе обобщенного метода Дарлингтона с использованием аппроксимирующих функций, обладающих улучшенными вариативными свойствами, *отличающаяся* представлением нагрузки и элементов согласования отрезками микрополосковых линий одинаковой длины за счёт использования преобразования Ричардса, *что позволило* расширить полосу согласования патч-антенн, рассчитанных на 1,2 ГГц до 15%, и 869 МГц до 17%, что в 2.14 - 2.43 раза больше по сравнению с известными методами согласования (выбора точки возбуждения антенны и использования четвертьволновых трансформаторов).

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

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Основным соавтором публикаций является научный руководитель – канд. тех. наук, доцент Филиппович Г.А., который определял цели, ставил задачи исследований, принимал участие в выборе методов исследований и обсуждении полученных результатов. Вклад других соавторов в совместно опубликованных работах – канд. тех. наук Бойкачева П. В., канд. тех. наук Свириденко А. А., канд. тех. наук Дубовика И. А. и Кириченко В. В. связан с обсуждением промежуточных результатов и оформлении иллюстративных материалов. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научная конференция «ИТС 2016, 2017, 2018» (г. Минск, 2016, 2017, 2018); IV, VI Международная научно-техническая интернет-конференция «Информационные технологии в образовании, науке и производстве» (г. Минск, 2016, 2018); XX, XXIII, XXIV Республиканская научная конференция «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, 2017,

2020, 2021); II Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития авиации» (г. Минск, 2018); VII Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» (г. Минск, 2017); Международная военно-научная конференция «Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы» (г. Минск, 2017); Международная военно-научная конференция «Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях» (г. Минск, 2019); Международная военно-научная конференция «Военное образование и наука в условиях цифровой трансформации знаний» (г. Минск, 2022); Международная научная конференция «Современные средства связи» (г. Минск, 2019); XIV Международная научно-практическая конференция «Current issues of modern science and practice» (Италия, г. Рим, 2020); XVI Международная конференция молодых ученых «Молодежь в науке» (г. Минск, 2019); 7-ая, 8-ая, 9-ая Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения «MILEX.INNOVATIONS – 2017, 2019, 2021» (г. Минск, 2017, 2019, 2021).

Использование результатов диссертации подтверждено 4 актами их внедрения в производство и учебный процесс и 1 справкой о возможном практическом использовании.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликовано 27 научных работ общим объемом 7,44 авторского листа. Из них 8 статей объемом 4,47 авторского листа в научных изданиях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 14 статей в сборниках материалов конференций объемом 2,54 авторского листа, 5 статей в сборниках тезисов докладов конференций объемом 0,43 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников, 3 приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 96 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 27 наименований. Общий объем – 140 страниц, в том числе 80 рисунков на 24 страницах, 4 таблицы на 2 страницах, 3 приложения на 14 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе представлен обзор и анализ методов ШПС. Обозначена ключевая проблема аналитической теории ШПС – ограниченные параметрические возможности известных аппроксимаций характеристик коэффициента преобразования мощности, и как следствие проблемы – отсутствие решений для сложных комплексных нагрузок.

Приведена классификация сложных комплексных нагрузок, для которых аналитического решения в согласовании при использовании классических аппроксимаций Баттерворта, Чебышева 1-го рода (далее подразумевается АФ Чебышева 1-го рода) найти невозможно. К таким нагрузкам следует относить:

- нагрузки с нулями передачи (в том числе с кратными) простых классов, с заданными параметрами, при которых решение классическими АФ становится невозможным;
- нагрузки с комбинированными нулями передачи;
- нагрузки, обусловленные многополосной и квазидвухполосовой функцией коэффициента передачи мощности.

Рассматриваемые категории сложных комплексных нагрузок могут соответствовать моделям сопротивлений РТУ различного функционального назначения, используемых в современных системах радиолокации, радионавигации, связи. Согласования таких устройств аналитическими методами позволит определить граничные условия и возможность улучшения характеристик согласования, что определяет актуальность настоящей работы. Для согласуемой нагрузки повышенной сложности задача сводится к использованию аналитической АФ коэффициента передачи мощности удовлетворяющей ограничениям накладываемых нагрузкой, а также требованиям предъявляемых к виду ЧХ. Диссертационное исследование посвящено решению сложных для аналитики задач согласования за счёт расширения области аппроксимации.

В качестве метода исследований определен обобщенный метод Дарлингтона, как системный подход к решению задач ШПС с возможностью использования различных аппроксимаций.

Вторая глава посвящена поиску АФ с улучшенными вариативными свойствами и разработке методики их использования при согласовании произвольных комплексных нагрузок.

На основе анализа существующих АФ в работах [1–А, 9–А, 11–А, 12–А, 14–А 23–А, 24–А], было установлено, что возможности классических функций могут быть значительно улучшены за счёт их модификации. Принцип модификации был использован и для решения рассматриваемой проблемы. В качестве базовых функций были взяты АФ Баттерворта и Чебышева.

Процесс поиска возможных решений этой проблемы начинался с представления в самом общем виде АФ для цепей фильтрации и согласования следующим образом:

$$K_p(\omega^2) = \frac{K}{1 + P(\omega^2)}, \quad (1)$$

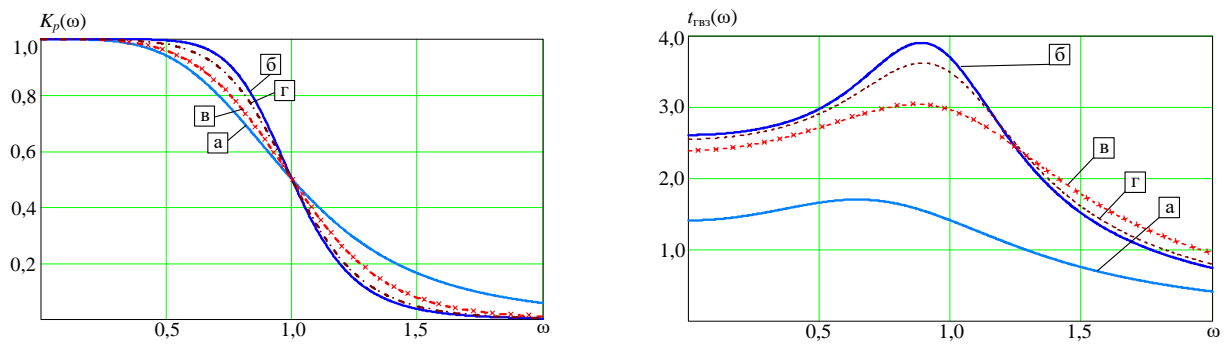
где $K \in (0; 1]$ – коэффициент передачи мощности; $P(\omega^2)$ – некоторый аппроксимирующий четный полином.

При аппроксимации по Тейлору $P(\omega^2) = \omega^{2n}$ вариации ограничиваются величиной K и степенью полинома n , которая скачкообразно меняет форму полинома и вид ЧХ. Для придания большей гибкости есть предложения использовать полиномы дробной степени. Аналитического решения для этого пока не существует, и решение находят численными методами. Однако дополнительных вариативных возможностей при этом не возникает. Полином $P(\omega^2) = \omega^{2n}$ можно рассматривать как произведение полиномов ω^2 . Но если произведение полиномов приводит к аналитическим решениям, можно поискать их среди суммы полиномов вида $v_{i+1}\omega^{2(i+1)} + \dots + v_n\omega^{2n}$ (где $i=0, 1, \dots, n$), каждый из которых является аппроксимирующим. Взвешенная сумма полиномов обеспечивает аппроксимацию по Тейлору порядка n и уже не является максимально плоской. Используя такую взвешенную сумму полиномов в выражении (1), получаем

$$K_p(\omega^2) = \frac{K}{1 + \varepsilon^2 \cdot \frac{v_1\omega^2 + v_2\omega^4 + \dots + v_n\omega^{2n}}{v_1 + v_2 + \dots + v_n}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon \in (0; 1]$ – коэффициент регулирования полосы согласования (аналог коэффициента пульсаций чебышевской АФ), $v_i \in (-\infty; \infty)$ – варьируемые параметры при условии $\sum_{i=1}^n v_i \neq 0$ [4–А, 5–А, 21–А, 27–А].

Как и в классических аппроксимациях, функция (2) нормирована. Так, при частоте среза $\omega_c = 1$, ЧХ будет нормирована по уровню K в соответствии с параметром ε , как и для чебышевской АФ. Гибкость функции проявляется в том, что, варьируя коэффициентами v_i , можно плавно изменять форму ЧХ. Так, при $v_n = 1$ и равными нулю остальными коэффициентами v_i мы имеем максимально-плоскую АФ, а при $v_1 = 1$ и $v_{i+1} = 0$, получаем минимальный порядок аппроксимации (минимально-плоскую АФ). Необходимо отметить, что свойство "гибкости" функции (2) может быть полезным при решении различных задач в радиотехнике, в частности – для получения переходных ЧХ. На рисунке 1 показаны гибкие свойства функции (2) при $K=1$, $\varepsilon=1$, $n=4$ и различных значениях параметра v_4 , в сравнении с аппроксимациями Баттерворта 2-го и 4-го порядков [20–А, 21–А].



а – АФ Баттерворта 2-го порядка; б – АФ Баттерворта 4-го порядка;
 в – АФ (2) при $v_{1,3} = 0$; $v_2 = 1$; $v_4 = 0,5$; г – АФ (2) при $v_{1,3} = 0$; $v_2 = 1$; $v_4 = 3$

Рисунок 1 – Характеристики $K_p(\omega)$, $t_{гв3}(\omega)$

Представленная на рисунке 1 АФ (2), обладает дополнительным вариативным параметром v_4 , позволяющим осуществлять контролируемый плавный переход между функциями Баттерворта 2-го и 4-го порядка. Представленная зависимость группового времени запаздывания $t_{гв3}(\omega)$ на рисунке 1 также отражает вариативные свойства АФ (2).

АФ (2) можно дополнять корректирующими полиномами Чебышева как показано ниже

$$K_p(\omega^2) = \frac{K}{1 + \varepsilon^2 \frac{\sum_{i=1}^n v_i \omega^{2i} \cdot T_{Ch}^2(m, \omega)}{\sum_{i=1}^n v_i}} \quad (3)$$

где $T_{Ch}^2(m, \omega)$ – аппроксимирующий полином Чебышева первого рода m -го порядка.

АФ (3) представляет собой разновидность нарастающе-волновой функции с улучшенными вариативными свойствами [5–А]. Данный класс функций позволяет формировать промежуточные баттервортовско-чебышевские характеристики. Сочетание свойств указанных функций, позволяет добиться большей избирательности в полосе, чем у чебышевской АФ, и преобладать во внеполосном затухании в сравнении с АФ Баттерворта.

Выражения (2) и (3) являются ключевыми соотношениями всей диссертационной работы. Применительно к задаче ШПС АФ (2) и (3), в отличие от классических аппроксимаций, позволяют расширить диапазон согласуемых нагрузок.

Разработана методика ШПС на основе обобщенного метода Дарлингтона с использованием АФ (2) и (3). Методика состоит из восьми этапов [4–А, 5–А]:

1. Анализ нагрузки заключается в определении количества нулей передачи, содержащихся в функции сопротивления (4), а также их принадлежности к одному из классов, для чего необходимо определить четный полином (5).

$$Z_H(s) = \frac{m_{1H} + n_{1H}}{m_{2H} + n_{2H}}, \quad (4)$$

где $m_{1H}, m_{2H}, n_{1H}, n_{2H}$ – четные и нечетные части полиномов функции сопротивления $Z_H(s)$ соответственно.

$$N_H(-s^2) = m_{1H}m_{2H} - n_{1H}n_{2H}, \quad (5)$$

Если сопротивление источника сигналов представлено в виде комплексного, а не резистивного сопротивления, аналогичным образом, как и в пункте 1, анализируется его функция сопротивления.

2. По результатам анализа нагрузки и условию задачи производится формирование ФПМ на основе выражений (2), (3). Когда стоит задача формирования СУ полосовой ЧХ, к выражениям (2), (3) необходимо применить известное реактансное частотное преобразование:

$$\omega \rightarrow \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{B\omega}, \quad (6)$$

где: $\omega_0 = \sqrt{\omega_{гр1} \cdot \omega_{гр2}}$ – центральная частота ($\omega_{гр1}, \omega_{гр2}$ – граничные частоты);

$B = \omega_{гр2} - \omega_{гр1}$ – полоса пропускания ЧХ.

Необходимым свойством АФ в задачах ШПС является наличие нулей передачи согласуемой нагрузки не меньшей кратности. Для нулей передачи в бесконечности можно использовать низкочастотные прототипы функций (2) или (3); для нулей в начале координат надо применить к выбранному низкочастотному прототипу частотное преобразование $\omega \rightarrow 1/\omega$; для смешанных нулей этих классов – преобразование (6). В том случае, если нагрузка содержит нули на мнимой и (или) вещественной осях комплексной частоты, следует внедрить их в АФ (2) или (3), как показано в работе [4–А]. К примеру, для такого случая функция (2) примет следующий вид:

$$K_p(\omega^2) = \frac{K}{1 + \varepsilon^2 \frac{(s_0^2 - 1)^2}{(s_0^2 - \omega^2)^2} \cdot \frac{v_1\omega^2 + v_2\omega^4 + \dots + v_n\omega^{2n}}{v_1 + v_2 + \dots + v_n}}, \quad (7)$$

где s_0 – вводимый нуль передачи (комплексная частота, на которой функция (7) принимает нулевое значение).

При выборе порядка исходной функции передачи оценивается количество нулей нагрузки, а также требуемое затухание в полосе заграждения.

3. Производится запись функции коэффициента отражения (КО) (8) в соответствии с заданным порядком АФ.

$$\rho(s) = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}. \quad (8)$$

4. Формируется система уравнений, определяющих вид ЧХ в соответствии с выражением

$$K_p(-s^2) = 1 - \rho(s)\rho(-s),$$

а также система уравнений, обеспечивающих положительность и вещественность функции КО (8). Для тестирования алгоритма, обеспечивающего АФ (2) n -го порядка, можно задать коэффициенты $K = 1$; $v_1 = v_2 \dots = v_{n-1} = 0$; $v_n = 1$; $\varepsilon = 1$. Функция find (Mathcad) должна вывести $b_0 = b_1 \dots = b_{n-1} = 0$; $b_n = 1$ и коэффициенты a_i полинома Баттерворта порядка n . Аналогично для АФ (3), при тестировании будет получена нарастающе-волновая аппроксимация соответствующего порядка.

5. Определяется функция входного сопротивления согласно (9)

$$Z_{\text{вх}}(s) = \frac{m_1 + n_1}{m_2 + n_2} = \frac{1 - \rho(s)}{1 + \rho(s)}, \quad (9)$$

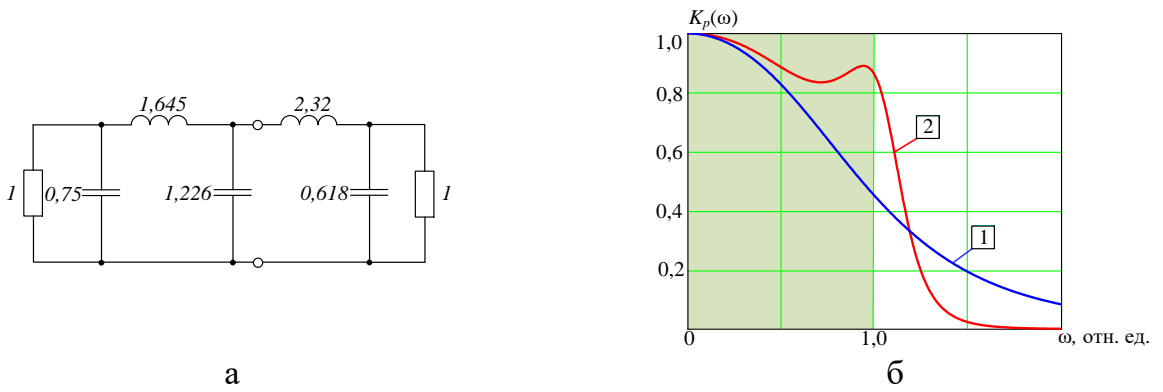
где m_1, m_2, n_1, n_2 – четные и нечетные части полиномов функции сопротивления $Z_{\text{вх}}(s)$ соответственно.

6. Выбирается соответствующая система z -параметров (А или В). На основании оценки нулей передачи нагрузки составляется система равенств и (или) неравенств, обеспечивающая физическую реализуемость СЦ.

7. Выполняется совместное решение уравнений полученных в пунктах 4 и 6. Рекомендации использования параметров v_i при решении системы уравнений заключаются в следующем. Для улучшения формы ЧХ желательно иметь больше нулевых коэффициентов v_i , начиная с первого. Если условия задачи не позволяют получить нулевые коэффициенты, решение возможно при максимальной вариативности параметров. В том случае, если решения системы уравнений нет, необходимо увеличивать число вариативных параметров, а значит порядок аппроксимации.

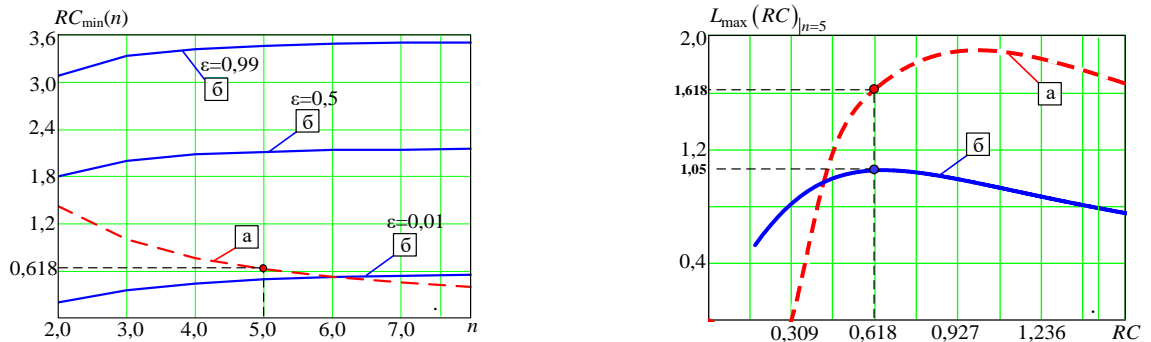
8. Синтез цепи производится, как правило, одним из классических методов (Кауэра, Фостера, Бруне, неопределенных коэффициентов). Результаты синтеза могут не обеспечивать некоторых конструктивных требований разработчика (наличие трансформаторов, реализуемость стандартным рядом элементов и др.). В этом случае уместным будет на заключительном этапе синтеза – оптимизации – использовать процедуры параметрической оптимизации.

Отличительной особенностью представленной методики синтеза, является применение на одном из её этапов аппроксимаций (2), (3) и рекомендаций по их использованию. При помощи разработанной методики, были найдены решения для ряда нагрузок недоступных при согласовании классическими аппроксимациями. В частности представлено решение для тестовой задачи согласования низкочастотной RLC нагрузки (рисунок 2).



а – схема согласования RLC нагрузки;
 б – частотная характеристика передачи мощности: 1– нагрузки, 2– нагрузки с ШСУ
 Рисунок 2 – Решение задачи согласования RLC нагрузки

На рисунке 3 представлены зависимости предельных значений параметров RLC нагрузки при согласовании классическими АФ Баттерворта и Чебышева, где минимальное значение произведения параметров R и C (RC_{\min}) зависит от выбранного порядка АФ, а максимальное значения индуктивности L_{\max} зависит от произведения RC .



а – АФ Баттерворта; б – АФ Чебышева;
 Рисунок 3 – Зависимости $RC_{\min}(n)$, $L_{\max}(RC)_{n=5}$

Из анализа представленных зависимостей на рисунке 3 следует вывод, что использование АФ (2) позволило расширить диапазон значений индуктивности на **30%** при сопоставлении с возможностями классических АФ [5–А].

В третьей главе разработаны подходы к синтезу многополосных и квазидвухполосовых СЦ при использовании обобщенного метода Дарлингтона. Для формирования многополосных ЧХ, предлагается использовать известное реактансное преобразование применительно к классическим АФ, для которых полином Гурвица табулирован [2–А]. Для нагрузок простых классов (в том числе с нулями передачи 2-ой кратности) впервые получены аналитические решения и теоретические ограничения на согласования [2–А, 10–А, 15–А, 18–А, 25–А, 26–А]. Определен способ формирования квазидвухполосовых ЧХ с регулируемой

шириной полосы поддиапазонов, для чего требуется решить систему нелинейных уравнений для каждого выражения граничной частоты:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{(\omega_1^2 - \omega_{гр1}^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega_{гр1}^2) \cdot (1 + x \cdot \omega_{гр1}^\alpha)}{\omega_{гр1}^\beta \cdot B'} \right)^2 = 1; \\ \vdots \\ \left(\frac{(\omega_1^2 - \omega_{гр4}^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega_{гр4}^2) \cdot (1 + x \cdot \omega_{гр4}^\alpha)}{\omega_{гр4}^\beta \cdot B'} \right)^2 = 1, \end{array} \right. \quad (10)$$

где $\omega_1, \omega_2, x, B'$ – коэффициенты, определяемые в результате решения системы нелинейных уравнений (10); α, β – параметры, выбираемые в зависимости от соотношения диапазонов.

Рекомендации по выбору параметров α и β представлены ниже в таблице 1.

Таблица 1. – Рекомендации по выбору параметров α и β

$B_1 = B_2$		$\alpha = 0, \beta = 1$
$B_1 > B_2$	$K_p(\omega^2) _{\omega=0} = 0$	$\alpha = 2 \cdot t; \beta = 1$
	$K_p(\omega^2) _{\omega=0} > 0$	$\alpha = 2 \cdot t; \beta = 0$
$B_1 < B_2$		$\alpha = 2; \beta = 2 \cdot t$

где $K_p(\omega^2)$ – требуемая по условию задачи АФ; B_1, B_2 – ширина 1-го и 2-го диапазона соответственно; $t = 1, 2$ – последовательно увеличиваемый коэффициент для решения системы уравнений (10).

Найденные параметры $\omega_1, \omega_2, x, B'$ подставляются в частотное преобразование (11) [3–А, 18–А, 19–А, 24–А].

$$\left(\frac{(\omega_1^2 - \omega^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega^2) \cdot (1 + x \cdot \omega^\alpha)}{\omega^\beta \cdot B'} \right). \quad (11)$$

Определена методика синтеза квазидвухполосовых СЦ с использованием классических АФ [3–А]. Проведено сопоставление результатов согласования тестовых нагрузок с условием обеспечения квазидвухполосовых ЧХ. Качество согласования по критерию максимума передачи мощности не уступает результатам, полученным аналитическим и структурно-параметрическим методами [6–А]. Возможности многополосных и квазидвухполосовых функций, полученных на основе низкочастотных прототипов классических АФ не исчерпывают всего многообразия объектов согласования. Номиналы элементов нагрузок могут находиться за пределами ограничений и таким образом не позволяют использовать рассмотренные выше подходы. Для чего предлагается использовать рассмотренные принципы формирования многополосных и квазидвухполосовых ЧХ

применительно к методике синтеза, основанной на использовании АФ (2) и (3) [6–А].

В четвертой главе представлен новый подход к синтезу согласующих устройств в распределенном элементном базисе. Разработанная во 2-ой главе методика ШПС перенесена в область синтеза на распределенных структурах, за счёт использования концепции метода синтеза электрических фильтров на однородных микрополосковых линиях, в основе которого лежит частотное преобразование Ричардса. Суть идеи заключается в представлении нагрузки и элементов согласования отрезками микрополосковых линий одинаковой длины. Общая последовательность действий в разработанной методике синтеза микрополосковых согласующих устройств остаётся такой же, как и для методики, описанной в главе 2 за исключением пунктов 1, 2, 8. Ниже для данных пунктов обозначены обязательные условия и порядок дополнительных действий [7–А, 8–А, 13–А, 16–А].

1. Модель нагрузки представляется каскадным соединением отрезков микрополосковых линий с электрической длиной равной (либо кратной) $\lambda/4$.

2. К АФ (2) и (3) применяется частотное преобразование Ричардса.

$$\omega^2 = (-1) \mathfrak{S}^2 \frac{p^2}{1-p^2}.$$

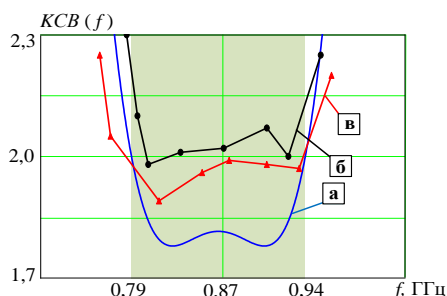
где $\mathfrak{S} = 1/\sin(2\pi l/\lambda)$ – нормирующий множитель (l – длина отрезка однородной линии передачи; λ – длина волны в линии передачи); $p = \pm j \tan(2\pi\tau)$ – частотная переменная Ричардса (τ – время задержки).

8. Синтез СУ, так же, как и для сосредоточенных элементов, производится по функции $Z_{\text{вых}}(p)$. Однако синтез основан на процедуре выделения волновых сопротивлений отрезков одинаковой длины.

Последовательность действий, связанных с выбором порядка функции и рекомендациями по их использованию сохраняется. При этом отпадает необходимость для полосового варианта использовать соответствующее частотное преобразование, что упрощает алгоритм синтеза. Система ограничений в пространстве Ричардса также имеет свои особенности, обусловленные характером нулей передачи. В распределенном синтезе нули передачи не должны содержаться в z -параметрах, поэтому в процессе синтеза они сокращаются в полиномах всех z -параметров. Здесь же других нулей передачи кроме $p = \pm 1$ нет, и аналога в синтезе с сосредоточенными параметрами для этого нуля тоже нет.

Предлагаемая методика синтеза в распределенном элементном базисе может использоваться для согласования широкого класса резонансных нагрузок, размеры которых кратны четверти длины волны [7–А, 8–А]. Патч-антенны являются удобным объектом для ШПС по предлагаемой методике синтеза, так как физическую модель сопротивления патч-антенны можно представить в виде отрезков линий. Представлены этапы моделирования и согласования патч-антенны, рассчитанной на 869 МГц [8–А].

Результат согласования патч-антенны, рассчитанной на 869 МГц – два отрезка одинаковой длины с волновыми сопротивлениями: $Z_1 = 105 \text{ Ом}$, $Z_2 = 135 \text{ Ом}$. Результат эксперимента хорошо согласуется с результатом синтеза, что видно из сопоставления характеристик на рисунке 4.



а – теоретический результат; б – промоделировано в среде CST Studio 2015;
в – эксперимент

Рисунок 4 – Частотные характеристики КСВ согласованной антенны

Полоса согласования по уровню $KCB=2$ составляет **17%**, что обеспечивает прием и передачу сигналов в полосе 150 МГц [8–А].

Также проведены этапы моделирования и согласования патч-антенны, рассчитанной на рабочую частоту 1,2 ГГц. Результатом синтеза по функции $Z_{\text{ВЫХ}}$, является волновое сопротивление согласующего отрезка $Z_c = 155 \text{ Ом}$ и $R_r = 83 \text{ Ом}$. Геометрические размеры согласующего элемента с учётом высоты и диэлектрической проницаемости подложки соответственно равны $l = 64 \text{ мм}$, $w = 0,2 \text{ мм}$. На рисунок 5 представлен вид характеристики КСВ согласованной патч-антенны, полученной при моделировании.

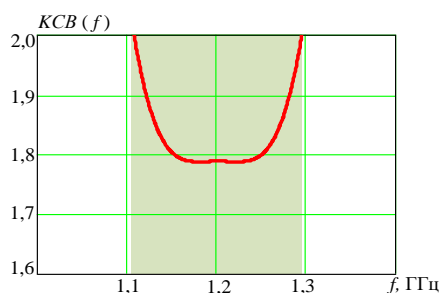
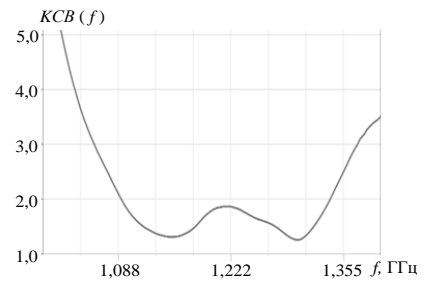


Рисунок 5 – Частотная характеристика КСВ согласованной патч-антенны

Увеличить полосу при значении $KCB = 2$ удалось до **15%** всего одним согласующим элементом [7–А]. Улучшить результат согласования удалось при помощи алгоритмов оптимизации заложенных в среде моделирования CST Studio, используя в качестве начальных приближений результаты синтеза. Для обеспечения $R_r = 50 \text{ Ом}$ использовался подстроечный элемент, в виде разомкнутого шлейфа. Опытный образец антенны представлен на рисунках б(а). Полоса согласования по уровню $KCB = 2$ составляет **20%** (рисунок б(б)), что обеспечивает прием и передачу сигналов в полосе 240 МГц.



а



б

Рисунок 6 – Конструкция (а) и частотная характеристика КСВ (б) патч-антенны

Результаты синтеза отражают потенциальные возможности пределов согласования, которые предоставляет АФ (2).

В **Приложении А** представлены пояснения к обобщенному методу Дарлингтона.

В **Приложении Б** представлены выражения для оценки пределов на согласования низкочастотной RLC нагрузки.

В **Приложении В** представлены акты о практическом использовании результатов диссертационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведен аналитический обзор известных методов ШПС нагрузок. Выявлены основные недостатки аналитических методов, к которым, прежде всего, относится недостаточная гибкость АФ [9–А – 12–А, 14–А, 15–А, 23–А, 24–А]. Известные аналитические методики пригодны лишь для согласования относительно простых нагрузок [1–А]. Определены направления для расширения области аналитических решений синтеза СЦ применительно к сложным комплексным нагрузкам. Разработаны новые АФ с дополнительными вариативными параметрами. Главной особенностью разработанных АФ является способность формирования переходных ЧХ между известными аппроксимациями [20–А, 21–А]. При этом дополнительные степени свободы позволяют расширить область аналитических решений задач ШПС [4–А, 5–А, 20–А, 21–А, 27–А].

2. На основе математического аппарата обобщенного метода Дарлингтона разработана новая методика синтеза СУ в сосредоточенном элементном базисе с использованием АФ с улучшенными вариативными свойствами применительно к сложным комплексным нагрузкам [4–А, 5–А]. При решении тестовой задачи согласования низкочастотной RLC нагрузки, показано преимущество использования предлагаемых АФ по отношению к классическим аппроксимациям Чебышева и Баттерворта. Оценка основана на возможном диапазоне параметров нагрузки для каждой аппроксимации. Так, использование разработанных АФ позволило расширить диапазон параметра индуктивности L на 30% в сравнении с классическими АФ [5–А].

3. Разработано новое модифицированное частотное преобразование, предназначенное для формирования квазидвухполосовых ЧХ с регулируемой шириной поддиапазонов [3–А, 19–А]. Использование известных и разработанных частотных преобразований позволило расширить возможности методики ШПС для случая многополосной и квазидвухполосовой ЧХ [2–А, 6–А, 18–А, 25–А, 26–А]. При сопоставлении с известным результатом согласования низкочастотной RC нагрузки, удалось при одинаковом уровне передаваемой мощности в полосе пропускания уменьшить мощность сигнала по интегральному критерию в полосе заграждения от 4,9 до 39,8 процентов [3–А]. При сопоставлении с известным результатом согласования низкочастотных RC и RL нагрузок, удалось уменьшить интегральную ошибку, оцениваемую в полосах согласования до 3,7% при экономии 5 элементов цепи согласования [6–А].

4. При согласовании патч-антенн предложен вариант использования обобщенного метода Дарлингтона для согласования в распределенном элементном базисе [7–А, 8–А, 17–А, 22–А]. В основе синтеза лежит частотное преобразование Ричардса [13–А, 16–А]. Разработанная методика синтеза микрополосковых согласующих отрезков позволила расширить полосу согласования при заданном уровне $K_{СВ} \leq 2$ для патч-антенны, рассчитанной на 1,2 ГГц до 15% (подтверждено результатами моделирования) и рассчитанной на 869 МГц до 17% (подтверждено результатами моделирования и натурального эксперимента), что в 2.14 - 2.43 раза больше по сравнению с известными методами согласования (выбора точки возбуждения антенны и использования четвертьволновых трансформаторов), которые обеспечивают полосу согласования для патч-антенн, при тех же условиях, не более 7%.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные АФ коэффициента преобразования мощности могут быть использованы при разработке электрических фильтров широкого назначения, в том числе с переходными ЧХ известных аппроксимаций.

Разработанная методика решения задач ШПС может быть использована при конструировании и модернизации радиоприемных устройств радиолокационных комплексов, средств радиосвязи, а также при согласовании антенных устройств, работающих в частотном диапазоне, позволяющем применять элементы с сосредоточенными параметрами. Также возможным является согласование сопротивлений РТУ с многоканальной (двухканальной) передачей сигналов.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при конструировании антенных систем геолокационных комплексов (приложение В).

Полученные в ходе исследования результаты целесообразно использовать при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в учреждениях, занимающихся разработкой и модернизацией радиотехнических и других систем, а также при подготовке инженеров соответствующего профиля.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

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

1–А. Янцевич, М. А. Преимущества подхода решения задач широкополосного согласования с использованием модифицированных аппроксимирующих функций / М. А. Янцевич, П. В. Бойкачев, И. А. Дубовик // Проблемы инфокоммуникаций. – 2018. – № 2. – С. 76–83.

2–А. Янцевич, М. А. Методика синтеза многополосных согласующих устройств / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // Докл. БГУИР. – 2019. – № 7/8. – С. 66–72.

3–А. Янцевич, М. А. Методика синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // Докл. БГУИР. – 2020. – Т. 18, № 2. – С. 71–79.

4–А. Янцевич, М.А. Методика синтеза широкополосных согласующих устройств с использованием ограниченно-плоских аппроксимирующих функций / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // Изв. Гомел. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. – 2021. – № 6. – С. 154–158.

5–А. Янцевич, М. А. Гибкие аппроксимирующие функции для широкополосного согласования / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 6–15.

6–А. Янцевич, М. А. Способ совершенствования методики синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств / М. А. Янцевич, А. А. Свириденко // Докл. БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 5. – С. 82–89.

7–А. Янцевич, М. А. Согласование патч-антенны для геолокации / М. А. Янцевич // Изв. Гомел. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. – 2022. – № 6. – С. 108–113.

8–А. Янцевич, М. А. Согласование патч-антенны с кросс-поляризацией для геолокации / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // Докл. БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 8. – С. 59–66.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9–А. Янцевич, М. А. Реализация модифицированных функций путем прямого синтеза четырехполюсника канонической формы / М. А. Янцевич, П. В. Бойкачев, А. А. Свириденко // Информационные технологии и системы 2016 (ИТС 2016) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 26 окт. 2016 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 242–243.

10–А. Янцевич, М. А. Анализ чувствительности характеристик электрических цепей синтезированных с использованием различных аппроксимирующих функций [Электронный ресурс] / М. А. Янцевич, П. В. Бойкачев // Информационные технологии в образовании, науке

и производстве : IV Междунар. науч.-техн. интернет-конф., Минск, 18–19 нояб. 2016 г. Секция: Информационные технологии в производстве и научных исследованиях / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/27169/Analiz_chuvstvitelnosti_harakteristik.pdf?sequence=1&isAllowed=y. – Дата доступа: 20.02.2023.

11–А. Янцевич, М. А. Анализ показателей качества фильтров-прототипов синтезированных с помощью классических и модифицированных аппроксимирующих функций [Электронный ресурс] / М. А. Янцевич, П. В. Бойкачев // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XX Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 20–22 марта 2017 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. ун-т ; редкол.: О. М. Демиденко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2017. – Ч. 2. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

12–А. Бойкачев, П. В. Обоснование основных требований к современным широкополосным средствам радиосвязи и пути их реализации / П. В. Бойкачев, М. А. Янцевич // 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 20–22 мая 2017 г. : сб. науч. ст. : в 3 ч. / Гос. воен.-пром. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: С. М. Ненужный, В. В. Гордей, Л. Н. Марков. – Минск, 2017. – Ч. 2. – С. 174–180.

13–А. Янцевич, М. А. Результаты моделирования фильтров СВЧ основанных на различных подходах к проблеме / М. А. Янцевич, А. А. Свириденко // Информационные технологии и системы 2017 (ИТС 2017) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 25 окт. 2017 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 210–211.

14–А. Янцевич, М. А. Модифицированные аппроксимирующие функции передачи мощности в задачах широкополосного согласования / М. А. Янцевич, И. А. Дубовик // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации – 2017 : сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 25–26 апр. 2018 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. акад. авиации ; сост.: А. В. Дубовский [и др.]. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 115–121.

15–А. Янцевич, М. А. Преимущества и особенности использования неминимально-фазового коэффициента отражения в задачах широкополосного согласования сопротивлений / М. А. Янцевич, И. А. Дубовик // Информационные технологии и системы 2018 (ИТС 2018) : материалы междунар. науч. конф., Минск, 25 окт. 2018 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 78–79.

16–А. Свириденко, А. А. Методика широкополосного согласования нагрузок с сосредоточенными параметрами на основе обобщенной матрицы рассеяния [Электронный ресурс] / А. А. Свириденко, М. А. Янцевич // Информационные технологии в образовании, науке и производстве : VI Междунар. науч.-техн. интернет-конф., 17–18 нояб. 2018 г. – [Б. и.], 2018. – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/49920/METODIKA_SHIROKOPOLOSNOGO_SOGLASOVANIYA_NAGRUZOK_S_SOSREDOTOCHENNYMI_PARAMETRAMI.pdf?sequence=1&isAllowed=y. – Дата доступа: 20.02.2023.

17–А. Патч антенны с вращающейся поляризацией / В. В. Кириченко, А. А. Свириденко, Г. А. Филиппович, М. А. Янцевич // 8-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения Минск, 16–17 мая 2019 г. : сб. науч. ст. : в 5 ч. / Гос. воен.-промыш. ком. Респ. Беларус. – Минск, 2019. – Ч. 4. – С. 25–27.

18–А. Янцевич, М. А. Многополосные согласующие устройства в аппаратуре радиосвязи / М. А. Янцевич // Современные средства связи : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 окт. 2019 г. / Белорус. гос. акад. связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2019. – С. 79–81.

19–А. Янцевич, М. А. Формирование квазидвухполосовых частотных характеристик с регулируемой шириной поддиапазонов / М. А. Янцевич // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XXIII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 23–25 марта 2020 г. / Гомел. гос. ун-т ; редкол.: С. П. Жогаль (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2020. – С. 64–65.

20–А. Янцевич, М. А. Аппроксимирующие функции передачи мощности с переходными свойствами известных частотных характеристик / М. А. Янцевич // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XXIV Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 22–24 марта 2021 г. / Гомел. гос. ун-т ; редкол.: С. П. Жогаль (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2021. – С. 69–70.

21–А. Янцевич, М. А. Гибкие аппроксимации в задачах широкополосного согласования / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // Current issues of modern science and practice : abstr. of XIV intern. sci. a. practical conf., Rome, 17–19 May 2021 / Europ. Conf. – [Rome], 2021. – P. 207–209.

22–А. Янцевич, М. А. Патч антенны с кросс-поляризацией для георазведки / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // 9-я международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 23–26 июня 2021 г. – Минск, 2021. – С. 179–182.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

23–А. Янцевич, М. А. Сравнительный анализ показателей качества частот-избирательных и согласующих цепей синтезированных с использованием классических и модифицированных аппроксимирующих функций / М. А. Янцевич, П. В. Бойкачев // Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 23–24 марта. 2017 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2017. – С. 401.

24–А. Янцевич, М. А. Анализ классических и модифицированных аппроксимирующих функций используемых для задач синтеза частотно-избирательных цепей / М. А. Янцевич, П. В. Бойкачев // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : тез. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. и авиац. фак. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 18–19 мая 2017 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2018. – С. 94.

25–А. Янцевич, М. А. Многополосные согласующие устройства / М. А. Янцевич // Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 17–18 апр. 2019 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – С. 320.

26–А. Янцевич, М. А. Согласующие устройства в многодиапазонных системах связи / М. А. Янцевич, А. А. Свириденко // Молодежь в науке – 2019 : тез. докл. XVI Междунар. конф. молодых ученых, Минск, 14–17 окт. 2019 г. / НАН Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 506–508.

27–А. Янцевич, М. А. Широкополосное согласование с использованием гибких аппроксимаций / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // Военное образование и наука в условиях цифровой трансформации знаний : тез. докл. Междунар. науч. конф. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 20–21 апр. 2022 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2022. – С. 415.



РЭЗІЮМЭ

Янцэвіч Міхаіл Аляксандравіч

Шырокапалоснае ўзгадненне абагульненым метадам Дарлінгтана з выкарыстаннем апраксімуецца функцый з палепшанымі варыятыўнымі ўласцівасцямі

Ключавыя словы: шырокапалоснае ўзгадненне, нагрузка, апраксімуецца функцыя.

Мэта працы: палепшэнне параметраў шырокапалоснага ўзгаднення складаных комплексных нагрузкаў у радыётэхнічных сістэмах.

Метады даследавання: абагульнены метады Дарлінгтана, а таксама метады матэматычнага мадэлявання і полунатурнага эксперыменту.

Выкарыстаная апаратура: вектарныя аналізатары электрычных ланцугоў «NanoVNA» і «Rohde & Schwarz ZNH14».

Атрыманыя вынікі і іх навізна: праведзены аналітычны агляд публікацый, прысвечаных рашэнню задачы шырокапалоснага ўзгаднення супраціваў радыётэхнічных прылад. Пазначана праблема аналітычных метадаў пры ўзгадненні імі складаных комплексных нагрузкаў, якая складаецца ў нізкай варыятыўнасці выкарыстоўваных пры гэтым класічных апраксімацый. Сфармулявана і знойдзена рашэнне ў выглядзе апраксімацый з палепшанымі варыятыўнымі ўласцівасцямі. Функцыі ўяўляюць сабой узважаныя сумы вядомых класічных апраксімацый Батэрворта і Чабышава. На аснове абагульненага метаду Дарлінгтана распрацавана метадыка шырокапалоснага ўзгаднення з выкарыстаннем апраксімавальных функцый з палепшанымі варыятыўнымі ўласцівасцямі. Перавага выкарыстання прапанаваных апраксімацый у адносінах да класічных функцый Чабышава і Батэрворта, выяўляецца, як у пашырэнні дыяпазону значэнняў параметраў нагрузкаў, так і павелічэнне складанасці іх структуры. Таксама разгледжаны падыходы да сінтэзу шматпалосных і квазідвухпалосавых узгадняючых ланцугоў пры выкарыстанні абагульненага метаду Дарлінгтана і гнуткіх апраксімацый. Разгледжаны рашэнні практычных задач узгаднення патч-антэн. Распрацавана метадыка шырокапалоснага ўзгаднення у размеркаваным элементным базісе.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі мэтазгодна выкарыстоўваць пры рашэнні практычных задач ўзгаднення антэна-фідэрнай прылад шырокага дыяпазону частот, а таксама выкананні навукова-даследчых і доследна-канструктарскіх работ ва ўстановах, якія займаюцца распрацоўкай і мадэрнізацыяй радыёлакацыйных і іншых сістэм, а таксама пры падрыхтоўцы інжынераў адпаведнага профілю.

Вобласць ужывання: распрацоўкі і мадэрнізацыі высокачашчынных гасцінцаў радыётэхнічных сістэм.

РЕЗЮМЕ

Янцевич Михаил Александрович

Широкополосное согласование обобщенным методом Дарлингтона с использованием аппроксимирующих функций с улучшенными вариативными свойствами

Ключевые слова: широкополосное согласование, нагрузка, аппроксимирующая функция.

Цель работы: улучшение параметров широкополосного согласования сложных комплексных нагрузок в радиотехнических системах.

Методы исследования: обобщенный метод Дарлингтона, а также методы математического моделирования и полунатурного эксперимента.

Использованная аппаратура: векторные анализаторы электрических цепей «NanoVNA» и «Rohde & Schwarz ZNH14».

Полученные результаты и их новизна: проведен аналитический обзор публикаций, посвященных решению задачи широкополосного согласования сопротивлений радиотехнических устройств. Обозначена проблема аналитических методов при согласовании ими сложных комплексных нагрузок, заключающейся в низкой вариативности используемых при этом классических аппроксимаций. Сформулировано и найдено решение в виде аппроксимаций с улучшенными вариативными свойствами. Функции представляют собой взвешенные суммы известных классических аппроксимаций Баттерворта и Чебышева. На основе обобщенного метода Дарлингтона разработана методика широкополосного согласования с использованием аппроксимирующих функций с улучшенными вариативными свойствами. Преимущество использования предлагаемых аппроксимаций по отношению к классическим функциям Чебышева и Баттерворта, проявляется, как в расширении диапазона значений параметров нагрузок, так и увеличение сложности их структуры. Также рассмотрены подходы к синтезу многополосных и квазидвухполосовых согласующих цепей при использовании обобщенного метода Дарлингтона и гибких аппроксимаций. Рассмотрены решения практических задач согласования патч-антенн. Разработана методика широкополосного согласования в распределенном элементном базисе.

Рекомендации по использованию: результаты целесообразно использовать при решения практических задач согласования антенно-фидерных устройств широкого диапазона частот, а также выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в учреждениях, занимающихся разработкой и модернизацией радиолокационных и других систем, а также при подготовке инженеров соответствующего профиля.

Область применения: разработки и модернизации высокочастотных трактов радиотехнических систем.

SUMMARY

Yantsevich Mikhail Alexandrovich

Broadband matching by the generalized Darlington method using approximating functions with improved variational properties

Keywords: broadband matching, load, approximating function.

Purpose of the work: improving the parameters of broadband matching of complex complex loads in radio systems.

Research methods: the generalized Darlington method, as well as methods of mathematical modeling and semi-natural experiment.

Used equipment: vector analyzers of electrical circuits «NanoVNA» and «Rohde & Schwarz ZNH14».

The results obtained and their novelty: An analytical review of publications devoted to solving the problem of broadband matching of the resistance of radio engineering devices was carried out. The problem of analytical methods in matching loads of increased complexity is identified, which consists in the low variability of the classical approximations used in this case. A solution was formulated and found in the form of approximations with improved variable properties. The functions are weighted sums of the well-known classical Butterworth and Chebyshev approximations. Based on the generalized Darlington method, a broadband matching technique using approximating functions with improved variable properties has been developed. The advantage of using the proposed approximations in relation to the classical Chebyshev and Butterworth functions is manifested both in expanding the range of values of load parameters and increasing the complexity of their structure. Approaches to the synthesis of multi-band and quasi-two-band matching circuits using the generalized Darlington method and flexible approximations are also considered. Solutions to practical problems of matching patch antennas are considered. A technique has been developed for broadband matching in a distributed element base.

Recommendations for use: it is advisable to use the results in solving practical problems of matching antenna-feeder devices of a wide frequency range, as well as performing research and development work in institutions engaged in the development and modernization of radar and other systems, as well as in the training of engineers of the appropriate profile.

Scope: development and modernization of high-frequency paths of radio engineering systems.

Научное издание

**Янцевич
Михаил Александрович**

**ШИРОКОПОЛОСНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ОБОБЩЕННЫМ
МЕТОДОМ ДАРЛИНГТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ С УЛУЧШЕННЫМИ
ВАРИАТИВНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

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

Подписано в печать 11.12.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 244.

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