

Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники»

Объект авторского права

УДК 621.372.512

**ИСАЕВ**  
**Владислав Олегович**

**АППРОКСИМАЦИЯ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В ЗАДАЧАХ  
ШИРОКОПОЛОСНОГО СОГЛАСОВАНИЯ НА ОСНОВЕ  
РАЗЛОЖЕНИЯ ДРОБНО-РАЦИОНАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ МЕТОДОМ  
ГЕВЕРЦА**

**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

**Бойкачев Павел Валериевич**, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры тактики и вооружения радиотехнических войск учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Официальные оппоненты:

**Забеньков Игорь Иванович**, доктор технических наук, профессор.

**Труханов Алексей Валентинович**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению».

Оппонирующая организация

Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр радиотехники НАН Беларуси».

Защита состоится «2» ноября 2023 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, 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 «2» октября 2023 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



Т.А. Пулко

## **ВВЕДЕНИЕ**

При проектировании радиотехнических устройств (РТУ) практически всегда решаются вопросы широкополосного согласования (ШПС) источника сигнала с комплексной нагрузкой [2, 9, 13]. Одной из основных проблем качественного решения задачи согласования широкополосных РТУ заключается в отсутствии возможности учета нестабильности импедансных характеристик, вызванной различными дестабилизирующими факторами изменения условий эксплуатации (температура, влажность, механические и электромагнитные воздействия), это ярко выражено на подвижных объектах. Особенно это наблюдается в системах, нагрузкой которых являются антенные устройства (АУ), их импеданс зависит не только от частоты излучаемого сигнала, но и от условий эксплуатации (сезонных и климатических изменений) [1, 3, 11].

Многочисленные работы ШПС направлены на решение задач согласования нагрузок, имеющих постоянный импеданс. Об этом свидетельствуют ряд современных публикаций и защищаемых диссертационных работ. Ввиду непостоянства иммитансных характеристик согласуемых нагрузок, методы, предлагаемые в этих работах, дают не оптимальные решения, в связи с этим возникает необходимость в разработке новых и улучшении существующих методов синтеза адаптивных согласующих устройств, позволяющих обеспечить требуемые характеристики РТУ при изменении импеданса нагрузки. Кроме этого, сопротивление современных РТУ представляются в виде измеренных значений реальной  $\text{Re}F(f)$  и мнимой  $\text{Im}F(f)$  составляющих на дискретном ряде частот, анализ изменения которых, в результате воздействия различных факторов, является сложной задачей [7].

Таким образом, весьма перспективным оказывается разработка методов математического моделирования импедансных характеристик согласуемых нагрузок, позволяющих провести оценку влияния внешних и внутренних воздействий на импеданс РТУ, как на этапе проектирования, так и во время эксплуатации, для последующего учета, оптимизации и адаптации их параметров к возмущающим воздействиям при использовании теории широкополосного согласования.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации включена в утвержденные планы научной работы учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» и соответствует Перечню перспективных направлений диссертационных исследований Вооруженных Сил Республики Беларусь в области разработки новых и совершенствованию существующих приемопередающих систем и устройств (п. 284). Содержание диссертационной работы соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 года, утвержденного Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 07.05.2020 в области машиностроения, машиностроительных

технологий, приборостроения и инновационных материалов (п. 4), обеспечения безопасности человека, общества и государства (п. 69).

Результаты диссертационных исследований использовались для разработки аналитических моделей функций входного сопротивления и широкополосных согласующих устройств (ШСУ):

– J-антенны быстроразвертываемого сигнализационного комплекса С-801 «Паук»;

– малогабаритной планарной рамочной антенны WWAN/LTE диапазона.

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

1) научно-исследовательская работа «Разработка математической модели адаптивного согласующего устройства» (№ госрегистрации 583907);

2) научно-исследовательская работа «Согласование нагрузок на элементном базисе с распределенными параметрами» (№ госрегистрации 339арх);

3) научно-исследовательская работа «Разработка методики восстановления сообщений в многопозиционной системе радиоперехвата КВ-диапазона» (№ госрегистрации 338арх).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Цель – улучшение параметров широкополосного согласования источников сигнала и комплексных нагрузок за счет обработки и аппроксимации измеренных значений импедансов широкополосных радиотехнических устройств (антенн).

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– проведен аналитический обзор и анализ по тематике диссертации, по результатам которого обозначена проблема, заключающаяся в изменении уровня КПМ от источника сигнала к комплексной нагрузке РТУ, вызванное изменением импеданса нагрузки от номинального значения из-за изменений условий эксплуатации и влиянием различных факторов процессов измерений и преобразования данных (шумы, помехи, дестабилизирующие факторы и ошибки измерений);

– выполнен аналитический обзор и анализ существующих методик моделирования импедансов комплексных нагрузок, численно заданных на дискретном ряде частот, по результатам которого сформированы их достоинства и недостатки, обоснована необходимость и направление их развития;

– осуществлен выбор математического аппарата, базирующегося на методе математического моделирования, который лежит в основе методики формирования аналитических моделей импедансов широкополосных РТУ;

– разработана методика формирования аналитических моделей импедансов широкополосных РТУ в виде дробно-рациональной функции, отличающийся учетом ограничений условий физической реализуемости и разложением аппроксимирующей функции на реальную и мнимую составляющие методом Геверца, обеспечивающая уменьшения ошибки аппроксимации импедансных характеристик согласуемых комплексных нагрузок;

– разработана методика обработки результатов измерения нестационарного импеданса согласуемой нагрузки, позволяющая рассчитать аналитические модели

измеренных значений импедансов широкополосных радиотехнических устройств с заданными параметрами доверительной вероятности, относительной погрешности и абсолютной ошибки аппроксимации в задачах широкополосного согласования;

– проведена оценка эффективности разработанных методик в решении задач согласования изменяющихся импедансов широкополосных РТУ.

**Объект исследования** – импедансные характеристики широкополосных радиотехнических устройств (антенн).

**Предмет исследования** – методы формирования и статистической оценки импедансной характеристики согласуемой нагрузки, применяемых в задачах широкополосного согласования.

### **Научная новизна**

*Научная новизна* полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработана методика формирования аналитической модели импеданса радиотехнических устройств, *отличающаяся* учетом условий физической реализуемости и разложением дробно-рациональной функции импеданса на реальную и мнимую составляющие методом Геверца, *позволяющая* уменьшить ошибку вычислений и порядок дробно-рациональной функции, описывающей реальную и мнимую составляющие импеданса согласуемой нагрузки, численно заданных на дискретном ряде частот, по сравнению со структурно-параметрическими методами моделирования импедансов нагрузки.

2. Предложен подход к формированию аналитических моделей параметров рассеяния ( $S$ -параметров) транзисторов в виде дробно-рациональных функций, *отличающийся* представлением модуля и фазы  $S$ -параметров в виде реальной и мнимой составляющей комплексного числа, что *позволяет* получить аналитическую модель параметров рассеяния, обеспечивающую ошибку аппроксимации не более 2%.

3. Разработана методика обработки результатов измерений импеданса радиотехнических устройств в заданных условиях эксплуатации, *отличающаяся* заданием требуемых доверительных вероятностей и интервала для реальной и мнимой составляющих импеданса в заданном диапазоне частот и определением минимального количества необходимого числа измерений импеданса на каждой частоте с учетом погрешностей измерителя, *позволяющая* получить аналитические модели импедансов широкополосных радиотехнических устройств с учетом погрешностей измерений с заданными параметрами доверительной вероятности (0.5–0.99), относительной погрешности (1–30%) и абсолютной ошибки аппроксимации не более 10%.

4. Разработана модель согласующего устройства для антенны AD-25/CW-3512, синтезированная методом вещественных частот с применением обработки результатов измерения нестационарного импеданса радиотехнических устройств, позволяющая, по сравнению со штатными ШСУ, обеспечить средний выигрыш от 2 до 15 % (250–2300 м) в потенциально достижимой дальности действия радиолинии носимой радиостанция УКВ-диапазона Р-181-5НУ.

## **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика формирования аналитической модели импеданса радиотехнических устройств, *отличающаяся* учетом условий физической реализуемости и разложением дробно-рациональной функции импеданса на реальную и мнимую составляющие методом Геверца, *позволяющая* уменьшить ошибку вычислений и порядок дробно-рациональной функции, описывающей реальную и мнимую составляющие импеданса согласуемой нагрузки, численно заданных на дискретном ряде частот, по сравнению со структурно-параметрическими методами моделирования импедансов нагрузки (например, для антенны типа вибратор горизонтальный диапазонный *уменьшить ошибку аппроксимации на 18%* для реальной составляющей, на *17%* - для мнимой составляющей и *уменьшить порядок* аналитической модели импеданса *на 2*).

2. Методика обработки результатов измерений импеданса радиотехнических устройств в заданных условиях эксплуатации, *отличающаяся* заданием требуемых доверительных вероятностей и интервала для реальной и мнимой составляющих импеданса в заданном диапазоне частот и определением минимального количества необходимого числа измерений импеданса на каждой частоте с учетом погрешностей измерителя, *позволяющая* получить аналитические модели импедансов широкополосных радиотехнических устройств с учетом погрешностей измерений с заданными параметрами доверительной вероятности (0.5–0.99), относительной погрешности (1–30%) и абсолютной ошибки аппроксимации не более 10%, требуемыми для расчета согласующих устройств (например, получить аналитическую модель нестационарного импеданса антенны AD-25/CW-3512 *с доверительной вероятностью 0,9, относительной погрешностью 10%, и обеспечить абсолютную ошибку аппроксимации не более 10%*).

## **Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением 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 Бойкачев П.В., который определял цели, ставил задачи исследований, принимал участие в выборе методов исследований и обсуждении полученных результатов. В части построения моделей ШСУ оказывал помощь канд. тех. наук Дубовик И. А. Вклад других соавторов в совместно опубликованных работах – канд. тех. наук Солонара А. С., канд. тех. наук Дмитренко А. А., канд. тех. наук Ержан А. А., канд. физ.-мат. наук Зубарь Т. И., канд. физ.-мат. наук Тишкевич Д. И, Сутько А.А., Полещук М.И., Марата А. и Шенера А.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: XXII и XXIII Республиканских научных конференциях студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, 2019, 2020); 8-й и 9-й Международных научных конференциях по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (MILEX-2019, MILEX-2021) (г. Минск, 2019, 2021); XVI Международной научной конференции «Молодежь в науке – 2.0'19» (г. Минск, 2019); XIII и XIV Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «XIII, XIV Машеровские чтения» (г. Витебск, 2019, 2020); Международной научной конференции «Технические и естественные науки» (г. Санкт-Петербург, октябрь 2020 г.); II Международной научно-практической конференции «Endless Light in Science» (г. Нур-Султан, 2020); Республиканской научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии» (г. Минск, 2020); Международной научной конференции «Информационные технологии и системы (ITS-2020)» (г. Минск, 2020); VIII Международной научно-технической интернет-конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве» (г. Минск, 2020); The XIII International Science Conference «Tasks and problems of science and practice» (г. Берлин, 2021); The I International Science Conference «Multidisciplinary academic research» (г. Амстердам, 2021).

Использование результатов диссертации подтверждено 11 актами их внедрения в производство и учебный процесс и 2 справками о возможном практическом использовании.

### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам выполненных исследований опубликовано 28 научных работ общим объемом 8,9 авторского листа. Из них 12 статей объемом 6,7 авторского листа в научных изданиях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 13 статей в сборниках материалов конференций объемом 2 авторского листа, 3 статьи в сборниках тезисов докладов конференций объемом 0,2 авторского листа.

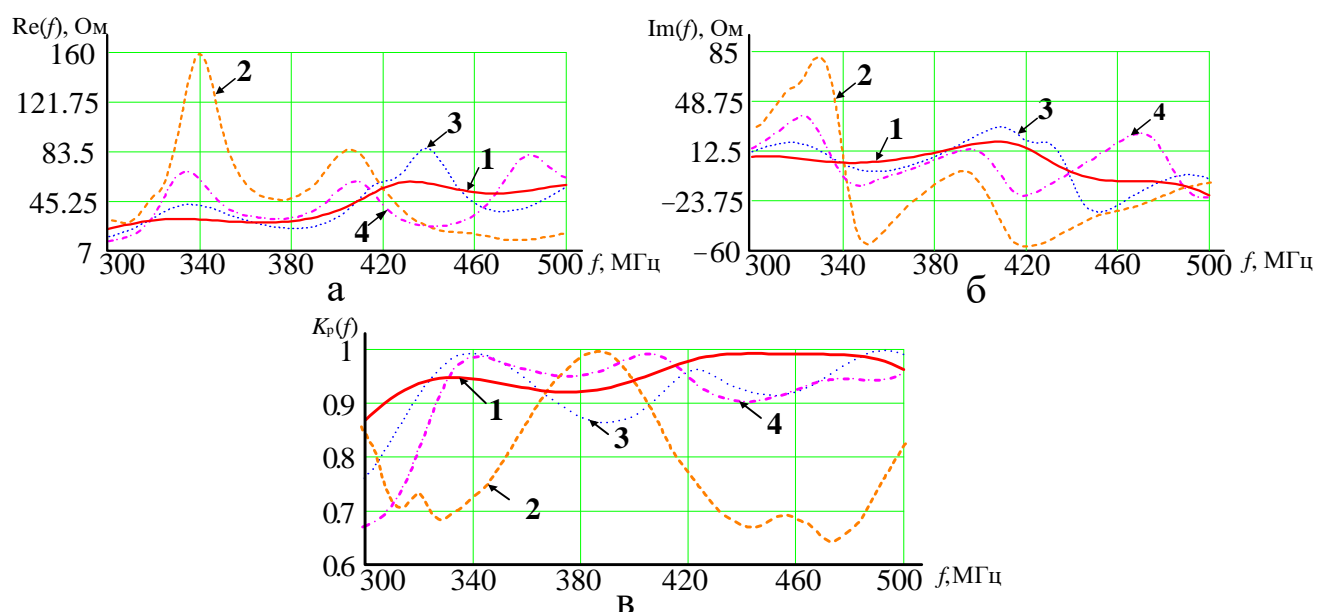
### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, перечня сокращений и условных обозначений, общей характеристики работы, основной части, состоящей из четырех глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 128 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 28 наименований. Общий объем – 171 страница, в том числе 79 рисунков на 50 страницах, 12 таблиц на 8 страницах, 3 приложений на 21 странице.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе обозначена научно-техническая проблема, связанная с изменением уровня КПМ от источника сигнала к комплексной нагрузке РТУ, вызванное изменением импеданса нагрузки от номинального значения из-за изменений условий эксплуатации.

Показано, что изменение величины импеданса нагрузки приводит к рассогласованию сопротивления источника сигнала с нагрузкой и образованию отраженной волны в тракте, что является причиной изменения режима работы РТУ. Что подтверждают результаты, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований по оценке влияния условий эксплуатации на импеданс АУ радиостанции Р-181-5НУ, а также на КПМ ( $K_p(f)$ ) от источника сигнала к АУ [1, 4, 6, 18, 28], результаты которых показаны на рисунке 1.



а – реальная составляющая; б – мнимая составляющая импеданса; в – КПМ  
1 – в экранируемой безэховой камере; 2 – в помещении;  
3 – в лесном массиве; 4 – в непосредственной близости с техникой.

Рисунок 1 – Зависимость импеданса АУ AD-44/CW-TA-30-512 и его КПМ в рабочей полосе частот от различных условий обстановки

Рассмотрены пути решения подобных проблем. Было установлено, что в современной радиотехнике для их решения применяются адаптивные согласующие устройства (АСУ), позволяющие обеспечить требуемый уровень передачи мощности принимаемого (передаваемого) сигнала от источника в нагрузку с изменяющейся импедансной характеристикой. Отличительной особенностью АСУ является наличие измерителя импеданса на входе согласуемой нагрузки, информация с которого поступает в решающее устройство, где принимается решение о необходимости изменения параметров АСУ, при которых обеспечивается оптимальное решение задачи согласования [2, 4, 6]. В тоже время, измеренные значения реальной  $ReZ_n(f)$  и мнимой  $ImZ_n(f)$  составляющих комплексного сопротивления согласуемой нагрузки требуют математической обработки в натуральном времени, так как производятся на



дискретном ряде частот и содержат случайные составляющие различной природы, обусловленные как статистической природой измеряемой характеристики, так и внешними факторами процессов измерений и преобразования данных, что приводит к неоптимальным результатам согласования [3, 7]. Был проведен обзор и анализ методов моделирования импедансных характеристик согласуемых нагрузок [7], по результатам которых установлено, что существующие методы позволяют рассчитать только модели стационарных импедансов простых и типовых комплексных нагрузок, когда как для современных методов согласования изменяющихся импедансов необходимо решить следующие актуальные задачи:

– разработать методику формирования аналитической модели импеданса согласуемой нагрузки, аппроксимирующую измеренный импеданс физически реализуемой функцией с минимальным порядком;

– разработать методику обработки результатов измерения импеданса согласуемой нагрузки с целью улучшения параметров согласования за счет более достоверного представления выходной информации с измерителя адаптивного согласующего устройства.

– провести оценку эффективности способа формирования аналитической модели и методики обработки результатов измерения импеданса согласуемой нагрузки в задачах широкополосного согласования импедансов.

**Вторая глава** посвящена разработке методики формирования аналитической модели импеданса широкополосного РТУ.

В процессе экспериментальных исследований получается статистический ряд измерений двух величин, когда каждому значению функции  $y_1, y_2, \dots, y_n$  соответствует определенное значение аргумента  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

На основе экспериментальных данных необходимо подобрать алгебраические выражения функции

$$y = f(x), \quad (1)$$

которые называются эмпирическими формулами. Такие формулы подбираются лишь в пределах измеренных значений аргумента  $x_1-x_n$  и имеют тем большую ценность, чем больше соответствуют результатам эксперимента, но при этом, должны быть наиболее простыми. Таким образом, эмпирические формулы являются *аппроксимирующими функциями*, а их процесс подбора состоит из трех этапов.

**I этап.** Численно заданные значения исходной характеристики  $y(x)$  интерполируются плавной кривой и используются в качестве эталонной модели, что позволяет применить интегральный критерий близости функций.

**II этап.** Выбор класса подходящей аппроксимирующей функции, соответствующего физической природе моделируемого процесса.

**III этап.** Вычисляются параметры аппроксимирующей функции  $f(x)$ , которые наилучшим образом соответствовали бы эталонной модели.

На основании этого в работе был проведен обзор и анализ наиболее распространенных видов интерполяционных функций, по результатам которых установлено, что в качестве математического аппарата для решения этапа интерполяции измеренных значений импеданса нагрузки выбран интерполяционный кубический сплайн  $S(x)$ . Данный выбор обусловлен тем, что интерполяционный кубический сплайн хорошо приближает гладкие функции (теорема о сходимости, оценка погрешности) и имеет минимальную сложность, что полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемые к кривым и поверхностям, описывающим функциональную зависимость экспериментальных исследований [8].

Проведенный в работе анализ литературы показал, что импеданс  $Z(s)$  РТУ определяется в стационарном режиме, общее выражение которого представляется в виде рациональной положительной вещественной функции  $F(s)$ , удовлетворяющей условиям физической реализуемости (УФР) [3, 5, 7, 8]:

$$F(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + \dots + a_ns^n}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + \dots + b_ms^m} = \frac{M_1 + N_1}{M_2 + N_2}, \quad (2)$$

где  $s = j\omega$  - комплексная переменная,  $M_1$  ( $M_2$ ) - четная часть числителя (знаменателя) функции  $F(s)$ , содержащая все четные степени  $s$ :  $s^0, s^2, s^4 \dots$ ;  $N_1$  ( $N_2$ ) - нечетная часть числителя (знаменателя) функции  $F(s)$ , содержащая все нечетные степени  $s$ :  $s, s^3, s^5 \dots$ .

С помощью математического преобразования Геверца, выражение (2) можно представить в виде реальной  $\text{Re}Z(s)$  и мнимой  $\text{Im}Z(s)$  составляющих импеданса нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}F(s) &= \frac{M_1M_2 - N_1N_2}{M_2^2 - N_2^2}; \\ \text{Im}F(s) &= \frac{N_1M_2 - M_1N_2}{j(M_2^2 - N_2^2)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Ограничиваясь УФР, систему уравнений (3) предлагается использовать в качестве аппроксимирующих функций  $\text{Re}f(s)$  и  $\text{Im}f(s)$  составляющих импедансов согласуемой нагрузки, порядок и коэффициенты которых определяются итерационно с применением методов нелинейной оптимизации (например, метод оптимизации Левенберга-Марквардта) [3, 5, 7, 8].

Таким образом, была разработана методика формирования аналитических моделей (АМ) импедансов широкополосных РТУ, состоящая в реализации следующих этапов:

1) **Задание исходных данных:**  $n, m$  – начальные степени числителя и знаменателя дробно-рациональной функции (2);  $\Omega$  – рабочий диапазон частот;  $\varepsilon$  – значение абсолютной ошибки аппроксимации.

2) **Формирование эталонной модели:** интерполирование  $\text{Re}Z(f)$  и  $\text{Im}Z(f)$  кубическим сплайном  $F_{\text{эт}}(f)$ .

3) **Аппроксимация:** формирование аппроксимирующих функций  $\text{Re}Z(f)$  и  $\text{Im}Z(f)$  согласно системе (3) и заданных  $n, m$ .

4) **Расчет параметров аппроксимационной функции:** решение задачи минимизации, зависящей от параметров  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$  и целевой функции  $D$  (выраженной в %) **при наличии ограничений УФР.**

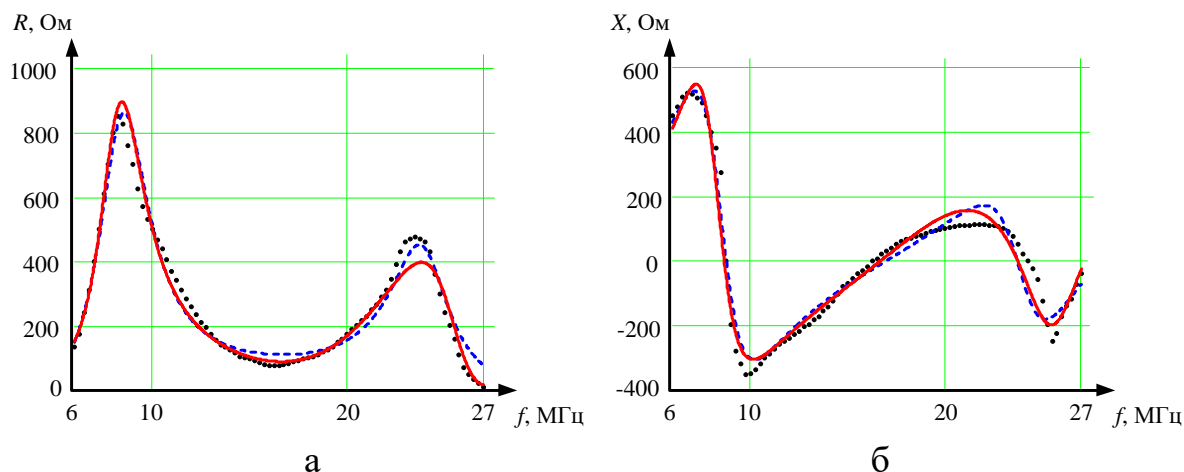
$$D = 100 \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{|\text{Re}(\text{Im})Z(f) - F_{\text{эт}}(f)|}{f_{\max} - f_{\min}} df. \quad (4)$$

5) **Проверка выполнения критерия близости  $D \leq \varepsilon$ :** если критерий **выполняется**, то переходим к этапу 6, если критерий **не выполняется**, то увеличиваем  $n$  или  $m$  на  $1$  (при этом контролируя выполнения неравенства  $|n - m| \leq 1$ ) и повторяем этапов 3, 4.

б) **Формирование аналитической модели импеданса:** подстановка рассчитанных в пункте 4 коэффициентов в дробно-рациональную функцию вида (2).

Для верификации разработанной методики формирования аналитической модели импедансных характеристик РТУ было произведено сравнение результатов моделирования импеданса антенны типа ВГД (вибратор горизонтальный диапазонный), представленной в виде дискретных значений реальной и мнимой составляющих, измеренных в диапазоне частот от 6 до 27 МГц, с результатами структурно-параметрического метода моделирования (рисунок 2) [7]. В результате, рассчитанная с использованием разработанной методики аналитическая модель входного импеданса ВГД имеет шестой порядок и имеет вид:

$$Z_{\text{ВГД}}(s) = \frac{1,845 \cdot 10^6 + 3,182 \cdot 10^6 (s) + 2,506 \cdot 10^5 (s)^2 + 1,792 \cdot 10^4 (s)^3 + 1,069 \cdot 10^3 (s)^4 + 18,554 (s)^5 + 0,989 (s)^6}{7,765 \cdot 10^4 + 6,088 \cdot 10^3 (s) + 1,526 \cdot 10^3 (s)^2 + 57,414 (s)^3 + 4,448 (s)^4 + 0,075 (s)^5 + 0,003 (s)^6}. \quad (5)$$



а – реальная составляющая; б – мнимая составляющая импеданса

Рисунок 2 – Измеренные значения импеданса антенны типа ВГД (точки), ее модели, рассчитанной структурно-параметрическим методом (пунктирная линия) и модели, рассчитанной разработанной методикой (сплошная линия)

На основании чего был сделан вывод о том, что разработанная методика позволяет сформировать аналитическую модель импеданса антенны типа ВГД и **уменьшить ошибку аппроксимации на 18% для реальной составляющей импеданса и на 17% - для мнимой составляющей соответственно, и**

*уменьшить на 2 порядка математическую модель* импеданса антенны ВГД, по отношению к модели, рассчитанной с использованием методик структурно-параметрического моделирования [7].

**Третья глава** посвящена разработке методики обработки результатов измерения нестационарного импеданса согласуемой нагрузки.

Как правило, импедансные характеристики согласуемой нагрузки задаются числовыми рядами значений двух величин: независимой ( $y_i$ ) и зависимой ( $x_i$ ), каждая из которых, в общем случае, кроме определенной регулярной (детерминированной) составляющей может содержать и случайные составляющие самой различной природы. При этом, согласно центральной предельной теореме, полагается, что значения случайной составляющей зависимой переменной (как собственные, так и «суммарные») распределены по нормальному вероятностному закону [3].

Исходя из этого, в работе представлены результаты расчета минимального потребного объема выборки  $N=272$  (числа проводимых натуральных, полунатурных или модельных экспериментов), при котором обеспечивается определение математического ожидания той или иной характеристики РТУ с доверительной вероятностью  $\beta=0,9$  и относительная погрешностью 10% [3]

Собрав совокупность данных об исследуемой характеристике РТУ, необходимо их обработать, т.е. привести в определенную и сбалансированную систему, используя математический аппарат теории вероятности [8].

Таким образом, результатами обработки имеющейся выборки являются пары чисел  $(x_{mi}, y_{mi})$ , соответствующих точечным оценкам математического ожидания  $\hat{M}_y$  оцениваемой характеристики  $y$  – регулярная составляющая экспериментальных данных, а также дисперсии  $\hat{D}_y$  и СКО  $\sigma_{\hat{M}}$  [8].

Разработана методика обработки результатов измерения импеданса согласуемой нагрузки, выполнение которой производится в следующей последовательности [3, 7, 8, 11]:

1. Задаются исходные данные: требуемые значения доверительной вероятности  $\beta$  и относительной погрешности результатов обработки измеренных значений импеданса согласуемой нагрузки;

2. Определяется необходимый объем выборки  $N$ , исходя из заданных исходных данных [3];

3. Производится расчет точечных оценок математического ожидания, дисперсии и СКО оцениваемой импедансной характеристики РТУ.

4. Рассчитывается АМ обработанных результатов наблюдений (измерений) импедансных характеристик РТУ согласно разработанной методики формирования АМ импеданса широкополосного РТУ.

Для верификации разработанной методики было проведено 272 измерения импеданса АУ АД-44/СW-3512 носимой радиостанция УКВ-диапазона Р-181-5НУ, что позволило оценить математическое ожидание импедансной характеристики АУ с минимально необходимой доверительной вероятностью 0,9 и относительной погрешностью 10 % [1, 2, 3, 4, 6, 7, 13].

Результаты моделирования полученной выборки импеданса АУ AD-25/CW-3512 представлены на рисунке 4 в виде частотных зависимостей реальной и мнимой составляющих импеданса (символы) и аналогичные параметры рассчитанной математической модели вида (2) (сплошные линии), коэффициенты которой представлены в таблице 1 [1, 3, 7].

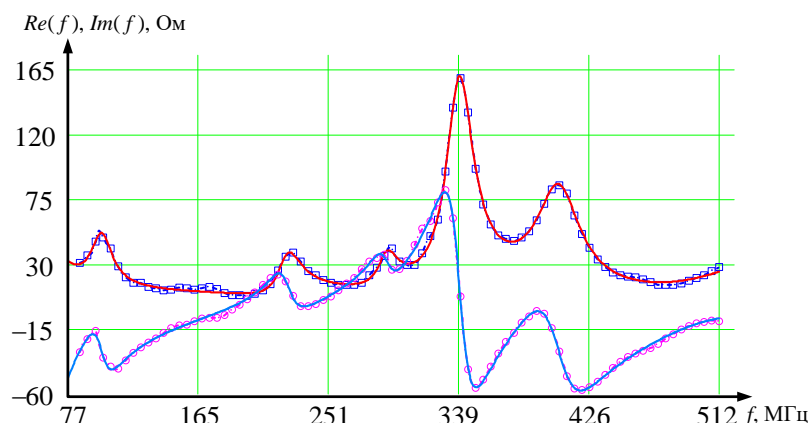


Рисунок 4 – Математическое ожидание функции входного сопротивления АУ AD-25/CW-3512 (символы) и его рассчитанной аналитической модели (сплошные линии) в рабочей полосе частот

По результатам моделирования был сделан вывод, что разработанная методика обработки результатов измерения импеданса согласуемой нагрузки позволила рассчитать АМ импеданса АУ AD-25/CW-3512 с доверительной вероятностью 0,9 и относительной погрешностью 10%, и **обеспечить абсолютную ошибку аппроксимации не более 10%** [3, 5, 6, 7, 11].

Таблица 1 – Коэффициенты дробно-рациональной функции, аппроксимирующей импедансные характеристики АУ AD-25/CW-3512

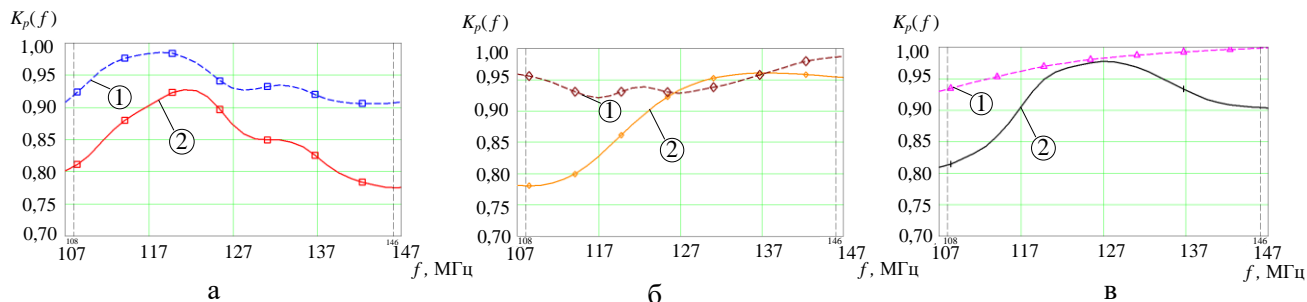
Коэфф-т	Значение	Коэфф-т	Значение	Коэфф-т	Значение	Коэфф-т	Значение	Коэфф-т	Значение
$a_0$	$1.792 \cdot 10^{-4}$	$a_6$	44.376	$a_{12}$	439.399	$b_3$	0.014	$b_9$	5.74
$a_1$	0.032	$a_7$	147.751	$a_{13}$	248.709	$b_4$	0.249	$b_{10}$	23.01
$a_2$	0.119	$a_8$	203.863	$a_{14}$	153.796	$b_5$	0.267	$b_{11}$	8.059
$a_3$	1.701	$a_9$	417.306	$b_0$	$6.059 \cdot 10^{-5}$	$b_6$	2.476	$b_{12}$	22.854
$a_4$	4.173	$a_{10}$	443.957	$b_1$	$1.706 \cdot 10^{-4}$	$b_7$	1.851	$b_{13}$	4.131
$a_5$	24.51	$a_{11}$	536.812	$b_2$	$7.996 \cdot 10^{-3}$	$b_8$	10.838	$b_{14}$	8.304

В четвертой главе представлены результаты верификации полученных результатов диссертационного исследования, применительно к решению задач широкополосного согласования.

Для проверки работоспособности разработанных методик были сформированы АМ импедансных характеристик (с доверительной вероятностью не менее 0,9 и относительной погрешностью не более 10 %) и синтезирована ШСЦ для антенны AD-44/CW-TA-30-512, функционирующей в диапазоне частот от 108 до 146 МГц [4, 5, 6, 11].

Зависимость КПМ от частоты для AD-44/CW-TA-30-512 с ШСЦ представлена на рисунке 5 (где кривая 1 – с синтезированной ШСЦ, кривая 2 – без нее). Анализ приведенных зависимостей показал, что сформированные АМ

импедасных характеристик антенны AD-44/CW-TA-30-512 позволили синтезировать ШСЦ, обеспечивающую уменьшение потерь уровня КПМ АУ AD-44/CW-TA-30-512 при расположении его в различных условиях эксплуатации не менее чем на 50% по отношению к потерям, полученным без синтезированной ШСЦ, а также обеспечивающую уровень КПМ не менее 0,9 при отклонении импеданса нагрузки от 5 до 25 Ом [5, 6, 10].

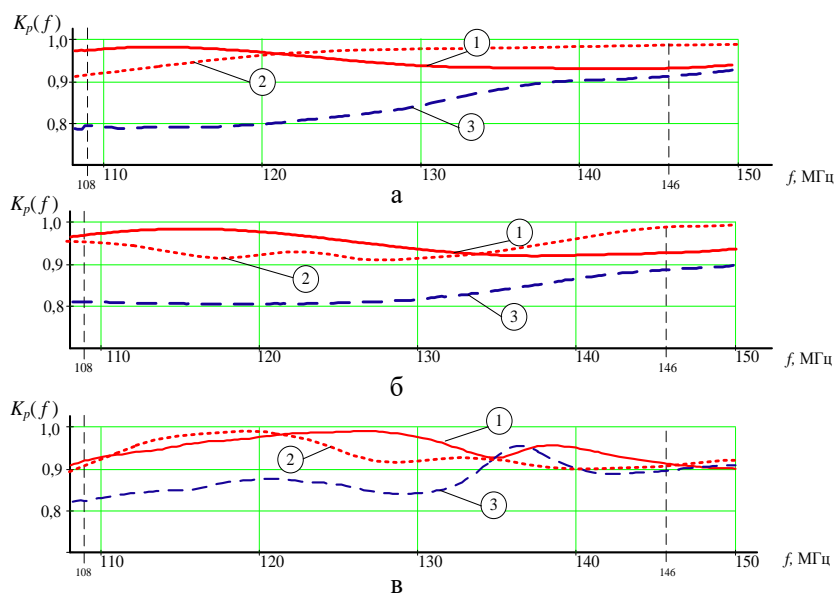


а – в помещении; б – в непосредственной близости с техникой; в – в лесном массиве.

Рисунок 5 – Зависимость КПМ AD-44/CW-TA-30-512 от частоты

Для верификации полученных результатов согласования был изготовлен макеты ШСЦ, эффективность которого оценивалась в ходе проведения экспериментальных исследований. Полученные результаты представлены на рисунке 6 в виде зависимостей КПМ (коэффициента стоячей волны (КСВ)) от частоты, где кривая 1 – зависимость с синтезируемой ШСЦ, кривая 2 – без нее, а кривая 3 – зависимости, полученные расчётным путем.

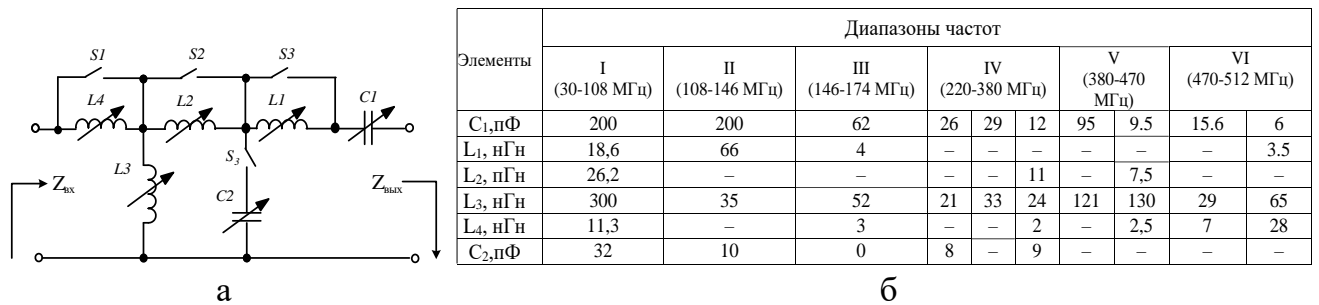
Результаты экспериментальных исследований показывают, что при подключении макетов ШСЦ к AD-44/CW-TA-30-512 потери уровня КПМ относительно максимального значения в помещении составляют 4,0 % (без ШСЦ – 9,1 %), в непосредственной близости с техникой 8,3 % (без ШСЦ – 17,2 %) и в лесном массиве 6,1 % (без ШСЦ – 12,2 %) [4, 6].



а – в лесном массиве; б – в непосредственной близости с техникой; в – в помещении

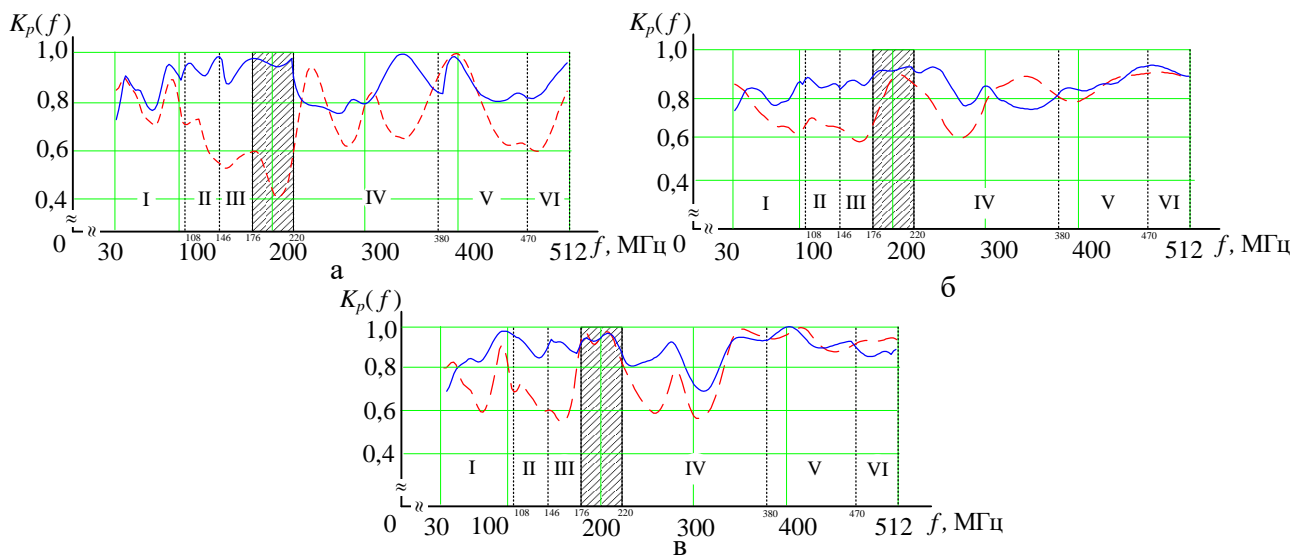
Рисунок 6 – Результаты экспериментальных исследований ШСЦ для АУ AD-44/CW-TA-30-512

Разработана математическая модель ШСУ, согласующая АУ AD-25/CW-3512 с прямо-передающим модулем носимой радиостанция УКВ-диапазона P-181-5НУ. Электрическая схема исполнительного устройства ШСУ, а также значение его параметров представлены на рисунке 7.



а – электрическая схема; б – параметры  
Рисунок 7 – Разработанная ШСУ

Результаты моделирования (рисунок 8) ШСУ представлены в виде зависимости КПМ от частоты в различных условиях эксплуатации. Сплошными линиями показаны КПМ АУ с синтезированным ШСУ, а штриховыми линиями – без него, где римскими цифрами обозначены рабочие диапазоны частот радиостанции P-181-5НУ.



а – в помещении; б – в непосредственной близости с техникой; в – в лесном массиве.

Рисунок 8 - Зависимость КПМ AD-25/CW-3512 от частоты

По результатам моделирования был сделан вывод, что сформированные с доверительной вероятностью 0,9 и абсолютной ошибкой аппроксимации не более 10% AM импедансных характеристик АУ AD-25/CW-3512 для различных условиях эксплуатации позволили синтезировать математическую модель ШСУ, обеспечивающую усредненный выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии для радиостанции P-181-5НУ от 2% до 15% (250–2300 м) в рамках полученных экспериментальных исследований [10, 14, 17].

**В заключении** сформулированы основные научные результаты диссертации и рекомендации по их практическому применению.

**В приложениях** представлены результаты решения задачи широкополосного согласования малогабаритной планарной рамочной антенны, антенного устройства AD-44/CW-TA-30-512 радиостанции Р-180, а также акты о практическом использовании результатов диссертационного исследования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Сформулирована научно-техническая проблема, заключающаяся в необходимости расчета эквивалентов импеданса РТУ, сложность которых возрастает со сложностью объекта согласования и влиянием различных факторов на процессы измерений (шумы, помехи, дестабилизирующие факторы и ошибки измерений), а также вызванное изменением импеданса нагрузки от номинального значения из-за изменений условий эксплуатации, что может привести к ухудшению КПМ от источника сигнала к нагрузке [1–А, 12–А, 13–А, 20–А, 28–А].

Для решения обозначенной проблемы был выполнен аналитический обзор и анализ существующих методов и методик моделирования согласуемых нагрузок по их импедансным характеристикам. Показано, что сложность процессов моделирования, основанных на представлении импедансов РТУ в виде электрических цепей лестничной структуры [7–А], а также большая ошибка аппроксимации импедансов согласуемых нагрузок [24–А] обуславливает необходимость в разработке более эффективных методов моделирования [18–А].

Исходя из этого, для решения задачи моделирования импедансных характеристик согласуемых нагрузок был использован метод макромоделирования. Это обусловлено тем, что данный подход позволяет рассматривать импеданс нагрузки в виде простых аналитических моделей с высокой степенью точности и не рассчитывать его в виде схемных эквивалентов [7–А].

2. Разработана методика формирования аналитической модели импедансных характеристик широкополосных РТУ, где в качестве математической модели импеданса используется дробно-рациональная функция импеданса, разложенная методом Геверца на реальную и мнимую составляющие, обладающая свойствами физической реализуемости. В качестве целевой функции используется минимизация ошибки аппроксимации при последовательном увеличении количества варьируемых параметров математической модели [3–А, 5–А, 7–А, 8–А, 15–А, 18–А].

Разработанная методика позволила сформировать аналитическую модель численно заданного на дискретном ряде частот импеданса в виде дробно-рациональной функции для антенны типа ВГД, обеспечивающую уменьшение ошибки аппроксимации для реальной составляющей на 18% и на 17% для мнимой составляющей импеданса, и уменьшить порядок аналитической модели импеданса на 2, по сравнению со структурно-параметрическими методами моделирования импедансов нагрузки [7–А].

Следует отметить, что разработанная методика формирования аналитических моделей импедансов широкополосных РТУ, может быть



применена для расчёта функций рассеяния ( $S$ -параметров), представленных на дискретном ряде частот в виде численных значений модуля и фазы [21–А].

3. Так как импедансные характеристики современных РТУ, которые определяют с помощью экспериментальных исследований, имеют сложный вид, изменяются как во времени, так и в зависимости от условий эксплуатации, и содержат случайные составляющие самой различной природы, то модели импедансов, рассчитанные по этим данным, становятся, по меньшей мере, не оптимальными [1–А, 8–А, 26–А, 27–А]. Исходя из этого была разработана методика обработки результатов измерений импеданса радиотехнических устройств в заданных условиях эксплуатации, отличающаяся заданием требуемых доверительных вероятностей и интервала для реальной и мнимой составляющих импеданса в заданном диапазоне частот и определением минимального количества необходимого числа измерений импеданса на каждой частоте с учетом погрешностей измерителя, позволяющая получить аналитические модели импедансов широкополосных радиотехнических устройств с учетом погрешностей измерений с заданными параметрами доверительной вероятности (0.5–0.99), относительной погрешности (1–30%) и абсолютной ошибки аппроксимации не более 10%, требуемыми для расчета согласующих устройств [1–А, 3–А, 5–А, 7–А, 8–А].

4. Проведены натурные и полунатурные исследования работоспособности разработанных методик в задачах широкополосного согласования, в результате которых установлено, что разработанная методика обработки результатов измерений импеданса радиотехнических устройств позволила:

– обработать и описать импедансные характеристики АУ АД-44/СW-ТА-30-512 в виде АМ с доверительной вероятностью не менее 0,9 и относительной погрешностью не более 10 % [16–А, 19–А, 23–А], что позволило синтезировать широкополосную СЦ, обеспечивающую уменьшение потерь уровня КПМ АУ АД-44/СW-ТА-30-512 при расположении его в различных условиях эксплуатации не менее чем на 50% по отношению к потерям, полученным без синтезированной ШСЦ, а также обеспечивающую уровень КПМ не менее 0,9 при отклонении импеданса нагрузки от 5 до 25 Ом [2–А, 4–А, 6–А, 11–А, 22–А];

– обработать и сформировать АМ импедансных характеристик АУ АД-25/СW-3512 в различных условиях эксплуатации с доверительной вероятностью не менее 0,9, относительной погрешностью не более 10 %, и обеспечить абсолютную ошибку аппроксимации не более 10% [11–А, 16–А, 25–А], что позволило синтезировать математическую модель ШСУ, обеспечивающую усредненный выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии для радиостанции Р-181-5НУ от 2% до 15% (250–2300 м) в рамках полученных экспериментальных исследований [10–А, 14–А, 17–А].

– рассчитать АМ импедансов АУ приемо-передающего тракта радиоканала управления БЛА, обеспечивающие требуемую абсолютную погрешность аппроксимации к характеристикам импеданса (менее 10%), что позволило синтезировать СЦ лестничной структуры, функционирующую в диапазоне от 415 до 449 МГц и обеспечивающую уменьшение потерь передаваемой мощности до

25% (уменьшение потерь с 38% до 13%) как в штатных условиях, так и в условиях обледенения АУ, что позволяет обеспечить канал управления БЛА устойчивой радиосвязью [9–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанная методика обработки импедансных характеристик широкополосных РТУ является новым инструментом для разработчиков и может быть использована при создании высокочастотных трактов, новых и модернизируемых РТУ. Тот факт, что при формировании аналитической модели импедансной характеристики осуществляется статистическая обработка исходных данных, представленных в численном виде на дискретном ряде частот, свидетельствует об универсальности разработанной методики.

Одним из направлений практического применения результатов диссертации является широкополосное согласование АУ для носимых и возимых радиостанций VHF/UHF диапазона частот, а также для РТУ, которые должны обеспечивать высокий уровень КППМ в различных условиях эксплуатации.

Результаты диссертационных исследований внедрены и использованы:

– при модернизации быстроразвертываемого сигнализационного комплекса С-801 «Паук», принятого на вооружение Вооруженных Сил Республики Беларусь в составе многофункционального разведывательного комплекса БРДМ-4Б2 приказом Министра обороны Вооруженных Сил Республики Беларусь № 1785 от 03.09.2019 г;

– в малогабаритной планарной рамочной антенне WWAN/LTE диапазона, реализованной на композитном материале в рамках выполнения договора РРА3071BLR190926004136890462791 от 02.10.2019 между ГО «НПЦ НАН Беларуси и материаловедения» и ООО «Бел Хуавей Технолоджис» по теме «Разработка магнитно-диэлектрических материалов».

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры автоматики, радиолокации и приемо-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», в курсы дисциплин «Радиоприемные устройства» для специальности 1-95 03 04 «Эксплуатация радиотехнических систем» (Л-3, ГЗ-3, ПЗ-2, ЛР-2) и для специальности 1-95 02 10 «Авиационные радиоэлектронные системы» (Л-5, Л-6, Лр-2), а также на кафедре радиоэлектронной техники ВВС и войск ПВО военного факультета в учреждении образования «БГУИР» в курсе дисциплин «Основы построения наземных радиолокационных станций обнаружения воздушных целей» для специальности 1-39 01 01-03 «Радиотехника (специальные системы радиолокации и радионавигации)» (Л-2.2, ГЗ-2.3, ГЗ-2.4, ПЗ-3.4).

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 рецензируемых научных изданиях

1. Исаев, В. О. Результаты исследования влияния условий эксплуатации на импеданс антенных устройств радиостанций ОВЧ/УВЧ диапазонов / В. О. Исаев, П. В. Бойкачев, И. А. Дубовик // Вестник Военной академии Республики Беларусь – 2019. – № 2 (63). – С. 32–40.

2. Дубовик, И. А. Методы синтеза согласующих цепей для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев, А. А. Дмитренко // Доклады БГУИР – 2021. – №19 (1). – С. 61-69.

3. Исаев, В. О. Способ нахождения адекватных математических моделей радиотехнических устройств с нестабильным импедансом / В. О. Исаев, П. В. Бойкачев // Научно-технический журнал «Метрология и приборостроение» – 2021. – № 1. – С.9–15.

4. Дубовик, И. А. Методика синтеза адаптивных согласующих устройств для широкополосных антенн UHF/VHF диапазона / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, А. А. Ержан, В. О. Исаев, А. Марат // Вестник КазННТУ – 2021. – №1 (143). – С.180-195.

5. Методика нахождения адекватных математических моделей, описывающих характеристики радиотехнических устройств / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, А. А. Ержан, В. О. Исаев, А. Марат // Известия национальной акад. наук Респ. Казахстан. – 2021. – № 2 (337). – С.145–151.

6. Исаев В. О. Метод синтеза широкополосных устройств с оптимальной характеристикой коэффициента преобразования мощности, согласующих изменяющийся во времени импеданс нагрузки / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев // [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №5. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.1>.

7. Исаев В. О. Аналитическое математическое моделирование входных характеристик радиотехнических систем / В.О. Исаев, П.В. Бойкачев // Научно-технический журнал ГГУ «Проблемы физики, математики и техники». – 2021. – № 3 (48). – С. 88 – 95.

8. Исаев В. О. Методика аппроксимации входных и передаточных характеристик радиотехнических устройств и получение аналитических математических моделей с высокой степенью адекватности / В. О. Исаев, П. В. Бойкачев // [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №1. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.4>.

9. Исаев В. О. Согласование антенного устройства канала управления и приемо-передающего модуля беспилотного летательного аппарата в условиях обледенения / П.В. Бойкачев, А.А. Сутько, А.А., И.А. Дубовик, В.О. Исаев, М.И. Полещук // [Электронный ресурс] Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №5. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.6.6>.

10. Dubovik, I. A. Matching device for AD-25/CW-3512 broadband antenna system adaptive to changing load impedance / I. A. Dubovik, P. V. Boykachev,

V. O. Isaev // Global journal of researches in engineering (F): Electrical and electronics engineering. – 2022. Vol. 22, №3. – P. 11–24.

11. Исаев В. О. Результаты аппроксимации импедансных характеристик антенных устройств ОВЧ/УВЧ диапазонов / П. В. Бойкачев, А. А. Ержан, А. В. Шенер, В. О. Исаев // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2022. № 2 (57). – С. 60–69.

12. Исаев В. О. Малогабаритная планарная рамочная антенна WWAN/LTE диапазона, выполненная с использованием нового композитного материала, применительно для технологий 5G / П. В. Бойкачев, А. С. Солонар, В. О. Исаев, И. А. Дубовик, А. А. Сутько, Т. И. Зубарь, Д. И. Тишкевич. // Инженерно-физический журнал. – 2022. Том 95, №5. – С. 1362–1368.

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

13. Исаев, В. О. Проблема изменения импеданса антенных устройств в различных условиях эксплуатации радиостанций ОВЧ/УВЧ диапазонов/ В.О. Исаев, И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев // Материалы XXII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» 25-27 марта 2019, Гомель, 2019. – С. 71-72.

14. Адаптивное согласование широкополосных радиотехнических устройств к изменяющемуся импедансу нагрузки / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев, М. А. Янцевич // 8-я Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного применения: сб. науч. ст., Минск, 16–17 мая 2019 г. / Гос. воен.-пром. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – Ч. 4. – С. 50–53.

15. Исаев, В. О. Способ аппроксимации иммитансных характеристик радиотехнических устройств / Исаев В. О., Бойкачев П. В. // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «XIII Машеровские чтения», Витебск 18 октября 2019 г. – Витебск: ВГУ имени П.М. Машерова, 2019, – С. 18–20.

16. Исаев, В. О. Результаты аппроксимации импедансных характеристик радиотехнических устройств // Исаев В.О., Бойкачев П.В. // Материалы XXIII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» 23-25 марта 2020, Гомель, 2020. – С. 45–46.

17. Комплексный критерий синтеза адаптивных согласующих устройств для широкополосных радиотехнических систем с изменяющимся импедансом / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев / Технические и естественные науки: сб. избр. ст. по материалам Междунар. науч. конф., СПб., окт. 2020 г. / ГНИИ «Нацразвитие». – СПб., 2020. – С. 20–23.

18. Математическая модель радиотехнических устройств / И. А. Дубовик, В. О. Исаев, П. В. Бойкачев, А. А. Сутько // Endless Light in Science: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Нур-Султан, 6–8 мая 2020 г. / Междунар. исслед. центр. – Нур-Султан, 2020. – С. 27–33.

19. Исаев, В. О. Синтез широкополосного согласующего устройства адаптивного к изменяющемуся импедансу антенного устройства AD-44/CW-TA-30-512 / И. А. Дубовик, О. В. Исаев // Машеровские чтения: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 21 окт. 2020 г. ВГУ им. П. М. Машерова. – Витебск 2020. – С. 24–26.

20. Исаев, В. О. Влияние температурного режима на характеристики мобильных антенных устройств / И. А. Дубовик, О. В. Исаев // Машеровские чтения: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 21 окт. 2020 г. ВГУ им. П. М. Машерова. – Витебск 2020. – С. 31–33.

21. Исаев, В. О. Способ аппроксимации частотных характеристик СВЧ транзисторов, представленных в численном виде, на дискретном ряде частот / И. А. Дубовик, В. О. Исаев, П. В. Бойкачев // «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020»: материалы Респ. науч.-техн. конф. Минск, 28–29 окт. 2020 г. БГУИР, 2020. – С. 85–89.

22. Исаев, В. О. Комплексный критерий синтеза широкополосных согласующих устройств на основе инварианта чувствительности / И. А. Дубовик, В. О. Исаев, П. В. Бойкачев // «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020»: материалы Респ. науч.-техн. конф. Минск, 28–29 окт. 2020 г. БГУИР, 2020. – С. 41–44.

23. Исаев, В. О. Методы синтеза широкополосных согласующих устройств к изменяющемуся импедансу нагрузки / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев // Информационные технологии и системы 2020 (ИТС 2020) = Information Technologies and Systems 2020 (ITS 2020): материалы международной научной конференции, Минск, 18 ноября 2020 г. / БГУИР; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2020. – С. 30–31.

24. Исаев, В. О. Математическая модель монопольной антенны диапазона декаметровых волн / В. О. Исаев, П. В. Бойкачев, И. А. Дубовик // VIII Международная научно-техническая интернет-конференция «Информационные технологии в образовании, науке и производстве», 21-22 ноября 2020 года [Электронный ресурс] / Белорусский национальный технический университет; сост. Е. В. Кондратёнок. – Минск: БНТУ, 2020. – С. 231-235.

25. Исаев, В. О. Реализация адекватных аналитических математических моделей радиотехнических устройств с переменным импедансом / В. О. Исаев, И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев // 9-я международная научная конференция по «Военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения», 23-26 июня 2021 г., MILEX.INNOVATIONS – Минск, 2021. – С.164-169.

#### **Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций**

26. Исаев, В. О. Реализация способа аппроксимации иммитансных характеристик радиотехнических устройств / В. О. Исаев, П. В. Бойкачев // XVI Международная конференция молодых ученых «Молодежь в науке – 2.0'19» Национальной академии наук Беларуси 14-17 октября 2019 г. Минск, 2019. – С.71-72.

27.Исаев, В. О. Реализация адекватных аналитических математических моделей радиотехнических устройств с нестабильным импедансом / Исаев В.О., Бойкачев П.В. // Tasks and problems of science and practice: abstracts of XIII International Scientific and Practical Conference, May 10 – 12, 2021, Berlin, Germany – Berlin, 2021. – p. 272–274.

28.Исаев, В. О. Адаптивное согласование малогабаритной планарной рамочной антенны, для мобильного устройства пятого поколения / П. В. Бойкачев, А. А. Сутько, В. О. Исаев // Multidisciplinary academic research: abstracts of I International Scientific and Practical Conference, September 20 – 22, 2021, Amsterdam. – p. 87–93.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Исаев' (Isaev), written in a cursive style.

## РЕЗЮМЕ

Исаев Владислав Олегович

### **Аппроксимация импедансных характеристик радиотехнических устройств в задачах широкополосного согласования на основе разложения дробно-рациональной функции методом Геверца**

**Ключевые слова:** согласование, математическое моделирование, рабочий диапазон, изменяющийся импеданс, дробно-рациональная функция, ошибка аппроксимации.

**Цель работы:** улучшение параметров широкополосного согласования источников сигнала и комплексных нагрузок за счет обработки и аппроксимации измеренных значений импедансов широкополосных радиотехнических устройств (антенн).

**Методы исследования и использованная аппаратура:** классические и современные методы анализа и синтеза моделей импедансных характеристик нагрузок, полунатурный и натурный эксперимент.

**Полученные результаты и их новизна:** обозначена научно-техническая проблема, проведен обзор и анализ методов моделирования импедансных характеристик широкополосных радиотехнических устройств. Разработана методика формирования аналитических моделей импеданса радиотехнических устройств, отличающаяся учетом условий физической реализуемости и разложением рациональной функции импеданса на реальную и мнимую составляющие методом Геверца, что позволило повысить качество соответствия входной информации для синтеза согласующих цепей широкополосных согласующих устройств. Разработана методика обработки результатов измерения нестационарного импеданса согласуемой нагрузки, позволяющая рассчитать аналитические модели импеданса широкополосных радиотехнических устройств с заданными параметрами доверительной вероятности, относительной погрешности и абсолютной ошибки аппроксимации. Разработана модель согласующего устройства для антенны AD-25/CW-3512, позволяющая, по сравнению со штатными согласующим устройством, обеспечить усредненный выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии носимой радиостанция УКВ-диапазона Р-181-5НУ.

**Рекомендации по использованию:** результаты целесообразно использовать при решении практических задач по созданию испытательных стендов входного контроля покупных 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, обеспечивающих оптимальные характеристики в различных условиях эксплуатации.

## РЭЗІЮМЭ

Ісаеў Уладзіслаў Алегавіч

### **Апраксімацыя імпедансных характарыстык радыётэхнічных устройстваў у задачах шырокапалоснага пагаджання на аснове разложэння дробна-рацыянальнай функцыі метадам Геверца**

**Ключавыя словы:** ўзгадненне, матэматычнае мадэляванне, працоўны дыяпазон, зменлівы імпеданс, дробава-рацыянальная функцыя, памылка апраксімацыі.

**Мэта працы:** паляпшэнне параметраў шырокапалоснага ўзгаднення крыніц сігналаў і комплексных нагрузак за кошт апрацоўкі і апраксімацыі вымераных значэнняў імпедансаў шырокапалосных радыётэхнічных прылад (антэн).

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** класічныя і сучасныя метады аналізу і сінтэзу мадэляў уваходных функцый нагрузак, паўнатурны і натурны эксперымент.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** пазначаная навукова-тэхнічная праблема, праведзены агляд і аналіз метадаў мадэлявання імпедансных характарыстык шырокапалосных радыётэхнічных прылад. Распрацавана метадыка фарміравання аналітычных мадэляў імпедансу радыётэхнічных прылад, адрозная ўлікам умоў фізічнай рэалізуемасці і раскладаннем рацыянальнай функцыі імпедансу на рэальную і ўяўную складнікі метадам Геверца, што дазволіла павысіць якасць адпаведнасці ўваходных інфармацыі для сінтэзу ўзгадняючых ланцугоў шырокапалосных ўзгадняючых прылад. Распрацавана метадыка апрацоўкі вынікаў вымярэння нестацыянарнага імпедансу согласуемой нагрузкі, якая дазваляе разлічыць аналітычныя мадэлі імпедансу шырокапалосных радыётэхнічных прылад з зададзенымі параметрамі давернай верагоднасці, адноснай хібнасці і абсалютнай памылкі апраксімацыі. Распрацавана мадэль згоднай прылады для антэны AD-25/CW-3512, якая дазваляе, у параўнанні са штатнымі ўзгадняючым прыладай, забяспечыць асераднёны выйгрыш у патэнцыяльна дасягальнай далёкасці дзеяння радыёлініі носімай радыёстанцыя УКХ-дыяпазону P-181-5НУ.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі мэтазгодна выкарыстоўваць пры рашэнні практычных задач па стварэнні выпрабавальных стэндаў уваходнага кантролю пакупных антэна-фідэрных 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 профіля.

**Вобласць ужывання:** распрацоўкі і мадэрнізацыі высокакашчынных гасцінцаў радыётэхнічных сістэм, якія забяспечваюць аптымальныя характарыстыкі ў розных умовах эксплуатацыі.



## SUMMARY

Isaev Vladislav Olegovich

### **Approximation of the impedance characteristics of radio engineering devices in the problems of broadband matching on the basis of the fractional-rational function expansion by the Geverts method**

**Key words:** matching, mathematical modeling, operating range, changing impedance, fractional-rational function, approximation error.

**The aim of the work** is to improve the parameters of broadband matching of signal sources and complex loads by processing and approximating the measured values of the impedances of broadband radio engineering devices (antennas).

**Research methods and equipment used:** classical and modern methods of analysis and synthesis of models of input load functions, semi-natural and full-scale experiment.

**The results obtained and their novelty:** a scientific and technical problem is identified, a review and analysis of methods for modeling the impedance characteristics of broadband radio devices is carried out. A method of forming analytical impedance models of radio engineering devices has been developed, characterized by taking into account the conditions of physical feasibility and decomposition of the rational impedance function into real and imaginary components by the Gewertz method, which made it possible to improve the quality of matching input information for the synthesis of matching circuits of broadband matching devices. A method of processing the measurement results of the non-stationary impedance of a consistent load has been developed, which allows calculating analytical models of the impedance of broadband radio engineering devices with specified parameters of confidence probability, relative error and absolute approximation error. A model of the matching device for the AD-25/CW-3512 antenna has been developed, which allows, in comparison with the standard matching device, to provide an average gain in the potentially achievable range of the radio line of the portable VHF radio station R-181-5NU.

**Recommendations for use:** it is advisable to use the results in solving practical problems of creating test benches for input control of purchased antenna-feeder devices of a wide frequency range, as well as performing research and development work in institutions involved in the development and modernization of radar and other systems, as well as also in the preparation of engineers of the appropriate profile.

**Scope:** development and modernization of high-frequency paths of radio engineering systems, providing optimal performance in various operating conditions.

*Научное издание*

**Исаев  
Владислав Олегович**

**АППРОКСИМАЦИЯ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В ЗАДАЧАХ  
ШИРОКОПОЛОСНОГО СОГЛАСОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗЛОЖЕНИЯ  
ДРОБНО-РАЦИОНАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ МЕТОДОМ ГЕВЕРЦА**

**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 26.09.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 60. Заказ 222.

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, Минск.