

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.96

**Ковалевич  
Дмитрий Александрович**

**АВТОМАТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫЕ СОГЛАСУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА  
ВЧ ДИАПАЗОНА БЕСПОИСКОВОГО ТИПА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Минск 2022

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Листопад Николай Измаилович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Официальные оппоненты: **Забеньков Игорь Иванович**, доктор технических наук, профессор.

**Бойкачев Павел Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой тактики и вооружения радиотехнических войск учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

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

Защита состоится «8» декабря 2022 г. в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89 e-mail: [dissovet@bsuir.by](mailto:dissovet@bsuir.by).

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

Автореферат разослан «8» ноября 2022 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

## **ВВЕДЕНИЕ**

Коротковолновая (КВ) радиосвязь – один из немногих видов связи, который способен обеспечивать передачу сообщений по радиоканалу в условиях отсутствия инфраструктуры. Использование новых технологий в последнее время помогло устранить многие присущие системам КВ связи недостатки. Развитие новых методов формирования и обработки сигналов позволило значительно повысить пропускную способность ионосферных каналов. Архитектура передатчика и приемника сегодня позволяет создать аппаратуру с возможностью быстрой смены частоты, а доступные методы модуляции совместно с цифровой обработкой сигналов позволяют автоматически оценивать качественные показатели канала и инициировать необходимые изменения параметров с целью достижения оптимального качества работы. Единственным элементом из состава КВ радиосредств, в реализации которого практически ничего принципиально не менялось на протяжении многих лет, является устройство для согласования входного (выходного) сопротивления приемника (передатчика) с антеннами.

Применение существующих подходов к организации процесса согласования на практике требует значительного времени для подготовки оборудования к ведению связи, что в некоторых случаях является недопустимым. К тому же, при проектировании согласующих устройств не всегда принимаются во внимание вопросы ресурса входящих в их состав элементов, а также наличие демаскирующего излучения в процессе настройки. Все вышеперечисленное обуславливает необходимость анализа существующих проблем при создании подобных устройств и разработке новых подходов к их решению.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

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

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на филиале кафедры информационных радиотехнологий в ОАО «Агат-Систем» в рамках организации и развития на предприятиях радиотехнического профиля Республики Беларусь промышленного производства систем радиосвязи с техническими, конструктивными и эксплуатационными характеристиками, соответствующими мировым функциональным требованиям, стандартам и технологическим нормам построения радиоаппаратуры XXI века.

Тема соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг. в области машиностроения, машиностроительных технологий, приборостроения и инновационных материалов (п.4), обеспечения безопасности человека, общества и государства (п. 6).

Результаты диссертационных исследований использованы в ряде опытно-конструкторских работ в рамках ГНТП «Радиосвязь и навигация».

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

*Цель* – повышение эффективности подвижных средств связи ВЧ диапазона за счет использования беспойсковых автоматических антенных согласующих устройств.

#### *Задачи:*

- систематизировать применяемые подходы к проектированию согласующих антенных устройств и выявить их универсальную структуру, модернизировать известные методики синтеза параметров согласующей цепи с учетом особенностей реализации подвижных средств связи ВЧ диапазона;
- разработать методику синтеза требований к измерителям электрических параметров системы «антенна – согласующее устройство» для расчетного способа автоматического согласования;
- разработать беспойсковые методы автоматического согласования антенных согласующих устройств ВЧ диапазона для существенного снижения времени, затрачиваемого на процесс подготовки к ведению связи.

*Гипотеза:* существует возможность реализации процесса автоматического согласования передатчика (приемника) с антенной в беспойсковом режиме за счет повышения сложности вычислений и наличия априорной информации о параметрах радиотехнических элементов, входящих в состав согласующего устройства.

*Объект* – автоматические антенные согласующие устройства ВЧ диапазона.

*Предмет* – методы построения и способы автоматической настройки антенных согласующих устройств ВЧ диапазона.

### **Научная новизна**

*Научная новизна* полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложен подход к автоматической настройке антенного согласующего устройства, отличающийся использованием его схемотехнической модели для нахождения оптимального состояния дискретных согласующих элементов с последующим использованием результатов моделирования для определения номиналов согласующих элементов, что *обеспечивает* беспойсковую настройку согласующего устройства при переменных в процессе эксплуатации параметрах антенны с существенным уменьшением времени настройки в сравнении с поразрядным поиском.

2. Предложена двухэтапная процедура автоматической настройки согласующего устройства, заключающаяся в том, что в процессе настройки производится два измерения электрических параметров системы «антенна-согласующее устройство»: предварительное, по результатам которого производится грубый расчет номинала дискретного трансформирующего элемента согласующей цепи и установка его старших разрядов, и основное,

по результатам которого аналитическим способом определяется состояние оставшихся разрядов с необходимой точностью, что позволило использовать значения иммитанса, измеренные с большей погрешностью, чем необходимо для аналитического расчета номиналов согласующих элементов (для антенны АШ-4 требования к погрешности измерения могут быть снижены до 6,8 раз по сравнению с известными методами).

3. Разработана методика синтеза требований к измерителям электрических параметров антенны на основании зависимости ее иммитанса от частоты с учетом требуемого качества согласования, которая включает в себя определение динамического диапазона используемых измерителей и допустимой погрешности измерений, *отличающаяся* тем, что может быть применена при проектировании согласующих устройств, использующих аналитический расчет номиналов дискретных согласующих элементов.

4. Разработаны алгоритмические методы оптимизации параметров аппаратных реализаций фазовых детекторов на логических элементах, которые представляют собой компенсацию гистерезиса компараторов, а также компенсацию отклонения передаточной характеристики от линейного закона, что в результате *обеспечивает* снижение погрешности измерений.

5. Разработана методика определения параметров согласующей цепи, учитывающая влияние на процесс настройки паразитных параметров ее элементов и непостоянство иммитанса мобильных антенн, которая *позволяет* определить минимально необходимое количество разрядов дискретных элементов.

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

1. Реализация беспойскового автоматического согласующего устройства, базирующаяся на использовании в реальном масштабе времени его схемотехнической модели для определения состояния дискретных реактивных элементов на основании измеренных электрических параметров антенны, включая двухэтапную процедуру автоматической настройки согласующего устройства, что в совокупности позволило существенно уменьшить время, необходимое для подготовки к ведению связи (до 21 раза по сравнению с устройствами, использующими поразрядный поиск).

2. Методика синтеза требований к измерителям электрических параметров антенны, включающая в себя определение их динамического диапазона и допустимой погрешности измерений на основании заданного при проектировании качества согласования и зависимости иммитанса антенны в рабочем диапазоне частот средства связи, что обеспечивает функционирование автоматических согласующих устройств, использующих аналитический расчет номиналов дискретных согласующих элементов.

3. Методика определения параметров универсальной согласующей цепи для подвижных систем связи ВЧ диапазона, отличающаяся тем, что в расчетах используется зависимость иммитанса антенны от частоты, а также учитывается нестационарность ее параметров в различных условиях эксплуатации и наличие паразитных параметров дискретных реактивных

элементов, что по сравнению с методиками, использующими информацию о КСВ антенны, повышает эффективность согласования за счет уменьшения количества разрядов дискретных реактивных элементов (с 30 до 20 для антенны длиной 3 метра).

### **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 – доктор технических наук, профессор Листопад Н. И., который осуществлял определение целей и постановку задач исследований.

Батура М. П. принимал участие в анализе и обобщении полученных результатов.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 8-ой и 9-ой международных научных конференциях по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (г. Минск, 2019, 2020 г.); 55-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2019 г.); 30-ой Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, Россия, 2020 г.); открытой республиканской научно-практической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020» (г. Минск, 2020 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 10 научных работ, в том числе 5 статей в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, объемом 2,39 авторского листа, 4 статьи в сборниках трудов научных конференций объемом 0,69 авторского листа, 1 тезис доклада в сборниках тезисов докладов научных конференций. Общий объем публикаций составляет 3,08 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 209 страниц, из них 124 страницы основного текста, 87 иллюстраций на 49 страницах, 57 таблиц на 16 страницах, библиографический список из 76 наименований на 5 страницах, список собственных публикаций из 10 наименований на 2 страницах и 5 приложений на 13 страницах, включающие три акта практического внедрения результатов диссертации, а также акт внедрения результатов исследования в учебный процесс.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во *введении* показана актуальность темы диссертации, обоснованы цель, объект, предмет и задачи диссертационной работы.

*Первая глава* посвящена общим вопросам согласования выходных каскадов передатчика с нагрузкой. Определена структура тракта передачи высокочастотного сигнала, рассмотрены различные подходы к согласованию, применяемые на практике, определена обобщенная структура согласующего устройства (СУ), которое содержит три основных элемента: согласующую цепь (СЦ), измеритель электрических параметров и управляющее устройство.

Универсальным решением является реализация СЦ в виде переключаемого Г-образного звена топологии фильтра низких частот. В зависимости от положения точки с координатами нагрузки на комплексной плоскости сопротивлений (проводимостей), необходимо использование одной из возможных схем согласующей цепи: Г-образное звено и обратное Г-образное звено.

Особое внимание уделено вопросам автоматического согласования. Для достижения целевого качества согласования могут использоваться различные способы, позволяющие автоматически определить состояние элементов СЦ: поисковый, расчетный, комбинированный. Анализ литературных источников показал, что для современных подвижных средств связи ВЧ диапазона необходимо решить следующие актуальные задачи:

- проанализировать, уточнить и дополнить известные методики синтеза требований к СЦ с учетом особенностей реализации подвижных средств связи;

- проанализировать взаимосвязь результативности автоматического согласования с использованием аналитических методов и погрешности измерителей электрических параметров антенны с целью разработки методики синтеза требований к ним;

- разработать беспойсковые методы автоматического согласования антенных согласующих устройств ВЧ диапазона для существенного снижения времени, затрачиваемого на процесс подготовки к ведению связи.

*Вторая глава* посвящена методике синтеза требований к СЦ. Рассмотрены известные подходы к определению номиналов элементов СЦ и определены их основные недостатки.

Требования к СЦ тесно связаны со следующими исходными данными: электрическими параметрами антенны (антенн), максимальной выходной мощностью передатчика, максимально допустимым КСВ на входе СУ, минимально допустимым КПД СУ. На основании этих данных производится аналитический расчет номиналов реактивных элементов для различных частот в рабочем диапазоне антенны. При анализе результатов расчета осуществляется поиск максимальных и минимальных значений трансформирующего и компенсирующего элементов, на основании которых определяется требуемый диапазон изменения их номиналов.

Дискретизация элементов СЦ приводит к дополнительному остаточному рассогласованию, вызванному тем, что величины дискретных элементов могут отличаться от расчетных на величину шага дискретизации. Величина шага дискретизации выбирается значительно меньшей минимального значения номинала согласующего элемента. Для компенсирующего элемента Г-образного звена шаг дискретизации предлагается рассчитывать следующим образом:

$$\Delta C = \sin \gamma \frac{G_0}{2\pi f} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{2SWR_{\max}}. \quad (1)$$

Здесь  $G_0$  – проводимость выхода передатчика,  $f$  – частота,  $SWR_{\max}$  – максимально допустимое значение КСВ,  $\gamma$  – угол вектора допустимой ошибки рассогласования. Выражение для определения шага дискретизации трансформирующего элемента примет следующий вид:

$$\Delta L = \frac{\Delta X'_{\min} R_0}{2\pi f}. \quad (2)$$

Наименьшее отклонение реактивного сопротивления  $\Delta X'_{\min}$  в этом случае выбирается из двух значений –  $\Delta X'_1$  и  $\Delta X'_2$ :

$$\Delta X'_1 = X'_{\Sigma \max} - X'_{\Sigma \text{opt}}; \quad (3)$$

$$\Delta X'_2 = X'_{\Sigma \text{opt}} - X'_{\Sigma \min}; \quad (4)$$

$$\Delta X'_{\Sigma \text{opt}} = \sqrt{R'_A - R_A'^2}; \quad (5)$$

$$\Delta X'_{\Sigma \max} = \sqrt{R'_A / G'_{CV \min} - R_A'^2}; \quad (6)$$

$$G'_{CV \min} = \frac{SWR_{\max}^2 + 1}{2SWR_{\max}} - \cos \gamma \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{2SWR_{\max}}. \quad (7)$$

Здесь  $R_0$  – выходное сопротивление передатчика,  $R'_A$  – приведенное активное сопротивление антенны. При этом можно выделить два случая:

1) приведенное активное сопротивление антенны находится в диапазоне  $0 < R'_A \leq 1 / G'_{CV \max}$ . Тогда:

$$X'_{\Sigma \min} = \sqrt{R'_A / G'_{CV \max} - R_A'^2}; \quad (8)$$

$$G'_{CV\max} = \frac{SWR_{\max}^2 + 1}{2SWR_{\max}} + \cos \gamma \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{2SWR_{\max}}. \quad (9)$$

2) приведенное активное сопротивление антенны находится в диапазоне  $1/G'_{CV\max} < R'_A \leq 1$ . Тогда:

$$X'_{\Sigma\min} = -\sqrt{SWR_{\max} R'_A + R'_A / SWR_{\max} - 1 - R'^2_A}. \quad (10)$$

По аналогии определен шаг дискретизации из условия обеспечения заданного КСВ на входе СУ для обратного Г-образного звена.

Рассмотрены различные способы оптимизации построения согласующих устройств. В качестве критериев оптимизации может быть выбрано следующее: упрощение (удешевление) конструкции устройства, улучшение его электрических параметров (например, повышение КПД либо снижение КСВ на верхних частотах).

Разработана оптимизированная методика синтеза параметров универсальной СЦ для мобильных систем связи на основании зависимости комплексного сопротивления (проводимости) антенны от частоты, которая позволяет уменьшить необходимое количество разрядов дискретных наборов согласующих элементов по сравнению с методиками, использующими информацию только о КСВ антенны. Выигрыш за счет применения разработанной методики может достигать 10 разрядов для штыревой антенны длиной 3 метра [2].

Оптимизированная методика состоит в реализации следующих этапов:

- определение иммитанса антенны (антенн) для набора частот при помощи имитационного моделирования по доступным данным (конструкция антенны, зависимость КСВ от частоты для верификации модели) для различных условий ведения связи;
- корректировка иммитанса с учетом паразитных параметров СУ;
- расчет номиналов СЦ для набора частот;
- поиск максимальных значений реактивных элементов для определения верхних границ диапазона их перестройки;
- определение допустимого рассогласования, вносимого трансформирующим и компенсирующим элементом;
- расчет допустимого шага дискретизации для входного набора частот;
- поиск минимального шага дискретизации для определения нижних границ диапазона перестройки согласующих элементов;
- определение разрядности дискретно перестраиваемых элементов СЦ.

Установлена связь между КПД СУ и добротностью индуктивного элемента:

- для СЦ в виде Г-звена:

$$\eta_{iu} \approx \frac{Q_{ind}}{Q_{ind} + Q_a}; \quad (11)$$

- для СЦ в виде обратного Г-звена:

$$\eta_{iu} \approx \frac{Q_{ind}}{Q_{ind} + Q_{TR}}; \quad (12)$$

$$Q_{TR} \approx \sqrt{\frac{1}{R_0 G_a} - 1}. \quad (13)$$

Здесь  $\eta_{iu}$  – КПД СУ,  $Q_a$  – добротность антенны,  $Q_{ind}$  – добротность индуктивного элемента СЦ,  $Q_{TR}$  – добротность трансформатора активного сопротивления.

Для экспериментальной оценки результативности предложенной методики синтеза требований к СЦ, был разработан макет СУ для работы с антенной АШ-4 и проведены измерения качества согласования, которые подтвердили корректность предложенной методики.

**Третья глава** посвящена измерителям электрических параметров антенны. Для СУ поискового типа качество согласования зависит только от погрешности используемых измерителей в ограниченном диапазоне значений контролируемых величин, за пределами которого ошибки измерений не нормируются. В системах, базирующихся на итерационном поиске, необходимо определить только одну точку, в которой коэффициент отражения на входе СУ равен нулю (КСВ равен 1).

Для СУ расчетного типа очевидна прямая связь между точностью измерения параметров антенны и качеством согласования. Из-за конечной точности измерений реальное значение ее комплексного сопротивления (проводимости) может находиться в некоторой области (фигура GJH на рисунке 1), которая не должна выходить за пределы окружности допустимых сопротивлений (проводимостей). Зная радиус этой окружности и измеренный иммитанс антенны, можно определить требования к точности измерителей модуля и фазы сопротивления (проводимости).

Разработана методика синтеза требований к измерителям тока, напряжения и разности фаз между ними на основании иммитанса антенны и требуемого качества согласования для устройств, использующих аналитический расчет номиналов СЦ, которая включает в себя [4]:

- определение динамического диапазона:

$$D_u = \sqrt{\frac{(R_0 + R_a)^2 + X_a^2}{R_a^2 + X_a^2}}; \quad (14)$$

$$D_i = \sqrt{\frac{(R_0 + R_a)^2 + X_a^2}{R_0^2}}; \quad (15)$$

- определение допустимой погрешности измерений:

$$\varepsilon_u = \varepsilon_i = \varepsilon_z / 2 = \varepsilon_y / 2; \quad (16)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_y = \cos \varphi \frac{SWR_{\max} - 1}{\sqrt{2} SWR_{\max}}; \quad (17)$$

$$\Delta \varphi = \arctg \left( \frac{\cos \varphi SWR_{\max} - 1}{\sqrt{2} SWR_{\max}} \right). \quad (18)$$

Здесь  $D_u$ ,  $D_i$  – динамические диапазоны измерителей напряжения и тока,  $R_0$  – выходное сопротивление передатчика,  $R_a$ ,  $X_a$  – активное и реактивное сопротивление антенны,  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_u$ ,  $\varepsilon_i$  – допустимая погрешность

измерителей модуля сопротивления, напряжения и тока,  $\varphi$  – сдвиг фаз напряжения и тока.

Сделан вывод о том, что ни одна доступная аппаратная реализация детектора фазы либо напряжения не может обеспечить требования к погрешности измерителей для СУ, использующих аналитический расчет номиналов элементов СЦ, для электрически коротких антенн, аналогичных антенне «АШ-4». Снять эти ограничения может применение цифровых детекторов напряжения и фазы либо аппаратная и алгоритмическая оптимизация.

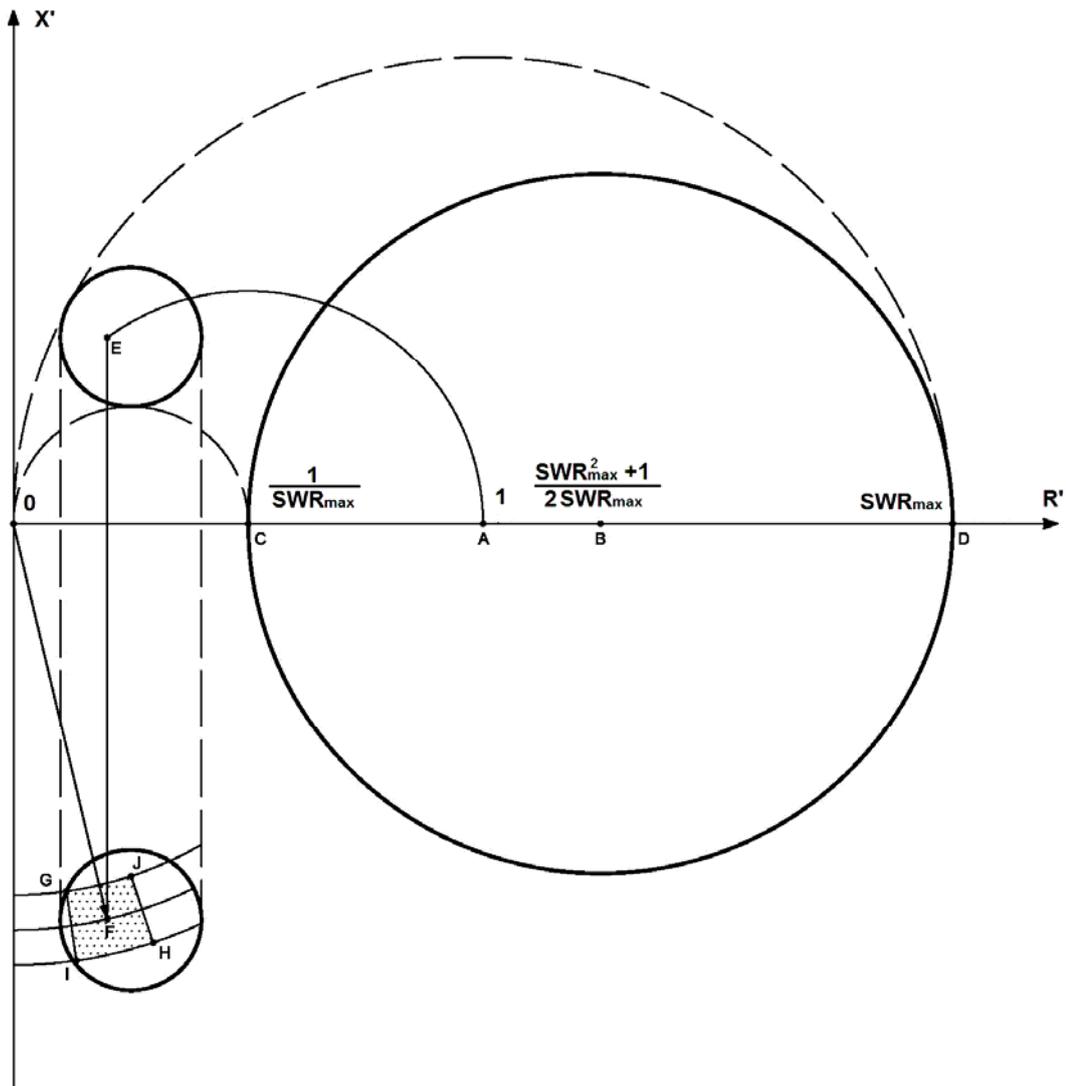


Рисунок 1 – Область допустимых значений импеданса антенны

Разработан метод компенсации искажений выходного сигнала измерителя фазы, реализованного на логических элементах, который позволяет повысить точность измерений в широком диапазоне уровней входных сигналов и для произвольной разности фаз. В данном методе предлагается реализовать компенсацию гистерезиса компараторов на основании следующей зависимости:

$$\varphi_{res} = \text{sign}(\varphi) \cdot |\varphi| + \frac{H_A}{2\sqrt{2}U_{A\text{ RMS}}} - \frac{H_B}{2\sqrt{2}U_{B\text{ RMS}}}. \quad (19)$$

Здесь  $\varphi$  – измеренный сдвиг фаз,  $\varphi_{res}$  – скорректированный сдвиг фаз,  $H_A$  и  $H_B$  – гистерезис компаратора на входе  $A$  и  $B$  соответственно,  $U_{A\,RMS}$  и  $U_{B\,RMS}$  – среднеквадратичное значение напряжения на входе  $A$  и  $B$ .

Искажения выходного сигнала измерителя, присущие малым измеренным углам, возможно компенсировать следующим образом:

$$\varphi = \sqrt{\varphi^* t_{tr} \omega}; \quad (20)$$

$$\varphi^* = \pi \frac{U_\varphi^*}{U_o}. \quad (21)$$

Здесь  $\varphi$  – фактический сдвиг фаз,  $\varphi^*$  – рассчитанный сдвиг фаз,  $t_{tr}$  – время нарастания и спада выходного напряжения логических элементов,  $\omega$  – частота измеряемого сигнала,  $U_\varphi^*$  – выходное напряжение детектора,  $U_o$  – максимальное выходное напряжение детектора.

В процессе проведения экспериментальных исследований было подтверждено, что применение алгоритма компенсации нелинейности измерителя фазы позволило значительно уменьшить погрешность измерений.

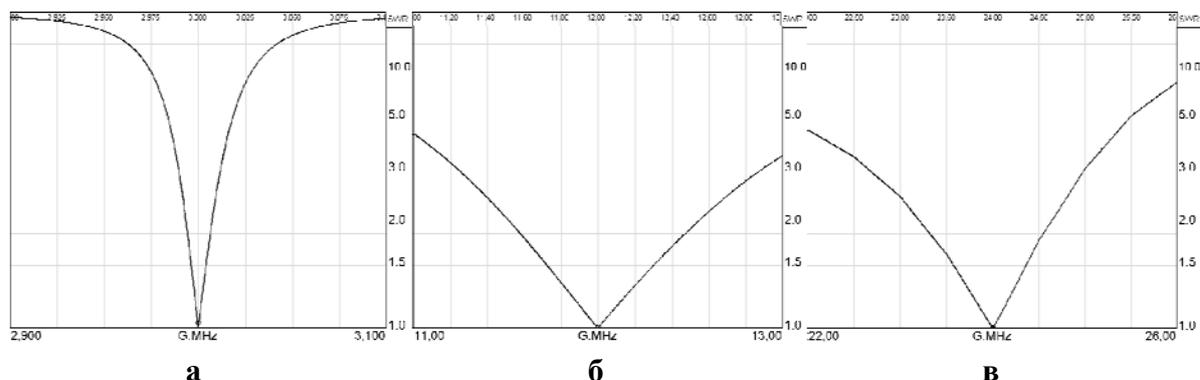
**Четвертая глава** посвящена методам автоматического согласования. Выбор того или иного метода определяет требования к аппаратной части устройства. От него зависит динамический диапазон и погрешность измерителей, сложность и производительность вычислительной части управляющего устройства, необходимый объем априорной информации об элементах СЦ.

Наибольший интерес представляет собой расчетный метод согласования. Скорость настройки на текущей рабочей частоте при его использовании ограничена только временем однократной смены состояния дискретного набора, что в случае применения электромагнитных реле численно равно их времени переключения. Основными механизмами ограничивающими качество согласования при использовании аналитического расчета номиналов элементов СЦ являются: ошибки измерений параметров антенны, ошибки установки рассчитанных значений номиналов элементов СЦ, наличие неучтенных в расчетах паразитных параметров элементов СЦ.

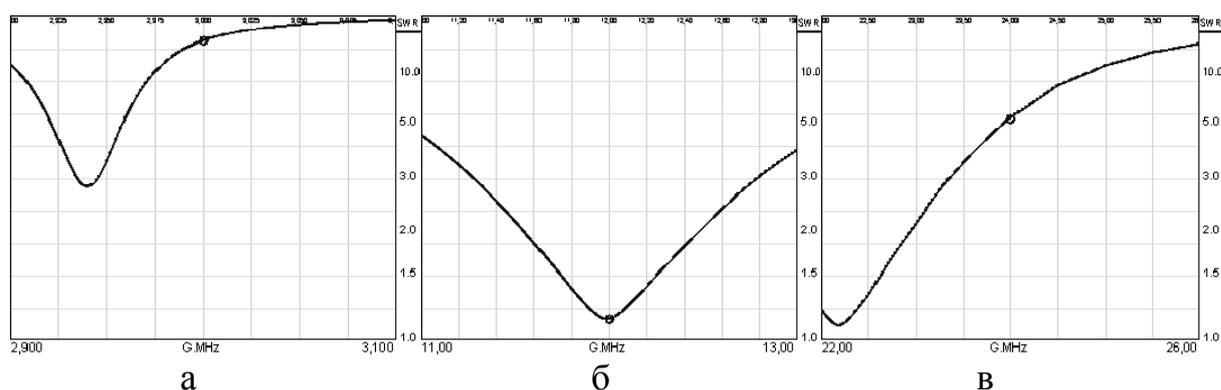
Показано, что решить проблему точности установки номиналов можно применением следующего подхода: фактические значения номиналов разрядов дискретных наборов элементов СЦ определяются при помощи встроенных измерителей СУ после сборки устройства и сохраняются в энергонезависимой памяти, а установка номиналов осуществляется с учетом фактических значений емкости и индуктивности разрядов.

Выделены основные паразитные параметры элементов, которые снижают результативность расчетного метода согласования: активные потери в индуктивных элементах СЦ, емкость между катушками индуктивности и корпусом СУ, индуктивность подключения конденсаторов. Осуществлено моделирование поведения СУ расчетного типа как с использованием моделей идеальных элементов СЦ (рисунок 2), так и с

учетом их паразитных параметров (рисунок 3). Показано, что именно наличие паразитных параметров, неучтенных в расчетах номиналов элементов СЦ, не позволяет достичь требуемого качества согласования. Учет их в расчетах потребует решения системы дифференциальных уравнений численными методами, что предъявляет высокие требования к производительности управляющего устройства, входящего в состав СУ.



**а** – для частоты 3 МГц; **б** – для частоты 12 МГц; **в** – для частоты 24 МГц  
**Рисунок 2 – КСВ на входе согласующего устройства при использовании идеальных элементов**



**а** – для частоты 3 МГц; **б** – для частоты 12 МГц; **в** – для частоты 24 МГц  
**Рисунок 3 – КСВ на входе согласующего устройства с учетом паразитных параметров**

Так как качество согласования с применением различных реализаций итерационного поиска является достаточно высоким, то существует возможность смоделировать такой процесс согласования [10] с применением его результатов для управления состоянием дискретных элементов СЦ – при каждой смене состояния производится оценка ее результативности при помощи схемотехнической модели, т.е. предлагается новый подход к согласованию – *виртуальный поиск* [3]. Он позволяет существенно снизить время настройки (приблизительно в 21 раз для антенны АШ-4), при этом незначительно проигрывая в качестве по сравнению с поразрядным поиском.

Для практического применения предложенного подхода, необходимо разработать схемотехническую модель аппаратной части СУ, используя схемы замещения элементов СЦ. Необходимость создания подобной модели обусловлена тем, что при конструировании СУ применяются не идеальные, а

реальные реактивные элементы. В рамках такой модели можно изменять состояние дискретных наборов катушек индуктивности и конденсаторов, тем самым изменяя эквивалентную схему четырехполюсника, образованную элементами СЦ. На её основании можно рассчитывать результирующий иммитанс на входе СУ по известному иммитансу антенны.

Предложено решение, которое использует трансформирующий элемент при проведении измерений для уменьшения реактивного сопротивления (проводимости) антенны и, как следствие, позволяет снизить требования к точности измерителей до необходимого уровня. При возникновении ситуации, когда измеренный иммитанс антенны не позволяет использовать полученное значение в расчетах из-за погрешности измерителя, производится предварительный расчет номинала трансформирующего элемента и включение необходимого числа старших разрядов дискретного набора в соответствии со следующими выражениями:

- для СЦ в виде Г-образного звена:

$$\sqrt{R_A R_0 - R_A^2} - X_A \geq X_{TR} \geq -X_A - \sqrt{\left(\frac{R_A}{2\sqrt{2}\varepsilon_Z} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{SWR_{\max}^2 + 1}\right)^2 - R_A^2}; \quad (22)$$

- для СЦ в виде обратного Г-образного звена:

$$\sqrt{G_A G_0 - G_A^2} - B_A \geq B_{TR} \geq -B_A - \sqrt{\left(\frac{G_A}{2\sqrt{2}\varepsilon_Z} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{SWR_{\max}^2 + 1}\right)^2 - G_A^2}. \quad (23)$$

После этого определяется состояние оставшихся младших разрядов, при этом состояние старших уже не изменяется. Предложенный метод учета погрешности измерителей [5] пригоден для любого расчетного способа согласования. В случае использования виртуального поиска этот механизм может быть интегрирован в сам способ согласования.

Произведена экспериментальная проверка различных способов согласования с использованием аппаратного макета СУ и эквивалента антенны АШ-4 [9], которая подтвердила, что разработанные способы согласования обладают достоинствами поискового и расчетного способов согласования, при этом лишены их недостатков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. В результате выполнения работы были систематизированы различные подходы к проектированию СУ и была выявлена универсальная структура подобных устройств, позволяющая решить задачу согласования для типовых антенных систем ВЧ диапазона. Показано, что невозможность применения широкополосных полноразмерных антенн в подвижных средствах связи [1], а также тенденция наращивания количества используемых частот [6], обуславливает необходимость поиска новых методов автоматического согласования для уменьшения времени настройки

СУ. В этой связи отказ от поисковых и разработка новых расчетных методов автоматического согласования связаны с необходимостью анализа взаимосвязи результативности подобных подходов с параметрами структурных элементов СУ, а также с разработкой методик синтеза требований к ним.

Установлено, что особенности антенной системы подвижных средств связи, такие как непостоянство электрических параметров и сложная зависимость иммитанса от частоты, требуют обязательного учета при проектировании СУ [1].

2. Разработана оптимизированная методика синтеза требований к универсальной СЦ, состоящей из двух дискретных реактивных элементов, на основании зависимости иммитанса антенны от частоты, которая, по сравнению с методиками, использующими информацию только о КСВ антенны, позволяет уменьшить количество разрядов согласующих элементов до минимально необходимого для обеспечения заданного качества согласования на произвольной частоте в рабочем диапазоне подвижного средства связи [2].

Разработанная методика позволяет не только устранить избыточность в номиналах дискретных согласующих элементов, но учесть нестационарность параметров мобильных антенн, а также влияние паразитных параметров элементов СЦ, что позволяет отказаться от применения схемотехнического моделирования для проверки результатов расчетов. Предложенная методика также позволяет определить минимально допустимую добротность согласующих элементов, необходимую для достижения требуемого КПД СУ.

3. Разработана методика синтеза требований к измерителям электрических параметров на основании требуемого качества согласования и закона изменения иммитанса антенны от частоты, отличающееся от известных методик тем, что обеспечивает функционирование автоматических согласующих устройств, использующих аналитический расчет номиналов дискретных согласующих элементов [4].

Обоснованы требования к максимальным погрешностям измерителей для СУ поискового типа на основании требуемого качества согласования для различных их реализаций.

Обоснованы технические решения детекторов напряжения и разности фаз, определены предельно достижимые значения погрешностей при их аппаратной реализации. Показано, что только реализация детекторов в цифровом виде способна обеспечить требуемую для расчетных методов согласования точность. Разработаны алгоритмические методы оптимизации параметров аппаратных реализаций фазовых детекторов на логических элементах, которые представляют собой компенсацию гистерезиса компараторов, а также компенсацию отклонения передаточной характеристики от линейного закона [8].

4. Разработан новый беспоисковый метод автоматического согласования антенны с выходом передатчика (входом приемника),

базирующийся на использовании схемотехнической модели СУ для осуществления итерационного поиска оптимального состояния элементов СЦ с последующим использованием результатов моделирования для управления аппаратной частью устройства, который позволяет существенно (до 21 раза для антенны АШ-4 по сравнению с поразрядным поиском) снизить время настройки [3].

5. Предложена модификация разработанного метода согласования, учитывающая погрешность используемого измерителя иммитанса, которая позволяет уменьшить время настройки (до 10 раз для антенны АШ-4 по сравнению с поразрядным поиском) и заключается в том, что производится два измерения иммитанса системы «антенна-согласующее устройство»: предварительное, по результатам которого производится расчет номинала дискретного трансформирующего элемента СЦ и установка его старших разрядов таким образом, чтобы понизить требования к точности измерений до необходимого значения, и основное, по результатам которого определяется с необходимой точностью состояние оставшихся разрядов [5].

5. На основании разработанных методик определены требования к элементам макета СУ для работы совместно с эквивалентом антенны АШ-4. Проведены испытания макета с использованием различных способов автоматического согласования. Показано, что использование вновь разработанных беспойсковых методов позволяет повысить эффективность подвижных средств связи за счет снижения времени настройки СУ, при этом качество согласования снижается незначительно (максимальный КСВ при использовании предложенных способов составил 1,74, при использовании итерационного поиска – 1,35).

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

Разработанные новые беспойсковые методы согласования могут быть использованы при проектировании СУ современных подвижных средств связи ВЧ диапазона для уменьшения времени подготовки к ведению связи для режимов, использующих большие наборы частот (АУС и ППРЧ). Для режимов, использующих одну фиксированную рабочую частоту, применение предложенных методов позволяет полностью отказаться от процедуры предварительного согласования и осуществлять процесс настройки СУ непосредственно перед началом передачи полезной информации [3, 5].

Для синтеза требований к аппаратной части СУ, позволяющих применить предложенные методы согласования, могут быть использованы оптимизированная методика синтеза требований к СЦ [2] и вновь разработанная методика синтеза требований к измерителю иммитанса [4].

Разработанные методики синтеза требований к структурным элементам СУ были использованы ОАО «Агат-Систем» при проведении ОКР в рамках ГНТП «Радиосвязь и навигация», что подтверждается актами о практическом использовании результатов работы (копии актов практического использования представлены в приложении Д).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Н. И. Листопад, Д. А. Ковалевич. Оптимизация параметров мобильных антенн ВЧ диапазона // Доклады БГУИР. –2018. – № 6. – С. 73-79
2. Н. И. Листопад, Д. А. Ковалевич. Методика синтеза согласующих устройств для мобильных систем связи КВ-диапазона. // Новости науки и технологий. – 2020. – №4. – С.17-25
3. Д. А. Ковалевич. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика. // Доклады БГУИР. – 2021. – №3. – С.31-39
4. Д. А. Ковалевич. Синтез требований к измерителю иммитанса для согласующих устройств расчетного типа. // Новости науки и технологий. – 2021. – №3. – С.29-38
5. Д. А. Ковалевич. Использование расчетного способа согласования антенны с учетом конечной точности измерителя иммитанса // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2021. – № 6 . – С.134-140

### Материалы научных конференций

6. Ковалевич Д. А. Антенные согласующие устройства для коротковолновых систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // 8-я международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 16-17 мая 2019 г.): сборник научных статей. В 5 ч. Ч. 4. – 2019. – С. 54-57
7. Ковалевич Д. А., Листопад Н. И., Батура М. П. Оптимизация расчетного алгоритма работы для автоматических согласующих устройств коротковолнового диапазона // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо' 2020). Вып.2: сб. науч. тр. 30-й Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 6-12 сентября 2020 г. – 2020. – С. 215-216
8. Ковалевич Д. А. Повышение точности измерителя фазы антенного согласующего устройства // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Респ. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2020 г.). – 2020. – С. 75-79
9. Ковалевич Д. А. Эквивалент антенны «АШ-4» для коротковолнового диапазона частот // Сборник материалов 9-й международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного назначения (Минск, 23-26 июня 2021 г.). – 2021. – С. 44-47

**Тезисы докладов**

10. Ковалевич Д. А. Моделирование процесса согласования автоматических антенных согласующих устройств коротковолнового диапазона // 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22-26 апреля 2019 г., БГУИР, Минск, Беларусь: тезисы докладов. – 2019. – С. 79-80



## РЭЗІЮМЭ

Кавалевіч Дзмітрый Аляксандравіч  
Аўтаматычныя антэнныя ўзгадняючыя прылады ВЧ дыяпазону  
беспашукавага тыпу

**Ключавыя словы:** мабільныя сістэмы сувязі, антэнныя ўзгадняльныя прылады, вымяральнік напругі, вымяральнік фазы, метады аўтаматычнага ўзгаднення, ўзгадняючы ланцуг, імітанс антэны, схематэхнічнае мадэляванне.

**Мэта працы:** павышэнне эфектыўнасці рухомах сродкаў сувязі ВЧ дыяпазону за кошт выкарыстання беспашукавых аўтаматычных антэнных узгадняльных прылад.

**Метады даследавання і выкарыстоўваная апаратура:** тэорыя ланцугоў, матэматычнае і камп'ютарнае мадэляванне, натурныя выпрабаванні.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** Сістэматызаваны розныя падыходы да праектавання ўзгадняючых прылад для тыпавых антэнных сістэм ВЧ дыяпазону. Распрацавана аптымізаваная метадыка сінтэзу параметраў універсальнага ўзгадняючага ланцуга, які складаецца з двух дыскрэтных рэактыўных элементаў на падставе залежнасці імітансу антэны ад частаты. Распрацавана метадыка сінтэзу патрабаванняў да вымяральнікаў электрычных параметраў антэны для ўзгадняючых прылад разліковага тыпу на падставе патрабаванай якасці ўзгаднення і закона змены імітансу антэны ад частаты. Распрацаваны алгарытмічныя метады аптымізацыі параметраў апаратных рэалізацый фазавых дэтэктараў на лагічных элементах, якія ўяўляюць сабой кампенсаванне гістарэзісу кампаратараў, а таксама кампенсаванне адхілення перадаткавай характарыстыкі ад лінейнага закона. Распрацаваны новы беспашукавы метады аўтаматычнага ўзгаднення антэны з выхаднымі каскадамі перадачы, які базуюцца на выкарыстанні схематэхнічнай мадэлі ўзгадняючай прылады для ажыццяўлення ітэрацыйнага пошуку аптымальнага стану элементаў ўзгадняючага ланцугу з наступным выкарыстаннем вынікаў мадэлявання для кіравання апаратнай часткай прылады. Распрацаваны беспашукавы метады аўтаматычнага ўзгаднення, які дазваляе выкарыстоўваць вымяральнік імітансу з хібнасцю, якая перавышае неабходнае для ажыццяўлення аналітычнага разліку наміналаў ўзгадняючых элементаў значэнне

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** метады аўтаматычнага ўзгаднення і метадыкі сінтэзу патрабаванняў да структурных элементаў ўзгадняючых прылад могуць выкарыстоўвацца пры распрацоўцы перспектыўных і мадэрнізацыі існых сродкаў сувязі ВЧ дыяпазону.

**Вобласць ужывання:** праектаванне мабільных сродкаў сувязі.

**РЕЗЮМЕ**

Ковалевич Дмитрий Александрович  
Автоматические антенные согласующие устройства ВЧ диапазона  
беспоискового типа

**Ключевые слова:** мобильные системы связи, антенные согласующие устройства, измеритель напряжения, измеритель фазы, методы автоматического согласования, согласующая цепь, иммитанс антенны, схемотехническое моделирование.

**Цель работы:** повышение эффективности подвижных средств связи ВЧ диапазона за счет использования беспоисковых автоматических антенных согласующих устройств.

**Методы исследования и используемая аппаратура:** теория цепей, математическое и компьютерное моделирование, натурные испытания.

**Полученные результаты и их новизна:** Систематизированы различные подходы к проектированию согласующих устройств для типовых антенных систем ВЧ диапазона. Разработана оптимизированная методика синтеза параметров универсальной согласующей цепи, состоящей из двух дискретных реактивных элементов на основании зависимости иммитанса антенны от частоты. Разработана методика синтеза требований к измерителям электрических параметров антенны для согласующих устройств расчетного типа на основании требуемого качества согласования и закона изменения иммитанса антенны от частоты. Разработаны алгоритмические методы оптимизации параметров аппаратных реализаций фазовых детекторов на логических элементах, которые представляют собой компенсацию гистерезиса компараторов, а также компенсацию отклонения передаточной характеристики от линейного закона. Разработан новый беспоисковый метод автоматического согласования антенны с выходными каскадами передатчика, базирующийся на использовании схемотехнической модели согласующего устройства для осуществления итерационного поиска оптимального состояния элементов согласующей цепи с последующим использованием результатов моделирования для управления аппаратной частью устройства. Разработан беспоисковый метод автоматического согласования, который позволяет использовать измеритель иммитанса с погрешностью, превышающей необходимое для осуществления аналитического расчета номиналов согласующих элементов значение.

**Рекомендации по использованию:** методы автоматического согласования и методики синтеза требований к структурным элементам согласующих устройств могут использоваться при разработке перспективных и модернизации существующих средств связи ВЧ диапазона.

**Область применения:** проектирование мобильных средств связи.

**RESUME**

Kovalevich Dmitry Alexandrovich  
Searchless automatic antenna tuning units for the HF range

**Keywords:** mobile communication systems, antenna tuning unit, voltage meter, phase meter, automatic matching methods, matching circuit, antenna immittance, circuit modeling.

**The purpose of the work:** increasing the efficiency of mobile communications in the HF range through the use of searchless automatic antenna tuning units.

**Research methods and equipment used:** circuit theory, mathematical and computer modeling, field tests.

**The obtained results and their novelty:** Various approaches to the design of tuning units for typical RF antenna systems are systematized. An optimized method for synthesizing the parameters of a universal matching circuit consisting of two discrete reactive elements based on the dependence of the antenna immittance on frequency has been developed. A technique has been developed for synthesizing requirements for measuring antenna electrical parameters for tuning units of the calculation type based on the required quality of matching and the law of change in the antenna immittance with frequency. Algorithmic methods have been developed for optimizing the parameters of hardware implementations of phase detectors based on logic elements, which are compensation for the hysteresis of comparators, as well as compensation for the deviation of the transfer characteristic from a linear law. A new searchless method has been developed for automatically matching the antenna with the output stages of the transmitter, based on the use of a circuitry model of a tuning unit to perform an iterative search for the optimal state of the elements of the matching circuit, followed by using the simulation results to control the hardware of the device. A searchless method for automatic matching has been developed, which allows the use of an immittance meter with an error exceeding the value necessary for the analytical calculation of the matching elements ratings.

**Recommendations for use:** automatic matching methods and methods for synthesizing requirements for the structural elements of tuning units can be used in the development of advanced and modernization of existing HF communication facilities.

**Application field:** design of mobile communications.

Ковалевич Дмитрий Александрович

**АВТОМАТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫЕ СОГЛАСУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА  
ВЧ ДИАПАЗОНА БЕСПОИСКОВОГО ТИПА**

**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 01.11.2022.	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 90.

---

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.  
ЛИ №02330/264 от 14.04.2014  
220013, Минск, П. Бровки, 6