

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора

Раевского Алексея Сергеевича

на диссертацию Карасева Максима Сергеевича

### «Методики оперативного контроля электрических параметров приемо-передающих модулей активной фазированной антенной решетки X-диапазона частот»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и  
наноэлектроники, квантовых устройств

#### 1. Актуальность диссертации

Радиолокационные станции (РЛС) являются главным средством обнаружения воздушных, морских и наземных объектов, а также для определения их дальности, скорости и геометрических параметров. В связи с этим они играют огромную роль в обеспечении обороноспособности России. Активные фазированные антенные решетки (АФАР), являются основой построения РЛС. Одним из ключевых элементов АФАР являются приемо-передающие модули (ППМ). Они обеспечивают необходимые параметры излучения, приема отраженного сигнала и требуемые режимы работы АФАР под конкретные задачи РЛС. В процессе работы вследствие влияния различных факторов, в частности, активных помех, отдельные элементы ППМ выходят из строя, что оказывает отрицательное влияние на работу РЛС.

В связи с этим считаю, что диссертационная работа Карасёва М.С., *целью* которой является разработка технических решений, позволяющих определять в режиме реального времени (в боевом режиме) с высокой точностью основные электрические параметры приемного и передающего тракта, для выполнения калибровки и оценки работоспособности приемо-передающих модулей в составе АФАР, безусловно, *является актуальной и практически востребованной*.

#### 2. Научная новизна и достоверность основных выводов и результатов диссертации

**Научная новизна** диссертации состоит в том, что *впервые*:

1. Разработано оригинальное контактное устройство оперативного контроля, позволяющее проводить измерения электрических параметров (ЭП) ППМ, с поверхностным контактным типом соединения и отдельно межплатных прижимных СВЧ-соединителей с высокой точностью и повторяемостью результатов.

2. Предложен и успешно апробирован новый метод оперативного контроля коэффициентов усиления каналов ППМ положительной обратной связью, позволяющий за счет используемых СВЧ-аттенуаторов и СВЧ-фазовращателей в каналах определять коэффициенты усиления трактов с высокой точностью и

быстродействием, без применения дополнительного оборудования для настройки и калибровки параметров ППМ.

3. Предложен и успешно апробирован новый метод оперативного контроля коэффициента усиления приемных каналов ППМ с помощью внешнего входного сигнала передающего канала, позволяющий за счет ответвления части мощности передатчика в приемник провести проверку коэффициента усиления приемного канала без использования внешнего входного сигнала, подаваемого на вход приемника. Использование нового метода в составе ППМ позволило проводить оценку работоспособности приемных каналов ППМ и с высоким быстродействием производить калибровку ЭП в составе АФАР.

4. Предложен и успешно апробирован новый метод адаптивного изменения временных диаграмм. Применение нового метода в составе ППМ позволило обеспечить помехозащищенность активных элементов приемного канала и создать необходимые условия для адаптивного режима работы с полным восстановлением штатного функционирования.

Научная новизна работы подтверждена двумя патентами Российской Федерации.

**Достоверность** представленных результатов подтверждается апробацией методов и технических решений на сертифицированных и поверенных лабораторно-измерительных стендах АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», а также в составе конструкций ППМ, разрабатываемых в процессе выполнения ОКР в АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина».

### **3. Ценность для науки и практики проделанной работы**

**Научная ценность** диссертации заключается в развитии методов оперативного контроля электрических параметров (ЭП) ППМ АФАР, а также методов защиты приёмника обработки сигналов АФАР.

#### **Практическая значимость работы**

1. Проведенные с помощью разработанного автором диссертации контактного устройства оперативного контроля измерения ЭП ППМ позволили провести модернизацию ППМ, что привело к повышению выходной мощности передающего тракта, снижению коэффициента шума и уменьшению неравномерности коэффициента усиления приемного тракта в изделиях, разработанных в рамках опытно-конструкторских работ.

2. Предложенные схемотехнические решения по проверке коэффициента усиления каналов положительной обратной связью реализованы в составе измерительной установки на производственном участке АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», что обеспечило минимизацию затрат времени на проверку основных ЭП ППМ при их серийном производстве.

3. С использованием предложенных схемотехнических решений по проверке коэффициента усиления за счет ответвления части мощности передатчика в приемник произведено несколько тысяч ППМ.

4. Предложенные схемотехнические решения по защите приемного канала от воздействий внешних помеховых сигналов реализованы в составе экспериментальной установки по определению паразитного влияния соседних каналов друг на друга в составе АФАР.

Научные результаты диссертационной работы использованы в ОКР АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» по созданию ППМ, входящих в состав АФАР радиолокационной станции (РЛС) X-диапазона частот. Впервые разработаны и внедрены ППМ с поверхностным контактным типом соединения для АФАР X-диапазона частот, разрабатываемые по заказу предприятия заказчика. Разработаны и внедрены ППМ с ответвлением части мощности передатчика в приемник, используемые для проверки работоспособности в составе АФАР РЛС X-диапазона частот, разрабатываемые предприятием заказчика. Внедрение результатов подтверждается соответствующими актами.

#### **4. Оценка содержания диссертации, ее завершенности**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы, включающего 164 наименования. Работа изложена на 151 странице машинописного текста, включая 94 рисунка и 8 таблиц.

Во *Введении* дана общая характеристика работы: актуальность темы, степень ее разработанности, цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, достоверность, реализация полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В *первой главе* проведен краткий обзор современных ППМ со встроенными узлами проверки работоспособности каналов. Обзор показал, что, не смотря на большое разнообразие разработок, методы проверки имеют схожий принцип. Отличием является только конструктивное исполнение узлов и применяемых элементов детектирования, что влияет на точность получения информации о работоспособности каналов. После проведенного обзора сделаны выводы, что применяемые методы контроля электрических параметров фирмами-разработчиками не дают полной картины о состоянии ППМ в процессе его работы, поэтому направление по обеспечению оперативного контроля электрических параметров является актуальным.

Во *второй главе* представлена структурная схема ППМ, включающего в себя два приемных канала и один передающий канал. Описываются основные принципы контроля работоспособности представленной схемы. Ставится задача ввода оперативного контроля электрических параметров для проверки работо-

способности ППМ. Рассматривается принцип контроля порогового значения выходной мощности за счет введения детекторной секции в передающий канал. Представляется реализация системы контроля мощности в составе приемопередающего модуля с поверхностным контактным типом соединения (ПКТС). Рассматривается принцип передачи СВЧ-сигнала через прижимной СВЧ-соединитель. Представляется оригинальное контактное устройство для решения задачи измерения и контроля электрических параметров приемопередающих модулей с ПКТС и прижимных СВЧ-соединителей. Проводятся экспериментальные исследования СВЧ-соединителя по показателям СВЧ-потерь и величине проходной мощности (с учетом технологического запаса). Проводятся исследования электрических параметров системы контроля мощности приемопередающих модулей с ПКТС. Анализируются полученные данные временных задержек реагирования системы контроля мощности, позволяющие оценить продолжительность оперативного контроля канала в составе АФАР.

В *третьей главе* представлена разработанная автором методика оперативного контроля коэффициента усиления приемного и передающего каналов с помощью положительной обратной связи (ПОС). Представлены формулы для расчета коэффициента усиления проверяемого канала. Представлен экспериментальный стенд для имитации процедуры оперативного контроля коэффициента усиления с помощью положительной обратной связи в составе конструкции ППМ. Приведены результаты экспериментальной проверки партии ППМ по коэффициенту усиления приемного и передающего каналов, с наглядными иллюстрациями. Проведен анализ результатов эксперимента и на его основе сделаны выводы о правильности работы схемы и методики вычислений коэффициентов усиления проверяемых каналов ППМ. На основе проведенных исследований был разработан базовый алгоритм проверки коэффициента усиления каналов ППМ, который может быть использован в составе АФАР. Проведена оценка продолжительности проверки коэффициента усиления одного канала АФАР по разработанному алгоритму. Определено дальнейшее направление исследований по реализации разработанных схемотехнических решений в составе ППМ и АФАР.

В *четвёртой главе* представлена разработанная автором методика оперативного контроля коэффициента усиления приемного канала за счет ответвления части мощности передатчика в приемник. Представлена реализация схемы в составе модернизируемого ППМ с двумя приемными каналами. Рассмотрен принцип вычисления коэффициента усиления канала ППМ по разработанной методике. Представлены расчетные формулы для проектирования элементов схемы контроля коэффициента усиления. Проведен конструктивный анализ и исследование влияния СВЧ-трактов ПРМ и ПРД при совмещении схемы проверки коэффициента усиления приемного канала и схемы проверки коэффициента усиления положительной обратной связью. Представлен экспериментальный образец ППМ с реализацией встроенного контроля коэффициента усиления. Представлена экспериментально-измерительная установка для проверки электриче-

ских параметров ППМ по разработанной методике. Представлены сравнительные результаты оценки коэффициентов усиления, измеренных стандартными методиками и коэффициентов усиления, полученных с использованием методики оперативного контроля. Проанализированы результаты проведенных исследований и экспериментальной проверки.

В *пятой главе* рассмотрены причины возникновения импульсных помеховых сигналов высокого уровня мощности на входе приемного канала. Описано влияние такого воздействия на ППМ в целом. Предложена схема и методика отключения питания активных элементов приемного канала. Приведены формулы для расчета электрических параметров элементов, входящих в состав схемы. Произведен расчет задержек реагирования и восстановления приемного канала ППМ после воздействия помехового сигнала. Представлен измерительный стенд для экспериментальной проверки разработанных схемотехнических решений. Проведены измерения времени реагирования разработанной схемы при воздействии СВЧ-сигнала высокого уровня мощности на вход приемного канала. На основе полученных экспериментальных данных, разработана методика адаптивного изменения временных диаграмм работы приемного канала для восстановления штатного режима функционирования. Методика основывается на измерении параметров помехового сигнала и изменении режима работы ППМ. Для выполнения корректировки сигналов управления, разработана методика измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на вход импульса высокой мощности. Проанализированы полученные экспериментальные результаты измерений образцов ППМ разного типа по разработанной методике. Получены необходимые данные для ввода разработанной схемы в состав каждого типа измеренных ППМ.

В *шестой главе* представлена разработанная общая структурная схема приемо-передающего модуля АФАР с узлами оперативного контроля ЭП. Рассмотрены основные принципы проектирования и конструирования приемо-передающего модуля и основные достоинства такого ППМ при работе в составе АФАР. Описаны эксплуатационные рекомендации по использованию узлов оперативного контроля в составе измерительных установок и АФАР. Описывается применение комбинаций КС для определения электрических параметров каналов в различных поставленных задачах. Рассмотрены направления для дальнейших исследований в области контроля электрических параметров каналов АФАР.

В *Заключении* кратко сформулированы основные результаты проведенного диссертационного исследования.

Содержание диссертации изложено последовательно и достаточно полно раскрывает решение поставленных научных задач. Диссертация является завершенным научно-квалификационным исследованием поставленной научной задачи. Работа написана грамотно. Оформление работы соответствует установленным нормам.

По материалам диссертации опубликована 21 научная работа. Из них работ, опубликованных в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, – 8 (5 из них без соавторов), 11 работ - в трудах международных и всероссийских конференций (1 без соавторов), 2 патента на изобретение. Издано 1 учебное пособие. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

## 5. Замечания по работе

### 1. По оформлению:

- нет названий Глав, что затрудняет увидеть из Содержания структуру диссертации;

- нет выводов по Главам, в которых мог бы быть сделан акцент на том, что из написанного в данной Главе является достижением автора;

- странно выглядит внутри Главы 1 пункт «1.2.3. Цель работы».

2. Стр.26,27 – зачем рассматривать диоды, которые заведомо не подходят?

3. Стр. 28 – обоснование не выглядит убедительным.

4. На стр.45 используется термин «коаксиально-волновой переход». Речь идёт о коаксиально-полосковом переходе?

5. На стр. 70 – «Методика контроля коэффициента усиления с помощью положительной обратной связи в составе конструкции ППМ АФАР в настоящее время не применялась». Что имеется в виду: «до настоящего времени не применялась» или «в настоящее время не применяется»?

6. На стр.85 ссылка на ф.(12) дана до появления в тексте этой формулы (названной почему-то «уравнением»). А откуда это формула? Просто подобрана для подгонки?

7. Как получились значения входной мощности приёмного канала (рис.74, стр.84)? Догадаться можно, но из текста не ясно.

8. На стр. 114 сказано, что в реальных условиях минимальное время проверки передающего канала оказывается равным 6 секундам. Является ли такое время проверки допустимым в условиях эксплуатации изделия?

9. В Положениях, выносимых на защиту, делается акцент на конкретных значениях времени оценки коэффициента усиления, времени проверки работоспособности, времени восстановления штатного функционирования в условиях активных помех. Однако в тексте диссертации не удалось найти сравнения этих временных затрат с результатами, полученными другими разработчиками. Это затрудняет оценку предлагаемых автором методик оперативного контроля.

## ВЫВОДЫ

1. Диссертация Карасёва Максима Сергеевича посвящена актуальной теме и является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, правильно структурирована. В ней представлены новые научно-обоснованные решения научно-технической задачи разработки технических решений, позволяющих определять в режиме реального времени с высокой точностью основные электрические параметры приемного и передающего тракта, для выполнения калибровки и оценки работоспособности приемопередающих модулей в составе АФАР. Основные результаты диссертации опубликованы и докладывались на научных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает главное содержание и основные выводы самой диссертации.

2. Указанные в данном отзыве недостатки имеют частный характер и не снижают в целом положительной оценки работы.

3. Диссертация Карасёва М.С. удовлетворяет критериям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Карасёв Максим Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

### Официальный оппонент,

Заведующий кафедрой «Физика и техника оптической связи»

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),

д.ф.-м.н., профессор

Раевский Алексей Сергеевич

Научная специальность: 01.04.03 – Радиофизика

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Адрес: 603950 г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
тел.: (831) 436-82-33. E-mail: raevsky@nntu.ru

Подпись заверяю:

Учёный секретарь Учёного Совета НГТУ

к.т.н., доцент



Мерзляков Игорь Николаевич

15.03.2022 г.