

На правах рукописи

Тимофеев Виктор Владимирович

МЕТОД И СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА СОГЛАСОВАНИЯ АНТЕНН ШТЫРЕВОГО ТИПА
С МОБИЛЬНОЙ РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЙ АППАРАТУРОЙ

Специальность: 05.11.13 – приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2009

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом
университете им. И.И. Ползунова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пронин Сергей Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Абанин Виктор Алексеевич

кандидат технических наук, доцент
Зацепин Павел Михайлович

Ведущая организация: НИИ Интроскопии Томского политехнического университета

Защита состоится 12 ноября 2009 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета
Д212.004.06 Алтайского государственного технического университета им. И.И. Пол-
зунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного
технического университета.

Автореферат разослан 12 октября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н., доцент

Д.Е. Кривобоков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы.

Современная радиопередающая аппаратура (РПА), имеющая выходной каскад, выполненный на полупроводниковых приборах, как правило, имеет широкополосные тракты, входные и выходные сопротивления которых составляют 50 или 75 Ом. Для реализации заявленных технических параметров такой аппаратуры, при её эксплуатации требуется обеспечить активную нагрузку как для приёмной, так и для передающей частей РПА. В случае возникновения рассогласования параметров РПА с антенно-фидерным устройством (АФУ), часть радиочастотной мощности выходного сигнала, отраженная от антенны обратно в фидер, неизбежно приведёт к нарушению режима работы выходного каскада РПА, ухудшению спектральной чистоты его выходного сигнала. Ситуация нарушения согласования АФУ с РПА является основной причиной выхода из строя активных элементов выходного каскада широко распространённой РПА практически любого типа.

Инструментальный контроль возникновения аварийных режимов в АФУ и выходных каскадах РПА, а также пограничных с ними режимов работы, исключительно затруднён ввиду динамичности протекающих в системе процессов и, зачастую, их фатальных результатов для активных компонентов исследуемой системы. По этой причине особую важность приобретает выбор метода контроля качества согласования АФУ с РПА мобильного исполнения.

Контроль качества согласования в мобильной технике связи осуществляется с помощью измерителей коэффициента стоячей волны. Измеряемые значения контролируемого параметра считываются оператором с измерительного прибора визуально и компенсируются вручную. Недостатками описанного метода являются: эпизодичность проведения измерений, необходимость прекращения штатной работы РПА на время измерений, обязательное участие оператора. Кроме того, будучи величиной, контролируемой косвенным образом, по значениям двух показаний индикаторной головки, считанным оператором, коэффициент стоячей волны определяется по результатам вычислений, что дополнительно снижает оперативность процедуры контроля.

Учитывая современное состояние проблемы в области решения прикладных задач эксплуатационной диагностики АФУ, в частности, контроля качества согласования антенн штыревого типа (АШТ) с мобильной радиопередающей аппаратурой (МРА), разработка современного метода и средства контроля качества согласования антенн штыревого типа с мобильной радиопередающей аппаратурой является актуальной задачей, имеющей большое прикладное значение.

Целью работы является создание метода и средства контроля качества согласования антенн штыревого типа с мобильной радиопередающей аппаратурой в режиме реального времени, которые могут быть положены в основу создания систем автоматического управления, для обеспечения улучшения частотных характеристик сигнала, излучаемого МРА.

Задачи исследования:

1. Интегрированный анализ причин возникновения внеполосных излучений МРА, комплексная оценка последствий их присутствия, как для самого МРА, так и частотного ресурса в целом, и выбор на его основе минимального комплекса контролируемых сигналов по степени выраженности влияния на них различных факторов внешнего воздействия на АШТ, с целью наиболее эффективного осуществления процесса контроля.
2. Обоснование выбора первичного измерительного преобразователя, обеспечивающего наилучшее сочетание эксплуатационных, технических и экономических характеристик средства контроля.
3. Практическая реализация прибора в виде действующего макета и исследование выбранных сигналов на объекте контроля с целью выявления структурных параметров сигналов, оценки диапазонов их изменения при различных внешних воздействиях и исследование степени взаимосвязи сигналов.
4. Разработка прибора контроля качества согласования антенн штыревого типа с мобильным радиопередающим аппаратом и его практическое внедрение.

Методы исследования.

Для решения поставленных задач использованы методы системного анализа, математического моделирования и экспериментального исследования системы АШТ-МРА и метрологических характеристик разработанного средства контроля.

Научная новизна выполненных исследований и разработок заключается в следующем:

1. Разработаны метод и средство контроля качества согласования АШТ с МРА в режиме реального времени. По сравнению с классическими методами контроля, для осуществления которых необходимы значения напряжений и падающей, и отражённой волн, в предложенном методе контролируют значение только отражённой волны, что увеличивает производительность, достоверность и обеспечивает непрерывный контроль.
2. Разработана математическая модель, позволяющая учесть влияние проводящего объекта, с размерами, превышающими несколько длин волн, попадающего в апертуру антенны. Моделирование выполнено по методу функции Грина. Эта отличительная особенность позволяет исключить трудоёмкий и сложный процесс описания параметров земли, который используется в моделях, построенных на основе метода конечных разностей. Построено аналитическое решение задачи расчёта входного сопротивления антенны с учётом влияния этого объекта. Корректность построенной модели подтверждена тестовыми расчётами и сравнением с экспериментальными результатами.

Практическая ценность работы.

Разработанный метод позволяет создать надёжные устройства, осуществляющие достоверный контроль функционирования не только антенн штыревого типа с мобильной радиопередающей аппаратурой, но и антенно-фидерных устройств других типов с радиопередающей аппаратурой, в том числе, стационарного исполнения.

Практическая реализация результатов исследования позволяет существенно сократить электромагнитное загрязнение частотного ресурса внеполосными излучениями, что, в целом, благоприятно сказывается на его эксплуатационной ёмкости.

Разработанный модуль может быть использован в мобильных и стационарных РПА, а также в качестве средства экспресс-диагностики качества согласования в ремонтных организациях.

Реализация и внедрение научно-технических результатов.

Разработанные метод и средство контроля качества согласования АШТ с МРА внедрены в ООО «Радиосвязь АВТО» и Центре сервисного обслуживания специальной техники и средств связи при ГУВД по Алтайскому краю.

На защиту выносятся:

1. Метод оперативного контроля и комплексной оценки качества согласования АШТ с МРА в процессе штатной эксплуатации МРА.
2. Модуль контроля качества согласования АШТ с МРА в режиме реального времени, выявляющий отклонение параметров этой системы, в процессе штатной эксплуатации МРА.

Публикации.

По материалам диссертационных исследований опубликовано 12 печатных работ, из них 1 патент на изобретение, 5 статей, в том числе 2 в изданиях, входящих в перечень ВАК, 6 тезисов докладов.

Апробация работы.

Материалы работы обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Информационные технологии» АлтГТУ, а также были представлены в докладах на конференциях : «Методы и средства измерений - 2007» г. Нижний Новгород, «Виртуальные и интеллектуальные системы - 2007, 2008, 2009» г. Барнаул, «Микроэлектроника и информатика - 2008» г. Москва, «Научная сессия ТУСУР - 2008» г. Томск, «Измерение, контроль, информатизация - 2008» г. Барнаул, «Радиотехника, электротехника, энергетика - 2008» г. Москва. По материалам исследования получен патент.

Личный вклад.

Автору принадлежат результаты аналитических исследований литературных источников по тематике работы; разработка исследовательского стенда на базе МРА, работающего в режиме узкополосной цифровой модуляции с применением ПЭВМ и её практическое воплощение; результаты экспериментальных исследований; разработка модуля контроля качества согласования АШТ с МРА и его практическая реализация в виде действующей конструкции.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Основное содержание изложено на 133 страницах машинописного текста, содержит 14 рисунков и 2 таблицы. Список литературы состоит из 204 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и практическая значимость выбранной темы, сформулированы и обсуждаются цели и задачи работы, методы их достижения, а также основные положения, выносимые на защиту. Сформулирована научная новизна работы и приведена её краткая характеристика.

В первой главе диссертационной работы содержится обзор литературных источников, изложено современное состояние вопроса контроля качества согласования АШТ с МРА. Рассмотрены и оценены имеющиеся варианты решения проблемы контроля качества согласования АФУ с РПА.

В подавляющем большинстве это теоретические исследования аналитическими методами установившихся процессов в линиях передачи и самих антеннах при различных стандартных стационарных условиях.

Основной проблемой исследований в данной области, в том числе и уже реализованных практически, во многих случаях даже серийно, является параллельность эволюции их результатов. С одной стороны существуют качественные, достаточно точные приборы для измерения параметров АФУ – антенные анализаторы, не требующие для своей работы даже наличия самого РПА. С другой стороны - сами согласующие устройства, известные со времён становления ламповой техники связи. Регулировка настроечных элементов в них производилась исключительно вручную. С переводом оконечных каскадов радиопередающих устройств на полупроводниковую элементную базу и развитием парка МРА вопрос согласования их с АШТ встал по-новому.

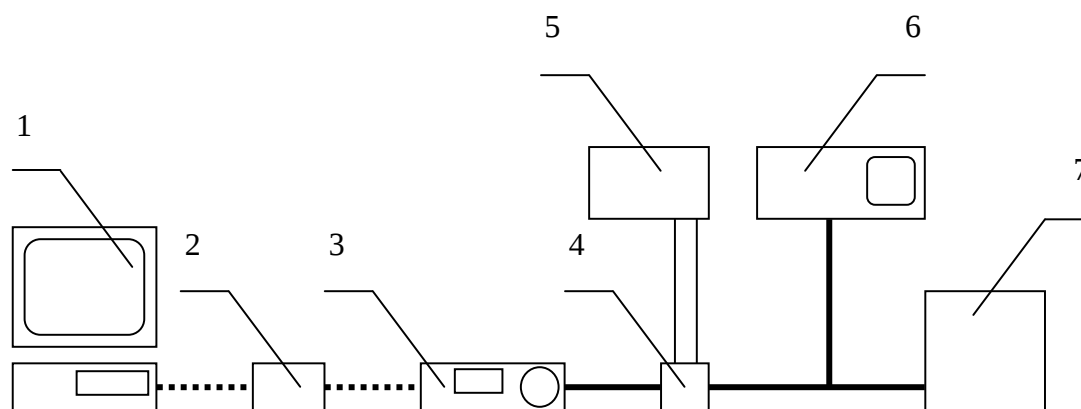
Динамический режим изменения параметров АШТ в процессе штатной эксплуатации под влиянием внешних воздействий более или менее подробно не рассматривается, а коротко именуется аварийным, хотя последствия его возникновения для активных силовых полупроводников очевидны. Любые изменения степени согласования выходного каскада АШТ с МРА по причине возникновения реактивности, как в сторону ёмкостной составляющей, так и в сторону индуктивной, свыше установленных пределов, неизбежно ведут к выходу этих элементов из строя.

Таким образом, просматривается существенная незавершенность ранее проведённых исследований в области поставленной задачи и малая степень практической реализации их результатов, что аргументировано обосновывает необходимость разработки новых методов контроля.

Во второй главе приводится описание экспериментальной установки, оцениваются причины ухудшения качества согласования АШТ с МРА, а также разрабатываются метод и средство контроля качества согласования АШТ с МРА во время штатной эксплуатации МРА в режиме реального времени.

Экспериментальная установка включает в себя РПА Icom IC-718, подключенный к персональному компьютеру для осуществления цифровой модуляции сигнала, разработанный модуль контроля качества согласования АШТ с МРА с датчиком на токовом трансформаторе оригинальной конструкции, коаксиальную фидерную линию. Нагрузкой которой являлись коаксиальный эквивалент, сопротивлением 50 Ом и электрический эквивалент антенны, имитирующий различные сочетания реактивности в реальной антенне. Измерение выпрямленного значения напряжения отражённой волны, снимаемого с датчика, проводилось вольтметром В7-36, контроль параметров внеполосных излучений проводился спектро스코пом трансивера Icom IC-7000. Для оценки влияния различных возмущающих факторов, действующих на реальные антенны, проводился ряд экспериментов в диапазоне 144 МГц. В качестве

типичных внешних факторов, воздействующих на антенны, рассмотрены близость проводящей поверхности (попадание её в апертуру антенны) и намокание антенны под влажными атмосферными осадками. Количественно степень рассогласования дополнительно контролировалась анализатором антенн MFJ-259.



Условные обозначения:

- 1 – ПЭВМ, 2 – сигнальный интерфейс, 3 – радиопередающий аппарат,
 4 – модуль контроля качества согласования АШТ с МРА, 5 – вольтметр
 В7-36, 6 – спектроп трансивера Icom-7000,
 7 – нагрузка радиопередающего аппарата.

Рис. 1 - Структурная схема экспериментальной установки для проведения исследования параметров модуля контроля качества согласования АШТ с МРА

Используемая конфигурация ПЭВМ (CPU Athlon-1800XP+, RAM 128 Mb, HDD 10 Gb, звуковая карта на процессоре AC 97) не является критичной и должна обеспечивать работоспособность программы, осуществляющей цифровую модуляцию сигнала.

Выбор вида модуляции был остановлен на активно развивающейся в настоящее время цифровой модуляции BPSK-31. По сравнению с альтернативными видами, для неё характерна наименьшая полоса основного сигнала. Это позволяет повысить информативность контроля при анализе спектров внеполосных излучений, расположенных в непосредственной близости от границ основного сигнала. Т.е. повышается разрешающая способность исследований АЧХ. Применение ПЭВМ позволяет стабилизировать параметры модулирующего сигнала.

На первом этапе экспериментов контролировали параметры компонентов экспериментальной установки и формировали границы изменения параметров АШТ, имеющие место при практической эксплуатации антенн. Затем исследовалась чувствительность датчика модуля контроля к изменению сопротивления нагрузки АФУ.

На втором этапе экспериментов изготовленный модуль был откалиброван и симметрирован с помощью анализатора антенн MFJ- 259 и измерительного эквивалента нагрузки. Далее устанавливался диапазон рабочих частот датчика модуля для соблюдения корректности измерений, модуль устанавливался в антенно-фидерный

тракт установки и оценивалась степень вносимого им рассогласования. После этого была проведена метрологическая оценка характеристик предлагаемого модуля, комплексный анализ полученных результатов и формулирование выводов.

В качестве типичных внешних факторов, воздействующих на рассматриваемые антенны штыревого типа, рассмотрены попадание в апертуру антенны проводящего объекта и намокание антенны под влажными атмосферными осадками. Антенна МРА постоянно подвергается воздействию посторонних проводящих поверхностей, попадающих в апертуру антенны. Это кузова других транспортных средств, элементы оборудования дороги, элементы архитектурной застройки и т.д. Все эти объекты оказывают негативное влияние на работу антенны, так как они не учтены в её конструкции при проектировании, изготовлении и настройке. Стационарные антенны также не лишены этих воздействий, поскольку при монтаже и настройке антенна обладает заданными параметрами лишь при вполне конкретном взаимном расположении в пространстве относительно своих компонентов и внешних объектов. В процессе эксплуатации это расположение неизбежно меняется по причинам старения элементов подвеса антенны, ветровых нагрузок, изменения близкорасположенных элементов застройки.

Эксперименты по оценке влияния возмущающих факторов, действующих на антенну, проводились в диапазоне 144 МГц. Использование компактных антенн позволило в максимальной степени повысить достоверность результатов проводимого исследования, поскольку объём свободного пространства, необходимого для объективности полученных данных также требовался небольшой, в пределах нескольких длин волны. Для количественной оценки согласования АШТ с МРА при постановке экспериментов производились замеры параметров АФУ анализатором антенн MFJ-259.

В качестве объекта исследования была использована штыревая автомобильная антенна с вертикальной поляризацией излучаемого сигнала и круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости с длиной излучателя, равной 0,25 длины волны. Рабочий диапазон частот антенны составлял 144-146 МГц, при коэффициенте стоячей волны не более 1,1. Антенна обладает входным сопротивлением 50 Ом и присоединяется к МРА посредством коаксиального кабеля с разъёмом PL-259. После монтажа антенны на крыше легкового автомобиля было инструментально проверено соответствие её технических параметров приведённым в документации. Все измеренные параметры соответствовали паспортным в полном объёме.

В качестве проводящей поверхности, вносимой в апертуру антенны, использовалась железобетонная плита потолочного перекрытия. Металлическая арматура, составляющая несущий каркас плиты представляет собой сетку с квадратной ячейкой сечением не более 0,05 длины волны выбранной для проведения исследования. Ячейки арматурной сетки соединены между собой с применением сварочного шва, обеспечивающего надёжный электрический контакт между прутками, т.е. для радиоволн такая сетка является проводящей поверхностью. Кроме этого габаритные размеры плиты (4х6 м) представляли собой аналог типичного габарита крупного транспортного средства или элемента архитектуры. Расстояние до антенны составляло менее одной длины волны и не оказывало принципиального значения на результаты измерений при варьировании до 0,5 длины волны.

Моделирование выпадения осадков имитировалось с помощью распылителя. В качестве земли для первоначального согласования антенны был использован металлический профиль длиной два метра. Будучи помещённым над металлической ёмкостью, имитирующей кузов автомобиля, он позволил согласовать вышеописанную антенну в рабочем диапазоне частот с КСВ не более 1,1. При этом входное сопротивление антенны являлось чисто активным и составляло 51-52 Ом. Воздействие влажных осадков в капельной форме с интенсивностью 20-40 мм·м²/минуту дало следующий эффект. Во-первых возникла реактивная составляющая входного сопротивления антенны в пределах 15-20 Ом, во-вторых существенно возросло входное сопротивление антенны до 100-115 Ом. КСВ в рабочем диапазоне составил 1,9-2,3.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 2 в виде графических зависимостей КСВ в фидере АШТ от частоты излучаемого МРА сигнала.

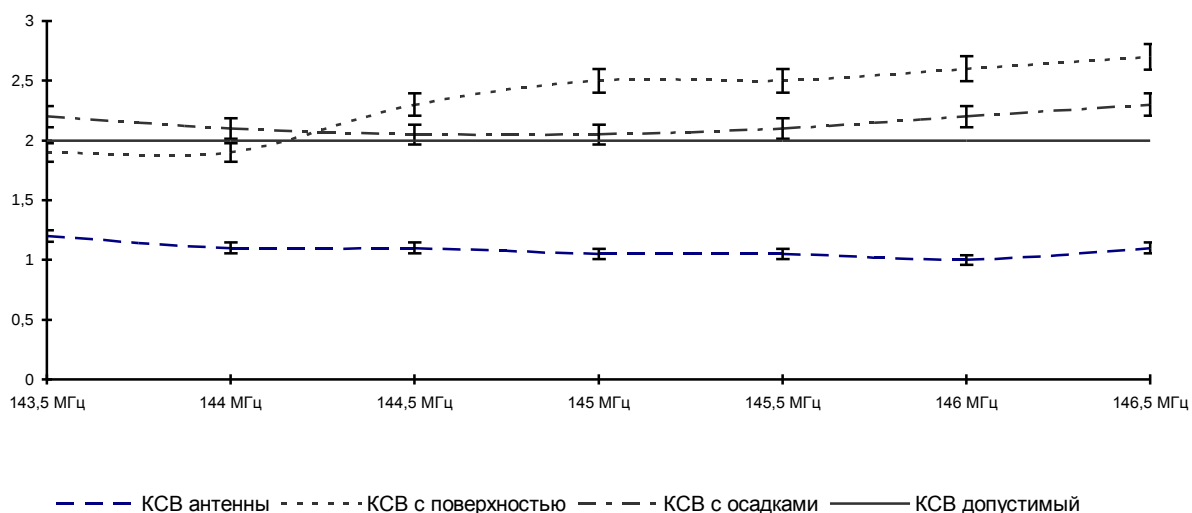


Рис. 2 – Зависимости КСВ в фидерной линии при различных внешних воздействиях на АШТ от частоты сигнала, излучаемого МРА

Для большей наглядности результатов экспериментов графики построены на единой координатной поверхности. Из построенных графиков видно, что контроль качества согласования АШТ с МРА в описанных условиях выявил недопустимое для эксплуатации РПА ухудшение параметров согласования: КСВ повысился до 2,5-2,7.

Предполагается, что природные осадки, имеющие загрязняющие примеси, по сравнению с очищенной питьевой водой, окажут более негативное воздействие на качество согласования АШТ с МРА.

Подводя итог проведённым исследованиям, можно утверждать, что влияние типичных внешних воздействий на качество взаимного согласования АШТ с МРА носит существенный характер. Результатом этого влияния является изменение электрических параметров антенны, непосредственно оказывающих влияние на качество согласования АШТ с МРА. Степень рассогласования АШТ с МРА, возникающая при этом, вполне достаточна для снижения качества согласования АШТ с выходным каскадом МРА ниже уровня, предусмотренного производителем РПА, в качестве эксплуатационного.

Выбор первичного измерительного преобразователя модуля контроля качества согласования АШТ с МРА осуществлялся по критериям максимальной чувствительности, широкополосности и помехозащищённости с учётом технологичности изготовления и массогабаритных показателей. Применение широкополосного трансформатора тока (ШПТТ) снимает вопрос о частотной зависимости показаний, поэтому такой прибор уже можно использовать как широкополосный высокочастотный ваттметр достаточно высокого класса точности. В подобных КСВ-метрах легко реализуется высокая чувствительность, поэтому они подходят и для мало-мощной передающей аппаратуры. Однако наличие высокочастотного широкополосного трансформатора заметно осложняет практическое изготовление прибора. Несмотря на это, при выборе датчика отраженной волны для проведения диссертационного исследования предпочтение было отдано именно ему. С одной стороны более качественный датчик позволит повысить качество экспериментальных исследований – их результаты будут более репрезентативными. С другой стороны – реализация разрабатываемого модуля контроля качества согласования АШТ с МРА на широкополосном датчике существенно расширит область его потенциального применения.

В разработанном модуле для контроля качества согласования используется лишь напряжение отраженной волны. Это техническое решение продиктовано соображениями экономической оптимизации производственных издержек в направлении их минимизации. Тем не менее, необходимость в симметрировании датчика имеется, поскольку его влияние на основной сигнал, при всей минимальности, существует. Симметрирование необходимо для уравнивания воздействия датчика модуля контроля качества согласования как на прямую, так и на отражённую волну в фидере.

В ходе проведения экспериментов были установлены зависимости напряжения вторичной обмотки широкополосного трансформатора от рассогласования, возникающего при различных изменениях параметров АФУ. При этом следует обратить внимание на тот факт, что постановка эксперимента предусматривает согласование выходного каскада МРА с фидером, а изменения параметров согласования, в частности входного сопротивления АФУ, будет в полной мере обусловлено изменением входного сопротивления рассматриваемой антенны.

На рисунке 3 приведена графическая зависимость напряжения вторичной обмотки ШПТТ при различных величинах сопротивлений активной нагрузки фидерного тракта экспериментальной установки. Симметричная U-образная форма полученного графика говорит о том, что исследуемый первичный преобразователь на основе ШПТТ одинаково чувствителен к изменению величины активной нагрузки фидера, как в сторону её уменьшения, так и в сторону увеличения. При этом, величина напряжения, наводящегося во вторичной обмотке ШПТТ, соответствующая двукратному изменению значения номинального сопротивления нагрузки, должна являться уровнем входного напряжения срабатывания компаратора напряжения экспериментальной установки.

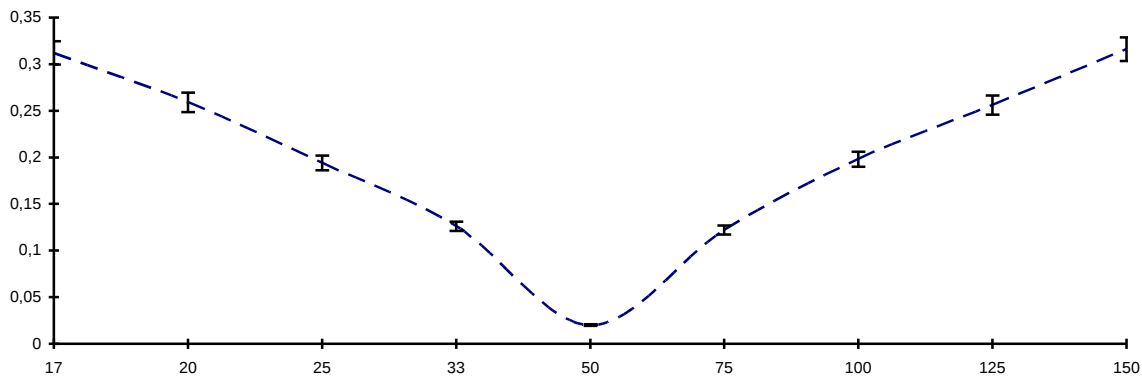


Рис. 3 - Зависимость напряжения вторичной обмотки ШПТТ при активной нагрузке МРА

Первоначально КСВ в фидерном тракте, нагруженном измерительным эквивалентом нагрузки сопротивлением 50 Ом, при измерении анализатором антенн MFJ-259, составил 1,0. После монтажа ШПТТ в фидерный тракт экспериментальной установки повторные замеры показали следующий результат: КСВ изменяется в пределах 1,0-1,1 в диапазоне частот от 2,5 до 70 МГц. Далее, путём использования нагрузок фидера, описанных выше, были сняты характеристики чувствительности ШПТТ.

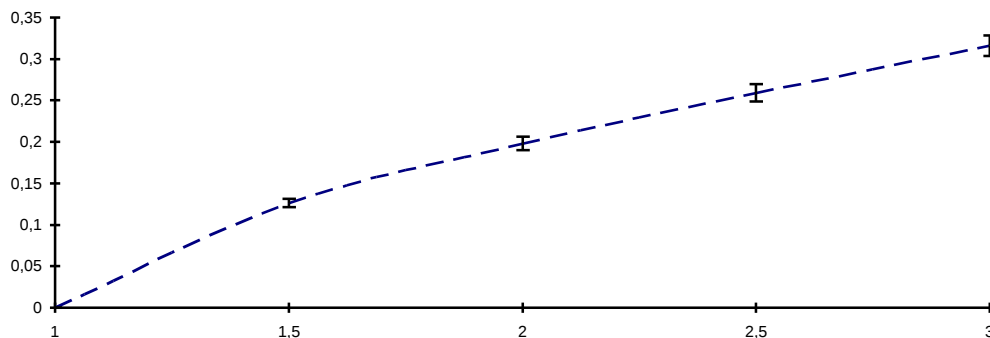


Рис. 4 - Зависимость напряжения вторичной обмотки ШПТТ от КСВ при комплексной нагрузке МРА

На рисунке 4 приведена графическая зависимость напряжения вторичной обмотки ШПТТ при комплексной нагрузке фидерного тракта экспериментальной установки. Форма полученного графика близка к линейной, что говорит о применимости выбранного первичного преобразователя на основе ШПТТ, в том числе, и для контроля параметров согласования фидерного тракта, нагруженного на нагрузку,

имеющую реактивную составляющую. Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод о достаточной степени чувствительности первичного преобразователя на основе ШПТТ и применимости его для решения задачи контроля качества согласования АШТ с МРА.

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что выбор в качестве первичного измерительного преобразователя для экспериментальной установки ШПТТ является экспериментально обоснованным, как обеспечивающего наилучшее сочетание эксплуатационных, технических и экономических характеристик средства контроля.

В настоящее время одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, является охрана окружающей среды. Снижая внеполосные излучения МРА, мы сможем уменьшить электромагнитное загрязнение атмосферы. Кроме этого побочные излучения активно способствуют снижению пропускной способности частотного ресурса, а это уже прямой экономический ущерб. Непрерывное повышение экологических и экономических требований к современной мобильной технике связи предопределяет разработку новых методик измерения её технических параметров с целью поддержания их в пределах требований нормативной документации.

В третьей главе предложена математическая модель влияния на АШТ внешних факторов.

Штыревая антенна, как правило, представляет собой полотно, длина которого кратна четверти длины волны излучаемого антенной сигнала рабочей частоты РПА. На этой частоте антенна является настроенной и согласованной с элементами выходного каскада РПА по входному сопротивлению. Кратность длины полотна антенны четверти длины волны облегчает процедуру согласования, поскольку приближает входное сопротивление антенны к величине 50 Ом - стандартному значению нагрузки выходного каскада РПА и стандартному значению волнового сопротивления коаксиальных фидеров, используемых в технике связи. Вторым плечом штыревой антенны в зависимости от её конструктивного исполнения может являться либо подстилающая поверхность (грунт), либо кузов автомобиля, либо система противовесов, её заменяющая, которая имеет ёмкостную связь с подстилающей поверхностью.

Таким образом, задачу влияния проводящего объекта достаточно произвольной формы, размерами, превышающего длину волны, попавшего в апертуру АШТ, можно описать взаимодействием антенны, находящейся над идеальной проводящей плоской поверхностью, связанной со вторым полюсом РПА, с другой идеально проводящей поверхностью. Таким образом, решена задача возбуждения плоского волновода с идеально проводящими стенками четвертьволновой штыревой антенной, геометрия постановки которой представлена на рисунке 5.

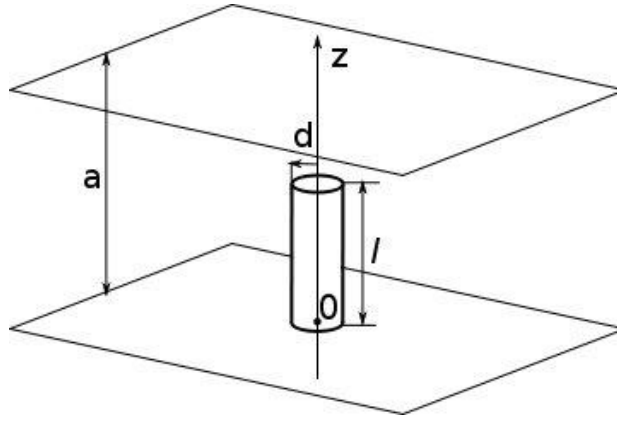


Рис. 5 - Геометрия задачи о возбуждении плоского волновода штыревой антенной

В основу построения модели было положено уравнение Гельмгольца (1), описывающее электромагнитные потенциалы в векторной форме, с граничными условиями, соответствующими идеально проводящим стенкам волновода (2):

$$\Delta A = -J_z, \quad \Delta \varphi = -\rho \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial A}{\partial z} \right|_{z=0,a} = 0 \quad (2)$$

Решая поставленную задачу методом функции Грина, можно найти выражение для компоненты векторного потенциала, что позволяет найти компоненты электромагнитного поля в волноводе. Используя закон сохранения энергии электромагнитного поля, можно вычислить мощность поля, что, в свою очередь, позволяет найти входное сопротивление антенны в виде:

$$Z_{\text{ex}} = \frac{Z_0 k_0}{2a} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{D_n^2 J_0^2(\xi_n d)}{\xi_n^2} \left[1 - i \frac{\pi}{2} \xi_n d \left(I_0(\xi_n d) J_1(\xi_n d) - N_0(\xi_n d) N_1(\xi_n d) \right) \right] + \right. \\ \left. + i \frac{\pi}{2} \sum_{n=N+1}^{\infty} D_n^2 I_0^2(\xi_n d) \frac{d}{|\xi_n|} K_0(\xi_n d) K_1(\xi_n d) \right\} \quad (3)$$

где $Z_0 = 120 \pi$ Ом — волновое сопротивление свободного пространства; $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ — волновое число в свободном пространстве; N — количество распространяющихся волноводных мод, которое найдено по формуле $N = \frac{k_0 a}{\pi}$; ξ_n — волновое число, вычисляемое по формуле $\xi_n^2 = k_0^2 - (\pi/a)^2$; $J_0(z)$ и $J_1(z)$ — функции Бесселя нулевого и первого порядков; $N_0(z)$ и $N_1(z)$ — функции Неймана нулевого и первого порядков; $I_0(z)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка; $K_0(z)$ и $K_1(z)$ — функции Макдональда нулевого и первого порядков. Коэффициенты D_n вычисляются по формуле:

$$D_n = \frac{c \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} l \epsilon_0 \delta_n}{\sqrt{1 + \delta_n^2}},$$

где ε и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды между стенками волновода (для воздуха $\varepsilon=1$, $\mu=1$); δ_{ij} — символ Кронекера.

Модель позволяет описывать зависимость параметров АШТ от факторов внешнего воздействия на неё. Разработанная модель подтвердила полноту экспериментальных исследований и их достоверность. Величина измеренного соотношения падающей и отраженной волн совпала с расчётным КСВ, полученным по модели.

При моделировании учитывалось влияние согласующего устройства, присутствовавшего в конструкции антенны, используемой при проведении экспериментов. Расчёты выполнены для параметров: длина полотна $l=0,6$ м, ширина волновода $a=0,68$ м, радиус полотна антенны $d=0,005$ м, волновое сопротивление фидера $W=50$ Ом. Длина полотна превышает $0,25\lambda$, поскольку согласующее устройство содержит удлиняющую индуктивность. Увеличение погрешности в нижней части частотного диапазона обусловлено наличием сосредоточенной ёмкости в согласующем устройстве.

На рисунке 6 приведены зависимости КСВ в фидерной линии, соединяющей МРА с АШТ, рассчитанные по предложенной модели и полученные экспериментальным путём.

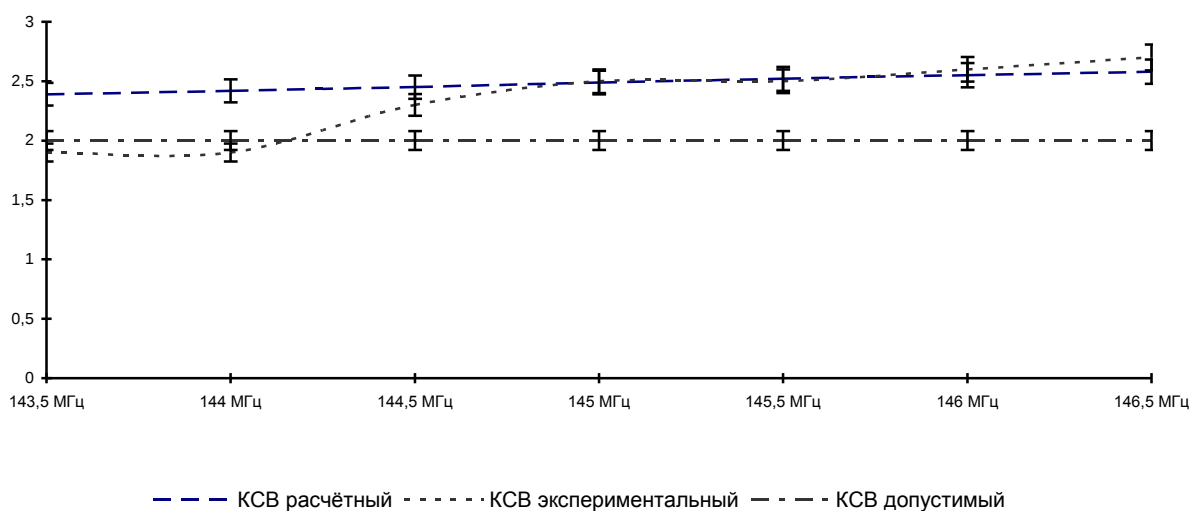


Рис. 6 — Зависимости КСВ в фидерной линии, рассчитанные по модели и полученные экспериментально

В настоящее время для инженерных расчётов широко применяются программные пакеты, использующие метод конечных разностей. Одной из подобных программ является MMANAGAL. Её существенный недостаток состоит в том, что корректно задать параметры земли не всегда представляется возможным из-за высокой степени детализации их описания. Следствием этого при расчёте параметров АФУ является высокая вероятность получения ошибочных значений параметров АФУ, приводящих к неверной интерпретации экспериментальных данных. В предложенной модели этот недостаток полностью устранен.

По построенной модели была составлена программа, вычисляющая входное сопротивление антенны и величину КСВ при различной степени внешнего влияния.

Оценка качества и достоверности математической модели была осуществлена путём сравнения результатов моделирования с результатами, полученными при тех же исходных данных с помощью программы моделирования антенн MMANAGAL, широко распространённой, проверенной на практике и использующей при расчетах альтернативный метод конечных элементов. Кроме этого были проведены контрольные расчёты параметров антенн в свободном пространстве и сравнены с теоретическими значениями. Существенных отличий в обоих случаях не выявлено.

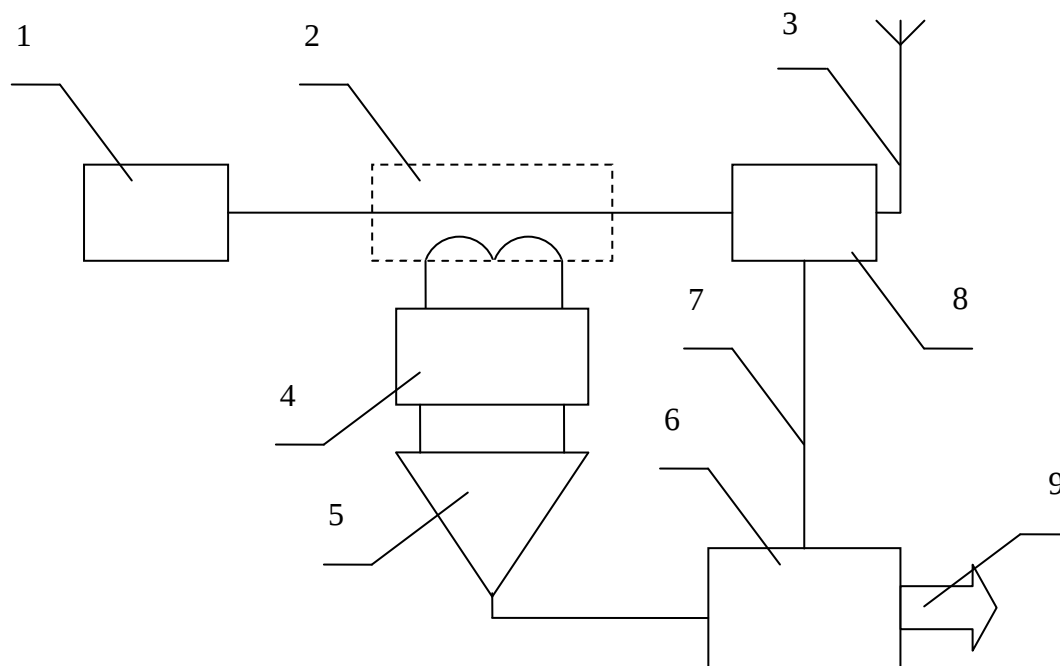
В четвёртой главе приводится описание предлагаемого метода и разработанного модуля контроля качества согласования АШТ с МРА. Проведена метрологическая оценка характеристик предложенного средства контроля. Представлены и проанализированы результаты внедрения средства контроля в технологический процесс эксплуатационных предприятий связи.

Сущность предлагаемого метода контроля качества согласования АШТ с МРА заключается в осуществлении контроля амплитуды выпрямленного напряжения отраженной от антенны волны выходного сигнала РПА. Контроль осуществляется в процессе эксплуатации МРА при его работе в режиме передачи. Проведение процесса контроля происходит непрерывно во времени, не требуя прекращения режима штатной эксплуатации МРА. В случае изменения уровня выходной мощности РПА производится однократная установка порога чувствительности компаратора устройства контроля (для данной мощности). В качестве нагрузки в этом случае вместо штатного АШТ используется измерительная нагрузка с сопротивлением, двукратно превышающим значение номинального для данного РПА. Теоретически, измерительная нагрузка может иметь величину сопротивления и уменьшенную вдвое относительно номинального значения, но предполагается, что для выходного каскада РПА режим работы на такую нагрузку менее предпочтителен. Процесс контроля автоматизирован, поскольку модуль формирует сигнал активации автоматического согласующего устройства без участия оператора.

Устройство контроля качества согласования включается последовательно в фидерный тракт между выходом МРА и АШТ (либо измерительным эквивалентом), посредством разъёмов PL-259. Передающая часть МРА может работать с любой выходной мощностью в пределах паспортных данных (1-100 Вт), в любой части КВ диапазона (1,8-30 МГц), согласно требований лицензии контролирующего органа. Предварительная настройка средства контроля не требует дополнительных измерительных приборов. Необходимо лишь наличие дополнительной принадлежности – измерительного эквивалента нагрузки, с активным сопротивлением 100 Ом и кратковременно рассеиваемой мощностью 100 Вт. Настройка устройства заключается в следующем: штатная антенна временно отключается от фидера и вместо неё подключается настроенный эквивалент с повышенным, относительно штатного значения (50 Ом), сопротивлением 100 Ом. Выходной каскад МРА выставляется на необходимый уровень излучаемой мощности, МРА включается в режим передачи и регулировочным резистором чувствительность компаратора средства контроля выставляется на пороговый уровень, до его сработки. Этой регулировкой оператор добивается сработки компаратора устройства контроля при достижении КСВ в фидере значения 2 именно при заданной выходной мощности РПА. На этом процедура на-

стройки завершается. Измерительный эквивалент отсоединяется от фидера, к фидеру подсоединяется штатная антенна – устройство готово к работе.

Предлагаемый метод реализуется на практике с помощью устройства контроля, выполненного в виде отдельного модуля. Структурная схема предлагаемого устройства приведена на рисунке 7.



Условные обозначения:

1 – МРА, 2 – широкополосный токовый трансформатор, 3 – АШТ,
4 – высокочастотный выпрямитель, 5 – компаратор напряжения, 6 – формирователь
сигналов, 7 – сигнал активации, 8 – автоматическое согласующее устройство, 9 –
сигнал индикации аварийного рассогласования.

Рис. 7 - Структурная схема модуля контроля
качества согласования АШТ с МРА

При выборе варианта конструктивной реализации модуля были учтены критерии стойкости изделия к различного рода деструктивным воздействиям, в первую очередь механическим и температурным, поскольку ставилась задача изготовления многоцелевого устройства контроля параметров согласования АФУ, как для стационарного, так и для мобильного применения. Кроме того, предусмотрен вариант многофункциональности использования предложенного устройства: как для контроля в качестве модуля формирования сигнала активации автоматической подстройки параметров АФУ при их недопустимом отклонении от заданных значений (в комплекте с промышленным автоматическим согласующим устройством), так и в качестве измерительного преобразователя для лабораторных исследований контролируемых величин. Изготовленный модуль пригоден также для доработки ранее выпущенных

РПА, оконечный каскад усилителя мощности которых не оборудован средствами контроля состояния параметров АФУ.

Внешний вид устройства контроля приведён на рисунке 8.

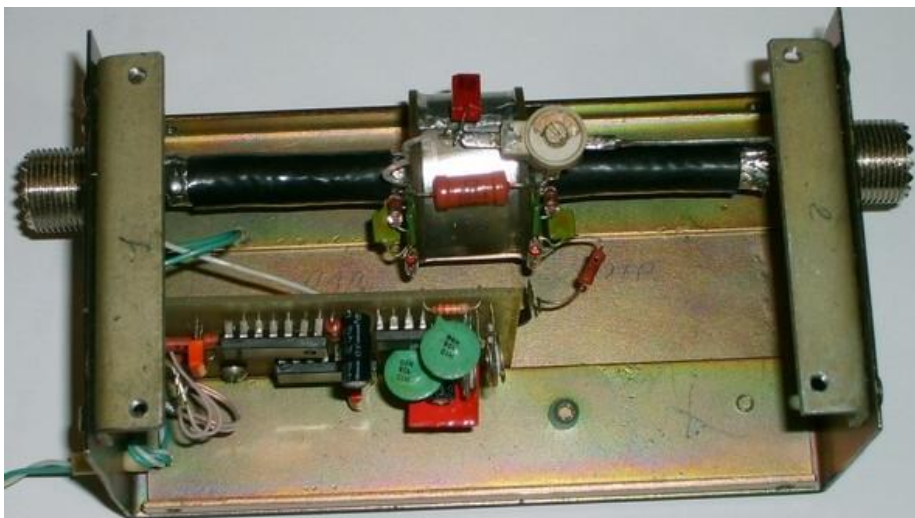


Рис. 8 – Внешний вид модуля контроля качества согласования АШТ с МРА

Для определения точности предложенного средства контроля, а также состоятельности и технической применимости реализуемого с его помощью метода контроля была проведена оценка метрологических параметров разработанного устройства.

Действующее значение выпрямленного напряжения вторичной обмотки датчика отражённой волны находится в непосредственной зависимости от формы модулирующего сигнала. В целях повышения точности эксперимента и объективности его результатов, было решено исследовать точность срабатывания компаратора при подаче на его вход постоянного стабилизированного напряжения от источника питания через регулируемый делитель. Это решение позволило абстрагироваться от ряда погрешностей, носящих систематический и методический характер, а значит получить объективную картину измерений. Так как заранее предполагалась достаточно высокая точность срабатывания компаратора, а напряжение вторичной обмотки датчика составляет доли-единицы вольт, то контроль напряжения срабатывания и оценка погрешностей проводили на токоограничивающем резисторе делителя, задающего входной сигнал. Поскольку напряжение на нём в несколько раз больше, во столько же раз повышается точность измерений. Измерения напряжения срабатывания проводились при нормальных условиях ($t=20^{\circ}\text{C}$, напряжение питающей сети $U=220\text{В}\pm 5\%$) цифровым вольтметром М-838, показания которого были проконтролированы по поверенному вольтметру В7-26. Расхождений в показаниях выявлено не было.

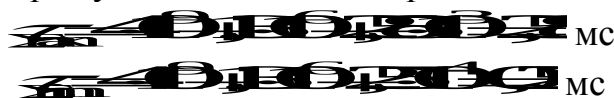
Было проведено пять серий по 20 измерений величины напряжения срабатывания компаратора. Результаты измерения найдены методами статистической обработки данных наблюдений. Величина среднеквадратического отклонения σ_x среднего арифметического значения измеряемой величины является критерием точности

аттестуемого метода контроля качества. Поскольку её значение примерно на порядок меньше систематической погрешности применяемого измерительного прибора, использованного при проведении измерений, можно сделать положительный вывод о точности предлагаемого метода.

Проведением оценки температурной стабильности изготовленного устройства под влиянием внешних климатических факторов, а также нагрева элементов устройства в процессе функционирования, выявлено, что в рабочем диапазоне температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ максимальная нестабильность составит около 3 %, что не оказывает существенного влияния на процесс контроля.

Поскольку резисторы, входящие в состав делителя опорного напряжения компаратора, однотипны и подвергаются одинаковому и одновременному воздействию внешней температуры, то соотношение их величин сопротивления сохраняет свою пропорцию. Кроме этого, отклонения номиналов резисторов, возникающие при производстве и эксплуатации средства контроля, легко компенсируются эксплуатационной настройкой порога срабатывания устройства. Таким образом, имеющаяся температурная стабильность устройства вполне достаточна для решения поставленной задачи контроля.

Оценка быстродействия модуля контроля качества согласования АФУ с РПА показала суммарную задержку τ_{Σ} сигнала на выпрямителе и компараторе в пределах



Время гарантированной работы мощных биполярных транзисторов, предназначенных для использования в выходных каскадах РПА в линейном режиме (классы А и АВ), а также классе С составляет порядка 1 с при КСВ=30. Полученное быстродействие средства контроля с запасом соответствует этим требованиям.

Скорость срабатывания устройства контроля в достаточной степени превосходит скорость возникновения любых рассогласующих факторов, в том числе и носящих периодический (колебательный) характер.

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Радиосвязь АВТО» и Центре сервисного обслуживания специальной техники и средств связи при ГУВД по Алтайскому краю.

В заключении перечислены основные результаты работы.

В приложение вынесены копии актов внедрения разработанных устройств и каталог используемых приборов с кратким техническим описанием.

Основные выводы и результаты работы:

1. Обоснована необходимость создания средства контроля качества согласования АШТ с МРА с точки зрения наличия внеполосных излучений МРА, расположенных вблизи частоты основного сигнала. Рассмотрены пути подавления их и устранения негативного влияния отраженной от антенны энергии на активные полупроводниковые элементы оконечного каскада МРА, путём обеспечения контроля этих параметров в процессе штатной эксплуатации МРА и оптимизации параметров согласования АШТ.

2. Разработана и изготовлена экспериментальная установка, которая позволяет проводить исследования параметров согласования АШТ с МРА и первичного преобразователя.

3. Предложен метод контроля качества согласования АШТ с МРА, с учётом предполагаемых областей использования, обеспечивающий непрерывный контроль в ходе штатной эксплуатации МРА.

4. Разработан модуль контроля порогового значения величины рассогласования АШТ с МРА, предназначенный для постоянного использования в составе комплекта МРА в различных радиочастотных диапазонах, пригодный также для стационарного применения, осуществляющий непрерывный контроль и формирование управляющего сигнала для внешнего согласующего устройства.

5. Создан и испытан действующий образец разработанного модуля, проведено исследование его метрологических характеристик. При условии прецизионного подбора комплектующих входных делителей с точностью $\pm 1\%$, точность контроля составляет не более $0,3\%$.

6. Рассмотрен и обоснован экологический аспект использования разработанного устройства, применение которого существенно снизит электромагнитное загрязнение окружающей среды.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Тимофеев В.В. Проблемы снижения уровня внеполосных излучений радиопередающей аппаратуры, расположенных в непосредственной близости от частоты основного сигнала. //Ползуновский альманах, 2007.- № 3.- с. 99-101.

2. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А. Контроль параметров излучения радиопередающей аппаратуры, как основное направление повышения эффективности использования частотного ресурса. // Методы и средства измерения физических величин: Сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции. – Нижний Новгород: НИМЦ Диалог, 2007.- с. 31-32.

3. Тимофеев В.В. Модуляция радиочастотного сигнала с помощью ПЭВМ. // Микроэлектроника и информатика – 2008. 15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИ-ЭТ, 2008. – с. 245.

4. Тимофеев В.В. Влияние типичных внешних воздействий на качество согласования антенно-фидерного устройства с радиопередающим аппаратом. // Научная сессия ТУСУР-2008: Материалы докладов Всероссийской Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2008. – с. 128-130.

5. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А. Экспериментальная установка для исследования качества согласования антенно-фидерного устройства с радиопередающим аппаратом. Измерение, контроль, информатизация: Материалы девятой международной научно-технической конференции./ Под. Ред. Л.И. Сучковой – Барнаул: АлтГТУ, 2008. – с. 227-229.

6. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А. Влияние внешних факторов на качество согласования антенно-фидерного устройства с радиопередающим аппаратом.

Измерение, контроль, информатизация: Материалы девятой международной научно-технической конференции./ Под. Ред. Л.И. Сучковой – Барнаул: АлтГТУ, 2008. – с. 229-233.

7. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А. Исследование характеристик чувствительности первичного преобразователя на основе высокочастотного широкополосного трансформатора //Ползуновский альманах, 2008.- № 2.- с. 96- 97.

8. Тимофеев В.В. Метод контроля качества согласования антенно-фидерного устройства с радиопередающим аппаратом. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Материалы пятнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – М.: МЭИ (ТУ), 2009. – с. 123-124.

9. Патент на изобретение № 2344553 «Модуль контроля качества согласования антенно-фидерного устройства с радиопередающим аппаратом» Авторы: Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А., приоритет от 26 ноября 2007 г., опубликовано 20.01.2009 г. Бюллетень № 2.

10. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Щербинин В.В. Разработка метода и средства контроля качества согласования РПА с АФУ// Управление, контроль, диагностика, 2009. - № 3 – с. 41-45 (Издание, входящее в перечень ВАК).

11. Тимофеев В.В., Пронин С.П., Зрюмов Е.А., Щербинин В.В. Метод контроля качества согласования антенно-фидерного устройства с радиопередающим аппаратом.// Естественные и технические науки, 2009. - № 3 (41) – с. 312-314 (Издание, входящее в перечень ВАК).