

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.03 НА
БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБ-
РАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИО-
НАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ
ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕР-
СИТЕТ)» (МАИ) МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОС-
СИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (МИНОБРНАУКИ РФ) ПО ДИСЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26.05.2015 № 6

О присуждении Малахову Роману Юрьевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Модуль бортовой цифровой антенной решетки» по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии» принята к защите 10.02.2015, протокол №2, диссертационным советом Д 212.125.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» («МАИ») Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ), почтовый адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, дом 4, созданным приказом Минобрнауки России № 714 /нк от 02.11.2012.

Соискатель Малахов Роман Юрьевич 1989 года рождения. В 2011 году с отличием окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (государственный технический университет)» по специальности «Радиофизика и электроника».

В 2014 году соискатель Малахов Роман Юрьевич окончил очную аспирантуру Московского авиационного института (национального исследовательского университета). С 2013 года работает в должности заместителя начальника лаборатории в Научном центре специальных радиоэлектронных систем и менеджмента МАИ (НЦ СРМ МАИ).

Диссертация выполнена на кафедре 406 «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» факультета «Радиоэлектроника летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» («МАИ»).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент, Добычина Елена Михайловна, доцент кафедры 406 «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Официальные оппоненты:

1. Кулешов Валентин Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Формирование и обработка радиосигналов» национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», 111250, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14.
2. Романюк Виталий Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Микроэлектронные радиотехнические устройства и системы» национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега» (г. Москва) в своем положительном отзыве, подписанном Курочкиным Александром Петровичем, доктором технических наук, профессором, начальником отдела АО «Концерн радиостроения «Вега»; Королёвым Алексеем Владимировичем, кандидатом технических наук, заместителем началь-

ника отдела по НИОКР АО «Концерн радиостроения «Вега»; Кушнеревым Николаем Александровичем, кандидатом технических наук, начальником лаборатории АО «Концерн радиостроения «Вега», указала, что область исследований соискателя актуальна, диссертация обладает научной новизной, а полученные результаты достоверны. В отзыве **подчеркнута практическая ценность** диссертации, заключающаяся в рекомендации использования результатов диссертационной работы при проведении разработок усилительных трактов приемопередающих модулей и передающих устройств на предприятиях АО «Концерн радиостроения «Вега». В частности отмечен факт внедрения полученных результатов диссертационной работы в ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», в НЦ СРМ МАИ и в учебный процесс МАИ. В деле приложены соответствующие акты о внедрении.

По содержанию диссертации Малахова Романа Юрьевича **ведущей организацией были отмечены следующие замечания:**

1. Во введении указано, что существенное изменение входных сопротивлений излучателей при сканировании и смене режима работы АФАР обуславливает изменение характеристик активных элементов модуля и может нарушить их устойчивость, однако анализ такого влияния при разработке усилителя мощности передающего тракта выполнен не был.
2. При анализе тепловых параметров усилителя мощности указаны импульсный и непрерывный режимы работы, однако из материалов работы не ясно, для какого режима работы задано тепловое сопротивление примененных транзисторов, и возможно ли применение разработанного усилителя в непрерывном режиме работы.
3. При разработке формирователя сигналов передающего тракта не проведена представляющая интерес оценка влияния ошибок выбранного ССЧ с использованием разработанной в диссертации аналитической модели ФС.
4. При анализе ранее разработанных ППМ не указан критерий низкого динамического диапазона и малого КПД.

При этом отмечено, что приведенные замечания не затрагивают основных результатов, полученных в диссертации. Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор Малахов Роман Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании секции №5 научно-технического совета АО «Концерн радиостроения «Вега» (протокол от 17 апреля 2015 года).

Соискатель имеет 18 опубликованных работ по теме диссертации (в том числе 6 – без соавторов). Общий объем публикаций 88 печатных страниц. В числе данных работ 6 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК и 1 учебное пособие. В данных публикациях описывается предлагаемая структура модуля бортовой цифровой антенной решетки, фазовые ошибки передающего тракта, а также методы повышения энергетической эффективности выходных каскадов усилительных трактов таких модулей за счет создания более точной нелинейной модели транзисторов, входящих в их состав.

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Малахов, Р.Ю. Усилители мощности цифровых антенных решеток бортовых радиоэлектронных систем / Р.Ю. Малахов // Вестник Московского авиационного института. – 2014. – № 2, том 21. – с. 135 – 142.
2. Малахов, Р.Ю. Приёмопередающий модуль цифровой антенной решетки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Антенны. – 2014. – № 2 (201). – с. 53 – 57.
3. Малахов, Р.Ю. Цифровые антенные решетки для бортовых радиолокационных систем / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012, №186. – с. 176 – 183.

4. Малахов, Р.Ю. Мощные транзисторы для передатчиков бортовых радиолокационных систем / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012, №186. – с. 184 – 190.
5. Малахов, Р.Ю. Экстракция параметров мощных СВЧ транзисторов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014, №213, с. 136 – 144.
6. Малахов, Р.Ю. Цифровой приемо-передающий модуль активной фазированной антенной решетки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА, 2014, №213, с. 117 – 123.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

От Кулешова Валентина Николаевича (официальный оппонент). Отзыв заверен начальником управления кадров НИУ МЭИ Е.Ю. Барановой.

Замечания:

1. Неясны источники информации о спектральной плотности мощности фазовых шумов генератора несущей (рис. 2.12), методика получения распределения вероятности фазовой ошибки (рис. 2.13) и место этой составляющей фазовой ошибки в оценке её общей величины.
2. Эквивалентная электрическая схема на рис. 3.9 по сравнению с другими более простыми моделями (например, с моделью Ангелова) не может быть непосредственно использована при моделировании в программных средах. Это затрудняет использование этой схемы потенциальными пользователями. Неясно также, каково физическое происхождение внутренних резонансных контуров предложенной модели.
3. Не доказана обоснованность применения полиномиальных функций при описании номиналов элементов эквивалентной схемы транзистора, а также критерия смешанной корреляции для оценки сходимости полученных зависимостей к искомому.

При этом подчеркнуто, что отмеченные недостатки не затрагивают основного содержания диссертации и не снижают ценности основных результатов.

От Романюка Виталия Александровича (официальный оппонент). Отзыв заверен начальником отдела кадров НИУ МИЭТ Заболотным С.В.

Замечания:

1. При определении параметров модели транзистора обычно используют измеренные: S-параметры в режиме малого сигнала, статические вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики (ВФХ) внутренних емкостей транзистора. В диссертационной работе ВФХ не измерялись, поэтому, неясно, как была учтена нелинейность емкостей затвор-исток, сток-исток и учитывалась ли проходная емкость транзистора затвор-исток.
2. В диссертации отсутствует анализ взаимного влияния большого числа синтезаторов частот, входящих в состав каждого модуля, на характеристики ЦАР. Исторически техника АФАР начиналась со схем, аналогичных предлагаемой автором диссертации, а именно, с включением в состав каждого модуля синхронизируемых СВЧ автогенераторов. В дальнейшем от первоначальной идеи отказались. Возникает вопрос, не появятся ли проблемы при реализации предложенной модели ЦАР.
3. Не проведено сравнение разработанной модели транзистора с существующими нелинейными моделями полевых СВЧ транзисторов, например, Angelov, Tom, Curtise, Fujii, Yhland.
4. Обзор моделей мощных полевых транзисторов и методов определения их, приведенный в разделе 3.2, не является полным, в частности, осталось неясным, каким образом находятся параметры моделей.
5. На стр. 76 упомянуто о достижении КПД усилителя на нитридгаллиевом транзисторе в режиме АВ, равном 80%, что превышает теоретический уровень для данного режима.
6. Утверждение на стр. 86 о том, что основой модели Angelov и Curtise является эквивалентная схема транзистора для малого сигнала не совсем корректно, поскольку схема остается такой же и для большого сигнала, изменяется лишь описание её элементов.

Подчеркнуто, что, несмотря на отмеченные недостатки, диссертация представляет собой законченный научно-исследовательский труд, в котором получены новые научные результаты.

Из ОАО «НПК «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи». Отзыв положительный. Отзыв подписан начальником лаборатории, кандидатом технических наук Васильевым Александром Павловичем. Отзыв заверен ученым секретарем ОАО «НПК «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», кандидатом технических наук Корощуповым Олегом Николаевичем.

Замечание:

Отсутствие анализа амплитудно-фазовых ошибок ППМ с предложенной структурой.

Из федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Отзыв положительный. Отзыв подписан доцентом кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства», кандидатом технических наук Крехтуновым Владимиром Михайловичем. Отзыв заверен заместителем начальника управления кадров МГТУ им. Н.Э. Баумана Матвеевым А.Г.

Замечания:

1. Нет информации о “разработанных технологиях передающего и приемного тракта модулей ЦАР с “высокими массогабаритными и стоимостными характеристиками”.
2. Из автореферата не ясно, о каких конкретно мощных GaAs и GaN транзисторов, результаты исследования которых описаны в 4 главе, идет речь.

Из «Московского государственного технического университета гражданской авиации». Отзыв положительный. Отзыв подписан заведующим кафедрой “Управление воздушным движением”, доктором технических наук Нечаевым Евгением Евгеньевичем. Отзыв заверен проректором МГТУ ГА по НР и И Воробьевым В.В.

Замечания:

1. Не рассмотрено влияние системы синхронизации модулей на амплитудно-фазовые ошибки диаграммы направленности ЦАР.
2. Недостаточно обоснован выбор в качестве СВЧ возбуждителя синтезатора сетки частот на основе цифрового кольца ФАПЧ.

Из ОАО «Радиотехнический институт им. Академика А.Л. Минца». Отзыв положительный. Отзыв заверен генеральным конструктором, доктором технических наук Слокой В.К.

Замечания:

1. В Главе 1 автор указывает на доступные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), обеспечивающие преобразование на несущей частоте вплоть до 20 ГГц. Однако в Главе 2 приведены графики частотной зависимости потребляемых мощностей предложенной схемы модуля ЦАР с вышеуказанными АЦП в диапазоне до 40 ГГц. Также в рамках автореферата не упоминается доступность соответствующих цифро-аналоговых преобразователей.
2. Аббревиатура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) используется на 7 странице автореферата, в то время как её расшифровка на странице 12; в тексте отсутствуют расшифровки ряда аббревиатур, таких как диаграмма направленности (ДН), сверхвысокие частоты (СВЧ), что нарушает стилевые нормы публикаций.

Из ФГУП «ВНИИФТРИ». Отзыв положительный. Отзыв подписан начальником НИО-1, кандидатом технических наук Каминским Олегом Викторовичем и начальником лаборатории 160, кандидатом технических наук Шкуркиным Максимом Сергеевичем. Отзыв заверен ученым секретарем ФГУП «ВНИИФТРИ» Поярковым С.Ю.

Замечания:

1. Некоторые термины, принятые и используемые автором при написании автореферата диссертации, не соответствуют существующим нормативным документам в области метрологии, в частности РМГ 29-2013. Так, вместо

характеристик “точность определения”, корректно применять “погрешность измерений” и т.д.

2. В автореферате диссертации, помимо одной модели Ангелова, не представлены сведения о других существующих нелинейных моделях мощных СВЧ транзисторов.

3. При расчете энергетических характеристик АФАР не учтены омические потери СВЧ трактов, соединителей, а также энергопотребление средствами обработки информации.

Из ОАО «Научно-исследовательский институт точных приборов». Отзыв положительный. Отзыв подписан начальником отдела, кандидатом технических наук Коваленко А.И. Отзыв заверен главным конструктором направления ОАО «НИИ ТП», кандидатом технических наук Риманом В.В.

Замечания:

1. Нет анализа фазочастотной характеристики усилителя мощности, работающего в выбранном диссертантом режиме с повышенным КПД, хотя эта характеристика очень важна для работы радиосистем с широкополосными сигналами.

2. Не освещена проблема взаимной синхронизации большого количества синтезаторов частоты на ФАПЧ, установленных в каждом ППМ. Как правило, синтезаторы частоты имеют в своем составе делители, это требует специальных средств взаимной синхронизации при каждом включении питания.

3. Предложенная схема построения модуля ЦАР с оцифровкой принятого сигнала на несущей частоте делает практически нереализуемой задачу передачи оцифрованных сигналов из каждого модуля решетки в реальном времени в сосредоточенный цифровой сигнальный процессор. Так, для полосы сигнала 500 МГц и 8 разрядах АЦП потребуется линия передачи цифровых данных со скоростью около 20 Гбит/с.

4. Вывод о снижении энергопотребления бортовой РЭС, реализованной на базе ЦАР, на 3-5% за счет применения предложенной схемотехнической

реализации модуля (стр. 7, п.1; стр. 21-22, п.3) представляется недостаточно обоснованным по следующим причинам:

- при расчете мощности потребления ППМ не учтена мощность потребления приёмо-передатчиков скоростных каналов передачи цифровых данных в сигнальный процессор ЦАР;
- не приведено сравнение ЦАР, использующей предлагаемые ППМ, с гибридной схемой построения АФАР, в которой используется ППМ традиционной архитектуры с фазовращателями; цифровые формирователи сигнала и АЦП обслуживают группу таких ППМ, а СВЧ-распределительная схема минимизирована по длине.

Из АО «ВНИИРА». Отзыв положительный. Отзыв подписан начальником научно-технического отдела антенных измерений, доктором технических наук Калашниковым В.С. Отзыв заверен ученым секретарем АО «ВНИИРА», доктором технических наук Шатраковым Ю.Г.

Замечания:

1. Из автореферата непонятно, в каком программном обеспечении осуществлялось моделирование транзисторов, а также энергетических характеристик АФАР.
2. Отсутствует описание условий измерения характеристик усилителей мощности при сравнении традиционной и предложенной модели транзистора.
3. В нелинейной модели не учтено влияние погрешностей при изготовлении тестовой платы, а также разброса параметров транзисторов от партии к партии. Не отражено влияние температуры окружающей среды на входное и выходное сопротивление транзистора

Из Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). Отзыв положительный. Отзыв подписан заведующим кафедрой «Физика и техника оптической связи» (ФТОС), доктором физико-математических наук Раевским А.С. и профессором кафедры ФТОС НГТУ, доктором технических наук Раевским С.Б. Отзыв заверен ученым сек-

ретарем ученого совета НГТУ, кандидатом технических наук Мерзляковым И.Н.

Замечание:

Автореферат диссертации не содержит обобщающих рекомендаций по построению цифровых антенных модулей рассмотренного типа. Поэтому диссертация выглядит как решение частной практической задачи, пусть очень важной и практически полезной.

Из ФНПЦ ОАО «НПП «Полет». Отзыв положительный. Отзыв подписан главным научным сотрудником отдела 231, доктором технических наук, доцентом Кейстовичем А.В. Отзыв заверен директором по НИОКР ФНПЦ ОАО «НПП «Полет» Войткевичем К.Л.

Замечания:

1. На листе 15 автореферата “Показано, что предложенная структура модуля обеспечивает снижение энергопотребления бортовой ЦАР на 0,1-0,2 дБ (3-5%) в диапазоне частот 1-18 ГГц...”, хотя на листе 14 указано, что “...предложенная структура модуля обеспечивает снижения энергопотребления ЦАР, начиная с 10,5 ГГц...”.
2. На листе 15 автореферата приведено, что “Базовым элементом электрической схемы ТТП является параллельный резонансный контур с потерями”. Однако, из рисунка 5 (лист 16) видно, что базовым элементом является набор последовательных и параллельных резонансных контуров с потерями.
3. Хотя в подразделе “Заключение” (лист 21) и сказано, что “Предложенная структура модуля, позволяющая уменьшить габариты и массу многоэлементной бортовой ЦАР...”, никаких конкретных подтверждающих данных в автореферате не приведено.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у оппонентов публикаций по профилю диссертации за последние 5 лет, а у ведущей организации передового опыта разработок в области приёмопередающих модулей и цифровых антенных решеток.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработана** методика определения элементов эквивалентной электрической схемы мощного СВЧ транзистора, позволяющая увеличить точность определения его параметров по сравнению с существующими методиками и повысить тем самым КПД и уровень выходной мощности СВЧ усилителей на 3-5% и 8-10% соответственно.
- **предложена** нелинейная модель транзистора, в которой учтена зависимость режима от совокупности параметров, влияющих на его основные энергетические характеристики;
- **доказана** достоверность и перспективность использования предложенной методики посредством разработки ряда моделей мощных СВЧ транзисторов на основе экспериментальных данных;

Теоретическая значимость исследования обоснована так как:

- **доказано**, что использование нелинейной модели транзистора на тестовой плате позволяет повысить точность представления характеристик мощных СВЧ транзисторов в широкой полосе частот.
- **применительно к проблематике диссертации результативно использованы** метод гармонического баланса для описания нелинейных электрических цепей, матричные методы решения систем линейных алгебраических уравнений, теория матричного описания антенн и устройств СВЧ;
- **предложена** методика измерения параметров мощных СВЧ транзисторов на тестовой плате;
- **раскрыта** зависимость номиналов элементов внутренних резонансных контуров эквивалентной электрической схемы транзистора на тестовой плате от напряжений питания и смещения;
- **предложена модернизация** существующих нелинейных моделей мощных СВЧ транзисторов с целью повышения точности определения параметров транзисторов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- **разработаны и внедрены** нелинейные модели ряда отечественных и зарубежных мощных СВЧ транзисторов на предприятия ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» и в НИЦ СРМ МАИ;
- **намечены** перспективы использования синтезаторов сетки частот в составе каждого модуля цифровых антенных решеток в перспективных многофункциональных радиоэлектронных комплексах;
- **предложена** методика определения параметров мощных СВЧ транзисторов на основании измерений S-параметров транзистора на тестовой плате в режиме малого сигнала, а также статических вольт-амперных характеристик;
- **даны** рекомендации по выбору параметров цифровых и аналоговых элементов в составе предлагаемого модуля бортовой цифровой антенной решетки;

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- **для экспериментальных работ** результаты были получены на сертифицированном калиброванном оборудовании ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» и МАИ;
- **теория** подтверждается результатами сравнения с известными решениями задач подобного типа;
- **было использовано** сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике;
- **установлено** качественное совпадение результатов, полученных автором, с результатами независимых источников;
- **использовалось** современное апробированное программное обеспечение для моделирования СВЧ усилителей и мощных СВЧ транзисторов;

Личный вклад соискателя состоит в разработке нелинейной модели мощных СВЧ транзисторов, позволяющей повысить точность определения параметров СВЧ усилителей на их основе, увеличить их КПД и уровень вы-

ходной мощности. Оригинальная методика определения параметров мощных СВЧ транзисторов была разработана лично соискателем и внедрена на предприятии ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» и НЦ СРМ МАИ.

Соискатель лично подготавливал все результаты научных исследований к опубликованию и выступлениям на конференциях.

Диссертационный совет отмечает, что диссертация Малахова Романа Юрьевича на тему «Модуль бортовой цифровой антенной решетки» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей научную новизну и практическую ценность для цифровых антенных решеток перспективных многофункциональных радиоэлектронных систем. Работа соответствует паспорту специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии» и отвечает критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

На заседании 26.05.2015 года диссертационный совет принял решение присудить Малахову Р.Ю. ученую степень кандидата технических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности 05.12.07 - «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии», участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за **20**, против **нет**, недействительных бюллетеней **нет**.

Председатель
диссертационного совета
Д 212.125.03, д.т.н.

Д.И. Воскресенский

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, д.т.н.

М.И. Сычев

