

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Шайдурова Кирилла Дмитриевича  
«Динамика формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных  
радиолокаторов с амплитудной и частотной модуляцией»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.12.14 — Радиолокация и радионавигация.

**Актуальность темы диссертационной работы.** Тема диссертации представляет интерес для специалистов, занимающихся решением широкого спектра прикладных задач, связанных с измерениями различных характеристик и параметров объектов и процессов радиолокационными методами в различных отраслях техники. При их решении в промышленности, сельском хозяйстве, транспорте, авиации, научно-прикладных исследованиях почти всегда требуется наличие малогабаритных, автономных и дешёвых устройств и датчиков (УИД), действующих на малых дальностях и являющихся системами ближней радиолокации (СБРЛ). Таким требованиям в значительной степени соответствуют устройства и датчики на основе автодинных генераторов (АГ), теория которых разрабатывается с середины XX века. Рассматриваемая диссертация посвящена дальнейшему углубленному исследованию этого класса УИД для достижения ими более высоких эксплуатационных характеристик и открытия для них новых областей применения.

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью проведения исследований характера формирования сигнальных и шумовых зависимостей характеристик автодинного радиолокатора (АР) в присутствии амплитудной и частотной модуляции. Строгое математическое описание процесса взаимодействия автоколебаний генератора с полезным радиолокационным откликом, отражённым от цели в присутствии модуляции, необходимо как для проектирования соответствующих устройств и датчиков с целенаправленным применением одного из видов модуляции, так и для подавления (или снижения) негативного (паразитного) влияния другого вида модуляции на работу УИД.

Существующий в настоящее время уровень развития микроэлектроники даёт разработчикам радиоэлектронной аппаратуры широкие возможности по созданию малогабаритных и эффективных по многим показателям изделий, востребованных в различных отраслях народного хозяйства. Как отмечено в диссертации, развитие теории АР в сочетании с использованием современной базы электронных компонентов способно решить большой ряд задач по измерению характеристик и параметров различных явлений, что, несомненно, является подтверждением актуальности проведённых исследований.

**Общая характеристика диссертации.** Диссертация К.Д. Шайдурова структурно содержит Введение, пять глав, Заключение, список литературы и одно Приложение. Общий объём текста диссертации 163 страницы, она включает в себя 55 рисунков. Библиографический список литературы содержит 146 источников.

**Во введении** показана актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, обоснованы научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены основные результаты работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор основных публикаций по теме диссертации. Выполнен обзор имеющихся на данный момент публикаций и результатов исследований особенностей формирования сигналов в АР с одновременной амплитудной и частотной модуляцией. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** на основе функциональной и эквивалентной схем АГ, работающего в

составе радиолокационного устройства, входящего в замкнутую систему с обратной связью «генератор – объект локации», составлены исходные укороченные дифференциальные уравнения для изменений амплитуды и частоты автоколебаний. Получена система уравнений для анализа сигнальных характеристик АГ, находящегося под собственным отражённым излучением, для чего использованы методы медленно меняющихся амплитуд, усреднения и квазилинейный метод. Задавшись наличием амплитудной и частотной модуляции и подставляя аналитические описания соответствующие форм колебаний в систему уравнений, диссертант получил новую систему уравнений, описывающую относительные изменения амплитуды и частоты автоколебаний автодина. Полученные выражения обобщены для учёта влияния внутреннего шума активного элемента АГ.

**В третьей главе** представлены результаты численного моделирования полученной во второй главе математической модели АГ при вариациях характеристик автоколебаний. Качественный анализ результатов строится на изучении периодических характеристик амплитудной селекции (ХАС) сигнала, иллюстрирующих отличительные особенности АР в сравнении с гомодинными радиолокаторами. Рассмотрение предельных переходов, приводящих к известным из теории радиолокации результатам, подтверждает адекватность созданной модели. В данной главе также проанализировано поведение величины СКО шума в АГ, характер которого имеет существенное отличие от случая гомодинного генератора.

**В четвёртой главе** представлены результаты экспериментальных исследований автодинных модулей «Тигель-08М» на лабораторном стенде и в полевых условиях. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов позволило подтвердить адекватность созданной математической модели и полученных в ходе численного моделирования данных. На графиках, приведенных в данной главе, показаны степень взаимного влияния одного вида модуляции на работу СБРЛ, использующей другой вид модуляции, и характер нестационарного поведения величины СКО шума в АГ с коэффициентом обратной связи, близким к единице.

**Пятая глава** посвящена вопросам применения результатов диссертационных исследований. Отталкиваясь от полученной системы уравнений, диссертант сформулировал принцип оценки динамических характеристик АГ путём измерения постоянной времени автодинного отклика. Показано, что данный метод достаточно прост в применении и может быть востребован в лабораторных условиях в ходе проектирования автодинных СБРЛ. Пятая глава содержит также краткое описание патентов РФ на изобретения, касающихся повышения точности измерений параметров движения локомотивов.

**В Заключении** подводятся итоги проведённой работы, сформулированы основные рекомендации для применения результатов исследования и описаны перспективы дальнейшего развития данной темы.

**Оформление диссертации** соответствует требованиям, установленным Министерством образования и науки РФ. Автореферат диссертации полностью раскрывает её содержание и структуру. Текст диссертации и автореферата написан стилистически весьма совершенен. Изложение материалов диссертации выполнено последовательно и логично. В своей работе диссертант грамотно пользуется математическим аппаратом, а также общепринятой математической и радиотехнической терминологией и понятиями. Применение новых терминов обосновано и оправдано.

**По теме диссертации** диссертантом опубликовано 25 научных работ, в том числе, 14 статей и докладов в рецензируемых международными базами данных научных изданиях из списка, определённого ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ для опубликования результатов исследований соискателями на степень кандидата технических наук. Результаты исследований включены в 4 отчёта о НИР и являются частью 2-х патентов РФ на изобретения.

**Содержание диссертации** соответствует содержанию и качеству опубликованных

работ. Диссертация полностью удовлетворяет в части публикаций Требованиям п. 11 и п. 13, а в части ссылок на авторов (или источники) заимствования материалов или отдельных результатов, а также на соавторов совместных публикаций и разработок, выполненных коллективно, – Требованиям п. 14 Положения о присуждении учёных степеней УрФУ.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Считаю, что соискатель грамотно выбрал методы исследования, вытекающие из цели и задач диссертации. Предложенные соискателем модели и результаты расчётов параметров и характеристик автодинов с амплитудной и частотной модуляцией позволили ему убедительно обосновать и сформулировать следующие основные научные **положения**, вынесенные на защиту.

1. При взаимодействии в автодинной СБРЛ с гармонической АМ зондирующего и отраженного излучений на гармониках частоты модуляции, включая нулевую, формируется периодическая характеристика амплитудной селекции (ХАС) цели в виде зависимости автодинного сигнала от расстояния до объекта локации. Данное положение обосновано и доказано на стр. 59–64 (далее ссылки на страницы диссертации указаны в скобках).

1.1. Если в автодине с АМ величина сопутствующей девиации частоты генерации пренебрежимо мала, то максимум автодинного отклика соответствует середине ХАС. При этом эффективность переноса полезного сигнала на гармоники частоты модуляции уменьшается с увеличением номера гармоники. (стр. 60–62)

1.2. В случае увеличения сопутствующей девиации частоты генерации автодина (АД) с АМ вначале область главного максимума ХАС смещается в сторону больших значений нормированного расстояния, затем – приобретает многогорбый характер, наблюдаемый в СБРЛ с ЧМ. Также при этом улучшается эффективность переноса сигнала на высшие гармоники частоты модуляции. (стр. 60, 61, 64, 65)

2. При взаимодействии в автоколебательной системе автодинной (АД) СБРЛ с гармонической ЧМ излучаемого и принимаемого колебаний формируется периодическая ХАС цели, наблюдаемая на всех гармониках частоты модуляции, включая нулевую. (стр. 67–70, 72)

2.1. Если величины сопутствующей АМ и внешней обратной связи автодинной системы «генератор – объект локации» пренебрежимо малы, то в АД СБРЛ с ЧМ сигналы формируются на гармониках частоты модуляции, включая окрестность нулевой гармоники, в соответствии с функциями Бесселя, аналогично формированию сигналов в гомодинных СБРЛ с ЧМ. (стр. 74–80)

2.2. Наличие сопутствующей АМ в АД СБРЛ с ЧМ вносит изменения в амплитудные и фазовые соотношения сигналов и вызывает отклонения формируемой ХАС цели от вида функций Бесселя. При этом влияние сопутствующей АМ на формирование ХАС значительно уменьшается с увеличением номера гармоники частоты модуляции. (стр. 71–73)

2.3. Выходные сигналы АД СБРЛ с ЧМ, соответствующие краям периода ХАС, наблюдаются только на нулевой гармонике модуляции, т.е. в области доплеровских частот, вне зависимости от наличия сопутствующей АМ. (стр. 69–73)

3. Амплитудные значения сигналов в средней части ХАС на всех гармониках частоты модуляции, включая нулевую, асимптотически возрастают с приближением коэффициента АМ к единице. Спектр сигнала автодинных СБРЛ при одновременной АМ и ЧМ на гармониках частоты модуляции имеет асимметричный вид. Если величина параметра обратной связи автодинной системы «генератор – объект локации» соизмерима с единицей, то сигналы АД

СБРЛ с АМ и/или ЧМ от равномерно и прямолинейно движущегося точечного отражателя имеют ангармонические искажения. (стр. 87–89, 95, 96)

4. Частота выходного сигнала АД СБРЛ с ЧМ совпадает с частотой сигнала гомодинной СБРЛ с ЧМ в случаях как движущегося, так и неподвижного объекта локации. Если параметр внешней обратной связи «генератор – объект локации» значительно меньше единицы, то форма сигнала практически синусоидальная, а шумовые характеристики стационарны. В ином случае наблюдаются ангармонические искажения сигнала и обогащение его спектра, а также возникает периодическая нестационарность среднеквадратического уровня шума. (стр. 74–80)

5. При асинхронном воздействии на генератор излучения от стороннего источника регистрация изменений амплитуды биений в виде амплитудно-частотной характеристики обеспечивает возможность фиксации частоты среза по уровню 0,707, что позволяет определить постоянную времени автодинного отклика, которая характеризует динамические свойства генератора как автодина. (стр. 107–109)

Основные научные положения разработанной в диссертации теории автодинов с модуляцией основываются на известных достижениях математики и теории нелинейных электрических цепей. На основе теоретических исследований модели АГ с амплитудной и частотной модуляцией, анализа большого числа вычислений различных параметров и характеристик, а также сопоставления с экспериментальными данными, соискателем получены **новые научные результаты:**

1. Впервые разработана математическая модель АР с одновременной амплитудной и частотной модуляцией излучения, описывающая формирование характеристик амплитудной селекции цели в зависимости от расстояния. При этом модель учитывает внешнюю инерционность автодинной системы «генератор – объект локации», обусловленную конечным временем распространения зондирующего излучения до цели и обратно, а также произвольное соотношение этого времени и периода модулирующей функции.

2. Впервые выполнены теоретические и экспериментальные исследования взаимного влияния АМ и ЧМ, а также величины параметра внешней обратной связи, на формирование динамических сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ при произвольном соотношении времени запаздывания отраженного от цели излучения и периодов сигнала и модулирующей функции.

3. Впервые дано обоснование метода биений для определения динамических свойств и чувствительности автодинных генераторов.

4. Выполненные исследования позволили найти новые технические решения СБРЛ с ЧМ, предназначенные для определения параметров движения локомотивов и повышения безопасности эксплуатации железнодорожного транспорта.

На основе защищаемых положений и полученных результатов, соискатель сформулировал перспективы дальнейшего теоретического изучения и развития рассматриваемого направления, состоящие в том, что создание новых типов монолитных и гибридно-интегральных СВЧ автодинных модулей и их использование в системах СБРЛ с модуляцией способно значительно расширить области применения и возможности в реализации различных радиолокационных устройств и датчиков (стр. 135).

Обоснование рекомендаций и выводов диссертантом выполнено убедительно, аргументировано и не вызывает сомнений. Из диссертации видно, что её автор, К.Д. Шайдуров,

умело формулирует и содержательно оформляет выводы, демонстрирует результативность проведенных исследований.

#### **Оценка новизны и достоверности научных положений и результатов диссертации.**

На наш взгляд, защищаемые положения и связанные с ними результаты работы и вытекающие из них рекомендации вполне оригинальны. Результаты исследования характера формирования сигналов в автодинных генераторах (АГ) с модуляцией развивает существующую теорию автодинов, опубликованы в рецензируемых научных журналах и изданиях и являются оригинальными. Достоверность теоретических исследований и результатов вычислений подтверждена экспериментально, некоторые научные положения и результаты дополнительно проверялись путем сравнения с результатами расчётов и экспериментальных исследований, полученных другими авторами. При экспериментальных исследованиях использовались современное оборудование и приборы, а также лицензированное программное обеспечение.

#### **Замечания по работе** состоят в следующем.

1. Не совсем понятен вкладываемый диссертантом смысл в формулировку «характеристика», в частности, «сигнальная характеристика» встречающуюся, в том числе, в названии диссертации, а также в описании хода исследований. Общепринято употребление этого термина при описании функциональной зависимости одного параметра от другого.

2. В ходе разработки математической модели автодинного генератора с модуляцией автор использует ряд известных математических приёмов, включая разложение в ряд Тейлора по малому параметру и отбрасывание высших членов ряда. Очевидно, это допущение делает математическую модель приближенной, то есть она априорно содержащей некоторую методическую погрешность. Однако, в дальнейшем, при выполнении численного моделирования, экспериментальных исследований и сравнении полученных результатов, диссертант не рассматривает влияние методической погрешности математической модели на точность расчетов.

3. Во Введении диссертант в ходе доказательства актуальности темы диссертации описывает преимущества использования автодинных радиолокаторов по сравнению с гомодинными в ряде применений, однако, при дальнейшем рассмотрении динамики формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных СБРЛ не приводится количественного сравнения с гомодинными СБРЛ, способными выполнять свою задачу в тех же условиях эксплуатации. Стоит отметить, что именно количественная оценка преимуществ может являться решающей на начальных этапах проектирования радиоэлектронных устройств и датчиков, а именно, на стадии выбора функциональной схемы будущего устройства.

4. Из приведённого в главе 5 краткого описания патентов РФ на изобретения, без сомнения, следует высокий изобретательский уровень запатентованных идей, однако для читателя не становится очевидной взаимосвязь теории автодинных и гомодинных радиолокационных устройств для измерения скорости локомотива.

Все отмеченные замечания не снижают оценку качества выполненных исследований существенно и не влияют на несомненную практическую значимость полученных результатов. Эти замечания в дальнейшем могут являться для диссертанта полезными советами при дальнейшем развитии тематики исследований.

**Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ.** Исходя из вышесказанного, можно констатировать, что

диссертация Шайдурова Кирилла Дмитриевича представляет собой самостоятельно выполненную и завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему, которая отличается внутренним единством содержания и структуры. В ней на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований разработаны теоретические положения, позволившие установить основные закономерности формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных радиолокаторов с модуляцией. Разработан и описан удобный на практике метод оценки динамических характеристик автодинных генераторов с использованием метода биений, а также представлены свидетельства промышленной применимости результатов исследования, их востребованности, а значит, и целесообразности дальнейшего развития данной научной тематики.

Совокупность перечисленных результатов работы можно квалифицировать как решение научно-технической задачи, имеющей значение для развития теории и техники в области создания автодинных приёмо-передающих модулей для систем ближней радиолокации, датчиков и измерителей СВЧ и КВЧ диапазонов.

На основании вышеизложенного считаю, что обсуждаемая работа «Динамика формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинных радиолокаторов с амплитудной и частотной модуляцией» отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Шайдуров Кирилл Дмитриевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

#### Официальный оппонент:

Ровкин Михаил Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ систем электросвязи федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».



Ровкин Михаил Евгеньевич

16 июня 2021 г.

Адрес организации:

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40,

рабочий телефон (3822) 51-05-30, e-mail: [office@tusur.ru](mailto:office@tusur.ru)

Подпись Ровкина М.Е. заверяю.

Учёный секретарь ФГБОУ ВО

«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Прокопчук Елена Викторовна

