

О Т З Ы В

официального оппонента д.т.н., профессора Ю.Н. Паршина
на диссертационную работу Максименко Валерия Григорьевича
«Шумы и помехи при приеме низкочастотного электромагнитного поля
в морской воде», представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Во многих случаях основным требованием, предъявляемым к радиосистемам передачи информации, является высокая скорость передачи или высокая пропускная способность. Однако, существуют прикладные области, где основным требованием является надежность передачи информации при сравнительно невысокой скорости передачи. К таким областям относятся передача информации в системах Интернета вещей, а также передача информации в сплошных средах, например, в водной среде, под землей и других. В последнем случае рабочие частоты достаточно низкие, что достаточно при низкой скорости передачи информации. В рассматриваемой диссертации исследуется передача информации в морской воде, обладающей заметной проводимостью, дисперсионностью, большими потерями электромагнитного излучения. В этом случае большое влияние на качество приема оказывают шумы и помехи различного происхождения. В результате качество передачи информации в основном определяется чувствительностью датчиков электрического и магнитного полей. Поэтому задачи исследования шумов и помех при приеме низкочастотного электромагнитного поля в морской воде, а также разработка высокочувствительных датчиков, решаемые в диссертации В.Г. Максименко, является актуальными и практически значимыми.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, выводов и практических рекомендаций, списка использованных источников и приложения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы объект и цель исследования. Перечислены задачи, решаемые в работе, методы исследований, научная новизна полученных результатов. Сформулированы защищаемые положения.

В первой главе исследованы шумы в отсутствии движения и предельная чувствительность электродных датчиков. Перечислены основные источники шумов и помех в морской воде. Подробно рассмотрены свойства электромагнитного поля в морской воде, вызванного атмосферным электричеством, гидродинамические электромагнитные поля, промышленные помехи. Особое внимание уделено собственным шумам датчиков электромагнитного поля в морской воде. Проведена классификация датчиков на электродные и безэлектродные. Подробно рассмотрены электрофизические процессы в электродных датчиках, связанные с образованием двойного электрического слоя. Проанализировано влияние материала, из которого изготовлен датчик, на величину шума и чувствительность. Автором введено понятие «шум движения», подробно проанализированы

механизмы его формирования. В качестве безэлектродного датчика используется трансформаторный датчик с кольцевым сердечником или магнитоиндукционный датчик со стержневым сердечником. На основе анализа свойств датчиков различного типа сделан вывод о необходимости уменьшать уровень собственных шумов датчиков для повышения чувствительности приема низкочастотных сигналов в морской воде.

Во второй главе рассмотрены характеристики шумов в отсутствие движения и предельная чувствительность электродных датчиков. Изложена методика исследования электродного шума в отсутствии движения. Приведены результаты измерений избыточного шума электродного датчика, изготовленного из латуни, тантала, титана, результаты которых свидетельствуют о преимуществах электродов из тантала. Установлено, что выдержка электродов в электролите уменьшает уровень избыточного шума; подробно исследовано влияние режимов выдержки на уровень шума. Установлено, что плотность распределения вероятностей электродного шума имеет негауссовский характер с коэффициентом эксцесса равным $-(0,8...1)$, а спектр электродного шума имеет вид $1/f$. Одним из факторов электродного шума является импеданс электрода. Тепловой шум зависит от активной составляющей импеданса. Подробно анализируются физические механизмы, определяющие активную и реактивную составляющие импеданса. Экспериментально получены зависимости активной и емкостной составляющих импеданса от времени и частоты для различных материалов. Отдельно рассмотрено влияние нефтепродуктов на импеданс электродов. Данные о значении импеданса использованы для согласования электродного датчика с приемным устройством с помощью трансформатора при учете только теплового шума по критерию максимума отношения сигнал-шум. Рассмотрены варианты конструкции трансформатора с различными типами сердечников. Предложен и исследован бестрансформаторный способ согласования датчиков с усилителем. Определена предельная чувствительность электродного датчика и приемного устройства с электродным датчиком.

Третья глава посвящена шумам электродных датчиков при движении в морской воде. Изложена методика измерения шума движения, возникающего в электродном датчике. Установлено, что шумы электродов из тантала и титана нечувствительны к движению электролита, а шумы движения электродов из ниобия и никеля превышают шумы из тантала и титана в 16...25 раз. Для создания контролируемого движения электролита введен активатор с регулируемой скоростью вращения. Проведен спектральный анализ шумов датчика, выявлена зависимость частот гармоник от параметров эксперимента. Исследована зависимость интенсивности шумов от степени турбулентности потока жидкости. установлена связь электродного шума с пульсациями скорости и давления жидкости. Создана оригинальная экспериментальная установка и разработана методика для измерения электродного шума при пульсациях скорости жидкости. Спектральный анализ показал, что максимумы спектра шума расположены на тех же частотах

тах, что и гармоники частоты пульсации скорости жидкости. Создана и экспериментально апробирована модель электрода в виде инерционного звена 1-го порядка. Выполнено экспериментальное исследование поляризации электрода, совершающего гармонические колебания в водном электролите.

В четвертой главе изучена природа шума движения и предложены методы его уменьшения. Установлена связь пульсаций потенциала электрода с пульсациями скорости электролита вследствие модуляции толщины диффузионного слоя. Проанализировано изменение потенциала электрода при деформации двойного электрического слоя. Для уменьшения шума движения электродного датчика предложены меры для уменьшения турбулентности движения жидкости в пограничном слое. Определено максимальное удаление задней границы электрода от передней кромки датчика, при котором обеспечивается ламинарность течения. Предложено использовать чувствительность электрода к пульсациям скорости для уменьшения шума движения. Проведено исследование обтекатель на шум движения электродного датчика.

В пятой главе исследованы особенности конструкции высокочувствительных электродных датчиков и приемных устройств для радиосвязи с подводным объектом. Большое внимание уделено влиянию конструкции на пульсации скорости жидкости и турбулентность потока, пузырькам воздуха на поверхности электрода. Для уменьшения шума предложено устанавливать пористые перегородки внутри электродного датчика. Предложен метод повышения чувствительности приемного устройства путем компенсации шума движения, использующий корреляцию между электродным напряжением и пульсациями скорости. Описана установка и методика исследования корреляции электродного шума с пульсациями скорости жидкости. Разработана схема приемного устройства с компенсацией шума движения. Предложено устройство компенсации промышленной помехи при приеме низкочастотных радиосигналов на движущемся подводном объекте с использованием дополнительного датчика.

В шестой главе исследуется шум и предельная чувствительность безэлектродных датчиков электромагнитного поля. Проведена оптимизация конструкции магнитоиндукционного датчика в виде катушки с незамкнутым сердечником по критерию максимума отношения сигнал-шум. Найдено оптимальное число витков в каждой секции катушки. Проведена оптимизация конструкции трансформаторного датчика в виде катушки с кольцевым сердечником по критерию максимума коэффициента преобразования. На основе эквивалентной схемы определена предельная чувствительность трансформаторного датчика электромагнитного поля. Сравнение электродного и трансформаторного датчиков по предельной чувствительности показывает, что при сравнимых габаритах и массе у электродного датчика предельная чувствительность существенно лучше, чем у трансформаторного. Показаны пути повышения коэффициента преобразования трансформаторного датчика электрического поля, возбуждающего ток проводимости в окне тороидальной катушки. Проведено сравнение электродных и без-

электродных датчиков по достигаемой предельной чувствительности и сделан вывод в пользу электродного датчика.

В заключении диссертации приведены основные выводы и результаты выполненной работы. Выводы и практические рекомендации содержат сведения о возможностях практического применения результатов и дальнейшего развития исследований.

В приложении приведена копия письма председателя Научного совета АН СССР по проблеме «Статистическая радиофизика» академика Ю.Б. Кобзарева, в котором сообщается, что результаты разработки и испытаний датчика электрического поля, позволяющего снизить уровень шумов и помех в движущихся турбулированных потоках электролитов включены в отчет о важных результатах научных исследований в области статистической радиофизики за 1989 г.

Научная новизна исследования, выполненного в диссертационной работе, состоит в том, что в ней впервые сформулированы и комплексно решены актуальные задачи, связанные с повышением эффективности приема низкочастотного электромагнитного поля в морской воде.

Существенно новыми научными результатами являются следующие:

- на основе обширных экспериментальных исследований всех компонент электродного шума и его зависимости от различных факторов разработаны две теоретические модели образования электродного шума движения: 1) модуляция толщины диффузионного слоя у поверхности электрода набегающим пульсирующим потоком и 2) деформация жидкостной обкладки двойного электрического слоя на границе металл-электролит набегающим потоком электролита, адекватность которых подтверждена экспериментально;

- на основании разработанной модели шума движения предложен и обоснован новый метод уменьшения шума путем расположения электродов на плоском диэлектрическом обтекателе, что обеспечивает высокую чувствительность приема;

- на основе обнаруженной корреляции шума движения и пульсации скорости потока жидкости, обтекающей электроды датчика, предложено осуществить компенсацию шума движения и повысить тем самым чувствительность приема;

- на основе свойств распространения электромагнитных волн в морской воде предложен метод компенсации промышленной помехи в буксируемом кабельном электродном датчике;

- выполнена оптимизация элементов конструкции безэлектродных датчиков для достижения максимальной чувствительности приема, предложены новые технические решения приема сигналов, защищенные авторскими свидетельствами, патентами.

Теоретическая ценность работы состоит в создании теории шумов и помех в датчиках низкочастотного электромагнитного поля в морской воде, создании и экспериментального обоснования моделей шумов и помех, разработки методов

уменьшения шумов и помех в электродных и безэлектродных датчиках, функционирующих в морской воде, что позволяет повысить чувствительность приема низкочастотных сигналов.

Практическая значимость заключается в следующем:

□ предложены новые конструкции безэлектродных и электродных датчиков, в том числе кабельного датчика, имеющих высокую чувствительность в условиях буксировки и вибрации, а также высокий коэффициент преобразования по сравнению с известными датчиками;

□ предложена схема приемного устройства с компенсацией шума движения, что позволяет повысить чувствительность приема;

□ предложена схема приемного устройства с компенсацией промышленной помехи, которую создают силовые электроустановки, расположенные на объекте, буксирующем кабельный электродный датчик;

□ доказано, что применение обтекателей, снижающих скорость движения жидкости у поверхности электродов повышает эффективность борьбы с шумом движения электродного датчика;

□ показано, что трансформаторное согласование является единственно приемлемым способом согласования электродного датчика с приемным устройством; определены условия трансформаторного согласования электродных датчиков с входными каскадами приемного устройства, обеспечивающие наивысшую чувствительность.

Обоснованность и достоверность предложенных подходов и полученных технических решений подтверждена корректным применением математического аппарата, согласованием расчетных данных, полученных с использованием численных методов, и с данными прямого статистического моделирования, а также с значительным количеством экспериментальных данных, непротиворечивостью полученных результатов известным физическим представлениям и результатам работ других авторов.

Диссертация В.Г. Максименко обладает внутренним единством, представляет собой законченную научную работу, отвечающую требованиям к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора наук. В диссертации последовательно развивается и уточняется центральная идея разработки научно-технических основ построения и реализации приема низкочастотного электромагнитного поля в морской воде при действии специфических шумов и помех. Результаты, полученные в работе, в полной мере соответствуют поставленным целям и задачам, а результаты проведенных экспериментов подтверждают теоретические положения диссертации. Диссертация написана хорошим литературным языком, с правильной акцентацией основных положений, результатов и выводов.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, представляя все ее главы. В автореферате обоснована актуальность темы исследования, поставлены задачи, дана научная новизна, приводится краткое изложение содер-

жания глав и выводы, представлен перечень опубликованных работ автора, приведены результаты апробации диссертации и личный вклад автора.

Основные результаты диссертации изложены в 43 опубликованных работах. Среди них 24 статьи (23 опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, и проиндексированы в РИНЦ, а 18 из них проиндексированы в WoS), 17 авторских свидетельств и патентов на изобретение и полезную модель, опубликованы тезисы двух докладов на конференциях.

Результаты диссертации докладывались на научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь» в 2010, 2012 г.г., г. Москва, а также на Региональной XIII конференции по распространению радиоволн, г. Санкт-Петербург.

Также опубликованы три статьи, тезисы доклада на конференции и получен патент на изобретение по смежным с темой диссертации вопросам.

Диссертационная работа не лишена некоторых недостатков:

1. При выявлении свойств электродного шума установлено, что он имеет импульсный характер, «природа возникновения которого не установлена» (с.20). Представляется целесообразным в работе по радиофизике в какой-то мере обсудить физическую природу возникновения этих импульсов, что позволит более эффективно подавлять их.

2. В устройстве рис. 5.13 используется подстройка только одного коэффициента усиления усилителя в каждом пространственном канале. Однако, при использовании различных по физической природе датчиков в основном и компенсирующем каналах форма помех будет различной. Поэтому целесообразно применить частотно зависимую схему подстройки, например, линии задержки с отводами и несколькими корреляционными обратными связями.

3. В схеме компенсатора индустриальной помехи рис. 5.14 используются подстраиваемые усилитель и фазовращатель. Применение фазового управления значительно усложняет блок экстремального регулирования и снижает качество подавления помехи. Целесообразно в данном случае использовать квадратурные каналы с регулируемым усилением.

4. На рисунках 2.6, 2.7, 5.11, 5.12 не указана размерность по вертикальной оси.

5. На некоторых рисунках не отмечены доверительные интервалы, а также точки, отображающие экспериментально измеренные величины. Поэтому в ряде случаев затруднительно сделать однозначные выводы относительно областей параметров, в которых проявляются преимущества и недостатки тех или иных технических решений.

6. На с.61 диссертации имеется ссылка на несуществующую формулу (3).

Отмеченные недостатки не снижают высокий научный уровень диссертации, не опровергают ее теоретической и практической значимости и не препятствуют положительной оценке диссертационной работы в целом.

Тема исследования и в целом диссертация соответствуют Паспорту специальности 1.3.4 «Радиофизика», в частности его п. 4 и п.7. Диссертация содержит

новые научные результаты и положения, написана автором самостоятельно и свидетельствует о личном вкладе автора в науку, т. е. удовлетворяет требованиям п. 10 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ. Опубликованные в научных изданиях результаты работы соответствуют пп. 11, 13, 14 названного Положения.

Считаю, что диссертационная работа В.Г. Максименко «Шумы и помехи при приеме низкочастотного электромагнитного поля в морской воде» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема повышения качества приема на фоне шумов и помех в морской воде, получены новые свойства и характеристики электродных датчиков электромагнитного поля, предложены пути повышения приема низкочастотных сигналов на фоне таких помех, обеспечивающие эффективное функционирование информационных систем, внедрение которых имеет важное хозяйственное значение, что соответствует требованиям п. 9 названного Положения.

Автор диссертации Максименко Валерий Григорьевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиотехнические устройства»
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»



Ю.Н. Паршин

Подпись Паршина Юрия Николаевича заверяю.

Ученый секретарь Ученого совета
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»
канд. физ-мат. наук, доцент



К.В. Бухенский

18.01.2024 г.

Служебный адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1;
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина» (РГРТУ), кафедра «Радиотехнические устройства»;
служебный телефон: (4912)72-03-48;
E-mail: parshin.y.n@rsreu.ru

