

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИЗМИРАН
доктор физ.-мат. наук

Кузнецов В.Д.

«15 января 2024 г.»

Отзыв

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук
на диссертационную работу Максименко В. Г. «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»

1. Актуальность темы диссертации. Измерение электромагнитных полей низкой частоты в океане является одним из средств изучения строения земной коры. Применяются электрофизические методы разведки полезных ископаемых на дне океана и прибрежном шельфе, основанные на измерении естественного и специально возбуждаемого низкочастотного электромагнитного поля в морской воде. В последнее время нашел применение способ отыскания и определения координат подводных кабелей и трубопроводов, основанный на измерении излучаемого ими электромагнитного поля в диапазоне частот от десятков герц до десятков килогерц. Способность низкочастотного электромагнитного поля проникать в морскую воду на большую глубину используют для осуществления радиосвязи с подводными объектами. Значительное ослабление электромагнитного поля в морской воде приводит к необходимости приема слабых полей, находящихся на уровне чувствительности приемного устройства, которая в значительной степени определяется чувствительностью датчика. Увеличение практической глубины радиосвязи требует увеличения мощности передатчика и размеров излучающих антенн и повышения чувствительности приемника, которая ограничена собственным шумом датчика, осуществляющего преобразование компоненты E или H электромагнитного поля в электрический сигнал. При движении датчика в морской воде его собственный шум существенно возрастает. Обычный способ повышения чувствительности - это увеличение геометрических размеров датчиков, однако при этом возникает много про-

блем, препятствующих их практическому использованию. Совершенствование и разработка новых высокочувствительных средств приёма, предназначенных для использования в морской воде, позволяет уменьшить их размеры, увеличить глубину приёма и скорость буксировки датчика без увеличения мощности передатчика. Это даёт основания утверждать, что тема диссертационного исследования весьма актуальна.

2. Структура и содержание работы. Диссертационная работа объёмом 323 страниц состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность исследования, обозначены цели и задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Перечислены основные положения, выносимые на защиту. Также приведено краткое содержание выполненных исследований.

В первой главе рассмотрены источники помех и шумов при приеме радиосигналов низкой частоты в морской воде. На глубине до 50-100 метров преобладают атмосферные помехи. При распространении вглубь океана полезный сигнал испытывает такое же ослабление, как и атмосферные помехи, поэтому отношение сигнал/помеха сохраняется, пока собственный шум датчика электромагнитного поля не становится сравним по величине с атмосферными помехами. Дальнейшее увеличение глубины требует значительного увеличения мощности передатчика, которая и так очень велика. На глубине более 100 метров на первый план выходит собственный шум датчика электромагнитного поля и индустриальная помеха буксирующего датчик объекта. В связи с большим ослаблением принимаемого сигнала при распространении в морской воде применяются кабельные электродные датчики, длина которых достигает более чем 1000 метров. Активная часть такого датчика отнесена от источника помехи на расстояние порядка 300 метров, что даёт возможность ослабить индустриальную помеху. Малогабаритные электродные датчики не обеспечивают необходимой чувствительности из-за малой величины полезного сигнала при большом собственном шуме в движении.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований электродного шума в отсутствие движения электродов и составляющих импеданса электродов из разных материалов в морской воде. Также исследованы способы и условия согласования электродного датчика с приемным устройством, выполнена оптимизация входного трансформатора на минимум коэффициента шума, определена предельная чувствительность приемного устройства с электродным датчиком. В отсутствие движения при недостаточном времени выдержки в морской воде даже у некорродирующих металлов обнаружен

избыточный электрохимический электродный шум, который на частотах ниже 10 Гц в несколько раз может превышать тепловой шум, а также большой импульсный шум, который может привести к невозможности приема сигнала.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований электродных шумов при движении жидкости относительно электродов. Установлено, что при движении электролита относительно электродов возникает специфический шум движения, превышение которого над тепловым шумом по напряжению достигает нескольких порядков. Он и определяет чувствительность буксируемых электродных датчиков. Шум движения непосредственно связан с пульсациями скорости жидкости, в частности, с турбулентностью потока. Напряжение шума движения обратно пропорционально квадратному корню из площади электродов и увеличивается с разбавлением электролита. С увеличением времени выдержки электродов в электролите шум движения уменьшается. Наименьший шум движения из исследованных металлов наблюдается у тантала и титана. Установлено, что пульсации электродного потенциала в пульсирующем потоке электролита имеют инерционность относительно пульсаций скорости, определяемую постоянной времени порядка единиц миллисекунд. Доказано, что пульсации давления жидкости не оказывают влияния на электродный потенциал.

В четвертой главе выполнено теоретическое исследование связи пульсаций электродного напряжения с пульсациями скорости жидкости, в результате которого созданы две математические модели возникновения шума движения, которые как качественно, так и количественно согласуются с результатами экспериментальных исследований. Первая модель основана на модуляции скорости адсорбции кислорода на поверхность электрода при модуляции толщины диффузионного слоя у поверхности электрода набегающим пульсирующим потоком жидкости. Вторая модель основана на деформации двойного электрического слоя на границе электрод-жидкость набегающим потоком. На основе созданной теории предложены новые типы электродных датчиков, в которых шум движения может быть уменьшен в десятки раз. В частности, создана теория вращающегося электрода и экспериментально исследовано применение обтекателей для уменьшения шума движения. Результаты натурального эксперимента, показавшие возможность при помощи обтекателей уменьшить шум электродного датчика при движении до 10 раз по сравнению с незащищенными электродами, признаны Научным советом АН СССР важными и включены в «Отчет о важных и важнейших результатов научных исследований в области статисти-

ческой радиофизики за 1989 год», представленный Научным советом в Отделение общей физики и астрономии АН СССР.

Пятая глава посвящена разработке методов уменьшения шумов и помех, а также технических средств приема с электродными датчиками, предназначенных для применения на движущихся объектах. В частности, предложены метод и устройство компенсации шума движения, основанные на корреляционной связи напряжения шума движения и пульсаций скорости жидкости. Предложены метод и устройство компенсации индустриальной помехи, основанные на разнице в условиях распространения принимаемой электромагнитной волны и индустриальной помехи, создаваемой электроустановками объекта, с которым осуществляется связь.

В шестой главе рассмотрены методы повышения чувствительности безэлектродных датчиков электромагнитного поля – индукционных и трансформаторных. Выполнена оптимизация магнитоиндукционного датчика на максимум предельной чувствительности, выполнена оптимизация трансформаторного датчика на максимум коэффициента преобразования, выполнено сравнение предельной чувствительности электродных и безэлектродных датчиков. Показано, что у электродных датчиков она более чем на порядок выше. Предложены конструкции безэлектродных датчиков, имеющих повышенную защищенность от внешних помех и вибрации.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией.

3. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности. Тема и содержание диссертации соответствуют областям исследования специальности 1.3.4. Радиофизика (физико-математические науки) в части п.2, п.4 и п.7.

4. Научная новизна и практическая значимость результатов исследований

При выполнении работы проведено всестороннее экспериментальное исследование всех компонент электродного шума. Установлено существование избыточного электрохимического электродного шума, который на частотах ниже 10 Гц может в несколько раз превышать тепловой. Доказана необходимость выдержки электродов в морской воде для устранения собственного импульсного шума большой интенсивности. Обнаружена связь напряжения шума со скоростью движения жидкости, материалом и площадью электродов, соленостью электролита.

1. На основе открытых в экспериментальных исследованиях закономерностей впервые создана теория электродного шума движения, которая находится в хорошем соответствии с результатами экспериментов. В частности, созданы две

математические модели возникновения пульсаций напряжения на электродном датчике при его движении относительно электролита («шума движения» электродного датчика), которые объясняют полученные в экспериментах зависимости электродного шума от различных факторов. Полученные впервые экспериментальные результаты носят фундаментальный характер, задающий направления дальнейших исследований.

2. Установлено, что шум движения является главной причиной, ограничивающей чувствительность электродных датчиков. Экспериментально доказана возможность уменьшения шума движения электродного датчика до десяти раз по напряжению при применении обтекателей. Предложены новые конструкции датчиков с обтекателями, защищенные авторскими свидетельствами и патентами на изобретение.

3. Предложен, математически обоснован и доказан экспериментом метод уменьшения в несколько раз шума движения электродного датчика за счет выбора размеров и расположения электродов на диэлектрическом обтекателе. Предложен и математически обоснован метод уменьшения шума движения электродного датчика на 1-2 порядка за счет применения вращающихся электродов. Экспериментально установлена корреляция электродного шума с пульсациями скорости потока жидкости, обтекающей электроды датчика, что дает возможность осуществить частичную компенсацию шума движения и повысить чувствительность приемника более чем в 2 раза.

4. Экспериментально исследовано поведение составляющих импеданса (R и C) датчиков с электродами из разных металлов при длительной выдержке в морской воде. Показано, что по стабильности импеданса, предельной чувствительности, минимальному шуму в состоянии покоя и в движении наиболее пригодными для электродов являются тантал, титан, нержавеющая сталь. Определены условия трансформаторного согласования электродных датчиков с входными каскадами приемного устройства, обеспечивающие максимальное значение чувствительности. Выполнена оптимизация конструктивных параметров входного трансформатора на минимум коэффициента шума. Определена предельная чувствительность датчиков с электродами из разных металлов.

5. Выполнена оптимизация конструктивных параметров безэлектродных датчиков на максимум чувствительности или на максимум коэффициента преобразования.

6. Показана возможность компенсации промышленной помехи при приеме электромагнитных волн сверхнизкочастотного диапазона на буксируемый кабельный электродный датчик, основанный на особенностях распространения

электромагнитной волны в морской воде. Разработаны конструкции новых электродных и безэлектродных датчиков, имеющих при движении повышенную чувствительность по сравнению с известными. Новизну подтверждают 16 авторских свидетельств и патентов РФ на изобретение и полезную модель.

7. Важным практическим результатом работы является доказательство возможности создания малогабаритных высокочувствительных устройств для приема СНЧ электромагнитных волн в морской воде, а также разработка таких устройств с электродными и безэлектродными датчиками, которые могут заменить приемные устройства с длинными кабельными датчиками. При меньших на 1...2 порядка габаритах они могут обеспечить чувствительность, сравнимую с чувствительностью длинного кабельного датчика.

5. Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается корректным применением математического аппарата и подтверждается их физической непротиворечивостью, согласованностью результатов лабораторных и натуральных экспериментов с результатами теоретического анализа и математического моделирования, а также с результатами других авторов, и воспроизводимостью результатов в разных опытах.

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

7. Личный вклад автора. В публикациях диссертант, как правило, выступает как единственный автор. Он является лидером последних по времени теоретических исследований и технических разработок, посвященных данной тематике. Важной частью работы автора являются выполненные им лабораторные экспериментальные исследования шума движения и натуральный эксперимент по исследованию эффективности применения обтекателей для повышения чувствительности электродного датчика.

8. Замечания по содержанию и оформлению работы. Исследование, представленное автором диссертации, настолько полно и всесторонне охватывает проблему повышения чувствительности при приеме низкочастотных полей в море, насколько это позволяет современное состояние дел. При этом работа не лишена некоторых недостатков, на которые хотелось бы обратить внимание:

1. Ценность результатов работы была бы выше, если бы в экспериментах, особенно натуральных, производился также прием полезного сигнала, а не только измерение шумов.
 2. В натурном эксперименте желательно было бы определить не только уменьшение шума датчика при установке обтекателей, но и выигрыш в отношении сигнал-шум.
 3. Нет данных о шумах датчиков при скоростях более 5 м/с. Однако согласно опубликованным в США сведениям в экспериментах по реализации системы связи с подводными лодками скорость последних достигала 10 м/с.
 4. Остается неясной возможность использования второго электродного датчика в качестве источника компенсирующего напряжения для компенсации шума движения.
 5. На стр. 61 приведена ссылка на формулу (3), которой нет в тексте.
- Отмеченные недостатки работы не подвергают сомнению ее положительной оценки в целом.


9. Заключение

Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы и не вызывает нареканий. Полученные результаты полностью соответствуют заявленной цели, а решаемые задачи последовательно способствуют ее достижению. Представленные результаты достоверны и обоснованы, обладают практической и теоретической значимостью, отличаются глубиной исследования, опубликованы в открытой печати и доложены на научно-технических конференциях. Диссертация Максименко Валерия Григорьевича «Шумы и помехи при приеме низкочастотного электромагнитного поля в морской воде» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, обладает внутренним единством, содержит решение задач, имеющих важное народнохозяйственное значение, и отвечает всем квалификационным требованиям, пп. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям. Исходя из вышеизложенного, считаю, что Максименко Валерий Григорьевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиоп физика.

Отзыв ведущей организации заслушан и одобрен на заседании секции Ученого совета ИЗМИРАН по направлению «Ионосфера и распространение радиоволн» 29.03.2023 г. (протокол № 3 от 29.03.2023).

Отзыв подготовил главный научный сотрудник ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН»

доктор физико-математических наук, профессор
01.04.03 – Радиофизика

 А.Е. Резников

108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4, ИЗМИРАН

Тел. +7(985)2206283 e-mail: reznikov@izmiran.ru.



“ 31 ” января 2024 г.