

На правах рукописи



**МАКСИМЕНКО ВАЛЕРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ**

**ШУМЫ И ПОМЕХИ ПРИ ПРИЕМЕ  
НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В МОРСКОЙ ВОДЕ**

Специальность 1.3.4 Радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

Фрязино – 2023 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал).

Официальные оппоненты: Сороцкий Владимир Александрович,  
доктор технических наук

Мальцева Ольга Алексеевна,  
доктор физико-математических наук

Паршин Юрий Николаевич,  
доктор технических наук,  
профессор

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Защита состоится 01 марта 2024 года в 11.00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 при ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д.11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и в сети Интернет  
<http://cplire.ru/rus/dissertations/Maksimenko/index.html>

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2023г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук



Кузьмин Лев  
Викторович

## Общая характеристика работы

### *Актуальность темы и состояние вопроса*

Работа посвящена исследованию шумов датчиков электромагнитного поля крайне низких (КНЧ, 3...30 Гц) и сверхнизких (СНЧ, 30...300 Гц) частот в морской воде и физических процессов, обуславливающих эти шумы, а также разработке методов и малогабаритных технических средств, обеспечивающих максимальную чувствительность при приеме такого поля, что соответствует п. 4 и п. 7 Паспорта специальности 1.3.4 Радиофизика.

При решении ряда научных и практических задач необходимо принимать и измерять низкочастотные электромагнитные поля в морской воде. Измерение электромагнитных полей низкой частоты в океане является средством изучения строения земной коры. Способность низкочастотного электромагнитного поля проникать в морскую воду на большую глубину используют для осуществления радиосвязи с подводными объектами. Для приема электромагнитного поля в море применяют датчики, осуществляющие преобразование компоненты  $E$  или  $H$  электромагнитного поля в пропорциональный им электрический сигнал. Электродные датчики имеют два контактных электрода, которые снимают разность потенциалов, созданную в воде токами проводимости. Также применяют безэлектродные датчики. Это трансформаторные датчики, представляющие собой катушку на кольцевом сердечнике, а также магнитоиндукционные датчики, выполненные в виде цилиндрической катушки с сердечником. При обследовании большой акватории датчик буксируется за судном на кабель-тросе и подвергается воздействию потока воды и вибрации. При этом практически единственным приемлемым по чувствительности является кабельный электродный датчик, длина активной части которого достигает 1000 метров. На глубинах до 100 метров в диапазоне 3...300 Гц возможность приема сигнала на такой датчик в значительной мере определяется величиной атмосферных помех. На большей глубине атмосферные помехи, как и полезный сигнал, испытывают большое ослабление, и возможность приема ограничивается собственным шумом датчика. Также возможность приема ограничивает индустриальная помеха, создаваемая самим буксирующим судном. Это вынуждает относить активную часть датчика от судна, что также увеличивает его длину. Практические задачи требуют обеспечить прием сигнала на глубине более 100 метров при уменьшении габаритов датчика, так как его большая длина создает проблемы при эксплуатации вплоть до обрыва кабеля или делает его вообще неприменимым. Увеличение мощности СНЧ и КНЧ передатчика связано с очень большими материальными затратами. Поэтому уменьшение собственного шума датчиков и повышение чувствительности приемного устройства в целом весьма актуально как для системы связи, так и геологоразведки.

Отечественные публикации о приеме электромагнитного поля в море относятся к измерению электрических полей в диапазоне ниже единиц герц (Богородский М.М.), либо к разработке датчиков трансформаторного типа с металлическими концентраторами тока проводимости (Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С.), представляющих собой вариант электродного датчика с согласующим трансформатором. Известны работы об оптимизации магнитоиндукционных датчиков, (Дуб П.Б., Мизюк Л.Я., Ничога В.А.). Исследования электродных шумов в нашей стране проводились в рамках исследования шума электромагнитных расходомеров (Мальцев Ю.П., Мейстер А.А, Тоомет М.Э.). Зарубежные публикации связаны с проектом «Sanguine» по осуществлению радиосвязи с подводными лодками (Бернстайн С.Л., Burrows M.L., Kruger, V., Soderberg E.F., Fessenden C.T.). В последние годы публикации на эту тему в доступной литературе отсутствуют. Опубликованные материалы не позволяли создать малогабаритные датчики, обеспечивающие высокую чувствительность в условиях буксировки.

Предметом исследования является зависимость величины шума датчика от различных факторов, причины его возникновения, способы и условия согласования датчика с приемником, а также борьба с помехами индустриального и вибрационного происхождения, разработка новых типов датчиков и приемных устройств, позволяющих достичь более высокой чувствительности по сравнению с известными. Объектом исследований являются собственные шумы датчиков и методы их уменьшения. Электрохимические и гидромеханические процессы, происходящие на поверхности электродов электродных датчиков, не являются объектом исследования.

### ***Цель работы***

Целью диссертационной работы является исследование шумов и помех при приеме радиоволн сверхнизкой и крайне низкой частоты в морской среде, причин их возникновения и методов борьбы с ними, создание малогабаритных технических средств приема низкочастотных электромагнитных полей в морской воде, обеспечивающих чувствительность, сравнимую с известными кабельными датчиками.

### ***Задачи, решаемые в работе***

- экспериментальное исследование шума электродных датчиков в покоящейся и движущейся жидкости и его зависимости от скорости жидкости, концентрации NaCl в электролите, материала и площади электродов;
- исследование природы электродного шума движения, разработка его математической модели и рекомендаций по его минимизации;
- исследование параметров импеданса различных металлов с точки зрения их применимости для изготовления электродов датчиков, обеспечения минимума собственного теплового шума и стабильности импеданса;

- разработка методов и технических средств согласования электродных датчиков с входными каскадами приемного устройства КНЧ и СНЧ диапазонов для достижения максимальной чувствительности;

- создание новых малогабаритных электродных и безэлектродных высокочувствительных помехозащищенных датчиков, а также оптимизация конструктивных параметров известных датчиков для обеспечения их наивысшей чувствительности;

- разработка новых методов и технических средств для приема КНЧ и СНЧ электромагнитной волны в морской воде с целью компенсации индустриальной помехи и шума движения электродного датчика.

### ***Методы исследований***

Теоретические исследования базируются на принципах и достижениях следующих научных дисциплин: электродинамика и распространение радиоволн, теория электрических цепей, статистическая радиотехника, физико-химическая гидродинамика, физическая химия. Экспериментальные лабораторные и натурные исследования выполнены с использованием стандартных измерительных приборов и специально разработанных устройств и установок при широком применении аппаратных и программных компьютерных методов обработки результатов измерений.

### ***Научная новизна работы***

Впервые:

1. Выполнено всестороннее экспериментальное исследование всех компонент электродного шума, выявлена зависимость его от разных факторов (скорости жидкости и ее пульсаций, материала и площади электрода, солености воды и времени выдержки в ней электродов).

2. Разработаны две теоретических модели образования электродного шума движения, которые согласуются с результатами экспериментов.

3. Установлено, что шум движения является главным фактором, ограничивающим чувствительность электродных датчиков. Показана возможность уменьшения шума движения электродного датчика на порядок по напряжению при применении обтекателей.

4. На основании разработанной модели образования шума движения предложен, математически обоснован и подтвержден экспериментом новый метод уменьшения в несколько раз шума движения электродного датчика за счет выбора размеров и расположения электродов на плоском диэлектрическом обтекателе. Предложен и математически обоснован новый метод уменьшения шума движения электродного датчика до двух порядков за счет применения вращающихся электродов.

5. Экспериментально подтверждена следующая из разработанной математической модели шума движения корреляция электродного шума с пульсациями скорости потока жидкости, обтекающей электроды датчика.

Показана возможность осуществить частичную компенсацию шума движения и повысить чувствительность приемника более чем в 2 раза.

6. Предложен метод компенсации индустриальной помехи при приеме электромагнитных волн СНЧ диапазона на буксируемый кабельный электродный датчик, основанный на особенностях распространения электромагнитной волны в морской воде.

7. Выполнена оптимизация конструктивных параметров безэлектродных датчиков для достижения максимальной чувствительности и максимального коэффициента преобразования.

8. Предложены новые технические решения для создания малогабаритных средств приема КНЧ и СНЧ радиосигналов, которые защищены патентами и авторскими свидетельствами.

### ***Достоверность результатов***

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

### ***Научная и практическая значимость работы***

1. Получены существенно новые фундаментальные знания о природе и свойствах электродного шума, практически важные в случае, когда электроды используются в качестве элементов высокочувствительного датчика. Впервые разработана теория электродного шума движения, которая подтверждена экспериментом. Важным практическим результатом работы является доказательство возможности создания малогабаритных высокочувствительных устройств для приема электромагнитных волн сверхнизкой и крайне низкой частоты в морской среде, а также разработка таких устройств с электродными и безэлектродными датчиками, способных заменить приемные устройства с кабельными датчиками, длина которых достигает более чем 1000 м.

2. Использование полученных в диссертационной работе результатов позволяет максимально повысить чувствительность малогабаритных датчиков и устройств для приема низкочастотного электромагнитного поля в море. На практике это означает возможность осуществлять прием сигнала при глубинах и скоростях движения, ранее недостижимых без увеличения мощности передатчика. Такой подход позволяет экономить существенные средства на проведении исследовательских, опытно-конструкторских работ и в процессе эксплуатации низкочастотных радиолиний.

### ***На защиту выносятся следующие положения***

1. На частотах ниже нескольких десятков герц в отсутствие движения относительно воды электродный датчик имеет избыточный электрохимичес-

кий шум, не исчезающий и при выдержке его в морской воде в течение нескольких суток, в том числе импульсный шум. Функция распределения электродного шума при этом имеет трехгорбую форму с отрицательным эксцессом. После выдержки до исчезновения импульсов избыточный шум имеет спектр типа  $f^{-\alpha}$ , где величина  $\alpha$  составляет от 1 до 1,5 в зависимости от материала электродов, а функция распределения шума близка к гауссовской. У датчика с электродами из лучших по шумовым свойствам некорродирующих металлов (тантал, титан, нержавеющая сталь), отношение избыточного шума к тепловому на частотах ниже 10 Гц достигает нескольких раз.

2. При движении электродного датчика в морской воде возникает специфический электродный шум движения, превышение которого над тепловым шумом по напряжению достигает нескольких порядков. Именно он ограничивает чувствительность малогабаритных буксируемых электродных датчиков. У некорродирующих электродов шум движения обусловлен флуктуациями скорости жидкости, в частности, турбулентностью. Спектральные зависимости шумового напряжения имеют вид  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha \approx 1,6 \dots 1,2$  при скорости движения жидкости 2...3,5 м/с. Наименьший шум движения имеют датчики с электродами из тантала, титана, нержавеющей стали.

3. Созданы две теоретические модели шума движения, которые качественно и количественно согласуются с результатами экспериментальных исследований. Установлено, что основными причинами возникновения шума движения являются электрохимические процессы на поверхности электрода, а именно: изменение скорости адсорбции кислорода поверхностью электрода при модуляции толщины диффузионного слоя на границе электрод-жидкость набегающим пульсирующим потоком жидкости, и деформация двойного электрического слоя на границе металл-электролит. Корреляционная связь шума движения с пульсациями скорости жидкости относительно электродов позволяет осуществить его компенсацию и повысить чувствительность приемного устройства в несколько раз.

4. Выбор размеров и места расположения электродов, встроенных в поверхность диэлектрического обтекателя, равно как и применение обтекателей, защищающих электроды от потока жидкости, позволяет до десяти раз уменьшить шум движения электродного датчика по напряжению. Применение вращающихся электродов позволяет уменьшить шума движения датчика до двух порядков.

5. Различие в затухании электромагнитного поля промышленной помехи, распространяющегося от буксирующего кабельный электродный датчик объекта, и принимаемой электромагнитной волны, распространяющейся от поверхности моря, позволяет осуществить компенсацию промышленной помехи и повысить чувствительность приемного устройства при уменьшении длины датчика.

6. Разработаны методики оптимизации известных безэлектродных датчиков, а также предложены новые конструкции электродных и безэлектродных датчиков, которые в условиях буксировки и вибрации имеют более высокую чувствительность, чем известные.

### *Апробация работы и публикации*

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 [25,26,27], тезисы доклада на конференции [48] и получен патент на изобретение [30] по смежным с темой диссертации вопросам.

### *Личный вклад автора*

Результаты диссертационной работы автором получены лично или при его непосредственном определяющем участии. А именно, автор:

- спланировал, подготовил и провел эксперименты по исследованию электродного шума и измерению составляющих электродного импеданса в лабораторных условиях;
- подготовил натурный морской эксперимент, принимал участие в его осуществлении и в обработке результатов эксперимента;
- создал теоретические модели возникновения шума движения электродных датчиков и получил соотношения, определяющие изменение потенциала электрода при скачке скорости жидкости;
- обосновал возможность уменьшения шума движения электродного датчика путем выбора размеров и расположения электродов на плоском диэлектрическом обтекателе и доказал это в лабораторном эксперименте;
- обосновал возможность уменьшения шума движения электродного датчика путем применения вращающихся электродов и предложил конструкции электродных датчиков с их использованием;
- оптимизировал по максимальному отношению сигнал-шум магнитоиндукционный датчик и трансформаторный датчик по максимальному коэффициенту преобразования;
- разработал методику согласования электродных датчиков с приемным устройством с целью достижения максимального отношения сигнал-шум, включая оптимизацию входного трансформатора на минимум шума;
- предложил ряд существенных отличительных признаков помехозащищенных датчиков, а также устройств для измерения скорости жидкости, обтекающей датчики, признанных изобретениями;
- обосновал возможность компенсации индустриальной помехи и шума движения и предложил схемы приемного устройства с компенсацией индустриальной помехи и шума движения, признанные изобретениями.



### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, содержит 323 страницы текста, включая 115 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 119 библиографических наименований. После названия каждой главы даны ссылки на опубликованные работы диссертанта, по которым написана данная глава. Ссылки на известные работы других авторов, как правило, дополнены фамилией первого автора, взятой в круглые скобки.

### **Содержание диссертационной работы**

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели работы и положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит обзор литературы по теме диссертации.

Главы 2, 3, 4, 5 и 6 содержат оригинальные материалы, полученные диссертантом.

В главе 1 рассмотрены источники помех и шумов при приеме радиосигналов сверхнизкой частоты в морской воде. На глубине до 50-100 метров основной причиной, мешающей приему сигнала, являются атмосферные помехи, образующиеся в результате грозовой активности атмосферы. При распространении вглубь океана 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. Увеличение предельной глубины на 20 м на частоте 100 Гц потребует увеличения мощности передатчика в 5 раз, что может оказаться технически неосуществимо. На глубине более 100 метров атмосферные помехи можно не учитывать. 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. Поскольку активная часть датчика отнесена от источника помехи на расстояние порядка 300 метров, это дает возможность ослабить и индустриальную помеху. Однако такой длинный датчик создает большие проблемы при его эксплуатации. Малогабаритные электродные датчики не обеспечивают необходимой чувствительности из-за малой величины полезного сигнала при большом собственном шуме в движении. Этот шум связан с электрохимическими процессами, протекающими на поверхности электродов даже из химически стойких к коррозии металлов. У таких металлов это процесс формирования двойного электрического слоя на поверхности электродов, процесс роста окисной пленки, связанный с адсорбцией кислорода. У химически нестойких металлов это процесс электрохимической коррозии. У безэлектродных

датчиков (магнитоиндукционного, трансформаторного) при буксировке возникает сильная вибрационная помеха, которая делает их практически непригодными для применения на движущемся объекте. Указанные недостатки известных датчиков приводят к необходимости исследования причин возникновения шумов и помех и разработке методов борьбы с ними.

Глава 2 написана на основе работ [1-7; 47]. В ней представлены результаты экспериментальных исследований общезначимого характера: 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. Измерения электродного шума выполнены с использованием высокочувствительных усилителей Lock-in-amplifier model 124A, фирмы PAR (США) с малошумящим входным трансформатором model 190, Precision ac Amplifier type 452 фирмы BROOKDEAL (Великобритания), спектранализатора СК-74, аналого-цифрового преобразователя E20-10 фирмы L-Card (Россия) и компьютера. Поскольку измеряемые напряжения достигали долей нановольта, были приняты меры по устранению помех и наводок для обеспечения достоверных результатов измерения. Измерительный усилитель обеспечивал точность измерения напряжения шума не хуже 5%, точность измерения активной составляющей импеданса  $R$  составляла около 10%.

В разделе 2.1 приведены результаты лабораторных исследований шума электродов из различных материалов в отсутствие движения. Исследования показали, что при небольшой длительности выдержки электродов в соленой воде (менее 3-5 суток) электродный шум имеет импульсную составляющую, природа возникновения которой не установлена. Она серьезно влияет на возможность приема сигнала на электродный датчик. Исследован шум электродов из нержавеющей стали. Амплитуда шумовых импульсов на 1-2 порядка превышала среднеквадратическое значение  $\sigma$  напряжения «гладкого» шума между импульсами. При этом функция распределения электродного шума значительно отличалась от гауссовской и имела отрицательный эксцесс (рисунок 1). По мере увеличения времени выдержки интервал между импульсами становился все больше, а закон распределения электродного шума приближался к нормальному. Амплитуда импульсов также уменьшилась в 3...50 раз, оставаясь при этом в 50...180 раз больше, чем среднеквадратическое значение  $\sigma$  напряжения «гладкого» шума между импульсами. Увеличение площади электродов приводило к уменьшению амплитуды импульсов (в 10...90 раз при увеличении площади в 63 раза), величина  $\sigma$  «гладкого» шума также уменьшалась. Время, необходимое для исчезновения импульсов, уменьшалось, если электроды находились в замкну-

том состоянии. При повреждении поверхности электродов импульсы появляются снова и полностью исчезают более чем через сутки. Также после каждого просушивания электродов на воздухе требуется не менее 6 часов для устранения импульсного шума. Спектральный анализ импульсного шума показал, что после выдержки в электролите в течение 3 суток импульсы дают существенный вклад в спектральную плотность шума только на очень низких частотах. Увеличение спектральной плотности шумового напряжения за счет импульсов у электродов из нержавеющей стали площадью  $35 \text{ мм}^2$  на частоте  $f = 60 \text{ Гц}$  составило 1,5 дБ, на частоте  $f = 5 \text{ Гц}$  оно достигло 7,5 дБ, а на  $f = 3 \text{ Гц}$  - 12,5 дБ. Уменьшение времени выдержки до 12 часов привело к росту спектральной плотности шума на 10...13 дБ на частотах ниже 70 Гц. Наличие шумовых импульсов отмечено и у других металлов. В экспериментах установлено, что на величину импульсного электродного шума существенное влияние оказывает состояние поверхности электродов, в частности, ее шероховатость. Наличие острых кромок увеличивают электродный шум даже у электродов из тантала, который является одним из лучших исследованных материалов по величине электродного шума. Не рекомендуется применение покрытий даже из благородных металлов, поскольку они разрушаются под действием морской воды и имеют более высокий уровень шума, чем рекомендованные тантал, титан, нержавеющая сталь. Установлено, что кроме теплового шума, даже длительно выдержанные в элек-

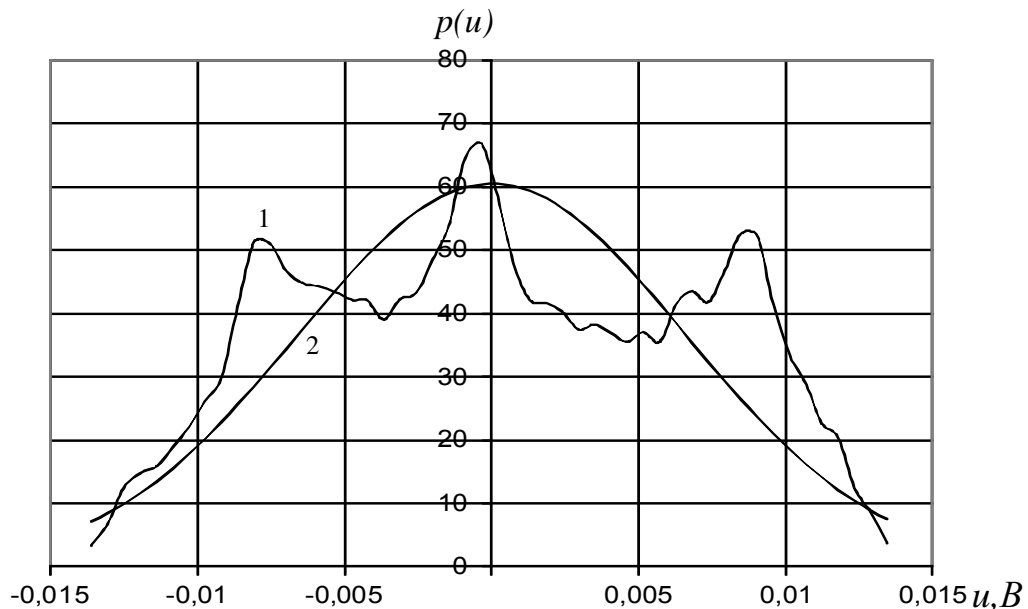


Рисунок 1 - Функция распределения шума электродов из нержавеющей стали с  $S = 35 \text{ мм}^2$ , выдержанных в электролите  $t = 72$  часа (1), и расчетная гауссовская функция распределения (2) при той же дисперсии

тролите электроды в отсутствие движения имеют электрохимический избыточный шум, который у корродирующих металлов (латунь, бронза) на частотах - ниже 30 Гц в десятки раз по напряжению превышает тепловой. У

некорродирующих танталовых электродов на частотах в единицы герц напряжение избыточного шума больше теплового в 2...3 раза (рисунок 2). На частотах выше 30 Гц электродный шум близок к тепловому.

В отсутствие движения шум имеет спектр типа  $1/f^\alpha$  ( $\alpha \approx 1...1,5$ ). Как избыточный, так и тепловой шум с ростом площади электродов  $S$  уменьшаются практически пропорционально  $\sqrt{S}$ , а их отношение изменяется мало.

В разделе 2.2 изложены результаты экспериментального исследования зависимости составляющих электродного импеданса (активного сопротивления и емкости между электродами, находящимися в морской воде) от времени выдержки в электролите (до 4000 часов) и частоты. Измерение параметров импеданса  $R$  и  $C$  выполнено с помощью моста переменного тока Р568 с индикатором Ф550, который после доработки позволил выполнить измерения на частоте 10 Гц с точностью 10%. На частотах выше 20 Гц точность составляла 1...2%. Активное сопротивление определяет величину теплового шума электродного датчика и его предельную чувствительность. Емкость оказывает влияние на частотную характеристику входной цепи приемного устройства. Обе эти составляющие определяют условия оптимального согласования датчика с приемным устройством, поэтому важна их стабильность во времени. По результатам исследования сделан вывод о том, что с точки зрения стабильности составляющих импеданса и достижения минимума тепловых шумов наиболее пригодными для изготовления электродов являются тантал, ниобий, никель, титан, золото, нержавеющая сталь.

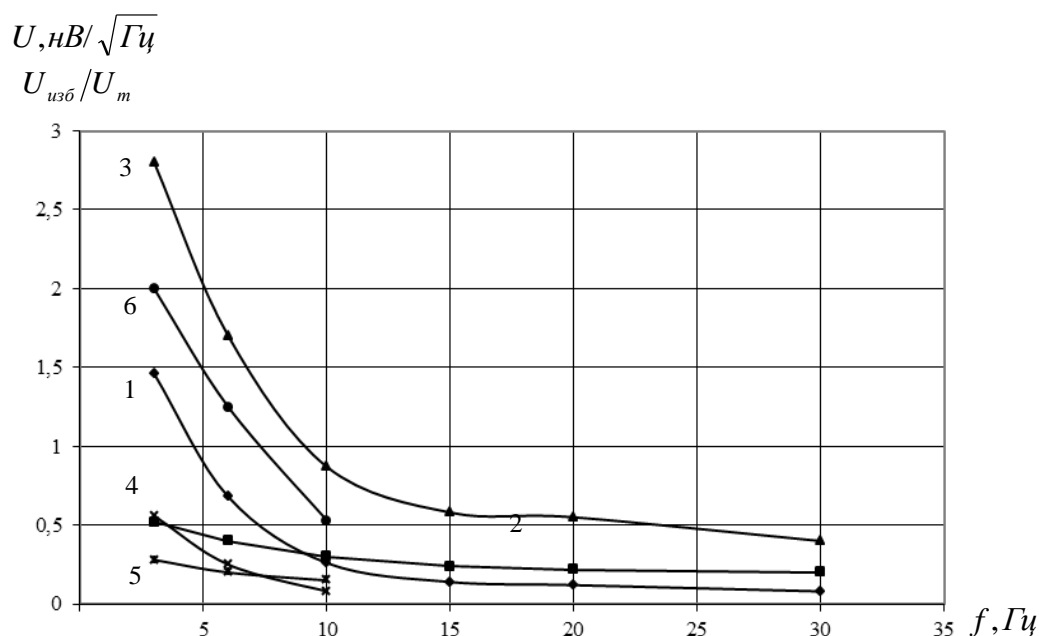


Рисунок 2 - Спектральные характеристики шумового напряжения танталовых электродов в неподвижном электролите после 4 суток выдержки. Кривые 1,4 – избыточный шум; 2,5 – тепловой шум; 3,6 – отношение избыточный/тепловой; 1,2,3 – электроды площадью  $54 \text{ см}^2$ ; 4,5,6 –  $360 \text{ см}^2$ .

В разделе 2.3 экспериментально исследовано влияние загрязнения поверхности электродов нефтепродуктами на параметры импеданса. Установлено, что попадание нефтепродуктов на сухую поверхность электродов увеличивает их сопротивление в 5 раз и уменьшает емкость в 3 раза, что приводит к увеличению теплового шума и рассогласованию электродного датчика с приемным устройством.

В разделе 2.4 рассмотрено трансформаторное согласование электродного датчика с приемным устройством. Анализ эквивалентной схемы входной цепи приемника (рисунок 3), включающей шумовые источники его пер-

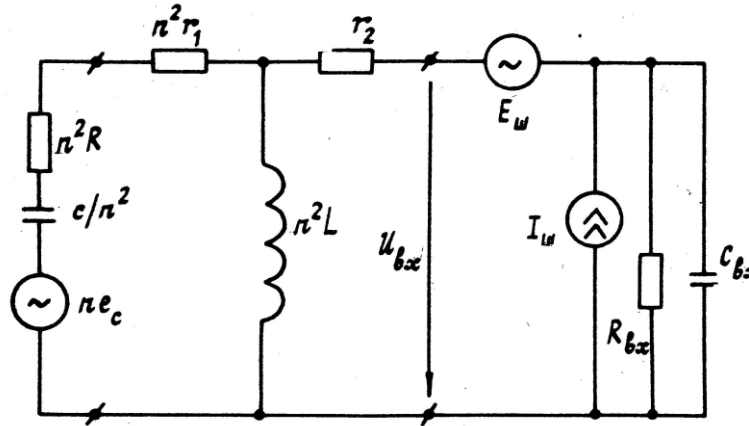


Рисунок 3 - Эквивалентная схема входной цепи приемного устройства

вого каскада, позволил определить максимальное значение предельной чувствительности  $E_{\min}$  и коэффициент трансформации  $n_{\text{опт}}$ , при котором оно достигается, как при настройке входной цепи в резонанс на частоту принимаемого сигнала, так и при нерезонансном согласовании (частота сигнала выше резонансной частоты входной цепи). В частности, для нерезонансного согласования показано, что

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{R_{i\text{опт}}}{R}} \left( \sqrt[4]{F_{\text{тр}}^2 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$E_{\min} = \frac{1}{d} \sqrt{4kTR \left[ F_{\text{тр}} + (F_{\text{усмин}} - 1) \sqrt{F_{\text{тр}}^2 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}} \right]}, \quad (2)$$

где  $R$  - активная составляющая импеданса датчика;  $R_{i\text{опт}}$  - оптимальное значение сопротивления источника сигнала для первого каскада приемника, при котором его коэффициент шума достигает минимального значения  $F_{\text{усмин}}$ ;  $F_{\text{тр}}$  - коэффициент шума согласующего трансформатора;  $\tau = RC$  - постоянная времени датчика, которая определяется материалом электродов;  $d$  - расстояние между электродами по направлению вектора напряженности

электрического поля,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $\omega$  - угловая частота.

В разделе 2.5 выполнена оптимизация на минимум коэффициента шума конструктивных параметров входного трансформатора на броневом и кольцевом сердечнике, осуществляющего согласование электродного датчика с малошумящим усилителем приемного устройства.

В разделе 2.6 рассмотрено бестрансформаторное согласование электродного датчика с приемным устройством при использовании в предварительном усилителе параллельно включенных транзисторов. Показано, что такое согласование требует нереально большого числа транзисторов, поэтому не рекомендовано к применению. Практически единственно приемлемым способом является трансформаторное согласование.

В разделе 2.7 определена предельная чувствительность приемного устройства с электродным датчиком при учете только теплового шума для разных материалов электродов, разных способов согласования и разных шумовых параметрах согласующего трансформатора и предварительного усилителя. Она составляет  $0,15 \dots 0,2 \text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 90 Гц для датчика с расстоянием 1 м между электродами. Рекомендовано нерезонансное трансформаторное согласование электродного датчика с приемным устройством, поскольку оно менее чувствительно к изменению импедансных характеристик датчика, чем резонансное.

В главе 3, написанной на основании работ [8-15; 28-30; 46], представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований электродных шумов при движении жидкости относительно электродов, имеющие общезначимый характер.

В разделе 3.1 представлены результаты лабораторных исследований напряжения шума для электродов из разных материалов. Экспериментальные исследования выполнены на специально созданной лабораторной установке, которая содержит герметичную стеклянную ванну, на крышке которой устанавливались исследуемые электроды. Раствор NaCl приводился в движение вращающимся активатором с радиальными ребрами, поэтому поток, набегаящий на электроды, был турбулизован. Ванна с электродами размещена в многослойном стальном экране, обеспечивающем надежную защиту от внешних магнитных и электрических полей. Фотоэлектрический датчик скорости вращения активатора позволяет вести контроль скорости движения жидкости с точностью не хуже 5%. Импульсы с его выхода подаются на частотный детектор, при этом флуктуации выходного напряжения на выходе частотного детектора соответствуют флуктуациям скорости жидкости у поверхности электродов. В диапазоне 3...30 Гц с помощью спектроанализатора СК-72 измерены спектры электродного шума и пульсаций скорости жидкости. Точность измерения спектров не хуже 5%. Установлено, что при дви-

жении жидкости шум у корродирующих электродов на несколько порядков, а у некорродирующих – в несколько раз превышает тепловой. На величину электродного шума оказывает влияние время выдержки электродов в электролите и шероховатость поверхности. Электроды из медных сплавов непригодны для использования в высокочувствительных измерительных системах, так как имеют большую нестабильность импеданса и большие электродные шумы. Электроды из ниобия и никеля, несмотря на низкое значение  $R$  и большое значение  $C$ , имеют значительный шум при движении жидкости, поэтому также не могут применяться в электродных датчиках. Электроды с покрытием из золота и палладия по меди также имели значительный уровень шума. Наименьшими значениями шума как в отсутствие движения, так и при движении жидкости, обладают электроды из титана, тантала и нержавеющей стали, которые и рекомендуются для применения в электродных датчиках. У некорродирующих электродов выявлена связь шумового напряжения с флуктуациями скорости потока жидкости. Спектр скорости жидкости выявил неравномерность вращения активатора. Он имеет пики на частотах 2,9 Гц и 5,1 Гц и на кратных им частотах. Спектр напряжения с пары танталовых электродов площадью  $78 \text{ мм}^2$ , расположенных в ванне установки, имеет такую же гребенчатую структуру, как и спектр пульсаций скорости, с пиками на тех же частотах. При этом в полосе 3...10 Гц напряжения, снимаемые одновременно с двух разных пар электродов, расположенных диаметрально противоположно, коррелированы с коэффициентом корреляции 0,9, а электродное напряжение имеет коэффициент корреляции более 0,7 с флуктуациями скорости потока жидкости. Это доказывает связь электродного напряжения с пульсациями скорости жидкости. На рисунке 4 показаны спектры напряжения шума титановых электродов разной площади при скорости потока жидкости 0; 2,1 и 3,5 м/с. Спектры измерены в диапазоне частот 30...200 Гц, где пульсации скорости жидкости, вызванные неравномерностью вращения, не проявляются. На частотах ниже 100 Гц движение жидкости заметно увеличивает напряжение электродного шума, что объясняется значительной турбулизацией жидкости активатором. На частоте 30 Гц это увеличение достигает порядка. Увеличение скорости потока приводит к росту электродного шума. Спектральная плотность шумового напряжения пропорциональна  $f^{-\alpha}$ , где  $\alpha \approx 1,5$ . Проведено исследование, доказавшее связь электродного шума с турбулентностью потока. Перед парой электродов располагалась поворотная преграда, сечение которой имело вид вытянутого овала. При движении жидкости со скоростью 1,7 м/с напряжение шума возросло в 1,8 раза в случае поперечного расположения большой оси овала по отношению к вектору скорости по сравнению с продольным ее положением. Увеличение скорости потока в экспериментах приводит к росту электродного шума, который объясняется увеличением флуктуационной

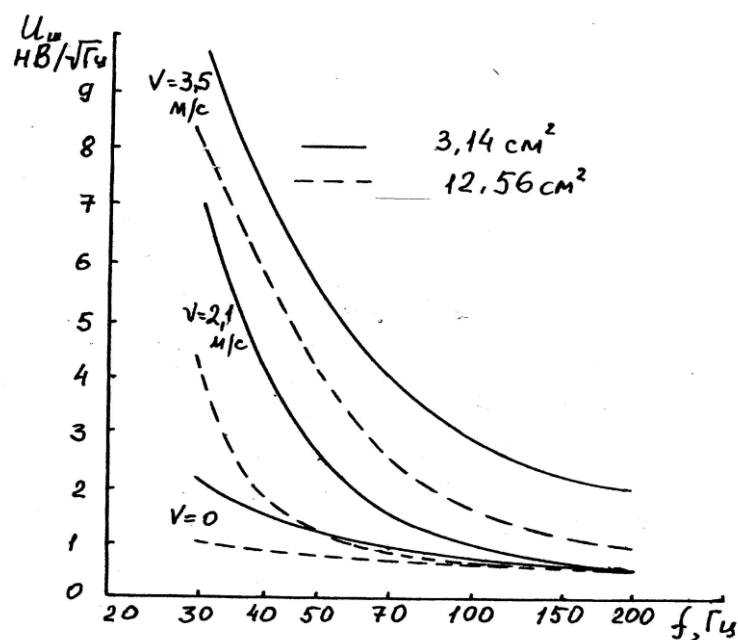


Рисунок 4 - Спектры электродного шума титановых электродов при движении жидкости. Время выдержки в электролите - 3 суток

составляющей скорости потока в результате увеличения энергии турбулентных вихрей. Обнаружена зависимость величины шумового напряжения от концентрации электролита. В диапазоне концентраций  $S$  от 2,9 г/л до 35 г/л она аппроксимируется степенной функцией  $U/U_0 = 7,8S^{-0,71}$ , где  $U_0$  - электродное шумовое напряжение при  $S = 18$  г/л. Установлено, что напряжение электродного шума движения обратно пропорционально квадратному корню из площади электрода.

В разделе 3.2 приведены результаты лабораторного эксперимента на специально созданной установке (рисунок 5). Выполнены более точные исследования зависимости электродного шума от пульсаций скорости жидкости. В стальном ящике 1, являющемся магнито- и электростатическим экраном, расположены второй стальной ящик-экран 2, установленный на его крышке электродвигатель 3, аккумулятор 4 питания электродвигателя и блок 5 регулирования скорости вращения электродвигателя, представляющий собой магазин переключаемых гасящих сопротивлений. В ящике 2 расположен центробежный насос 6, соединенный с электродвигателем 3 диэлектрическим валом 7, проходящим сквозь отверстие в крышке ящика 2. Он приводит в движение жидкость, в качестве которой использован водный раствор NaCl, имитирующий морскую воду. Также в ящике 2 расположена ячейка 8 с двумя имитирующими датчик электродами, предварительный усилитель 9 с собственным источником питания, резервуар 10 с жидкостью, датчик 11 скорости жидкости и его предварительный усилитель 12 с собственным источником питания. На рисунке 6 приведены измеренные усредненные спектры электродного шума (1), и напряжения датчика скорости (2)



при скорости жидкости 0,5 м/с и времени выдержки электродов в электролите (раствор NaCl, концентрация 4,5 г/л) 17 суток. Электроды: измерительный электрод из нержавеющей стали 12X18Н10Т диаметром 2,5 мм, электрод сравнения – из той же стали диаметром 9 мм. Спектры имеют гребенчатую структуру с пиками на гармониках основной частоты 46 Гц, величина которых на 10 дБ превышает уровень фонового шума. Спектральные характеристики напряжения с датчика скорости имеют пики на тех же частотах, что и спектральные характеристики электродного напряжения. Изменение частоты основной гармоники происходит во столько же раз, во сколько изменяется скорость движения жидкости. Это означает, что пульсации электродного напряжения обусловлены пульсациями скорости жидкости. Пик на частоте 85 Гц вызван проникновением помехи неизвестного происхождения, а пик на частоте 100 Гц обусловлен помехой на второй гармонике промышленной частоты. Измерена чувствительность электрода к пульсации скорости, которую можно оценить величиной

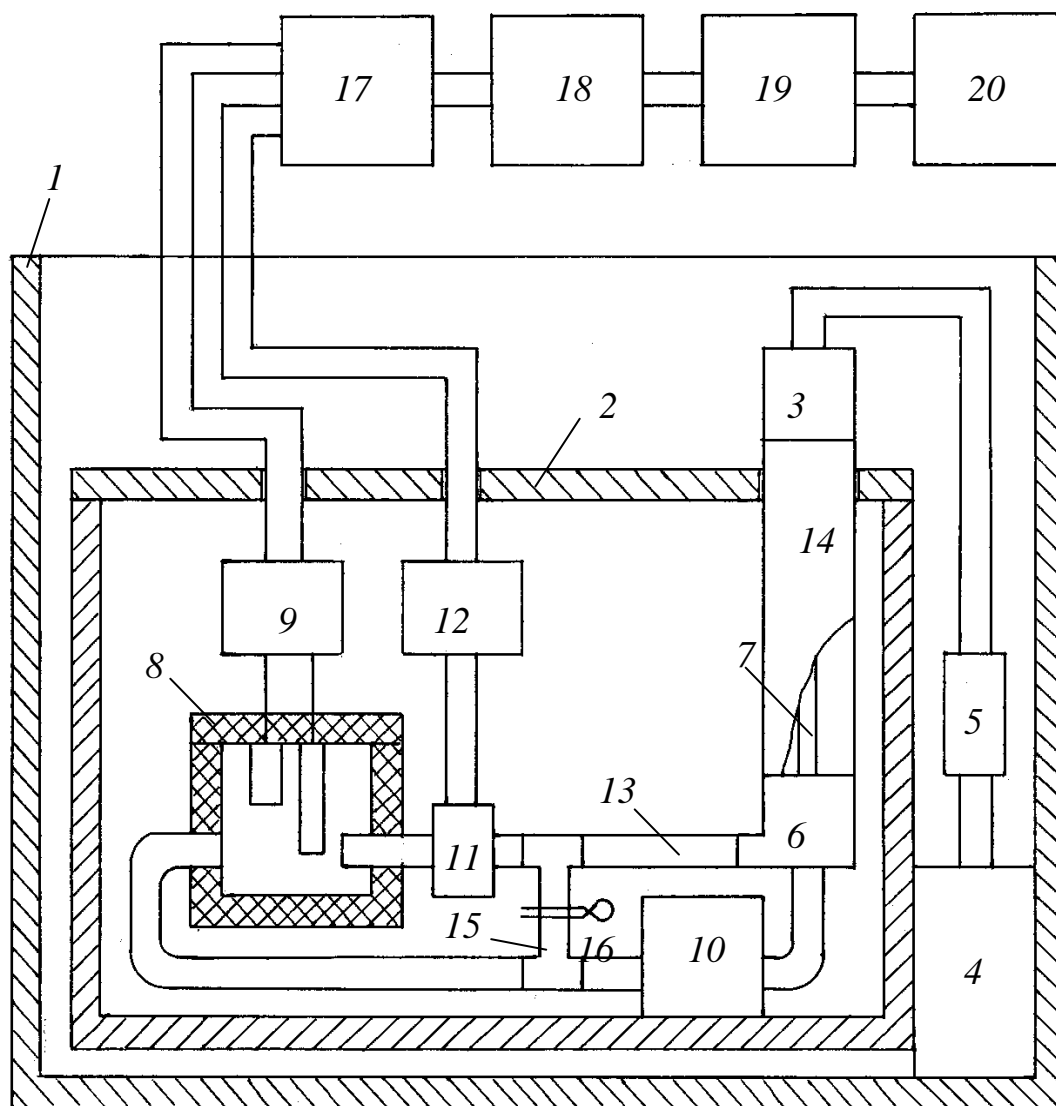


Рисунок 5 - Схема установки для измерения электродного шума

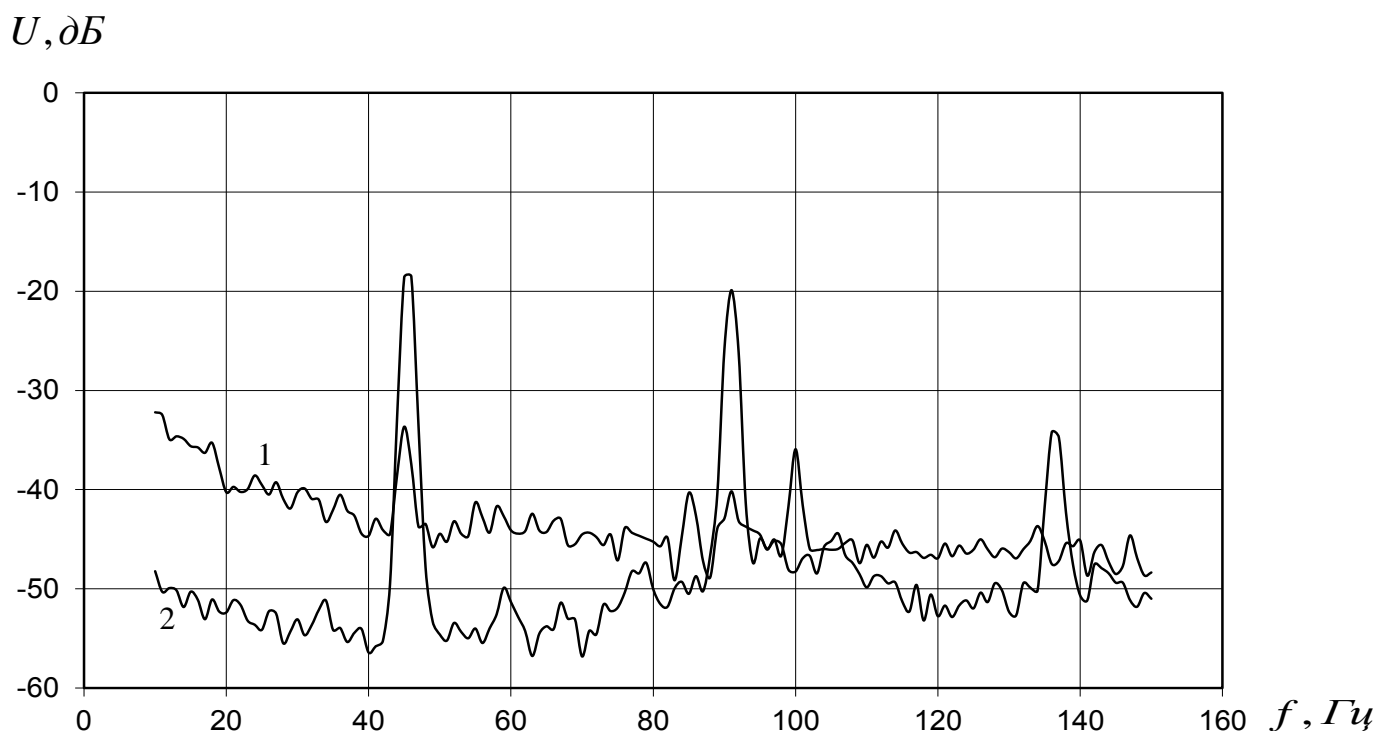


Рисунок 6 - Спектры электродного напряжения (1) и напряжения датчика скорости (2) при скорости жидкости 0,5 м/с после выдержки электродов в электролите (раствор NaCl с концентрацией 4,5 г/л) в течение 17 суток

$1,2 \cdot 10^{-6} \frac{B}{m/c}$ . По отношению высоты пиков спектральной характеристики электродного напряжения на частотах 46 и 92 Гц определена постоянная времени, характеризующая инерционность электрохимического процесса, ответственного за возникновение пульсаций электродного напряжения. Расчет дает значение  $\tau = 4,4$  мс. Это значит, что частотная характеристика электродного датчика по отношению к пульсациям скорости жидкости может считаться плоской только на частотах ниже 35 Гц. Более подробно исследована зависимость электродного шума от времени выдержки в электролите. Установлено, что движение жидкости со скоростью до 0,5 м/с увеличивает фоновый шум между пиками спектра на частотах меньше 40...50 Гц. Дальнейшее увеличение скорости мало влияет на величину фонового шума, так как скорость электрохимических реакций уже не ограничивается недостатком кислорода у поверхности электрода, а турбулентность при небольшой скорости жидкости не проявляется. Величина фонового шума в значительной степени зависит от времени выдержки датчика в жидкости. Его рост (рисунок 7) при движении жидкости со скоростью 0,5 м/с для измерительного электрода из нержавеющей стали диаметром 2,5 мм при концентрации электролита 4,5 г/л достигал 27 дБ на частоте 10 Гц и 6 дБ в диапазоне частот 60...100 Гц при суточной выдержке в электролите. На частотах

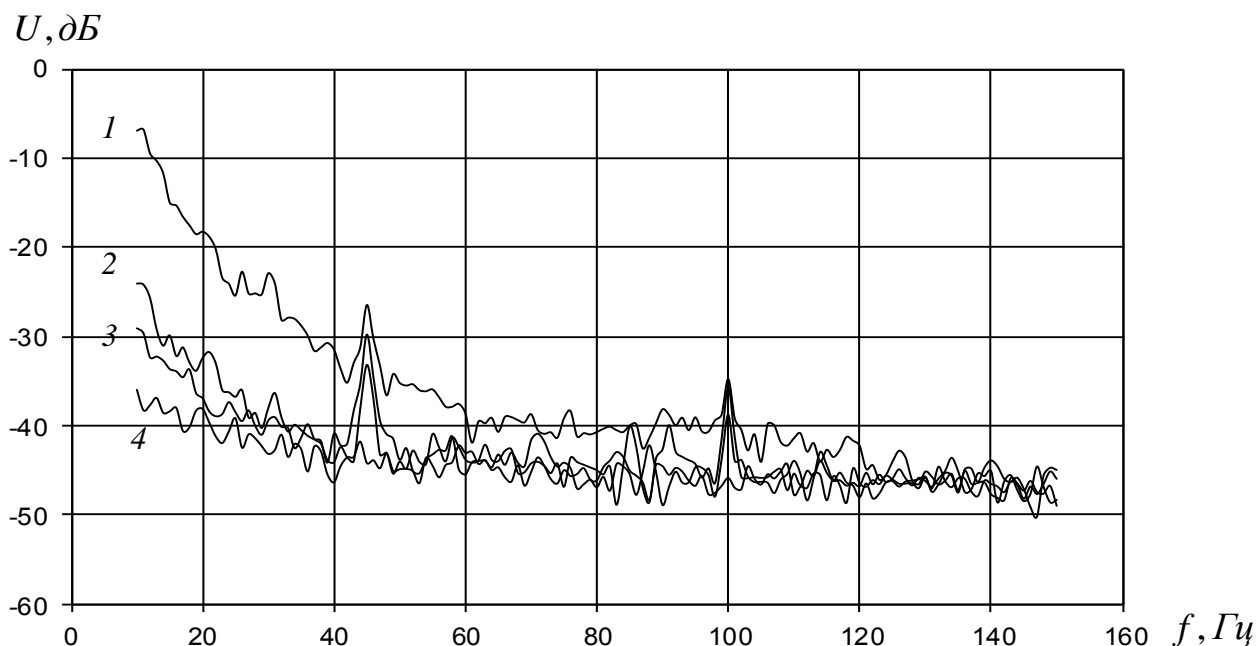


Рисунок 7 - Спектры электродного шума после выдержки в электролите с концентрацией 4,5 г/л в течение одних (1), двух (2) и 17 суток (3) при скорости жидкости 0,5 м/с. В отсутствие движения жидкости - (4)

выше 120 Гц рост фонового шума не наблюдался. При выдержке электродов в электролите в течение двух суток рост спектральной плотности фонового шума на частоте 10 Гц достигал 12 дБ по сравнению с отсутствием движения. На частотах выше 50 Гц фоновый шум практически не возрастал. После выдержки электродов в электролите в течение 17 суток электродный шум в отсутствие движения уменьшился на 2...3 дБ. Движение жидкости со скоростью 0,5 м/с увеличивало спектральную плотность электродного шума на 7 дБ на частоте 10 Гц, на частотах выше 40 Гц увеличение шума не отмечено. Таким образом, по мере увеличения выдержки датчика в электролите влияние движения жидкости на его фоновый шум уменьшается и проявляется на более низких частотах. Чувствительность датчика к пульсациям скорости тоже уменьшается, но фоновый шум уменьшается быстрее. Поэтому пик в спектре шумового напряжения датчика, определяющийся пульсацией скорости, становится заметнее. После включения насоса, приводящего жидкость в движение, наблюдается уменьшение спектральной плотности фонового шума более чем на порядок на частотах ниже 50 Гц в течение одной-двух минут. В первые часы выдержки электродов в электролите, а также при включении движения после того, как насос был выключен более часа, фоновое значение электродного шума велико и в некоторой степени маскирует указанные выше пики спектральной характеристики электродного шума, соответствующие пульсациям скорости жидкости. Фоновый шум уменьшается с ростом концентрации электролита и площади электродов. Подтверж-

дено установленное в разделе 3.1 уменьшение электродного шума при увеличении концентрации электролита и увеличении площади электродов. Чувствительность титановых электродов к пульсациям скорости жидкости оказалась на 3,5 дБ меньше, чем у стальных электродов. Это означает, что титан, как материал для электродов, предпочтительнее, так как имеет меньший уровень шума движения. Измерения, проведенные на специально созданной установке, показали, что воздействие пульсаций давления на разность потенциалов между электродами отсутствует.

В разделе 3.3 выполнено экспериментальное исследование, в котором измерялось напряжение между двумя электродами, находящимися в электролите. Один из них совершал гармонические колебания. При этом между электродами возникала разность потенциалов (напряжение поляризации). Измерения производились на специально созданной установке, схема которой показана на рисунке 8. Установка содержит стальной экранирующий корпус 1 с укрепленным на нем динамическим громкоговорителем 2, диффузор которого посредством диэлектрического штока 3 соединен с подвижным исследуемым электродом 4, имеющим форму цилиндра с закругленным концом. Подвижный электрод 4, а также неподвижный 5, располагались в стакане с электролитом 6, при этом нерабочая поверхность неподвижного электрода (в области границы раздела электролит - воздух) изолирована нитроокраской. Подвижный электрод (диаметр 8 мм, общая длина - 22 мм) выполнен из нержавеющей стали X18H9T и отполирован. Неподвижный электрод выполнен в виде цилиндра диаметром 10 мм при длине рабочей части 25 мм. Для уменьшения влияния постоянного магнитного поля на результаты измерений магнитная система громкоговорителя заключена в стальной магнитоэкранный экран, а вся установка размещена внутри второго экранирующего корпуса, выполненного, как и первый, из стали толщиной 10 мм. Установка снабжена также датчиком скорости 7 электрода, состоящим из двух концентрических металлических колец, внутреннее из которых установлено на штоке. Кольца образуют цилиндрический конденсатор, емкость которого линейно зависит от перемещения штока в пределах единиц миллиметров. Через датчик скорости ко входу усилителя 8 с входным сопротивлением  $R_{вх}$  подключена гальваническая батарея 9. При колебаниях штока 3 изменяется емкость  $C$  конденсатора, возбуждая в его цепи переменный электрический ток. Входное напряжение усилителя 8 пропорционально скорости движения электрода. Усилитель 8 выполнен в виде повторителя напряжения и обладает нулевым фазовым сдвигом и постоянным коэффициентом передачи во всем рабочем диапазоне частот. Подвижный электрод 4 подключен ко входу предварительного усилителя 10, выход которого через измерительный усилитель 11 с режекторным фильтром на частоту 50 Гц подключен к спектроанализатору 12. Динамический громкоговоритель 2 подключен к звуковому генератору 13 через усилитель мощности

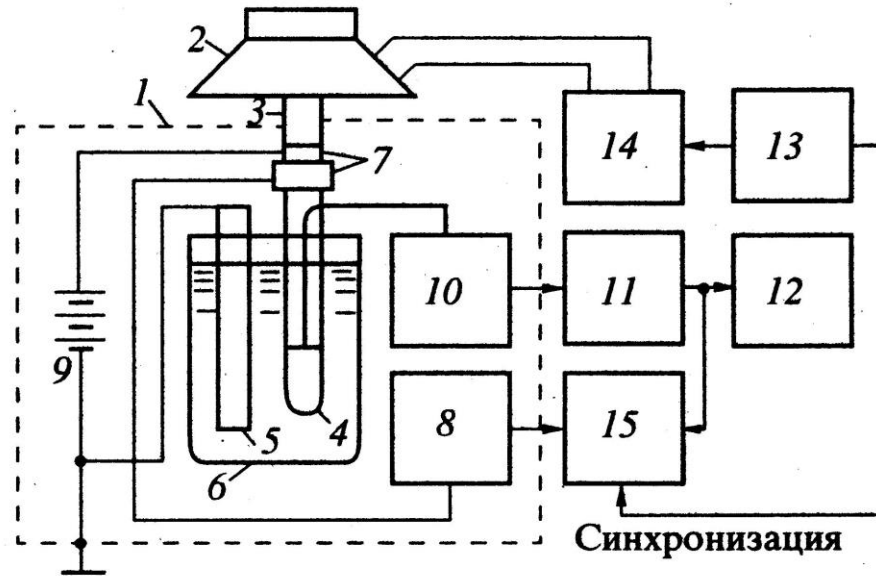


Рисунок 8 - Схема установки для исследования поляризации электрода

14. Выходы усилителей 8 и 11 подключены ко входам двухлучевого осциллографа 15, вход синхронизации которого соединен со звуковым генератором 13. Установка амплитуды колебаний штока производилась по шкале визуально через лупу с точностью не хуже 10%. В результате проведенных исследований установлено следующее:

- а) возникающее при колебаниях электрода поляризационное напряжение  $U_c$  имеет вид зашумленного гармонического колебания с флуктуирующей амплитудой и частотой, равной частоте механических колебаний;
- б) напряжение  $U_c$  практически синфазно с гармонически изменяющейся скоростью движения электрода;
- в) зависимости напряжения  $U_c$  от частоты колебаний, а, следовательно, от скорости движения электрода, близки к линейным. Поляризационное напряжение возрастает при увеличении частоты и уменьшении солёности электролита  $S$ .

На рисунке 9 показаны зависимости напряжения поляризации движущегося электрода от частоты колебаний при разной концентрации электролита. Линейность графиков свидетельствует о линейной связи напряжения поляризации и скорости движения электрода. Попарное сравнение результатов опытов, не разделенных значительным временным интервалом (1 и 2, 3 и 4), показало, что напряжение поляризации  $U_{II}$  при разбавлении электролита в 2 раза увеличивается тоже приблизительно в 2 раза. Эти результаты подтверждают установленную в разделе 3.2 связь шума движения именно с пульсациями скорости жидкости.

В главе 4, написанной на основе результатов главы 3 и работ [13-17; 31-35], выполнено теоретическое исследование общезначимого характера

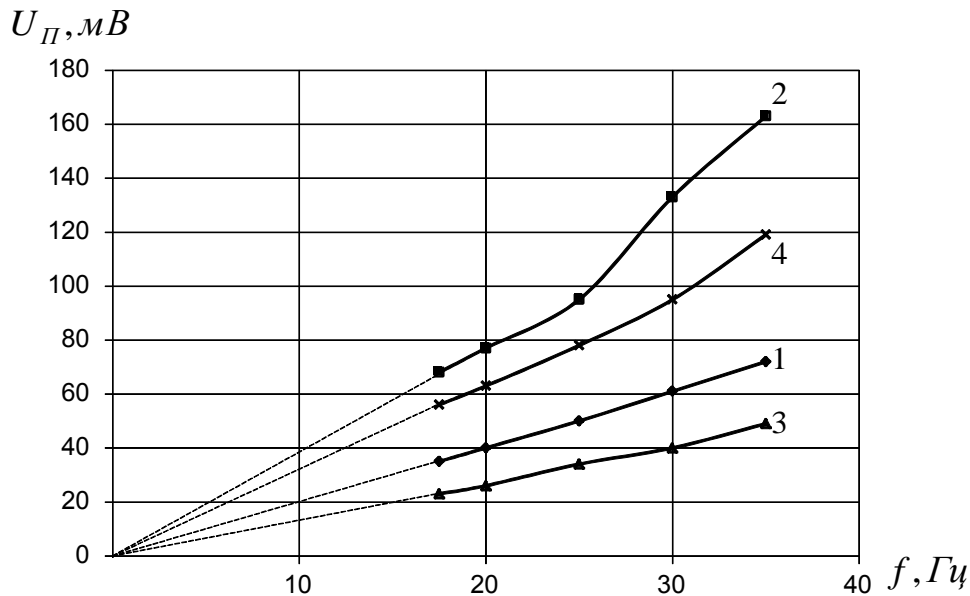


Рисунок 9 - Зависимость напряжения поляризации  $U_{П}$  от частоты колебаний при разной концентрации электролита. 1- 20 г/л; 2, 3 – 10 г/л; 4 – 5г/л

связи пульсаций электродного напряжения с пульсациями скорости жидкости, в результате которого созданы две теоретические модели шума движения. Также создана теория вращающегося электрода и исследовано применение обтекателей для уменьшения шума движения.

В разделе 4.1 выполнено исследование пульсаций электродного потенциала, вызванное модуляцией толщины диффузионного слоя на границе электрод-электролит при пульсациях скорости жидкости, основанное на общепринятой теории конвективной диффузии. Поверхность электрода, погруженного в морскую воду, адсорбирует атомы растворенного кислорода таким образом, что на поверхности электрода появляются отрицательно заряженные ионы кислорода. При этом потенциал металла смещается в положительную сторону относительно электролита. В растворе у поверхности электрода образуется избыточный положительный заряд из ионов растворенной соли. Таким образом, на поверхности электрода формируется двойной электрический слой в виде конденсатора с потерями, одна из обкладок которого жидкостная. Потенциал электрода относительно электролита определяется отношением заряда поверхности  $Q$  к емкости  $C_D$  двойного электрического слоя. Толщина  $\delta_0$  пограничного слоя на пластине зависит от скорости набегающего потока  $V_0$ .

$$\delta_0 \approx 3\sqrt{\frac{\nu x}{V}}. \quad (3)$$

Здесь  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости,  $x$  - расстояние от переднего края пластины. Непосредственно у поверхности электрода находится диф-

фузионный слой, толщиной 0,1 от толщины пограничного слоя, из которого и происходит диффузия кислорода к электроду. Скорость осаждения кислорода на поверхность электрода пропорциональна градиенту его концентрации  $dc/dy$  в диффузионном слое, следовательно, обратно пропорциональна его толщине, зависящей от скорости (закон Фика):

$$\frac{dN}{dt} = N_A D L a \frac{dc}{dy}, \quad (4)$$

где  $dN$  - число атомов осажденного кислорода за время  $dt$ ,  $N_A$  - число Авогадро,  $D$  - коэффициент диффузии кислорода,  $L$  - длина и  $a$  - ширина электрода. В пограничном слое скорость жидкости линейно увеличивается вдоль оси  $y$ , перпендикулярной к поверхности, от нуля до значения  $V_0$  на внешней границе  $\delta_0$  пограничного слоя. Пусть в момент  $t=0$  скорость потока, т.е. скорость жидкости на внешней границе пограничного слоя, скачком уменьшается до нуля. На длине  $dx$  на пограничный слой действуют тормозящие силы, величина которых зависит от градиента скорости  $u$  каждой границы

$$dF = \eta a \frac{dV}{dy} dx, \quad (5)$$

где  $\eta = \nu\rho$  - динамическая вязкость жидкости,  $\rho$  - плотность жидкости, под действием которых профиль скорости в пограничном слое приобретает параболическую форму

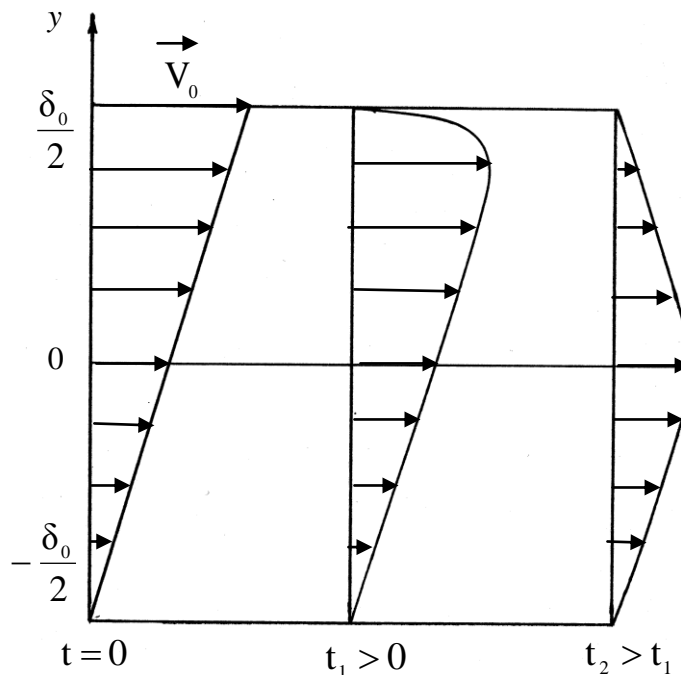


Рисунок 10 - Эпюры вектора скорости жидкости в пограничном слое при скачкообразном уменьшении скорости потока до нуля в разные моменты времени  $t$

$$V(y) = V_{\text{макс}} \left(1 - \frac{4y^2}{\delta_0^2}\right), \quad (6)$$

где максимальное значение скорости при  $y = 0$  равно  $V_{\text{макс}} = 0,5V_0$ .  
Уравнение динамики для всего пограничного слоя имеет вид

$$m_{\text{экв}} \frac{d\bar{V}}{dt} + F = 0, \quad (7)$$

где  $m_{\text{экв}}$  - эквивалентная масса всего пограничного слоя на длине электрода,  $\bar{V}$  - среднее энергетическое значение скорости пограничного слоя. Зная профиль скорости  $V(y)$  и исходя из кинетической энергии пограничного слоя, находим, что вначале  $\bar{V} = 0,365V_0$ , а

$$m_{\text{экв}} = 2\rho\alpha L\sqrt{\nu L/V_0}. \quad (8)$$

Тормозящую силу  $F$  находим интегрированием уравнения (5). Теперь уравнение (7) можно записать в виде

$$\frac{d\bar{V}}{dt} + \frac{4V_0}{3L}\bar{V} = 0. \quad (9)$$

$$\tau_1 = 3L/4V_0 \quad (10)$$

$\tau_1$  - постоянная времени установления пограничного и диффузионного слоя. Заряд поверхности электрода через время  $t$  после начала адсорбции определяется двойным интегралом

$$Q \approx 6,7FDac_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_0^t \int_0^L \frac{dtdx}{\sqrt{x}}, \quad (11)$$

где  $F = eN_A$  - число Фарадея. Пусть скорость потока в момент  $t = 0$  скачкообразно возрастает на величину  $\Delta V_0 \ll V_0$ . Скорость течения в середине пограничного слоя возрастает, толщина его уменьшается, а градиент концентрации кислорода увеличивается. С учетом инерции процессов

$$Q \approx 6,7FDac_0 \sqrt{\frac{V_0}{\nu}} \int_0^t \int_0^L \frac{1 + \frac{\Delta V_0}{V_0}(1 - e^{-t/\tau_1})}{\sqrt{x}} dx dt. \quad (12)$$

Интегрируя (12), получаем два слагаемых. Первое - медленно меняющаяся величина, обусловленная постоянным ростом заряда электрода вследствие диффузии. Второе слагаемое обусловлено скачком скорости, обозначим его  $\Delta Q$ . Изменение потенциала электрода при скачке скорости  $\Delta V_0$  составляет

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta Q}{C_D} = -\frac{13,4FDLac_0\Delta V_0\tau_1}{C_D\sqrt{LV_0\nu}}(1 - e^{-t/\tau_1}) = -\varphi_m(1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (13)$$



Здесь  $C_D = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_0}{\delta_D}$  - емкость двойного электрического слоя,  $\delta_D \approx \frac{3}{\sqrt{c_1}} \cdot 10^{-10}$  м - толщина двойного слоя,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - электрическая постоянная,  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость между обкладками двойного слоя.

С течением времени скорость адсорбции кислорода уменьшается. На поверхности электрода могут одновременно существовать как области без адсорбированного кислорода, так и области, покрытые адсорбированным кислородом и окисной пленкой. С учетом этого формула приобретает вид

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta Q}{C_D} = -\frac{3 \cdot 10^{-9} F D c_0}{\varepsilon\varepsilon_0} \sqrt{\frac{L}{c_1 V_0}} \cdot \frac{\Delta V_0}{V_0} (1 - e^{-t/\tau_1})(k_1(t) + e^{-t/\tau_2}(1 - k_1(t))). \quad (14)$$

Коэффициент диффузии кислорода  $D = 2,6 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Толщина диффузионного слоя  $\delta$  для электрода с длиной  $L = 2,5$  мм при скорости потока  $V_0 = 0,5$  м/с имеет порядок  $10^{-5}$  м. Постоянная времени установления диффузионного слоя  $\tau_1 = 3L/4V_0$ . Постоянная времени  $\tau_2$  учитывает замедление процесса адсорбции кислорода. Коэффициент  $k_1(t)$  зависит от материала электрода и учитывает рост окисной пленки.

В разделе 4.2 исследовано влияние деформации двойного электрического слоя на границе электрод-электролит набегающим потоком электролита, основанное на современной теории двойного слоя. При движении жидкости на передней границе электрода происходит замена сформированной диффузной части жидкостной обкладки двойного слоя электролитом, в связи с чем поверхность имеет нескомпенсированный заряд плотной части двойного слоя, а электрод приобретает потенциал относительно жидкости. Пусть течение направлено вдоль плоской поверхности электрода длиной  $L$ , а поперечный профиль скорости соответствует выражению

$$V_Y = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq z \leq z_1 \\ a(z - z_1) & \text{при } z > z_1 \end{cases} \quad (15)$$

Поскольку часть двойного слоя, находящаяся от электрода дальше плоскости скольжения, то есть для которой  $z > z_1$ , участвует в движении, то существует поверхностный ток, который определяется формулой

$$i_Y = \int_{z_1}^{\infty} \int_0^L j_Y dz dx = L \int_{z_1}^{\infty} V(z) \rho(z) dz = La\varepsilon_0 \varepsilon \varphi_0 e^{-z_1/d}. \quad (16)$$

Также существует ток, направленный перпендикулярно к поверхности электрода вблизи его передней границы

$$i_z = \int_s \sigma E ds = \int_s \frac{\sigma dQ}{2\varepsilon_0 \varepsilon ds} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0 \varepsilon} Q. \quad (17)$$

В состоянии равновесия должно удовлетворяться равенство  $i_y = i_z$ . Отсюда находим избыточный краевой заряд внутренней обкладки двойного слоя

$$Q = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{\sigma} i_y = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{\sigma} La\varepsilon_0\varepsilon\zeta. \quad (18)$$

То есть

$$Q = \varepsilon_0\varepsilon\tau La\zeta,$$

Здесь  $\zeta = \varphi_0 e^{-z_1/d}$  электрокинетический потенциал, зависящий от свойств окиси на поверхности электрода,  $\tau$  - время релаксации двойного слоя. На поверхности электрода находится большое число микровыступов, высота которых больше толщины двойного слоя, но меньше толщины пограничного слоя. Избыточный заряд формируется, в основном, на них. Скачок потенциала электрода  $\Delta\varphi$ , вызванный скачком скорости потока  $\Delta V_0$

$$\Delta\varphi \approx \Delta V_0 \cdot (\varphi)'_{v_0} = \frac{1333n\varepsilon\varepsilon_0\tau L\zeta V_0^{0.5}}{C_{уд}\sqrt{l}} \cdot \Delta V_0 \quad (19)$$

Здесь  $n$  - число микровыступов на  $1 \text{ м}^2$ ,  $L$  - размер микровыступа.

Пульсации потенциала электрода обусловлены действием обоих описанных механизмов, но в первые несколько суток первый превалирует.

Качественное и количественное результатов экспериментов с расчетом по полученным формулам показало хорошее совпадение. Расчетное значение постоянной времени  $\tau_1$  составило 3,8 мс, а определенное по результатам эксперимента - 4,4 мс. В эксперименте увеличение концентрации электролита в 6 раз с приводило к уменьшению пика в спектре электродного шума на частоте пульсации скорости в 2,05 раза. Расчет дает значение 2,45 раза. Расчет величины шумового напряжения для условий эксперимента дает значение напряжения шума от нескольких мкВ в начале измерений до нескольких нВ через несколько суток. Измеренные значения совпадают по порядку величины.

В разделе 4.3 теоретически и экспериментально показана возможность уменьшения в несколько раз шума движения электродного датчика за счет выбора размера и расположения электродов на плоском диэлектрическом обтекателе. По мере удаления от передней кромки плоской пластины, обтекаемой ламинарным потоком жидкости, чувствительность встроенного в нее плоского электрода к пульсациям скорости уменьшается. Это связано с увеличением толщины диффузионного слоя. Однако при большом удалении ламинарное течение жидкости переходит в турбулентное, что приводит к увеличению пульсаций скорости и связанного с ними электродного шума. Предложен и математически обоснован метод уменьшения электродного шума движения до 10 раз по напряжению путем выбора размеров и места расположения электродов, встроенных в поверхность диэлектрического обтекателя. В соответствии с разделом 4.1 уменьшение пульсаций потенциала электрода происходит во столько раз, во сколько уменьшается поток диффузии кислорода на электрод. Поток диффузии

$$I = \int_{l_1}^{l_2} a \frac{Dc_0}{\delta(x)} dx. \quad (20)$$

Интегрирование по всей площади электрода дает формулу выигрыша по шуму движения для прямоугольного электрода в

$$k = 1/(1 - \sqrt{l_1/l_2}) \quad (21)$$

раз, где  $l_1$  - расстояние от передней границы, а  $l_2$  - от задней границы электрода до передней кромки обтекателя. Выполнен эксперимент, в котором использована лабораторная установка, показанная на рисунке 5. Исследован шум измерительных титановых электродов, встроенных заподлицо в плоскую диэлектрическую торцевую площадку электродного блока, на которую набегаёт поток электролита, имеющий пульсацию скорости на частоте около 31 Гц. Схема расположения электродов показана на рисунке 11. В спектре электродного шума измерительных электродов наблюдаются пики на частоте 31 Гц, причем у электрода №2, расположенного на расстоянии в 10 раз большем от передней кромки диэлектрической площадки, чем электрод №1, высота пика на 10 дБ ниже, чем у электрода №1. Такой же выигрыш по шуму движения дает (22), что подтверждает правильность созданной теории шума движения.

В разделе 4.4 теоретически исследована возможность уменьшения шума движения электродного датчика при использовании вращающихся электродов. Пусть электрод имеет две электрически соединенные плоские площадки, движущиеся с одинаковой скоростью  $U$  в противоположные стороны: одна навстречу набегающему потоку воды, а вторая – по направлению потока. Вектор скорости  $V_0$  набегающего потока направлен вдоль поверхности площадок, которые имеют форму квадрата со стороной  $a$ . В результате первая из них имеет скорость относительно жидкости  $U + V_0$ , а вторая  $-V_0$ . Полагаем, что  $U \gg V_0$ . Толщина диффузионного слоя на гладкой пластинке,

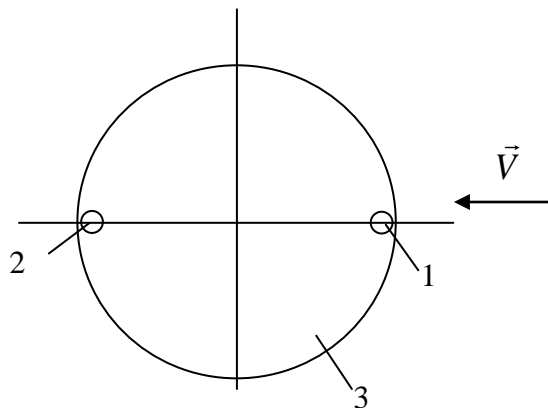


Рисунок 11- Схема расположения измерительных электродов на торцевой площадке электродного блока. 1 – электрод №1, 2 – электрод №2, 3 – площадка

на край которой набегают вдоль поверхности ламинарный поток электролита со скоростью  $V$  определяется формулой:  $\delta \approx 0,3\sqrt{\nu x/V}$ , где  $x$  - расстояние от передней кромки пластинки до точки наблюдения,  $\nu$  - кинематическая вязкость электролита. Плотность потока  $j$  диффундирующего кислорода (моль/с · м<sup>2</sup>) зависит от градиента концентрации кислорода в диффузионном слое электролита, который можно считать равным отношению концентрации кислорода в толще электролита к толщине диффузионного слоя.

$$j = D \frac{dc}{dz} \approx D \frac{c_0}{\delta} \quad (22)$$

Здесь  $c_0$  - концентрация атомов кислорода. Поток кислорода, диффундирующего к поверхности двух контактных пластин (моль/с),

$$I = 6,66 D a c_0 \sqrt{\frac{a}{\nu}} (\sqrt{U + V_0} + \sqrt{U - V_0}) \quad (23)$$

Как видно из (26), вызванные пульсациями скорости  $V_0$  пульсации потока кислорода, следовательно, и заряда, на встречно движущихся площадках одного электрода в значительной степени компенсируют друг друга. С некоторым приближением реализовать противоположное движение электроконтактных площадок одного электрода позволяет вращающийся электрод (рисунок 12). Предложены конструкции датчиков с вращающимися электродами, в которых влияние пульсации скорости буксировки на потенциал электрода уменьшено в десятки раз. Одна из конструкций содержит электроды, выполненные в виде расположенных диаметрально противоположно секторов круга, которые установлены на проводящей оси в параллельных плоскостях, перпендикулярных к оси. Секторы расположены так, что в плане образуют полный круг. Выигрыш по шуму движения для электродов такой конструкции превышает два порядка по напряжению. Он определен путем численного интегрирования потока диффузии кислорода на всю поверхность электрода. При этом размеры электрода и скорость вращения удовлетворяют условию отсутствия перехода ламинарного обтекания в турбулентное.

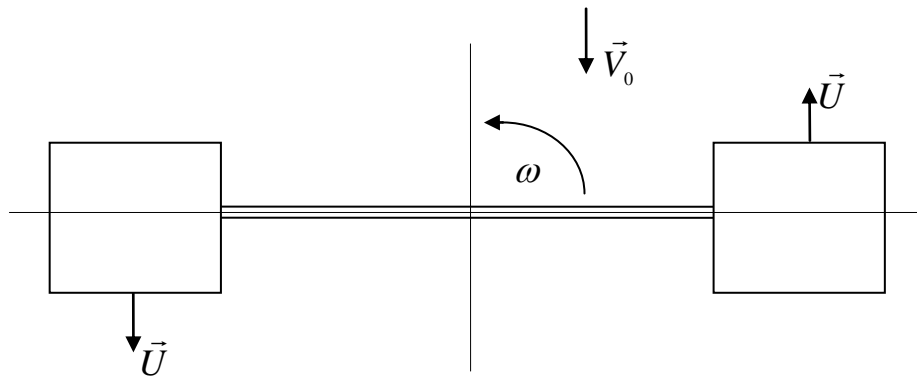


Рисунок 12 - Вращающийся электрод датчика электромагнитного поля

В разделе 4.5 приведены результаты исследования влияния обтекателей на электродный шум движения. Эксперимент, в котором измерительный электрод совершал гармонические колебания в электролите, показал, что обтекатель может в несколько раз уменьшить пульсации потенциала электрода. Также приведены результаты эксперимента в морских условиях. Диэлектрические обтекатели с отверстиями защищали электроды датчика от непосредственного воздействия набегающего потока жидкости при буксировке его за судном. На рисунке 13 показаны спектральные зависимости шума датчика, который буксировался на глубине 40 метров. Установлено, что применение обтекателей с небольшим числом электроконтактных отверстий позволило уменьшить величину шума датчика на 15...20 дБ. При увеличении числа отверстий шум движения увеличивался. В спектре шума датчика с обтекателями №2 а присутствуют всплески на частотах 16, 82 и 132 Гц, причиной которых может вибрация при неполном вытеснении воздуха из обтекателей. Спектр напряжения вибродатчика, установленного на электродном датчике, имеет всплески на тех же частотах. Натурный эксперимент подтвердил выводы главы 3, что шум движения является главным фактором, ограничивающим чувствительность электродного датчика. Также эксперименты доказали эффективность применения обтекателей для снижения шума движения. В разделе 4.6 приведена конструкция электродного датчика для измерения пульсаций скорости в турбулентном потоке жидкости, действие которого основано на установленной в главе 3 и разделах 4.1 и 4.2 связи пульсаций электродного потенциала с пульсацией скорости жидкости.

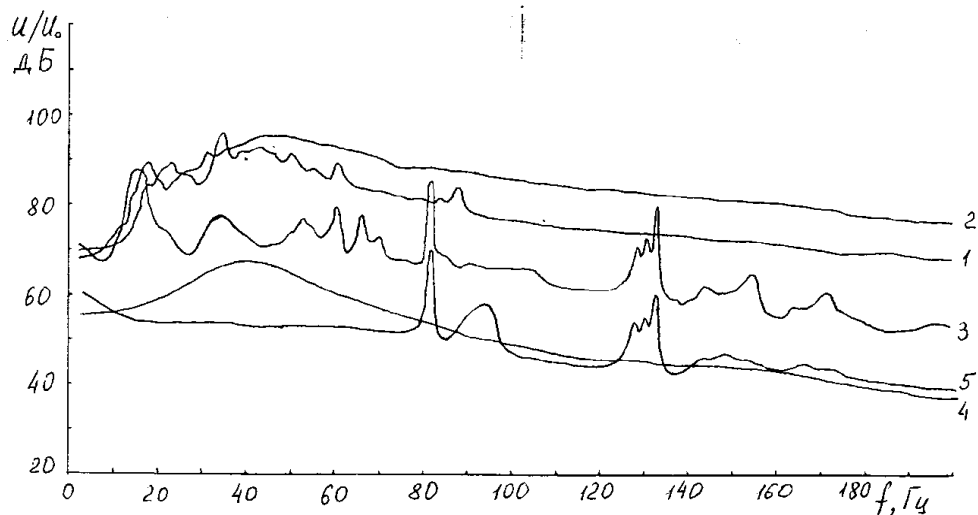


Рисунок 13 - Спектры выходного напряжения датчика и собственного шума предварительного усилителя. 1 – шум датчика без обтекателей при  $V=3$  м/с, 2 – шум датчика с обтекателями №1 при  $V=3,5$  м/с, 3 – шум датчика с обтекателями №2 при  $V=3$  м/с, 4 – шум неподвижного датчика, лежащего на грунте, 5 – спектр шума предусилителя с замкнутой первичной обмоткой трансформатора при скорости 2,3 м/с

Глава 5 написана на основе результатов глав 3,4 и работ [18; 19; 36-42] и посвящена разработке методов уменьшения шумов и помех, а также технических средств приема с электродными датчиками, предназначенных для применения на движущихся объектах.

В разделе 5.1 представлены предложенные диссертантом (в соавторстве) конструкции датчиков, электроды которых защищены от воздействия потока жидкости. Эти датчики имеют пониженный уровень шума движения. Представлены и конструкции электродов кабельного датчика, защищенных как от воздействия потока, так и от механических повреждений.

В разделе 5.2 представлены результаты лабораторного эксперимента, доказывающего высокую корреляцию электродного шума с пульсациями скорости жидкости. Используя обнаруженный эффект, можно повысить чувствительность приемного устройства более чем в два раза. Эксперимент выполнен на установке, показанной на рисунке 8. На рисунке 14 показаны измеренные реализации шумового напряжения с электродов измерительной ячейки (1) и напряжения с датчика скорости (2). Кривая 3 представляет собой результат вычитания кривой 2 из кривой 1. Напряжение с датчика скорости было масштабировано по амплитуде до достижения нулевого значения коэффициента корреляции кривых 2 и 3. Средние значения графиков по оси ординат выбраны для удобства, чтобы кривые не пересекались. Как видно из рисунка, шумовое напряжение с электродов коррелировано с напряжением датчика скорости. Измеренный коэффициент корреляции равен 0,9.

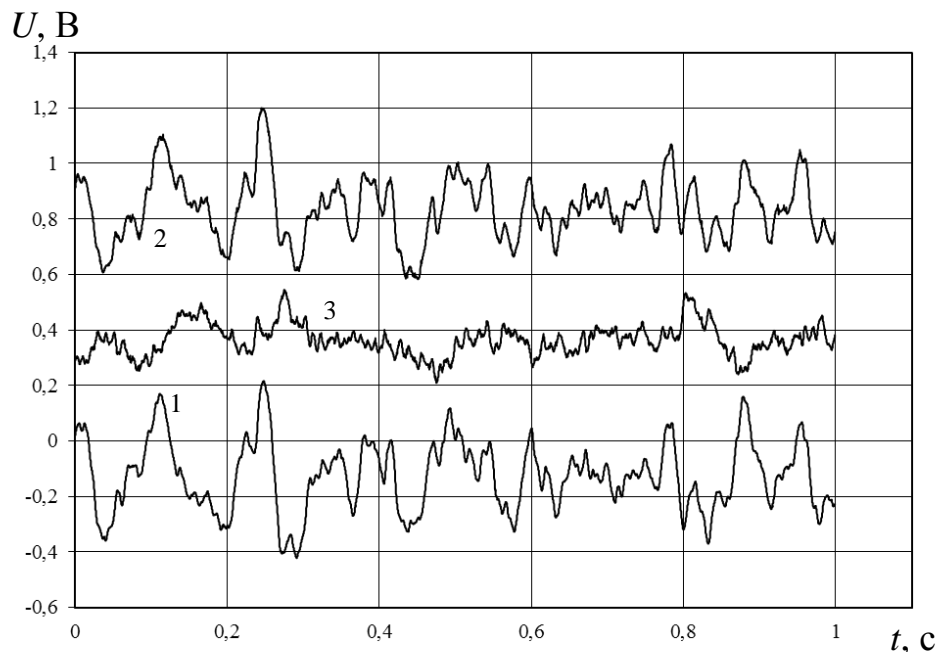


Рисунок 14. Реализации шумового напряжения с электродов измерительной ячейки (1) и напряжения с датчика скорости (2), и результат вычитания кривой 2 из кривой 1 (3)

Разностное напряжение (кривая 3) имеет среднеквадратическое отклонение в 2,3 раза меньше, чем исходный электродный шум (кривая 1). Предложена схема приемного устройства, в котором выполнена компенсация пульсаций выходного напряжения датчика, вызванных пульсациями скорости жидкости (рисунок 15). Оно содержит диэлектрическую платформу 1, на которой установлены электроды 2 и 3 датчика электрического поля, датчики пульсаций скорости 4 и 5, установленные соответственно на электродах 2 и 3, предварительный усилитель 6, блок вычитания 7, приемный блок 8, усилители 9 и 10 с управляемым коэффициентом усиления, коррелометры 11 и 12. Коррелометры идентичны и содержат соответственно перемножители 13, 14, интеграторы 15, 16. В исходном состоянии коэффициент усиления усилителя 9 минимален. Коррелометр 11 формирует медленно меняющееся напряжение, пропорциональное значению функции взаимной корреляции поступающих на него напряжений  $U(t)$  - с выхода блока вычитания 7 и  $S(t)$  - с выхода датчика скорости 4. Выходное напряжение интегратора 15 подается на управляющий вход регулируемого усилителя 9 и увеличивает его коэффициент усиления до значения, при котором компенсирующее напряжение на выходе усилителя 9 становится равным по величине составляющей выходного напряжения предварительного усилителя 6, обусловленной пульсацией скорости жидкости у поверхности электрода 2. Блок вычитания 7 осуществляет полное вычитание этих напряжений, и его выходное напряжение не содержит составляющей, обусловленной пульсациями скорости у поверхности электрода 2, то есть  $U(t) = 0$ . Напряжение на выходе интегратора

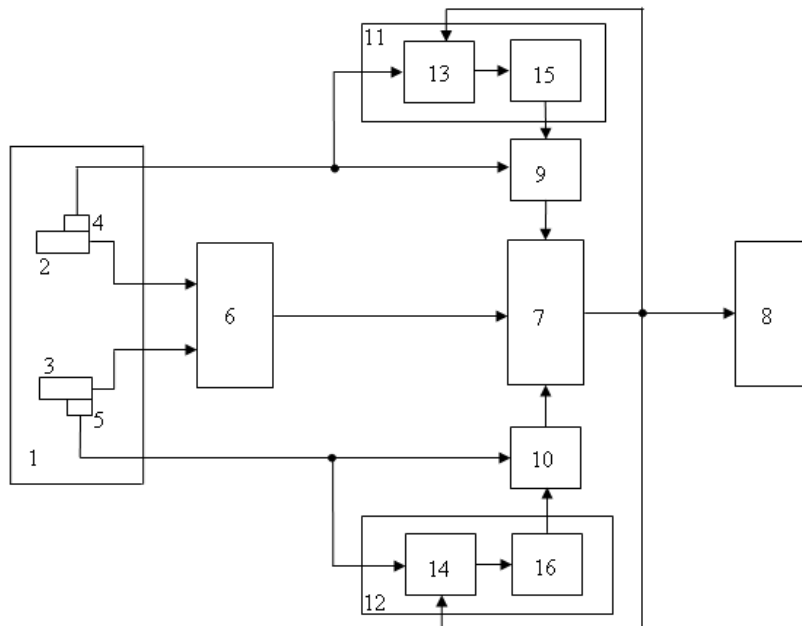


Рисунок 15. Схема приемного устройства с компенсацией «шума движения»

15 перестает изменяться и устанавливается постоянным. Соответственно постоянным устанавливается и коэффициент усиления усилителя 9. Второй канал компенсации, содержащий усилитель 10 и коррелометр 12, работает аналогично. Функции блоков 7 и 9 -16 при применении цифровой обработки сигналов могут быть реализованы программно.

В разделе 5.3 выполнен расчет, который показал возможность компенсации индустриальной помехи от электрооборудования объекта, буксирующего кабельный электродный датчик. Описано предложенное диссертантом приемное устройство, в котором осуществляется компенсация индустриальной помехи. В основе принципа работы приемного устройства лежит тот факт, что принимаемая электромагнитная волна доходит до всех точек кабельного датчика в одинаковой фазе и с одинаковой амплитудой, а индустриальная помеха, распространяясь от объекта вдоль кабеля, испытывает сильное затухание. Поэтому на коротком компенсационном электродном датчике, расположенном близко к источнику помехи, возникает напряжение помехи, сравнимое с тем, что возникает на длинном основном кабельном датчике. Это позволяет осуществить вычитание индустриальной помехи без заметного ослабления принимаемого сигнала. Устройство показано на рисунке 16 и содержит четырехжильный гибкий кабель 1, первый и второй электроды 2 и 3, образующие первый датчик электрического поля (активную часть кабельной антенны), третий и четвертый электроды 4 и 5, образующие второй (компенсационный) датчик электрического поля, предварительный усилитель 6, первый узкополосный фильтр 7, второй узкополосный фильтр 8, управляемый усилитель 9, управляемый фазовращатель 10, блок вычитания 11, приемный блок 12 и блок экстремального регулирования 13. Компенсирующее напряжение, получаемое от электродов 4 и 5, установленных на кабеле ближе к буксирующему объекту, чем электроды 2 и 3, после уравновешивания амплитуд и фазирования вычитают из выходного напряжения

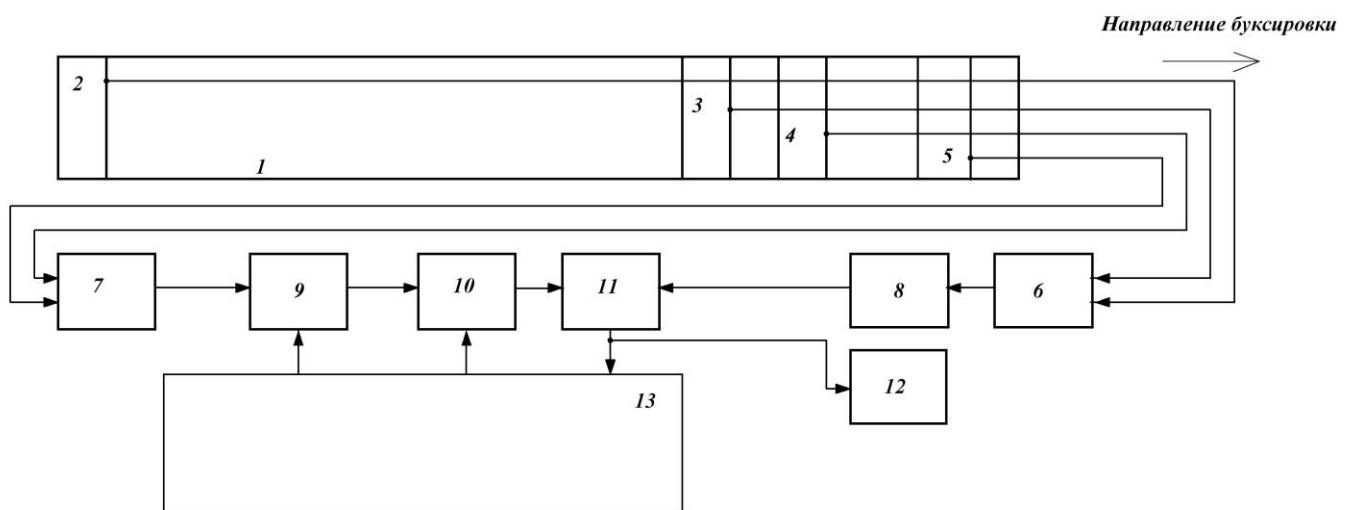


Рисунок 16. Приемное устройство для радиосвязи с подводным объектом



кабельного датчика. При этом потери полезного сигнала не превышают 10%. Блок экстремального регулирования 13 вырабатывает напряжения, управляющие коэффициентом усиления управляемого усилителя 9 и поворотом фазы управляемого фазовращателя 10 до достижения минимального значения напряжения на выходе блока вычитания 11. На его выходе остается напряжение сигнала с помехами естественного происхождения и промышленные помехи, скомпенсировать которые не удается.

Глава 6 написана на основе результатов главы 2 и работ [20-24; 43-45]. В ней рассмотрены методы повышения чувствительности безэлектродных датчиков электромагнитного поля – индукционных и трансформаторных.

В разделе 6.1 решена задача оптимизации формы катушки магнитоиндукционного датчика по максимуму отношения сигнал-шум. Определена предельная чувствительность оптимизированного и неоптимизированного магнитоиндукционного датчика. Показано, что оптимизированный магнитоиндукционный датчик имеет на 10...15% большую предельную чувствительность, чем неоптимизированный.

В разделе 6.2 решена задача оптимизации конструктивных параметров трансформаторного датчика по максимуму коэффициента преобразования при заданных максимальных габаритах. В результате оптимизации коэффициент преобразования может быть повышен в несколько раз. Если датчик буксируется за судном, то для уменьшения помех от его силовых установок датчик находится на большом расстоянии от приемника и соединен с ним кабелем. Повышение коэффициента преобразования датчика позволяет повысить чувствительность приемного устройства за счет уменьшения влияния вибрационного шума кабеля и промышленной помехи.

В разделе 6.3 получено выражение для предельной чувствительности трансформаторного датчика. Показано, что на частотах выше некоторой  $f_{гр}$ , составляющей порядка 100 Гц, при надлежащем выборе размеров и материала сердечника можно пренебречь вкладом сопротивления катушки в тепловой шум датчика. Его чувствительность определяется только геометрическими размерами, в частности, диаметром окна катушки.

В разделе 6.4 представлена конструкция трансформаторного датчика переменного электрического поля в море, имеющего повышенный в 1,5 – 2 раза коэффициент преобразования.

В разделе 6.5 выполнено сравнение электродных и безэлектродных датчиков по достигаемой предельной чувствительности. Показано, что при сравнимых размерах в диапазоне 3...300 Гц электродный датчик имеет на порядок большую предельную чувствительность, чем магнитоиндукционный или трансформаторный датчик.

В разделе 6.6 приведены предложенные диссертантом (и в соавторстве) конструкции трансформаторных датчиков с уменьшенной чувствительностью к вибрации и помехам промышленного происхождения.

В заключении сформулированы основные результаты исследований, изложенных в диссертации.

### Заключение

1. Исследован ряд металлов и металлических покрытий на пригодность для изготовления электродов датчиков электромагнитного поля. Рекомендованы титан, тантал, нержавеющая сталь X18H9T и 12X18H10T, которые обеспечивают низкое значение активной составляющей импеданса датчика  $R$  и большое значение емкости  $C$  датчика при хорошей стабильности этих параметров. Не рекомендовано применение металлических покрытий ввиду их нестойкости к действию морской воды.

2. Установлено, что в отсутствие движения даже у электродов из благородных и некорродирующих металлов обнаружен избыточный электрохимический шум, не исчезающий и через несколько суток выдержки в электролите. Его величина зависит от материала электродов, шероховатости поверхности и длительности выдержки в электролите. У тантала и титана, лучших по шумовым и импедансным характеристикам, отношение избыточного шума к тепловому на частотах в единицы герц достигает 3...4 раз. Установлено, что в первые часы в первые часы и даже сутки выдержки электродов в электролите электродный шум имеет импульсы неустановленной природы с амплитудой, на два порядка превышающей среднеквадратическое напряжение шума  $\sigma$  между импульсами. Наличие импульсной составляющей более чем в 30 раз увеличивает дисперсию шума. График функции распределения плотности вероятности шума становится изрезанным с отрицательным коэффициентом эксцесса ( $E = -1$ ). С течением времени импульсный шум уменьшается, а функция распределения все больше приближается к гауссовской. На частотах выше нескольких десятков герц избыточный шум у хорошо отполированных и длительно выдержанных в электролите электродов из таких металлов меньше теплового. Установлено, что для уменьшения избыточного шума необходимо увеличивать площадь электродов, полировать их поверхность и выдерживать в электролите не менее 3 суток.

3. Установлено, что при движении жидкости у датчика возникает специфический электродный шум движения, превышение которого над тепловым шумом по напряжению достигает у корродирующих электродов нескольких порядков, а у некорродирующих – до одного порядка. Именно он и определяет чувствительность буксируемых датчиков. Показано, что шумовое напряжение связано с пульсациями скорости жидкости, в частности, с турбулентностью. Спектральные зависимости шумового напряжения имеют вид  $f^{-\alpha}$  ( $\alpha \approx 1,2...1,6$ ). Показано, что напряжение шума при мелкомасштабной турбулентности в движущейся жидкости обратно пропорционально квадратному корню из площади электродов, при этом оно увеличивается с уменьшением концентрации электролита и уменьшается при выдержке элект-

тродов в электролите. Установлено, что при наличии пульсаций средней скорости потока шум движения коррелирован с пульсациями скорости, что позволяет осуществить компенсацию шума движения в приемном устройстве и повысить чувствительность более чем в два раза. Установлено, что пульсации давления жидкости не оказывают влияния на разность потенциалов между электродами. Установлено, что наименьшей величиной шума движения из исследованных металлов обладают титан, тантал, сталь нержавеющая. Величина его у перечисленных металлов практически одинакова.

4. Разработаны две математические модели электродного шума движения. В основе первой модели лежит модуляция толщины диффузионного слоя у поверхности электрода набегающим пульсирующим потоком, вследствие чего изменяется скорость адсорбции кислорода поверхностью электрода, что в свою очередь ведет к пульсациям потенциала электрода относительно жидкости. Вторая модель основана на деформации жидкостной обкладки двойного электрического слоя на границе металл-электролит набегающим потоком электролита. Получены формулы, определяющие величину пульсаций электродного потенциала. Установлено, что пульсация электродного потенциала, образуемая по первой модели, имеет инерционность по отношению к пульсациям скорости, которая ограничивает спектр шума движения диапазоном частот до 30-40 Гц и уменьшается с течением времени. Пульсации электродного потенциала, образуемые по второй модели, не имеют явной зависимости от времени и частоты, но значительно меньше по величине. Оба механизма действуют одновременно, но при небольшой выдержке электродов в воде первый преобладает. Показано, что качественные результаты эксперимента подтверждают развитую теорию шума движения, а измеренные значения пульсаций электродного напряжения близки к расчетным.

5. Доказано, что эффективным средством борьбы с шумом движения электродного датчика является применение обтекателей, снижающих скорость движения жидкости у поверхности электродов. В натурном эксперименте показано, что применение обтекателей для электродных датчиков позволяет уменьшить их шум в движении до 10 раз по сравнению с незащищенными электродами. Показана возможность уменьшения шума движения электродного датчика в несколько раз за счет выбора размеров и места расположения электродов на плоской поверхности обтекателя, а также уменьшения его в десятки раз при использовании вращающихся электродов. Тем самым показана и доказана в эксперименте возможность повышения чувствительности датчика. Предложены конструкции таких датчиков.

6. Показано, что трансформаторное согласование - единственно приемлемый способ согласования электродного датчика с приемным устройством для минимизации влияния теплового шума. Определены условия трансформаторного согласования электродных датчиков с входными каскадами приемного устройства, обеспечивающие наивысшую чувствитель-

ность. Выполнено сравнение материалов электродов по достигаемой предельной чувствительности датчика на частоте 90 Гц. Оно показало, что все рекомендованные выше материалы в датчике реальных размеров (сферические электроды радиусом 5 см разнесены на расстояние 1 м) обеспечивают значения предельной чувствительности в пределах  $0,13...0,2 \text{ нВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$ . Выполнена оптимизация входного трансформатора на минимум шума.

7. Разработана методика оптимизации магнитоиндукционного датчика, позволяющая путем выбора формы катушки достичь максимального отношения напряжения сигнала к собственному тепловому шуму. Увеличение предельной чувствительности такого датчика в результате оптимизации достигает 10...15 процентов. Разработана методика оптимизации трансформаторного датчика, которая при заданных габаритах позволяет в несколько раз увеличить коэффициент преобразования за счет оптимального выбора соотношений размеров сердечника и катушки и повысить чувствительность приемного устройства, если датчик соединен с ним длинным кабелем. Определена чувствительность магнитоиндукционного и трансформаторного датчиков. Показано, что в диапазоне 3...300 Гц электродный датчик имеет наивысшую из рассмотренных типов датчиков предельную чувствительность.

8. По результатам проведенных исследований предложены новые конструкции безэлектродных и электродных датчиков (в том числе кабельного датчика), признанные изобретениями. Они имеют более высокую чувствительность в условиях буксировки и вибрации или коэффициент преобразования по сравнению с известными.

9. Предложена схема приемного устройства с компенсацией шума движения. Предложена схема приемного устройства с компенсацией индустриальной помехи, которую создают силовые электроустановки, расположенные на объекте, буксирующем кабельный электродный датчик.

### **Выводы и практические рекомендации**

Результаты исследований, выполненных в рамках диссертации, можно квалифицировать как крупное научное достижение в развитии теории и техники приема низкочастотного электромагнитного поля в морской воде, имеющее при этом важное прикладное значение. Впервые выполнено всестороннее исследование электродного шума, измерены статистические характеристики, выявлены свойства электродного шума и методы его уменьшения, создана теория шума движения, показана возможность осуществления высокочувствительных приемных устройств с малогабаритными буксируемыми датчиками. При меньших на 1...2 порядка габаритах они могут обеспечить чувствительность, сравнимую с чувствительностью длинного кабельного датчика. При приеме низкочастотного электромагнитного поля на неподвижном подводном объекте возможно применение безэлектродных

датчиков. Их оптимизация по методике автора позволяет повысить чувствительность или уменьшить требования к приемно-регистрирующей аппаратуре. Ввиду большой сложности и стоимости экспериментов по приему СНЧ и КНЧ электромагнитного поля в море, для внедрения в практику разработанных методов приема и технических средств необходимо участие заинтересованных организаций в осуществлении таких экспериментов и разработке промышленной аппаратуры.

### Список литературы

#### *Статьи*

1. Акиндинов, В.В. Шумы электродных датчиков в морской воде / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 1984. - Т. 29, №3. - С. 484-490.
2. Максименко, В.Г. Статистические характеристики нестационарного шума электродного датчика. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2013. - Т. 58, №8. - С. 768-775
3. Максименко, В.Г. Импедансные характеристики и предельная чувствительность электродных датчиков электромагнитного поля в морской воде / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2006. - Т. 51, № 7. - С. 786-795
4. Максименко, В.Г. Оптимизация входного трансформатора / В.Г. Максименко // Радиотехника. - 1985. - №12. - С. 81-83.
5. Максименко, В.Г. Добротность тороидальных катушек индуктивности на низких частотах / В.Г. Максименко // Радиотехника. - 1990. - №6. - С. 91-93.
6. Максименко, В.Г. Оптимизация входного трансформатора низкой частоты на кольцевом сердечнике / В.Г. Максименко // Радиотехника. - 1990. - №8. - С. 22-24.
7. Максименко, В.Г. О применении входного трансформатора в высокочувствительной измерительной аппаратуре СНЧ диапазона / В.Г. Максименко // Исследование естественных случайных радиополей в диапазонах КНЧ, СНЧ и ОНЧ: сб. трудов под ред. акад. Ю.Б. Кобзарева / ИРЭ АН СССР. - М., 1985. - С. 124-134.
8. Максименко, В.Г. Проблемы уменьшения собственного шума электродных датчиков электрического поля, движущихся в электролите / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2002. - Т. 47, №7. - С. 809-813.
9. Максименко, В.Г. Шум электродного датчика в пульсирующем потоке жидкости / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2017. - Т. 62, №11. - С. 1086-1093.
10. Максименко, В.Г. Шум электродного датчика в потоке жидкости / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 2017. - №9. - С. 57-61.
11. Акиндинов, В.В. Экспериментальные исследования поляризации металлического электрода при движении в электролите / В.В. Акиндинов, В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 1996. - Т. 41, №8. - С. 985-989.

12. Максименко, В.Г. «Шум движения» электродных датчиков электрического поля в море и пути его уменьшения / В.Г. Максименко, В.И. Нарышкин // Радиотехника и электроника. - 2003. - Т. 48, №1. - С. 70-76.
13. Максименко, В.Г. Поляризация металлического электрода при движении в электролите / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 1997.- Т. 42, №2.- С. 210-213.
14. Максименко, В.Г. Пульсации напряжения электродного датчика в потоке электролита. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2018.- Т. 63, №7.- С. 720-726.
15. Максименко, В.Г. Шум движения электродного датчика и его связь с пульсациями скорости жидкости. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2020.- Т. 65, №10.- С. 987-993.
16. Максименко, В.Г. Уменьшение шума движения морского электродного датчика электрического поля. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2022.- Т. 67, №3.- С.268-274.
17. Максименко, В.Г. Вращающийся электрод в датчике электрического поля. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2021.- Т. 66, №5.- С. 436-442.
18. Максименко, В.Г. Компенсация «шума движения» электродного датчика напряженности электрического поля в морской воде / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 2019.- №1.- С. 58-62.
19. Максименко, В.Г. Компенсация промышленной помехи при приеме сверхнизкочастотного электромагнитного поля в море. / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 2020.- Т. 65, №2.- С. 141-144.
20. Максименко, В.Г. Оптимизация магнитной антенны СНЧ диапазона / В.Г. Максименко // Радиотехника. - 1990. - №4. - С. 88-90.
21. Максименко, В.Г. Оптимизация морского трансформаторного датчика переменного электрического поля / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 2007. - №4. - С. 59-61.
22. Максименко, В.Г. Предельная чувствительность трансформаторного датчика переменного электрического поля в море / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 2008. - №7. - С. 51-53.
23. Максименко, В.Г. Чувствительность низкочастотного магнитоиндукционного датчика / В.Г. Максименко // Радиотехника. - 2009.- №8, С. 44-47.
24. Максименко, В.Г. Трансформаторный датчик переменного электрического поля для морских исследований / В.Г. Максименко // Измерительная техника. - 1997. - №8. - С. 59-61.
25. Максименко, В.Г. Экранирование катушки индуктивности от воздействия статического магнитного поля / В.Г. Максименко // Радиотехника и электроника. - 1994. - Т.39, №1. - С. 73-75.
26. Каевицер, В.И. Радиофизический метод измерения координат и глубины расположения электрического кабеля, проложенного по дну водоема / В.И.

Каевицер, И.В. Лишин, В.Г. Максименко, В.И. Нарышкин, В.А. Дякин, А.В. Гашевский, О.С. Гашевская. // Радиотехника и электроника. - 2004. - Т. 49, № 4. - С. 450-453.

27. Дякин, В.А. Возможность обнаружения подводного кабеля по переизлучаемому им электромагнитному полю. / В.А. Дякин, А.С. Гугин, В.И. Каевицер, С.И. Киселев, И.В. Лишин, В.Г. Максименко, Н.И. Михалев, В.И. Нарышкин. // Радиотехника и электроника. - 2002. - Т. 47, № 11. - С. 1296-1303.

*Патенты и авторские свидетельства*

28. А.с.1067360, МПК G01 V 3/06. Способ измерения скорости потока жидкости / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко (РФ). - №3341827/18-10, заявл. 11.09.81; опубл. 15.01.84, Бюл. №2.

29. Пат. 159105 РФ на пол. модель, МПК G01F 1/06. Устройство для измерения скорости жидкости / В.Г. Максименко, О.Г. Максименко, Я.В. Мачина (РФ). - № [2015130206/28](#), заявл. 21.07.2015, опубл. 27.01.2015, Бюл. №3.

30. Пат. 2594989 РФ на изобр., МПК G01P 5/08. Устройство для измерения скорости жидкости / В.Г. Максименко, О.Г. Максименко, Я.В. Мачина (РФ). - №[2015130143/28](#), заявл. 21.07.2015, опубл. 28.08.2016, Бюл. №23.

31. Пат. 2745588 РФ на изобр., МПК G01V3/08. Электродный датчик напряженности электрического поля в море. / В.Г. Максименко.- [2020119841](#) /28, заявл. 08.06.2020, опубл. 29.03.2021, Бюл. №10.

32. Пат. 2752135 РФ на изобр., МПК G01N3/06. Электродный датчик напряженности электрического поля в море. / В.Г. Максименко. – 2020132071, заявл. 28.09.2020, опубл. 23.07.2021, Бюл.№21.

33. Пат. 210891 РФ на полезную модель, МПК G01N 3/06. Устройство для приема электромагнитного поля в море / В.Г. Максименко.- 2021134023, заявл. 22.11.2021, опубл. 12.05.2022, Бюл. №14.

34. Пат. 2789467 РФ на изобр., МПК G01V 3/02. Электродный датчик напряженности электрического поля в море. / В.Г. Максименко. – 2022112710, заявл. 05.05.2022, опубл. 03.02.2023, Бюл.№4.

35. Пат. 2497153 РФ на изобр., МПК G01V 3/02. Устройство для измерения турбулентных пульсаций скорости потока жидкости / В.Г. Максименко, Д. В. Максименко. - [2012123775/28](#), заявл. 07.06.2012, опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.

36. А.с. 1697525, МПК G01 V 3/06. Датчик напряженности электрического поля в электролитах / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко, Кулаков А.Ф, Литвинов А.Л. (РФ). - № [4766003/25](#), заявл. 07.12.1989, опубл. 20.07.1999, Бюл. № 20.

37. А.с. 1409959, МПК G01 V 3/06. Датчик напряженности электрического поля / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко (РФ). - № 4169962/31-25; заявл. 30.12.86, опубл. 15.04.89, Бюл. №7.

38. А.с. 1629890, МПК G01 V 3/08. Датчик напряженности электрического поля / В.В. Акиндинов, И.В. Лишин, В.Г. Максименко (РФ). - № 4677887/25; заявл. 12.04.89, опубл. 23.02.91, Бюл. № 7.
39. Пат. 136593 РФ на пол. модель, МПК G01V 3/06. Кабельный электродный датчик электрического поля / В.Г. Максименко, Д.В. Максименко.- [2013130770/28](#), заявл. 04.07.2013, опубл. 10.01.2014, Бюл. №1.
40. Пат. 139214 РФ на пол. модель, МПК G01V 3/06. Кабельный электродный датчик электрического поля / В.Г. Максименко, Д.В. Максименко.- [2013130799/28](#), заявл. 04.07.2013, опубл. 10.04.2014, Бюл. №10
41. Пат. 2691165 РФ на изобр., МПК G01V 3/06. Устройство для приема электромагнитного поля в море. / В.Г. Максименко. - [2018118888](#), заявл. 22.05.2018, опубл. 11.06.2019 г., Бюл.№17.
42. Пат. 2702235 РФ на изобр., МПК H04B 7/08. Приемное устройство для радиосвязи с подводным объектом. /В.Г. Максименко. – [2019101243](#), заявл. 14.01.2019, опубл. 07.10.2019 г., Бюл. №28.
43. А.с. 1762645, МПК G01V 3/06. Морской датчик напряженности электрического поля / В.Г. Максименко. - [4779297/25](#), заявл. 08.01.1990, опубл. 20.07.99, Бюл. № 20.
44. А.с. 1697524, МПК G01 V 3/06. Устройство для измерения напряженности электрического поля в электролитах / И.В. Лишин, В.Г. Максименко (РФ). - №4757895/25; заявл. 10.11.89; опубл. 20.07.99, Бюл. № 20.
45. Пат. 2353953 РФ на изобр., МПК G01V3/10. Трансформаторный датчик переменного электрического поля / В.Г. Максименко.- [2007124745/28](#), заявл. 03.07.2007, опубл. 27.04.2009, Бюл. №12.

*Доклады на конференциях*

46. Максименко, В.Г. Шум электродного датчика в движущейся жидкости / В.Г. Максименко// 6-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 19 – 22 ноября 2012 г.: сб. докладов. – М., 2012.- Т.2. - С. 281-285.
47. Максименко, В.Г. Статистические характеристики шума электродного датчика в растворе NaCl / В.Г. Максименко, С.В. Миронов, В.В. Лепехин // 4-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 29 ноября – 3 декабря 2010 г.: сб. докладов. – М., 2010. С. 116-119.
48. Максименко, В.Г. Измерение низкочастотного электромагнитного поля в водоемах Подмосковья. /В.И. Нарышкин, В.Г. Максименко, А.В. Гатиллов // Региональная XIII конференция по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, 13 ноября - 15 ноября 2007 года: тезисы докладов. – СПбГУ, 2007, С.68-69.