На правах рукописи

Егоров Иван Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗУЮЩИХ МИКРОСТРУКТУР ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный национальный университет)».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Агафонов Вадим Михайлович

Научный консультант: академик РАН, доктор физико-математических наук
Бугаев Александр Степанович

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-производственный комплекс «Технологический центр».

Защита состоится «….» мая 202... г. на заседании диссертационного совета ……., созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ) по адресу: 141700, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., д. 9, ауд. …….

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ и на сайте института http://mipt.ru.

Автореферат разослан «__» _____2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета — кандидат физико-математических наук, доцент Токунов Юрий Матвеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Технология на базе молекулярно-электронного переноса в электрохимической системе на сегодняшний момент может быть наиболее перспективной для создания сейсмических микровелосиметров и микроакселерометров. Обуславливается это высокой крутизной преобразования сигнала, обеспечиваемой базовым принципом работы, одновременно с малыми нелинейными эффектами, широкими частотным и динамическим диапазонами. Доступные на данный момент лазерные и планарные технологии обеспечивают возможность массового производства.

На практике, однако, ожидаемые достижения сталкиваются с ограничениями, связанными с малой изученностью явлений молекулярно-электронного переноса в преобразующих микроструктурах электрохимических сейсмических датчиков.

Так, при экспериментальных исследованиях нелинейных эффектов при больших входных сигналах был выявлен не известный ранее рост постоянной составляющей сигнального тока. Как было установлено, указанная постоянная составляющая влияет на режим работы операционного усилителя в сопутствующей электронике и существенно ограничивает его динамический диапазон.

Кроме того, при исследовании собственных шумов электрохимических сейсмических датчиков недостаточно изученными остались вопросы сопряжения датчиков с сопутствующей электроникой, а также определения механизмов генерации собственных шумов, специфичных для различных частотных диапазонов. В данной работе были выявлены новые механизмы генерации собственного шума в различных частотных областях, а также влияние на них таких факторов, как частотная зависимость импеданса электрохимической ячейки и параметры используемых операционных усилителей.

Также недостаточно изучен вопрос поведения характеристик чувствительного элемента в зависимости от температуры. На данный момент существуют теоретические модели, разработанные для узкого диапазона от +20°C до +60°C. Однако при апробации в реальных условиях, построенная на основе данных исследований термокомпенсация, не удовлетворяет требованиям к работоспособности на границах рабочего температурного диапазона электрохимических сейсмических датчиков.

Современные чувствительные элементы электрохимических сейсмических датчиков состоят из 4 электродов, которые представляют собой симметрично расположенные электрохимические ячейки. Для определения выходных параметров таких систем при решении уравнения конвективной диффузии в качестве граничных условий определяется постоянство потенциала вблизи анодов. В данной работе показано, что оптимизация выходных параметров чувствительного элемента как в расширении динамического диапазона, так и термостабилизации передаточной функции возможна при задании постоянного тока в электрохимической системе чувствительного элемента. С математической точки зрения это означает использование условия постоянного тока в качестве граничного на электродах. Для практической реализации необходимо введение дополнительных электродов и разработка электронной схемы подключения.

Цель и задачи работы

Работа направлена на достижение нескольких целей.

Первой является исследование динамического диапазона электрохимических сейсмических датчиков, величина которого одновременно зависит от физических механизмов, влияющих на значение максимального измеряемого сигнала, и от механизмов, определяющих уровень собственных шумов датчиков.

Второй целью работы является исследование возможности уменьшения зависимости выходных параметров электрохимических сейсмических датчиков от температуры.

Для достижения поставленных целей в процессе выполнения работы решались следующие задачи:

- Разработка методов получения и анализ экспериментальных данных для коэффициента гармонических искажений (КГИ) выходных сигналов электрохимических сейсмодатчиков и постоянной составляющей катодных токов чувствительного элемента от амплитуды входного воздействия.
- Построение теоретической модели, описывающей зависимость величин постоянной составляющей и высших гармоник электродных токов электрохимической системы чувствительного элемента от величины входного гармонического сигнала в рамках решения уравнения конвективной диффузии для одномерной модели чувствительного элемента.
- Разработка методов учета влияния различных механизмов шумов элементов электрохимического сейсмодатчика на уровень собственных шумов. Это позволит регулировать внутренние параметры чувствительного элемента и сопутствующих узлов для получения оптимальных выходных характеристик.
- Разработка методов получения семейств АЧХ чувствительного элемента электрохимического сейсмодатчика в зависимости от температуры в широком диапазоне от -40°C до +60°C и анализ полученных данных в широком частотном диапазоне 1-400 Гц.
- Построение математической модели АЧХ чувствительного элемента в широком температурном диапазоне от -40°C до +60°C и поиск температурных зависимостей параметров этой модели на основании анализа экспериментальных данных.
- Разработка способа стабилизации коэффициента преобразования сигнала при изменении температуры в широком диапазоне путем анализа известных моделей поведения характеристик электрохимического датчика в зависимости от температуры и экспериментальное исследование методов управления граничными условиями на электродах. Новый метод заключался в подключении двух дополнительных электродов симметрично расположенных в заанодном пространстве стандартного четырехэлектродного узла, благодаря которым проводится управление рабочей точкой на ВАХ заданием постоянного фонового тока, протекающего между анод-катодными парами.
- Разработка принципиальной электронной схемы управления новой шестиэлектродной микросистемой в составе электрохимического чувствительного элемента для проведения экспериментальных исследований зависимости АЧХ чувствительного элемента от температуры.

Новизна исследования

В диссертационной работе впервые был обнаружен эффект увеличения постоянной составляющей электродных токов в зависимости от амплитуды входного сигнала и была построена теоретическая модель данного явления в рамках одномерной модели электрохимической системы чувствительного элемента сейсмического датчика.

Экспериментально изучены зависимости амплитуд высших гармоник и КГИ от величины входного гармонического сигнала для электрохимических сейсмодатчиков. Предложена теоретическая модель обоснования этих зависимостей, на основании которой предложены методы уменьшения этих явлений.

Разработка методов учета влияния различных физических процессов, протекающих в чувствительном элементе электрохимического сейсмодатчика, на уровень собственных шумов. Это позволяет регулировать внутренние параметры чувствительного элемента и сопутствующих узлов для получения оптимальных выходных характеристик.

Предложен новый способ уменьшения температурной зависимости первичных характеристик чувствительного элемента электрохимического сейсмического датчика за счет изменения электрохимической системы чувствительного элемента, а именно, добавление пары

электродов, симметрично расположенных относительно четырехэлектродного узла. Была предложена принципиальная теоретическая модель такой системы и на её основании были проведены экспериментальные исследования и сопоставление результатов расчета и экспериментальных измерений.

На основе анализа полученных данных изучены перспективы разрабатываемых электрохимических микроакселерометров и микровелосиметров в сравнении с зарубежными аналогами.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Полученные в диссертационной работе результаты теоретического и экспериментального исследования динамических и шумовых характеристик электрохимических сейсмодатчиков, а также температурной зависимости АФЧХ от параметров преобразующих микроструктур чувствительного элемента могут быть применены в практических задачах при создании микродатчиков с оптимальными параметрами, для снижения уровня собственных шумов и нелинейных искажений, расширения частотного и динамического диапазонов для широкого спектра температур.

Проведенный анализ характеристик электрохимических сейсмодатчиков позволяет говорить о широких перспективах их использования в различных областях техники и конкурировать с существующими аналогами не только по техническим параметрам, но и по экономическим показателям.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Экспериментально выявленная зависимость постоянной составляющей сигнальных токов и экспериментальное исследование зависимости амплитуд высших гармоник выходного сигнала электрохимического датчика от величины гармонического входного сигнала.
2. Теоретическая модель, описывающая зависимость величины постоянной составляющей электродных токов и высших гармоник выходного сигнала электрохимической системы чувствительного элемента от величины гармонического входного сигнала в рамках решения уравнения конвективной диффузии для одномерной модели чувствительного элемента.
3. Метод учета влияния различных механизмов шумов элементов электрохимического сейсмодатчика на уровень собственных шумов.
4. Математическая модель, содержащая температурно-зависимые параметры и описывающая АЧХ чувствительного элемента явной аналитической зависимостью в широком температурном диапазоне.
5. Теоретическая модель функционирования шестиэлектродного чувствительного электрохимического элемента, одна пара электродов которого подключена к управляемому источнику постоянного тока.
6. Принципиальная электронная схема подключения шестиэлектродного чувствительного элемента, которая позволяет регулировать крутизну преобразования сигнала и исключать влияние температурной зависимости коэффициента диффузии на АЧХ чувствительного элемента с помощью контроля за величиной протекающего постоянного тока.

Апробация работы

Основные результаты представляемого исследования опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в 3 статьях отечественных журналов, входящих в перечень рекомендованных ВАК, 10 статьях в иностранных журналах, входящих в базу цитирования Scopus, представлены на различных научно-технических конференциях, в том числе на 56 научной конференции МФТИ 2013 г., международных конференциях:

- 72nd European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2010, Barcelona, Spain 14-17 June 2010;
- Third International Conference on Advances in Civil, Structural and Construction Engineering, 10-11 December 2015, Rome, Italy;
- 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2019, Albena, 30 June 2019 - 6 July 2019;
- 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, SGEM 2020, August 2020, № 166356.

А также часть результатов оформлено в виде патентов:

- Non-magnetic azimuth sensing with MET electrochemical sensors. Vadim M. Agafonov, Ivan Egorov, Catherine Rice. Patent Application Publication No.: US 9,329,039 May 3, 2016;
- Инерциальная система определения параметров движения тела и конечностей человека на основе молекулярно-электронных датчиков. Агафонов В.М., Егоров И.В., Зайцев Д.Л. Патент на полезную модель №RU91275U1 13 августа 2009 г.;
- Способ обеспечения температурной стабильности параметров молекулярно-электронного преобразователя в области высоких частот. Агафонов В.М., Егоров И.В., Егоров Е.В., Патент на изобретение № RU 2724303 от 10.12.2019.

Кроме того, результаты работы неоднократно обсуждались на семинарах и рабочих встречах в Центре Молекулярной Электроники МФТИ.

Экспериментальные и теоретические результаты, представленные в аттестационной работе, могут быть использованы организациями, ведущими научные разработки в области молекулярной электроники, а также производства измерительной аппаратуры на её основе: ООО «Р-Сенсорс», Московский физико-технический институт, ООО «ФизтехМорГео».

Личный вклад автора

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке узла электродинамического отрицательной обратной связи и методов получения характеристик с его помощью, проведении экспериментов, обработке и анализе результатов, подготовке статей и докладов на конференциях, а также создании экспериментальных установок и методов работы с ними.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, включая литературный обзор, заключения и списка литературы, изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 91 рисунков, 9 таблиц. Библиография включает 103 наименования.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава является литературным обзором, которая посвящена рассмотрению исторических этапов развития электрохимических датчиков параметров движения, а также основных направлений исследования современных электрохимических датчиков и их чувствительных элементов.

Приведен обзор теоретических моделей электрохимических чувствительных элементов, которые использовались для описания их характеристик, и результатов, полученных в рамках этих моделей. Обобщены основные экспериментальные и теоретические знания о физических эффектах, влияющих на эффективность преобразования сигнала в зависимости от частоты

внешнего воздействия и геометрических параметров для наиболее распространенных конфигураций электродных микросистем чувствительных элементов.

Произведен анализ работ, посвященных нелинейным эффектам в электрохимических датчиках параметров движения, которые возникают из-за влияния гидродинамического сопротивления и параметров механической системы на частотно-временной отклик чувствительного элемента. Также рассмотрены работы, в которых показано возникновение высших гармоник при изменении потенциала рабочей точки электрохимической системы чувствительного элемента. Отдельно рассмотрены работы, посвященные численному моделированию распределения концентрации активных носителей заряда в электрохимической системе чувствительного элемента при мощных гидродинамических потоках электролита через электродную микросистему.

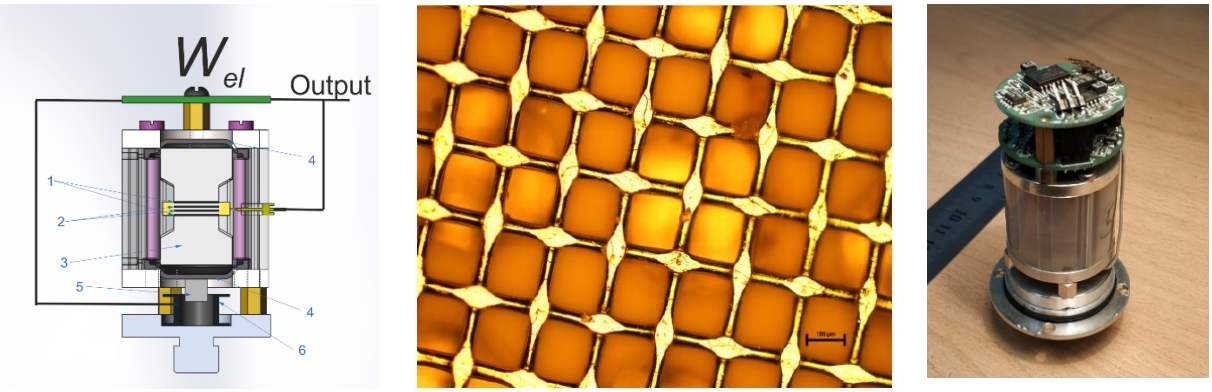
Произведен анализ накопленных фундаментальных знаний о роли и природе различных физических механизмов, обуславливающих уровень собственных шумов электрохимических датчиков параметров движения. Описаны наиболее распространенные в настоящее время методы исследования шумовых характеристик датчиков движения.

Отдельно рассмотрены работы, посвященные исследованию зависимостей параметров чувствительных элементов электрохимических датчиков параметров движения от температуры. Приведен краткий обзор фундаментальных трудов, рассматривающих температурные зависимости таких характеристик жидкостей как вязкость и коэффициент диффузии.

В заключении литературного обзора приведен анализ работ, которые посвящены исследованиям влияния конфигурации электродных микроструктур чувствительного элемента электрохимического датчика на его параметры. В частности, в нескольких работах были исследованы зависимости АЧХ характеристик чувствительного элемента от расстояния между электродами, возможность создания DC электрохимического акселерометра, а также инклинометра. В части работ уделено внимание созданию электродных микросистем на основе планарных и лазерных технологий и рассмотрены различные конфигурации расположения электродов на пластине для получения оптимальных параметров. Также рассмотрены работы, где отрицательная обратная связь была основана на магнитогидродинамическом эффекте благодаря размещению дополнительных пар электродов в тороидальный канал электрохимического датчика параметров угловых движений.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию динамического диапазона электрохимического датчика и факторам, влияющим на его значения. Согласно определению, применительно к сейсмодатчикам динамический диапазон определяется отношением максимально регистрируемого сигнала к минимальному в логарифмическом масштабе с предельным значением коэффициента нелинейных искажений. Поэтому данная глава разделена на две основных части. В первой части исследуются механизмы влияния больших значений входных сигналов на нелинейные эффекты, возникающие как на выходе чувствительного элемента, так и на выходе электрохимического сейсмодатчика, построенного на основе исследуемого электрохимического элемента. Во второй части исследуется метод учета влияния различных физических процессов, протекающих в чувствительном элементе электрохимического сейсмодатчика на уровень собственных шумов.

В начале дается определение объекта исследования, которым являлся электрохимический сейсмодатчик, разработка которого ведется в Центре Молекулярной Электроники на базе МФТИ (НИУ), который состоит из электрохимического чувствительного элемента, узла электродинамической отрицательной обратной связи и сопутствующей электроники. Его схема сборки, образец электрода электрохимической системы чувствительного элемента и собранный сейсмодатчик показаны на рисунках 1 *а,б,в* соответственно.



а *б* *в*

Рисунок 1. *а* – схема сборки электрохимического сейсмодатчика; *б* – образец образец электрода электрохимической системы чувствительного элемента; *в* - собранный сейсмодатчик.

Основными элементами электрохимического сейсмодатчика являются четырехэлектродная система, где1 - аноды, 2-катоды, помещенная в пластиковый корпус с обоих торцов закрытая мембранами 4, электролит 3, который способен перетекать через электродную систему, узел электродинамической отрицательной обратной связи, состоящий из катушки индуктивности 6 и постоянного магнита 5, а также блок сопутствующей электроники W_{el}.

Для электрохимического сейсмодатчика с отрицательной электродинамической обратной связью преобразование входного сигнала может быть описано передаточной функцией вида:

$$\begin{cases} W = \dfrac{W_s \cdot W_f}{1 + W_s \cdot W_f \cdot W_{fb}} \cdot W_{filter} \\ W_f = W_1 W_2 \end{cases} \quad (1)$$

Где, согласно принципиальной схеме работы электрохимического сейсмодатчика показанной на рисунке 20, $W_f = W_1 \cdot W_2$, W_1 создает разностный ток с катодов и преобразует его в напряжение, W_2 содержит фильтры ФНЧ и ФВЧ, а W_{fb} электронная цепь обратной связи.

Далее, дано описание экспериментальных установок и методов для измерения характеристик электрохимического сейсмодатчика и его чувствительного элемента в широких динамическом, частотном и температурном диапазоне. К таковым относятся ВАХ и АЧХ характеристики, коэффициенты гармонических искажений, амплитуды высших гармоник отклика электрохимического датчика, добавка к постоянной составляющей сигнальных токов, зависящая от амплитуды внешнего гармонического воздействия.

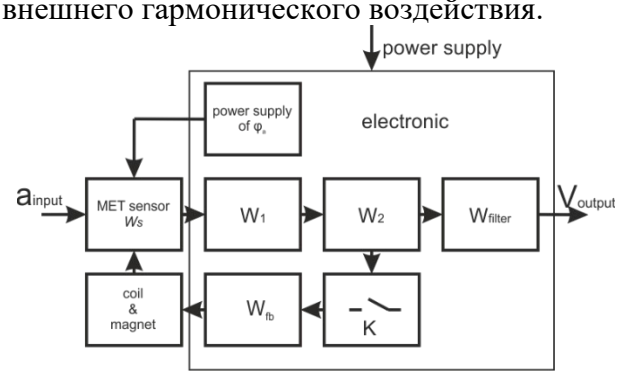


Рисунок 2. Принципиальная схема работы электрохимического сейсмодатчика.

Измерения проводились на частоте 10 Гц, что соответствует максимуму глубине отрицательной обратной связи $W_s \cdot W_f \cdot W_{fb}$. Это позволило подать на вход широкий по амплитуде диапазон входных сигналов.

В первой части этой главы в ходе экспериментов было выявлено, что зависимости амплитуд второй и третьей гармоники на выходе электрохимического датчика от амплитуды входного воздействия ведут себя согласно следующему выражению,

$$\begin{cases} y_{2\omega} = 19.03V^2 \\ y_{3\omega} = 0.57V^3 \end{cases}, \quad (2)$$

которое аппроксимирует экспериментальные данные, показанные на рисунке 2 слева и справа соответственно.

Также была получена экспериментальная зависимость постоянной составляющей сигнальных токов $q = \langle I \rangle - I_0$ от амплитуды входного воздействия для двух режимов работы электрохимического сейсмодатчика: с замкнутой и разомкнутой обратной связью. $\langle I \rangle$-среднее значение тока за конечное число периодов, а I_0 – фоновый ток. Экспериментальные данные показаны на рисунке 4.

Для каждого режима была построена аппроксимирующая степенная функция вида $y=x^n$. Показатели степени получились n_1=1.86 и n_2=2.11, что соответствует n=2 с погрешностью менее 10%.

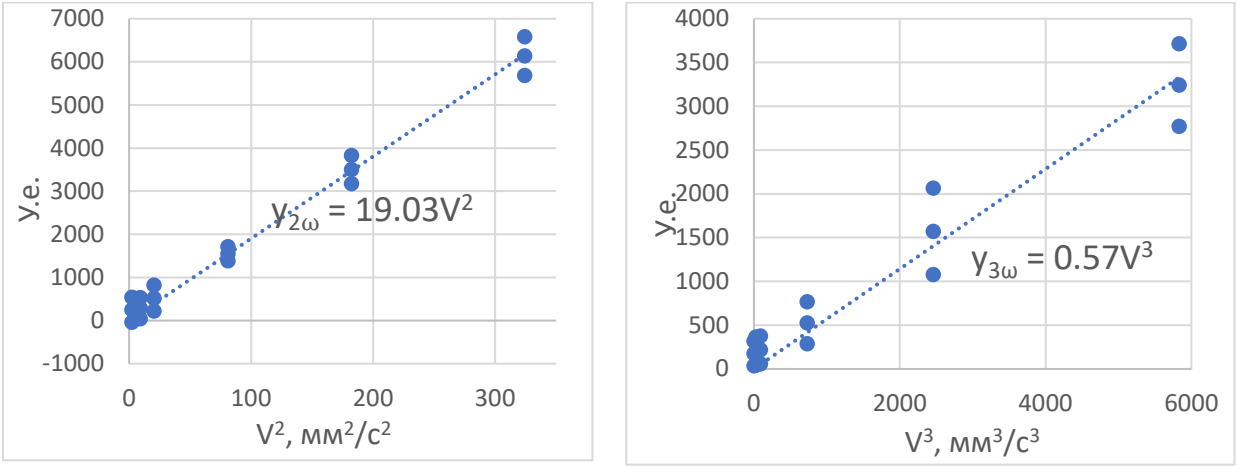


Рисунок 3. Зависимость амплитуды второй гармоники от квадрата входной скорости (слева) и амплитуды третьей гармоники от входной скорости в третьей степени (справа).

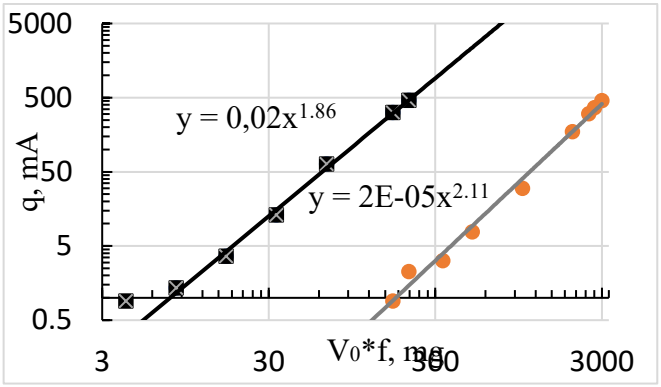


Рисунок 4. Зависимость постоянной составляющей сигнального тока от величины входного сигнала. Черный график соответствует зависимости q сейсмодатчика с разомкнутой обратной связью. Серый соответствует зависимости q сейсмодатчика с замкнутой обратной связью.

В конце экспериментальной части представлены данные по прямому измерению частотной зависимости максимального измеряемого сигнала в широком частотном диапазоне для двух образцов электрохимических сейсмодатчиков, показанные на рисунке 5

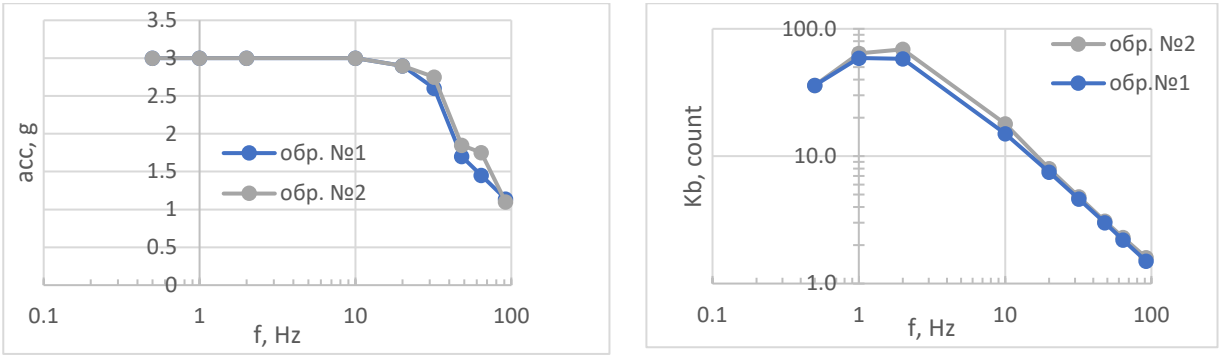


Рисунок 5. Максимальный измеряемый сигнал (слева) и значение глубины обратной связи $W_s \cdot W_f \cdot W_{fb}$ из (1) (справа).

Для этого на каждой частоте на калибровочный вход подавался гармонический сигнал с шагом 0.2 g до тех пор, пока датчик не входил в режим насыщения. Значения максимальных сигналов показаны на рисунке 5 слева, а справа показаны значения значение глубины обратной связи $W_s \cdot W_f \cdot W_{fb}$ из (1). Максимальный сигнал на частотах ниже 10 Гц составляет ±3 g, что соответствует напряжению ±7,2 В, которое определяется питанием электроники. Для каждого образца при максимальном сигнале были измерены коэффициенты КГИ, данные которых представлены на рисунке 6.

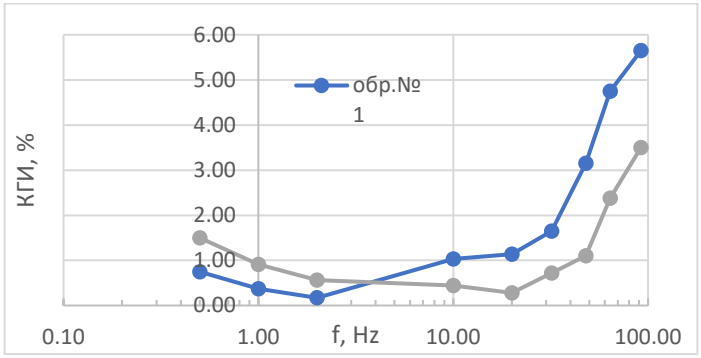


Рисунок 6. КГИ для каждого образца электрохимического сейсмодатчика при максимальном сигнале.

Для проверки возможности использования электрохимического сейсмодатчика в натурных условиях была проведена запись на механическом стенде производства Teknik Destek Grubu (TDG, Турция), имитирующем землетрясение, совместно с МЭМС акселерометром MS1000 производства Colibrys. В качестве образца был взят серийный электрохимический акселерометр MTSS1031A производства R-Sensors. Записи и спектры сигналов представлены на рисунке 63.

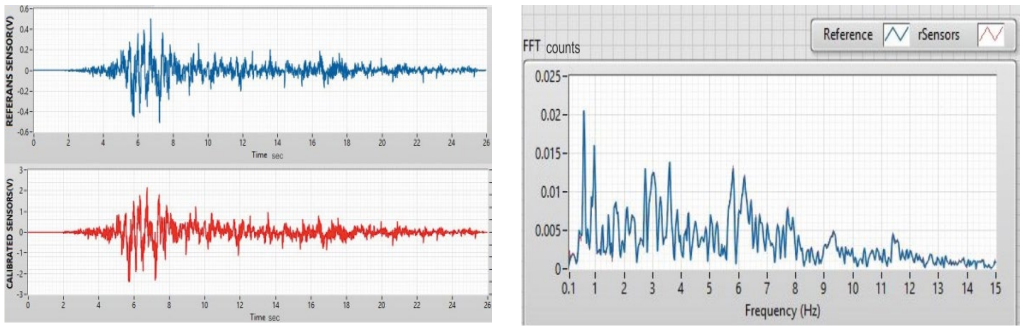


Рисунок 7. Данные записи имитации землетрясения на механическом столе (слева): голубой – для MS1000 (Colibrys) с чувствительностью 0.5 В/g; красный – MTSS1031A (R-Sensors) с чувствительностью 2.4 В/g. Спектры записей имитации землетрясения (справа): голубой - MS1000 (Colibrys); красный – MTSS1031A (R-Sensors).

Спектральный анализ показал, что электрохимический акселерометр MTSS 1031A (R- Sensors) может использоваться для детектирования и анализа сильных возмущений наравне с МЭМС акселерометрами MS1000 (Colibrys).

Для математического обоснования экспериментальных данных была разработана одномерная модель, основанная на решении уравнения конвективной диффузии для переноса активных ионов с граничными условиями, учитывающими скорости электродных реакций:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial C_{I_3^-}}{\partial t} = D_{I_3^-} \dfrac{\partial^2 C_{I_3^-}}{\partial x^2} - V \dfrac{\partial C_{I_3^-}}{\partial x} \\ \dfrac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где $C_{I_3^-}$ - концентрация, $D_{I_3^-}$ коэффициент диффузии ионов I_3^-, V - скорость потока раствора электролита через электродную ячейку, а $\Phi = \phi - \frac{kT(D_{I^-} - D_{K^+})C_{I^-}}{qC_b(D_{I^-} + D_{K^+})} - \frac{kT(D_{I_3^-} - D_{K^+})C_{I_3^-}}{qC_b(D_{I^-} + D_{K^+})}$

Будем искать решение уравнений (3) в виде разложений по степеням V до третьего порядка, с учетом того, что электролит протекает со скоростью, меняющейся по гармоническому закону $V = V_0 sin\omega t$:

$$C_{I_3^-} = C_{I_3^-}{}^{(0)} + C_{I_3^-}{}^{(1)} + C_{I_3^-}{}^{(2)} \quad (4)$$
$$\Phi = \Phi^{(0)} + \Phi^{(1)} + \Phi^{(2)}$$

где $C_{I_3^-}{}^{(0)}, \Phi^{(0)} \sim V^0, C_{I_3^-}{}^{(1)}, \Phi^{(1)} \sim V^1, C_{I_3^-}{}^{(2)}, \Phi^{(2)} \sim V^2, C_{I_3^-}{}^{(3)}, \Phi^{(3)} \sim V^3$. Если решения искать в виде $C_{I_3^-}{}^{(1)} = \mathrm{C}_1(x)\sin(\omega t + \gamma)$, $C_{I_3^-}{}^{(2)} = \mathrm{C}_2(x) sin^2(\omega t + \alpha)$, $C_{I_3^-}{}^{(3)} = \mathrm{C}_3(x) sin^3(\omega t + \epsilon)$, то решение для $C_{I_3^-}{}^{(2)}$ дает добавку к катодным токам в виде постоянной величины зависящей от ${V_0}^2$, а общее выражение для тока представляется как:

$$I = I_0 + I_1(V_0)\sin(\omega t + \theta_1) + I_2\left({V_0}^2\right) cos(2\omega t + \theta_2) + \\ + q(V_0^2) + {I_3}'\left({V_0}^3\right) si\, n(\omega t + {\theta_3}') + + {I_3}''\left({V_0}^3\right) sin\,(3\omega t + {\theta_3}'') \quad (5)$$

Здесь I_0 – фоновый ток, который определяется стационарным случаем, I_1, I_2, I_3', I_3'' – сигнальные токи соответствующие степеням разложения скорости, $q({V_0}^2)$ - постоянная составляющая тока, зависящая от скорости электролита.

Как результат, экспериментальные данные этой части полностью соответствуют выражению (5).

Во второй части этой главы исследовались шумовые характеристики электрохимических датчиков двух типов: не содержащего отрицательную обратную связь датчика угловой скорости METR 11 (R-Sensors) и датчиков, содержащих узел отрицательной обратной связи MTSS 1001 (R- Sensors).

Для первого типа были экспериментально получены зависимости спектральной плотности мощности шума от частоты для электрохимического датчика угловой скорости на выходе электроники и, отдельно, для электроники на входе которой вместо анод-катодных пар чувствительного элемента, подключались резисторы для их различных значений. Полученные данные показаны на рисунке 8, где слева показано сравнение экспериментальных данных и математическое моделирование значений шумов электроники, а справа сравнение собственного шума электрохимического датчика угловой скорости и моделирование значений шумов электроники.

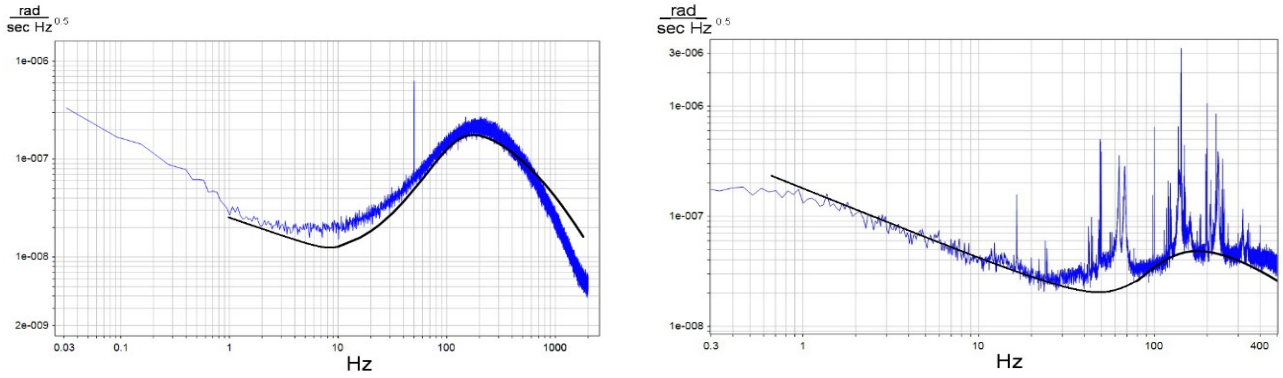


Рисунок 8. Моделирование собственного шума электроники (слева): синяя кривая – экспериментальные данные, черная кривая - теоретическое приближение. Моделирование собственного шума электрохимического датчика угловой скорости (справа): черная кривая - собственный шум электроники, синяя кривая - собственный шум датчика.

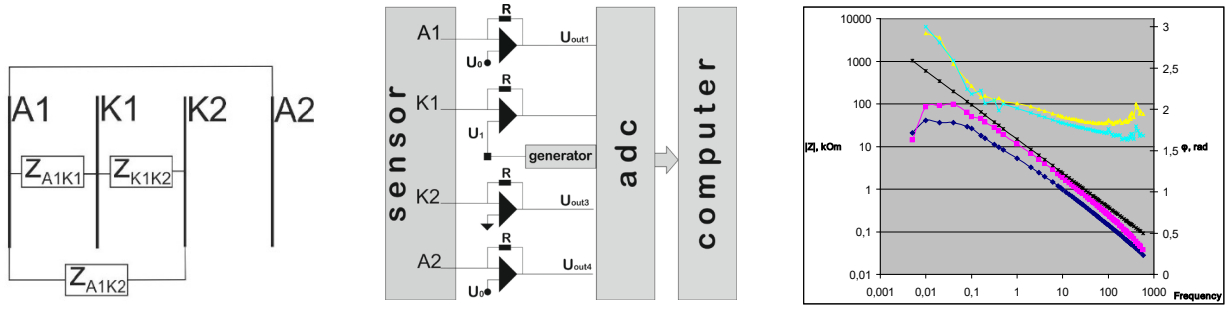
В итоге был сделан вывод, что модель собственного шума электрохимического датчика угловой скорости, основанная на предположении о наличии двух физических механизмов, ответственных за собственный шум прибора, согласуется с экспериментальными данными. Этими двумя источниками шума являются гидродинамическая конвекция и собственный шум операционных усилителей. Спектральная плотность шума, создаваемого конвекцией, преобладает на низких частотах и затем снижается по закону ~ 1/*f*, в то время как электронный шум преобладает на высоких частотах.

Для исследования электронного шума датчика второго типа были измерены импедансы анод-катодных пар по схеме показанной на рисунке 9 *а* и *б,* которые соответствуют входным импедансам операционного усилителя в первом каскаде, что дает возможность точно рассчитать значения импеданса на всем частотном диапазоне. После этого, собственный шум, приведенный к выходу, рассчитывается согласно следующему выражению:

$$U_{out1} = \frac{\frac{U_{N1}(1 + Z_1/Z_{sens})Z_3}{Z_2}}{1 - W_s W_f W_{fb}} \qquad (6)$$

где U_{N1} – шум по напряжению во входе ОУ, Z_1 – импеданс в обратной связи ОУ в первом каскаде, Z_3/Z_2 – передаточная функция второго каскада W_2, Z_{sens} – импеданс электрохимической системы.

Результаты расчёта спектральной плотности шумов операционных усилителей по току и напряжению на выходе электрохимического сейсмодатчика показаны на рисунке 10 слева. Справа представлены различными цветами суммарные шумы электроники (светло-красный) и конвекции (темно-красный), что позволяет оценить их вклад в общий шум на различных частотах.



а *б* *в*

Рисунок 9. *а*- эквивалентная электрическая цепь, представляющая импеданс электрохимической системы. *б* -блок-схема измерения импеданса электрохимической системы. *в* -. модуль и фаза экспериментальных данных измерения импеданса анод-катодных пар электрохимических ячеек. Синяя кривая – модуль импеданса анода 1, сиреневая – модуль импеданса анода 2, желтая и голубая – фазы мпеданса анода 1 и 2 соответственно. Черная – функция $1/f^{0.8}$.

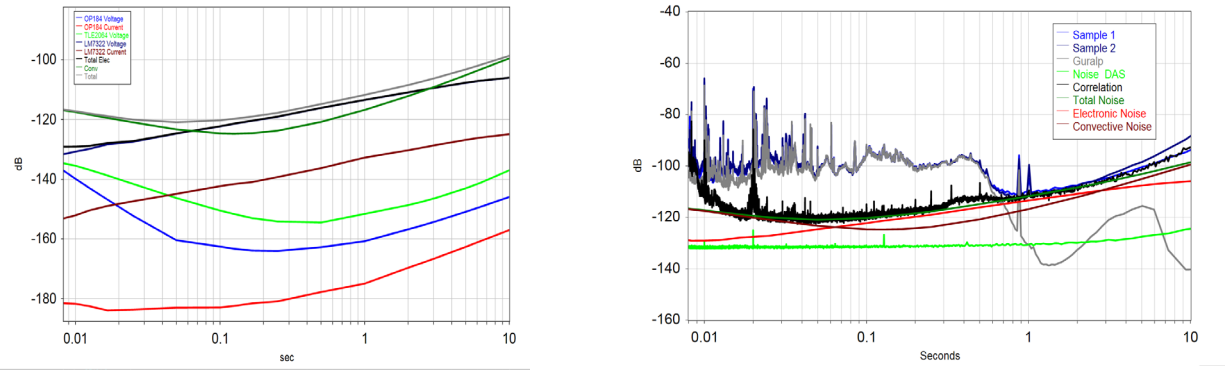


Рисунок 10. Слева - спектральная плотность шумов операционных усилителей по току и напряжению на выходе электрохимического сейсмодатчика. Справа - спектральные плотности: сигналов электрохимических сейсмодатчиков; их некоррелированная составляющая; сигнала референсного прибора; шума системы сбора данных; шума электроники.

На рисунке 11 представлены влияния на уровень собственных шумов электрохимических сейсмодатчиков различных параметров электронных компонент сопутствующей электроники:

- Синяя кривая – в первом каскаде W_1 ОУ AD706, резисторы в каскадах обратной связи W_{fb} Z_4=4.7 кОм, Z_5=2.4 кОм, Z_6=1.5 кОм.
- Красная кривая - в первом каскаде W_1 ОУ TLE2064, резисторы в каскадах обратной связи W_{fb} Z_4=4.7 кОм, Z_5=2.4 кОм, Z_6=1.5 кОм.
- Серая кривая - в первом каскаде W_1 ОУ AD706, резисторы в каскадах обратной связи W_{fb} Z_4=47 кОм, Z_5=24 кОм, Z_6=15 кОм.

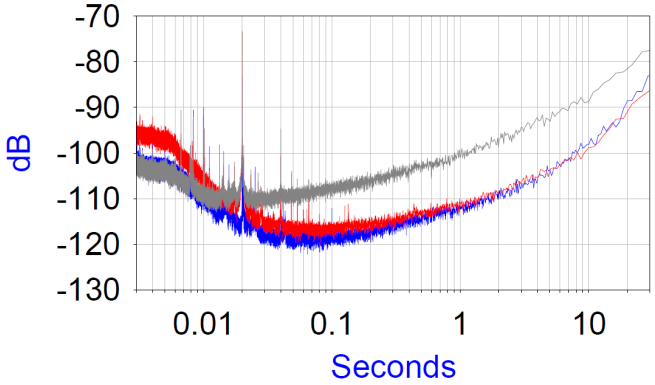


Рисунок 11. Вклад в уровень собственных шумов электрохимических сейсмодатчиков различных параметров электронных компонент сопутствующей электроники.

Учитывая хорошее согласие экспериментальных данных для собственных шумов электрохимического сейсмодатчика с расчетами, делались выводы, что уровень шумов электрохимических сейсмодатчиков с обратной связью определяется следующими факторами:

- на низких частотах - конвективной составляющей и шумом по току операционного усилителя в каскаде обратной связи электроники;
- на средних частотах – конвективным шумом;
- на высоких частотах – шумом по напряжению усилителя первого каскада электроники, который зависит от импеданса электрохимической системы чувствительного элемента, а также конвективной составляющей.

Из полученных результатов сделаны следующие выводы ко второй главе:

1. Основной вклад в коэффициент гармонического искажения вносит третья гармоника, за счет того, что сигнальная составляющая выходного тока является результатом вычитания катодных токов. При этом исключить влияние второй гармоники полностью невозможно ввиду неидеальности технологий создания электродных микроструктур чувствительного элемента электрохимического датчика.

2. Одним из основных ограничений в максимально измеряемый сигнал вносит нелинейный эффект, заключающийся в увеличении постоянных составляющих катодных токов при увеличении амплитуды входного воздействия. При таком поведении катодных токов возникает ситуация, когда операционные усилители в первом каскаде электроники, которые преобразуют катодные токи в напряжение, входят в режим насыщения и электрохимический сейсмодатчик выходит из рабочего режима.
3. Применение отрицательной электродинамической обратной связи позволяет уменьшить скорость потока электролита, что непосредственным образом уменьшает все нелинейные эффекты при увеличении максимально регистрируемого сигнала электрохимическим сейсмодатчиком.
4. Основными параметрами, влияющими на минимально регистрируемый сигнал, являются параметры электрохимической системы чувствительного элемента сейсмодатчика совместно с сопутствующей электроникой. Так на высоких частотах уровень собственных шумов электрохимических датчиков определяется значением входного шума операционного усилителя по напряжению и импедансом электрохимической ячейки сейсмодатчика. На низких частотах уровень собственных шумов электрохимического сейсмодатчка определяется механизмом конвекции, а также шумом по току операционного усилителя в каскаде обратной связи электроники.
5. На основе исследований были модифицированы и выпущены на серийном производстве компании R-Sensors электрохимические сейсмические акселерометры MTSS-1031A и прошли испытания в лаборатории заказчика Teknik Destek Grubu (TDG, Турция).

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию зависимостей характеристик чувствительного элемента электрохимического сейсмодатчика в широком диапазоне температур.

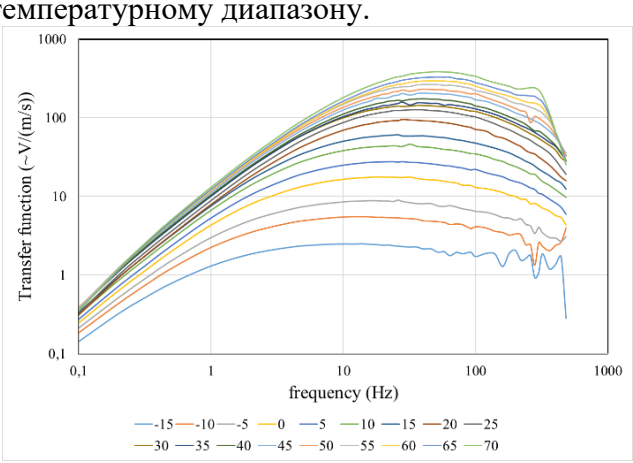
В первой части была описана специально сконструированная экспериментальная установка и методы получения экспериментальных данных в диапазоне температур от -40°C до +60°C.

Также была определена математическая модель передаточной функции электрохимического чувствительного элемента с учетом накопленных теоретических и экспериментальных знаний, которая была представлена следующим выражением:

$$W = \frac{A_0}{\left(1+\frac{\omega_{mech1}^2}{\omega^2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(1+\frac{\omega_{mech2}^2}{\omega^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \times \frac{1}{\left(1+\frac{\omega^2}{\omega_{el-ch}^2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(1+\frac{\omega^2}{\omega_D^2}\right)^{\alpha}} \quad (7)$$

где $A_0, \omega_{mech,1}, \omega_{mech,2}, \omega_{el-ch}, \omega_D$ и α - параметры аппроксимации, зависящие от температуры.

С помощью экспериментальной установки получены семейства АЧХ для образцов на основе KI от -15°C до +70°C и LiI от -35°C до +70°C, которые показаны рисунке 12. Видно, что АЧХ образцов электрохимических чувствительных элементов существенно зависит от температуры, причем характер изменений не является линейным как по частотному, так и по температурному диапазону.



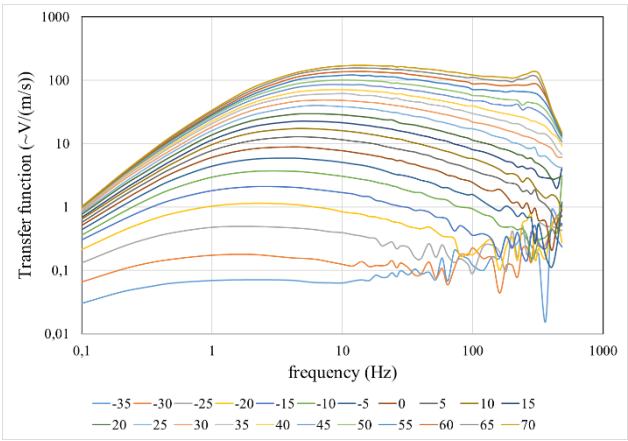


Рисунок 12. Семейства АЧХ для образцов на основе KI от -15°C до +70°C (слева) и на основе LiI от -35°C до +70°C (справа) с шагом 5°C.

Одновременно проводились измерения зависимости фоновых токов от температуры для одних и тех же образцов. Результаты показаны на рисунке 13.

Для анализа полученных данных были построены $ln(W)$ от $1/T$ для каждой из частот при температурах от 0°C до +50°C, представленные на рисунке 14, где каждая линия отображает значение $W(\omega)$ на одной и той же частоте ω для разных температур в диапазоне 80 – 403 Гц. Линейная аппроксимация для каждого массива экспериментальных точек дает наклон для каждой частоты $\beta = T \cdot \ln(W)$. Согласно (7) при типичных значения параметров $\beta = const$ при ω> 100 Гц, что хорошо соответствует экспериментальным результатам.

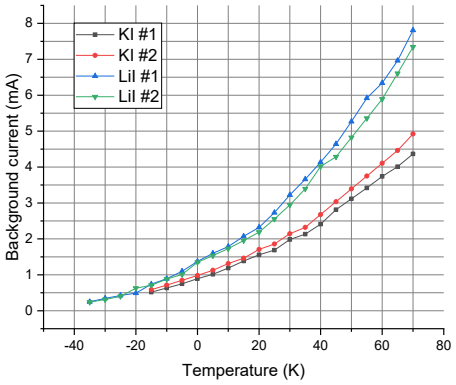


Рисунок 13. Зависимости фоновых токов от температуры для образцов электрохимических чувствительных элементов.

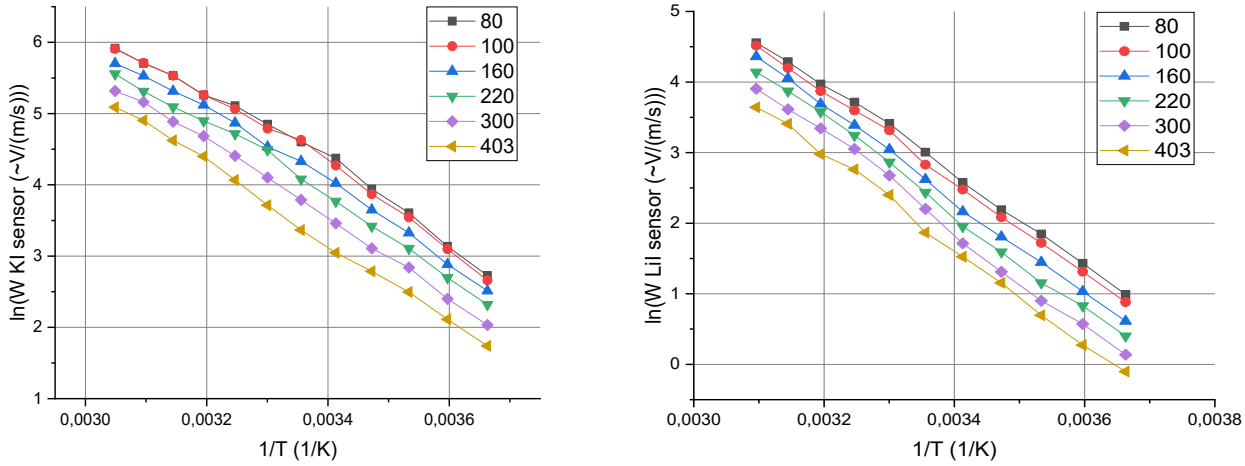


Рисунок 14. Зависимости $\ln(W_{KI\ sensor})$ (слева) и $\ln(W_{LiI\ sensor})$ (справа) от $1/T$ в диапазоне 80 - 403 Гц.

Аппроксимация АЧХ во всем рабочем диапазоне температур для каждого электролита проводилась в программе Origin 2018 в логарифмической шкале методом наименьших квадратов. Выяснилось, что параметр A_0 практически не изменяется при изменении температуры, а параметр α получил разброс значений от 0.24 до 0.27, что хорошо согласуется с теоретическим значением 0.25. Дальнейший выбор параметров аппроксимации проводился при фиксированных A_0 и α. На рисунке 15 показаны приближения АЧХ одного из образцов на основе KI при +25°C (слева) и +70°C (справа). На рисунке 16 показаны приближения АЧХ одного из образцов на основе Li при -20°C.

Таким образом, для передаточных функций, взятых при каждой температуре, были получены значения $\omega_{mech,1}$, $\omega_{mech,2}$, ω_{el-ch}, и ω_D, то есть в соответствии с экспериментальными точками для каждой температуры были заданы параметры аппроксимации, чтобы четко придерживаться АЧХ аналитической зависимости, предложенной в (7).

Согласно теоретической модели, каждая из этих частот связана с зависящими от температуры коэффициентами вязкости и диффузии следующими выражениями:

$$\begin{cases} \omega_{mech,1} = \dfrac{\alpha}{R_h S_{CH}} \sigma^2 \sim \dfrac{1}{\nu} \\ \omega_{mech,2} = \dfrac{R_h S_{CH}}{\rho L} \sim \nu \\ \omega_{el-ch} = b \dfrac{bD}{d^2} \sim D \\ \omega_D \sim D \end{cases} \quad (8)$$

В свою очередь, коэффициент диффузии D и вязкость жидкости ν экспоненциально зависят от температуры.

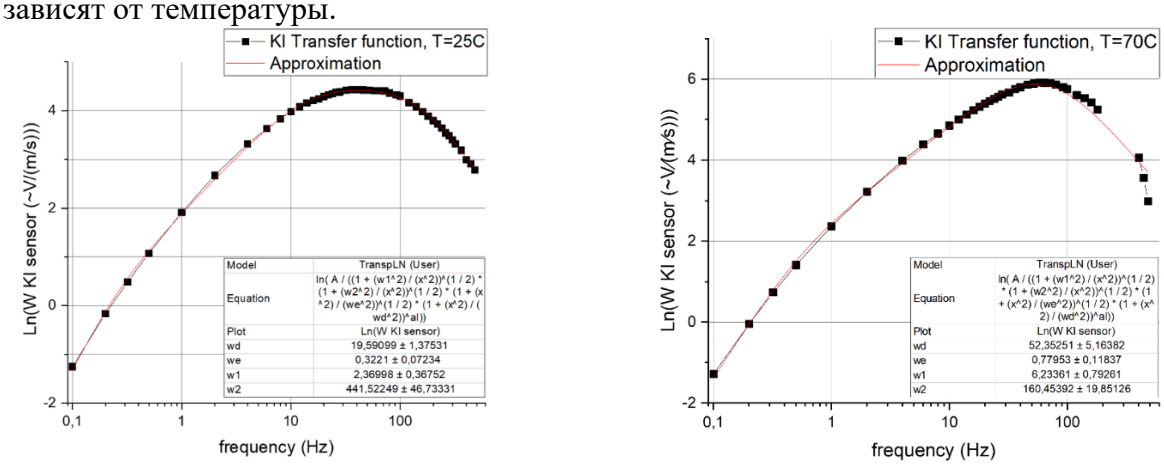


Рисунок 15. Аппроксимация передаточной функции для одного из образцов на основе KI при +25°C (слева) и +70°C (справа).

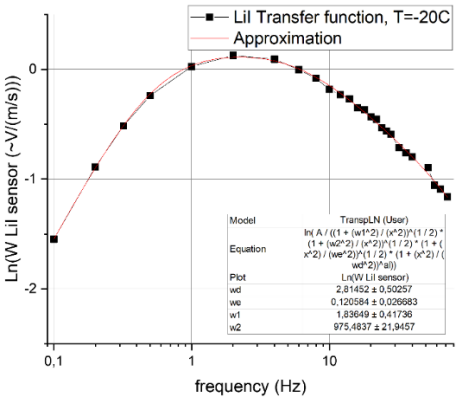


Рисунок 16. Аппроксимация передаточной функции для одного из датчиков на основе LiI при - 20°C.

Для проверки теоретической модели и полученных коэффициентов аппроксимации экспериментальных данных в логарифмическом масштабе были построены зависимости $\omega_{mech,1}$, $\omega_{mech,2}$, ω_{el-ch} и ω_D от обратной температуры ($1/T$). На рисунке 17 приведены зависимости ω_D образцов электрохимических чувствительных элементов с электролитом на основе KI (слева) и LiI (справа). Видно, что экспериментальные точки строго лежат на линейной функции, что полностью согласуется с температурной зависимостью коэффициента диффузии $D = \frac{\delta^2}{2\tau_0} exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$. Угловой коэффициент таких зависимостей должен быть равен энергиям активации E_a ионов соответствующего электролита, деленному на постоянную Больцмана k.

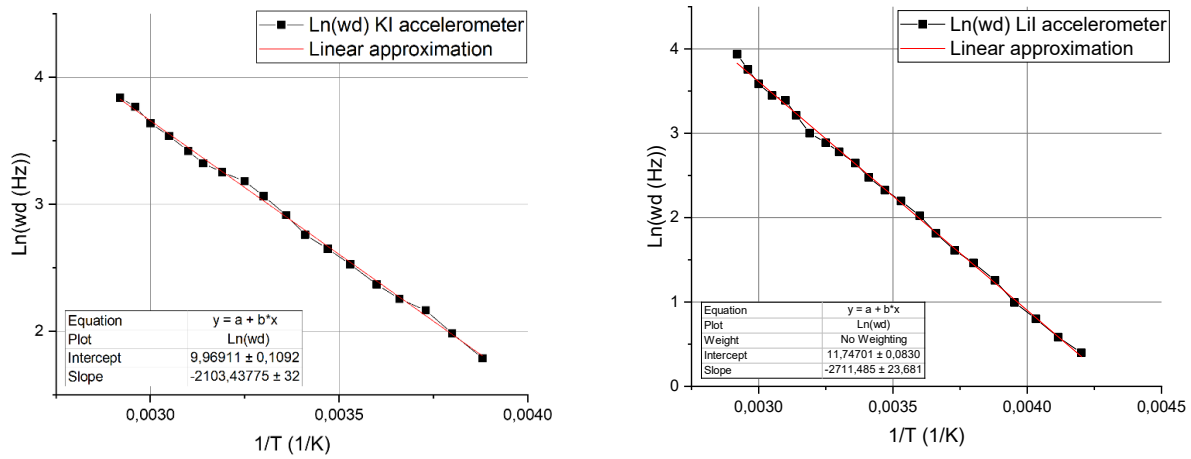


Рисунок 17. Аппроксимация углового коэффициента для ω_D для одного из образцов на основе KI (слева) и LiI (справа) в диапазоне от -40°C до +70°C.

Аналогичные зависимости были построены для остальных параметров аппроксимации $\omega_{mech,1}$, $\omega_{mech,2}$, ω_{el-ch} и ω_D и угловых коэффициентов для каждой из характеристических частот. Соответствующие энергии активации рассчитывались аналогично. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Энергии активации, найденные из коэффициентов аппроксимации.

Угловые коэффициенты, E_a/k (^{0}K)				
Параметр	KI #1	KI #2	LiI #1	LiI #2
ω_D	2168 ± 27	2103 ± 24	2711 ± 31	2698 ± 33
ω_{el-ch}	2133 ± 28	2090 ± 19	2612 ± 21	2594 ± 35
$\omega_{mech,1}$	1989 ± 39	1922 ± 43	2420 ± 47	2296 ± 52
$\omega_{mech,2}$	2018 ± 54	1934 ± 51	2412 ± 62	2251 ± 50

Из данных представленных в Таблице 1 видно, что в пределах погрешности энергии активации хорошо совпадают между собой для каждого параметра аппроксимации, что является хорошей проверкой правильности выбранной математической модели температурного поведения электрохимических сейсмодатчиков в диапазоне 0.1 - 483 Гц.

Было замечено, что энергии активации для электрохимических коэффициентов (ω_{el-ch} и ω_D) во всех случаях оказались немного выше, чем для механических коэффициентов ($\omega_{mech,1}$, $\omega_{mech,2}$). Это происходит потому, что при рассмотрении диффузии и вязкости важны разные ионы раствора электролита. Поскольку носителями тока в электрохимической системе, который определяется коэффициентом диффузии, являются только триодид-ионы I_3^-, энергия активации этих ионов соответствует электрохимической подсистеме. Тогда как вязкость входит уже как параметр механической системы и здесь существенную роль играет усредненная энергия активации всех молекул и ионов раствора: молекулы воды H_2O, ионы йода I^-, калия K^+ (или лития Li^+), ионы триодида I_3^-.

Также полученные значения фоновых токов, показанные на рисунке 13, имеют температурную зависимость, пропорциональную коэффициенту диффузии в соответствии с выражением для токов через электроды:

$$I = -Dq \oint_S (\nabla c, \vec{n}) dS \tag{9}$$

здесь интегрирование выполняется по поверхности S электрода, $\vec{n}$ - единичный вектор, нормальный к поверхности, q - заряд, переносимый через электрод в единичной реакции. Зависимость фоновых токов от температуры в логарифмическом масштабе должна быть линейной, а угловые коэффициенты, показанные в Таблице 2, должны быть такими же, как и для зависимостей ω_Dи ω_{el-ch}, что показано на рисунке 18.

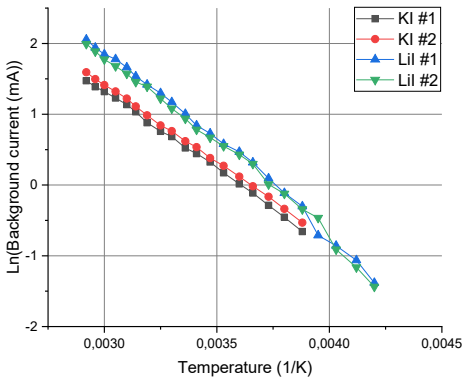


Рисунок 18. Аппроксимация углового коэффициента фонового тока датчиков на основе KI и LiI.

Таблица 2. Энергии активации трийодида I_3^-, определяемые по фоновым токам.

Угловые коэффициенты, E_a/k (^{0}K)			
KI #1	KI #2	LiI #1	LiI #2
2184 ± 28	2102 ± 24	2626 ± 33	2567 ± 39

Сравнивая результаты Таблиц 1 и 2, видно, что энергии активации, полученные для параметров, зависящих от коэффициента диффузии для трииодид-ионов I_3, близки друг к другу, что свидетельствует о правильном выборе модели и полном согласии с экспериментом.

Вязкость электролита и энергия активации ионов четырехмолярного раствора KI и LiI были измерены независимо от работы датчика с помощью вискозиметра ВПЗ-3 с возможностью терморегуляции выбранного объема. Диаграммы экспериментальных данных вязкости в логарифмическом масштабе от обратной температуры для электролита KI и LiI, аппроксимированные линейными функциями, показаны на рисунке 19 слева и справа соответственно.

Таким образом, угловые коэффициенты E_a/k были получены с использованием прямых измерений вязкости электролита в зависимости от температуры и представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Энергии активации 4-молярных растворов KI и LiI, найденные из коэффициентов вязкости.

Угловой коэффициент, E_a/k (^{0}K)	
KI	LiI
1868 ± 34	2280 ± 35

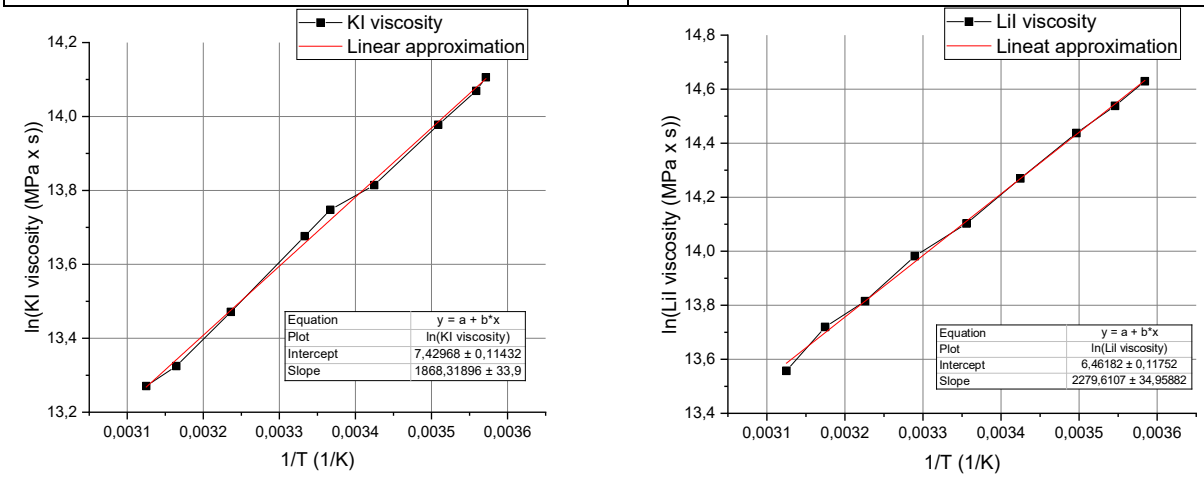


Рисунок 19. Аппроксимация коэффициента вязкости электролита KI (слева) и LiI (справа).

При сравнении 1 и 3 видно, что значения энергий активации, полученные из анализа частотных и температурных характеристик электрохимических датчиков для параметров,

зависящих от коэффициента вязкости для 4-молярных растворов KI и LiI, совпадают в пределах погрешности менее 10% с энергией активации полученной прямым измерением вязкости. Таким образом, предложенная теоретическая модель (7) полностью подтвердилась.

Вторая часть третьей главы посвящена разработке способа стабилизации коэффициента преобразования сигнала при изменении температуры в широком диапазоне путем анализа известных моделей поведения характеристик электрохимического датчика в зависимости от температуры и экспериментального исследования методов управления граничными условиями на электродах.

Известно, что параметры электрохимического чувствительного элемента изменяются с температурой, что вызвано температурными изменениями вязкости жидкости и коэффициента диффузии. Так при понижении температуры вязкость увеличивается, что, соответственно, влияет на скорость протекания электролита, которая уменьшается при одинаковом воздействии. Одновременно коэффициент диффузии уменьшается. Соответственно, уменьшается размер области в объеме электролита, из которой активные носители заряда успевают достичь электродов при изменении механического воздействия. Оба эти эффекта вызывают падение коэффициента преобразования при понижении температуры. В частности, в диапазоне от -40°C до + 70°C перепад может достигать нескольких сотен раз, согласно данным показанным на рисунке 12.

Для уменьшения температурной погрешности электрохимического чувствительного элемента можно использовать способ, заключающийся в подключении указанного чувствительного элемента к электронике, содержащей схемы коррекции с терморезисторами. При изменении температуры окружающей среды изменение сопротивления термистора корректирует коэффициент преобразования. Основным недостатком использования схем коррекции является то, что довольно сложно компенсировать падение коэффициента передачи при изменении температуры во всем рабочем диапазоне частот. Это требует более сложной электроники и увеличения количества компонентов, используемых в сопутствующей электронике, что увеличивает шум измерительного тракта. Альтернативный подход состоит в управляемом изменении концентрации активных носителей заряда в анодной области и, как следствие, изменении градиента концентрации активных носителей заряда вблизи катода.

Для реализации этого подхода была предложена новая электродная микросистема электрохимического чувствительного элемента, основная задача которой - стабилизация первичных выходных параметров при изменении температуры.

В новой электродной микросистеме используются шесть симметрично расположенных электродов. Схема этого узла и его подключение к электронике, показаны на рисунке 20. Также на рисунке 20 показано распределение концентрации активного компонента при неподвижном электролите. В этом случае концентрация активного компонента на катоде «c» равна нулю. Выходные токи преобразуется в напряжение и усиливаются операционными усилителями ОА, включенными в дифференциальную цепь. На вспомогательные электроды «a_el», расположенные относительно анодов на намного большем расстоянии чем катоды, подается электрический потенциал U_0 на 100-500 мВ выше потенциала катодов, обеспечивая рабочую точку на ВАХ. Соответственно, на анодах, которые подключены к источнику постоянного тока «J», автоматически устанавливается потенциал для обеспечения протекания установленного тока.

В результате в зависимости от величины тока источника устанавливается распределение концентрации, показанное кривыми 1 и 2 на рисунке 20. В первом случае распределения, показанного зависимостью 1, фоновый ток превышает фоновый ток при подключении стандартного четырехэлектродного узла. Во втором случае (кривая 2) фоновый ток меньше соответствующего тока при подключении четырехэлектродного узла. Из-за разницы в расстоянии от анода до катода и вспомогательного электрода основная часть тока (> 90%) источника идет на катоды. Таким образом обеспечивает постоянство фонового катодного тока. Это означает, что при изменении температуры и соответствующем изменении коэффициента диффузии в выражении (8) концентрация распределения активного компонента должна

измениться так, чтобы градиент концентрации активного компонента в катодной области пропорционально увеличивался.

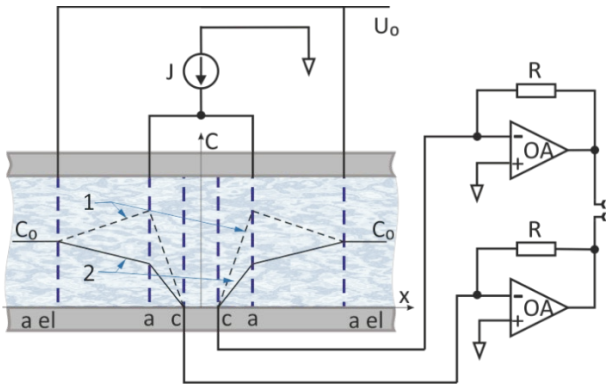


Рисунок 20. Схема подключения к электронной схеме шестиэлектродного узла и распределение концентрации активного компонента при неподвижном электролите.

В результате, когда температура изменяется, следующие разнонаправленные механизмы будут влиять на поведение коэффициента преобразования. С одной стороны, увеличение вязкости и уменьшение коэффициента диффузии должно приводить к уменьшению коэффициента преобразования при более низких температурах. С другой стороны, увеличение градиента прикатодной концентрации активного компонента должно способствовать его росту.

Для экспериментальных исследований температурных зависимостей АЧХ нового шестиэлектродного электрохимического чувствительного элемента использовался стандартный четырехэлектродный чувствительный элемент с сетчатыми платиноиридиевыми электродами размером 3x3 мм^2. Отличием в конструкции было подключение дополнительных электродов, которые также представляли собой сетчатые платиноиридиевые электроды с площадью 8 мм^2, помещенные симметрично в заанодные пространства на расстоянии, примерно, 10 мм от анодов.

На рисунке 21 слева представлен образец чувствительного элемента с новой электродной микросистемой, где в пластиковом корпусе расположен стандартный четырехэлектродный узел, а рядом с мембранами в объеме электролита располагались дополнительные электроды. Принципиальная схема подключения шести электродов представлена на рисунке 21 справа, где фоновый ток, подаваемый на аноды «а» определяется как $I = U_{cur}/R_{28}$. Напряжение на дополнительных электродах «a_el» формируется с помощью стабилитрона LM285-1.2 и составляет 300 мВ. Токи, снимаемые с катодов «с», подаются на первый каскад электроники прямой цепи, где складываются и преобразуются в напряжение для дальнейшей коррекции.

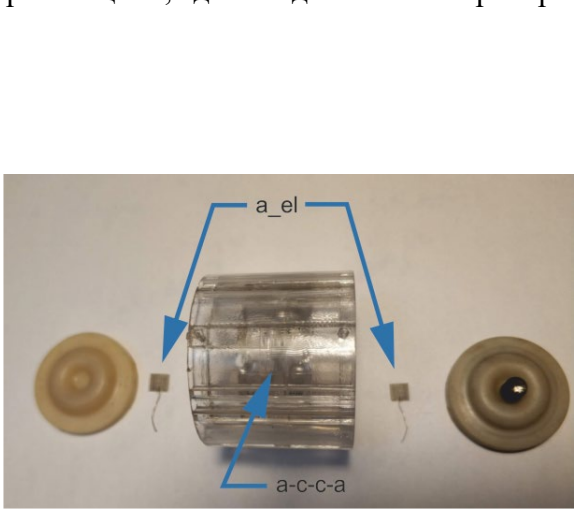


Рисунок 21. Слева- образец чувствительного элемента с новой электродной микросистемой. Справа - Принципиальная схема подключения шестиэлектродного узла.

Полученное семейство передаточных функций для чувствительного элемента с новой микросистемой в диапазоне от -20°С до +40°С с шагом 15°С показано на рисунке 22 слева. Также получена зависимость фоновых токов от температуры для того же образца, данные которой показаны на рисунке 22 справа.

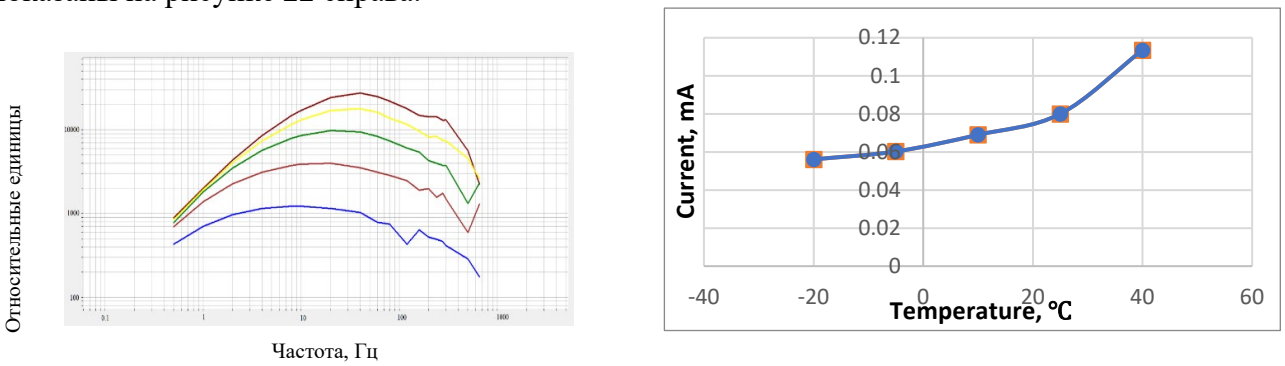


Рисунок 22. Слева: семейство передаточных функций чувствительного элемента с новой микросистемой (в диапазоне от + 40 °С до -20 °С с шагом 15 °С). Справа: рависимость фонового тока от температуры для электрохимического элемента с новой микроэлектродной системой.

Одновременно была измерена зависимость разности потенциалов между анод-катодными парами при изменении фонового тока, данные которой показаны в Таблице 4. Где I – фоновый ток, задаваемый схемой, URT1, URT2 – напряжения на соответствующих резисторах схемы, Ua- с – разность потенциалов между анодами и катодами. Так как схема поддерживается напряжением питания ±7В, то фоновый ток более 1300 мкА вводил в режим перегрузки операционный усилитель AD8671.

Таблица 4. Зависимость разности потенциалов между анодами и катодами Ua-с от фонового тока.

I, мкА	Ua-c, В	URT1, В	URT2, В
94.08	0.302	0.72	0.52
106.77	0.304	0.78	0.55
117.14	0.303	0.83	0.59
128.24	0.304	0.85	0.61
144.42	0.306	1.02	0.72
291.50	0.317	1.59	1.12
519.00	0.329	2.26	1.65
711.76	0.332	3.74	2.65
896.67	0.347	4.70	3.31
1260.00	0.362	6.08	4.28

Из данных, показанных в Таблице 4, видно, что можно подать фоновый ток в 4-5 раз больше тока стандартного четырехэлектродного узла.

Сравнивая данные полученные для стандартного четырехэлектродного узла, показанные на рисунке 12 справа, и для шестиэлектродного узла, показанные на рисунке 22 для температур -20°С и +40°С получаем, что в первом случае падение было в 100 раз, а во втором примерно в 30 раз. Таким образом, предлагаемое техническое решение новой шестиэлектродной микросистемы электрохимических сейсмодатчиков позволяет значительно снизить температурную зависимость стандартных чувствительных элементов. Предварительные эксперименты показали работоспособность предложенного технического решения.

Основные результаты, полученные в диссертации, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Экспериментально выявлена зависимость постоянной составляющей сигнальных токов от величины входного сигнала в диапазоне ускорений до 3g. Экспериментально получены коэффициенты гармонических искажений во всем рабочем частотном диапазоне

электрохимического акселерометра MTSS-1031A на верхней границе динамического диапазона. Измерены зависимости амплитуд второй и третьей гармоник выходного сигнала от величины входного воздействия.

2. Построена теоретическая модель, описывающая зависимость величины постоянной составляющей электродных токов электрохимической системы чувствительного элемента от величины входного сигнала в рамках решения уравнения конвективной диффузии одномерной модели чувствительного элемента. Также получены зависимости амплитуд второй и третьей гармоник катодных токов при решении уравнения конвективной диффузии одномерной модели чувствительного элемента. Полученные экспериментальные данные хорошо совпадают с теоретической моделью, что дает основание сделать вывод о применимости этой модели при описании нелинейного поведения электрохимического сейсмодатчика.
3. Разработан метод представления собственных шумов датчика в виде суммы составляющих, имеющих различную физическую природу. Установлено, что общий шум складывается из шума операционных усилителей в каскадах коррекции сигнала и каскада, образующего отрицательную обратную связь, шума операционного усилителя на входе которого стоит импеданс электрохимической системы, шума конвективной природы. Для каждого из физических механизмов, ответственных за генерацию шума, установлен частотный диапазон, в котором данный механизм является преобладающим.
4. Построена математическая модель, содержащая температурно-зависимые параметры и описывающая АЧХ чувствительного элемента явной аналитической зависимостью в широком температурном диапазоне.
5. Математическая модель температурного поведения АЧХ чувствительного элемента подтверждена экспериментальными измерения в термокамере для диапазона температур -15 °C - +70 °C для электролита на основе KI и -35 °C - +70 °C для электролита на основе LiI
6. Предложена теоретическая модель функционирования электрохимической системы чувствительного элемента сейсмодатчика с новой электродной микроструктурой, предназначенной для стабилизации коэффициента преобразования сигнала при изменении температуры в широком диапазоне. В новой микроструктуре два дополнительных электрода, на которых подается постоянный потенциал, относительно катодов, располагаются симметрично в заанодном пространстве. Одновременно через анод-катодные пары пропускается постоянный ток, который задает рабочую точку на ВАХ характеристике. Установлено, что при уменьшении температуры потенциал на анодах растет за счет изменения физико-химических свойств электролита, но благодаря подключению дополнительных электродов в электрическую цепь, на анодах не наступает процесс электролиза растворителя, при котором наступает отказ работы электрохимического чувствительного элемента.
7. Разработана принципиальная электронная схема подключения шестиэлектродного чувствительного элемента, которая позволяет регулировать крутизну преобразования сигнала и исключить влияние температурной зависимости коэффициента диффузии на АЧХ чувствительного элемента путем контроля величины протекающего постоянного тока.

Автор выражает глубочайшую благодарность научному руководителю Агафонову В.М., коллегам Егорову Е.В., Зайцеву Д.Л., Шабалиной А.С. за неоценимую помощь в работе над данной диссертационной работой, а также Мехедовой Е.Б., Мельникову И.В. и всему коллективу Центра Молекулярной Электроники за плодотворное научное сотрудничество.

.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью / В.М. Агафонов, И.В. Егоров, А.С. Шабалина // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49. – № 1. – С. 5-18. (англ. вариант: Agafonov V.M., Egorov I.V. and Shabalina A.S. Operating Principles and Technical Characteristics of a Small_Sized Molecular–Electronic Seismic Sensor with Negative Feedback / V. M. Agafonov, I. V. Egorov, and A. S. Shabalina // Seismic Instruments. – 2014. – V. 50. – No. 1. – Pp. 1–8. – © Allerton Press, Inc. ISSN 0747_9239).
2. Шабалина А.С., Зайцев Д.Л., Егоров Е.В., Егоров И.В., Антонов А.Н., Бугаев А.С., Агафонов В.М., Криштоп В.Г. Молекулярно-электронные преобразователи в современных измерительных приборах / А.С. Шабалина, Д.Л. Зайцев, Е.В. Егоров, И.В. Егоров, А.Н. Антонов, А.С. Бугаев, В.М. Агафонов, В.Г. Криштоп // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – № 9. – С. 33-46.
3. Egorov I.V., Shabalina A.S., Agafonov V.M. Design and Self-Noise of MET Closed-Loop Seismic Accelerometers / I.V. Egorov, A.S. Shabalina, V.M. Agafonov // IEEE Sensors Journal. – 1 April 2017. – V. 17. – I. 7. – No. 7847366. – Pp 2008-2014.
4. E. V. Egorov, I. V. Egorov, and V. M. Agafonov. Self-Noise of the MET angular motion seismic sensors // E. V. Egorov, I. V. Egorov, and V. M. Agafonov. J. Sensors, vol. 2015, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1155/2015/512645.
5. Novikov A.V., Egorchikov A.E., Dolgov A.N., Gornev E.S., Popov V.G., Egorov I.V., Krishtop V.G. The planar silicon-based microelectronic technology for electrochemical transducers / Novikov A.V., Egorchikov A.E., Dolgov A.N., Gornev E.S., Popov V.G., Egorov I.V., Krishtop V.G. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering – 2016, I. – 10224, № 102241J
6. Antonov A., Shabalina A., Razin A., Avdyukhina S., Egorov I., Agafonov V. Low-frequency seismic node based on molecular-electronic transfer sensors for marine and transition zone exploration / A. Antonov, A. Shabalina, A. Razin, S. Avdyukhina, I. Egorov, V. Agafonov // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 1 August 2017. – V. 34. – I. 8. – Pp. 1743-1748.
7. Agafonov V., Antonov A., Razin A., Avdyukhina S., Egorov I., Neeshpapa A., Dmitry P. Low-frequency sea-bottom seismic station for offshore exploration / Agafonov V., Antonov A., Razin A., Avdyukhina S., Egorov I., Neeshpapa A., Dmitry P. 9th Congress of the Balkan Geophysical Society, BGS 2017, November 2017, № 135104
8. Bugaev A.S., Antonov A. N., Agafonov V.M., Belotelov K.S., Vergeles S.S., Dudkin P.V., Egorov E.V., Egorov I.V, Zhevnenko D.A., Zhabin S.N., Zaitsev D.L., Krishtop T.V., Neeshpapa A.V., Popov V.G., Uskov V.V., Shabalina A.S. and Krishtop V. G. Measuring Devices Based on Molecular-Electronic Transducers / A.S. Bugaev, A. N. Antonov, V.M. Agafonov, K.S. Belotelov, S.S. Vergeles, P.V. Dudkin, E.V. Egorov, I.V. Egorov, D.A. Zhevnenko, S.N. Zhabin, D.L. Zaitsev, T.V. Krishtop, A.V. Neeshpapa, V.G. Popov, V.V. Uskov, A.S. Shabalina and V.G. Krishtop // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2018. – V. 63. – No. 12. – Pp. 1339–1351. ISSN 1064-2269. – © Pleiades Publishing, Inc. https://doi.org/10.1134/S1064226918110025. (Бугаев А.С., Антонов А.Н., Агафонов В.М., Белотелов К.С., Вергелес С.С., Дудкин П.В., Егоров Е.В., Егоров И.В., Жевненко Д.А., Жабин С.Н., Зайцев Д.Л., Криштоп Т.В., Неешпапа А.В., Попов В.Г., Усков В.В., Шабалина А.С., Криштоп В.Г. Измерительные приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей / А.С. Бугаев, А.Н. Антонов, В.М. Агафонов, К.С. Белотелов, С.С. Вергелес, П.В. Дудкин, Е.В. Егоров, И.В. Егоров, Д.А. Жевненко, С.Н. Жабин, Д.Л. Зайцев, Т.В. Криштоп, А.В. Неешпапа, В.Г. Попов, В.В. Усков, А.С. Шабалина, В.Г. Криштоп // Радиотехника и Электроника. – 2018. – Т. 63. – № 11. – С. 1–14).

9. Egorov I., Bugaev A., Chikishev D. Strong motion molecular-electronic accelerometer / Egorov I., Bugaev A., Chikishev D. 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2019, June, № 150485. pp. 959-966.
10. Dmitry A. Chikishev, Dmitry L. Zaitsev, Konstantin S. Belotelov, Ivan V. Egorov. The temperature dependence of amplitude- frequency response of the MET sensor of linear motion in a broad frequency range/ Dmitry A. Chikishev, Dmitry L. Zaitsev, Konstantin S. Belotelov, Ivan V. Egorov // IEEE Sensors Journal. – 1 November 2019. – V. 19. – I. 21. – No. 8758914. – Pp 9653-9661.
11. Fokina A., Egorov I., Shabalina A. Method for ensuring temperature and time stability of parameters of molecular electronic geophysical sensors for oil and gas exploration systems / 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, SGEM 2020, August 2020, № 166356.
12. Artem A. Krylov, Ivan V. Egorov, Sergey A. Kovachev, Dmitry A. Ilinskiy, Oleg Yu. Ganzha, Georgy K. Timashkevich, Konstantin A. Roginskiy, Mikhail E. Kulikov, Mikhail A. Novikov, Vladimir N. Ivanov, Elena A. Radiuk, Daria D. Rukavishnikova, Alexander V. Neeshpapa, Grigory O. Velichko, Leopold I. Lobkovsky, Igor P. Medvedev and Igor P. Semiletov. Ocean-Bottom Seismographs Based on Broadband MET Sensors: Architecture and Deployment Case Study in the Arctic / Artem A. Krylov, Ivan V. Egorov, Sergey A. Kovachev, Dmitry A. Ilinskiy, Oleg Yu. Ganzha, Georgy K. Timashkevich, Konstantin A. Roginskiy, Mikhail E. Kulikov, Mikhail A. Novikov, Vladimir N. Ivanov, Elena A. Radiuk, Daria D. Rukavishnikova, Alexander V. Neeshpapa, Grigory O. Velichko, Leopold I. Lobkovsky, Igor P. Medvedev and Igor P. Semiletov //Sensors – 9 June 2021. – V. 21. No. 3979. – Pp 1-22. https://doi.org/10.3390/s21123979.

Патенты

1. Non-magnetic azimuth sensing with MET electrochemical sensors. Vadim M. Agafonov, Ivan Egorov, Catherine Rice. Patent Application Publication No.: US 9,329,039 May 3, 2016.
2. Инерциальная система определения параметров движения тела и конечностей человека на основе молекулярно-электронных датчиков. Агафонов В.М., Егоров И.В., Зайцев Д.Л. Патент на полезную модель №RU91275U1 13 августа 2009 г.
3. Способ обеспечения температурной стабильности параметров молекулярно-электронного преобразователя в области высоких частот. Агафонов В.М., Егоров И.В., Егоров Е.В., Патент на изобретение № RU 2724303 от 10.12.2019.