На правах рукописи

Смокталь Николай Николаевич

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ГАЛЬВАНИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ТЕЛ

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» на кафедре «Электроэнергетика».

Научный руководитель:	**Завьялов Валерий Михайлович,** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь
Официальные оппоненты:	**Бирюков Сергей Владимирович,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Физика» ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск
	Хальясмаа Александра Ильмаровна, кандидат технических наук, доцент, заведующий научной лабораторией цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары

Защита состоится «22» января 2027 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.321.01 на базе ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000 г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Тел.: +7 (3842) 39-69-60, e-mail: markovso@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте: http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2026/smo/Dissertation.pdf

Автореферат разослан «___» _____20___г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент С.О. Марков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Высоковольтные электрические сети являются наиболее распространенными в электроэнергетической системе, от качества их функционирования зависит надежность энергообеспечения как промышленных предприятий, так и коммунального хозяйства. Для обеспечения их надежной и безотказной работы, а также защиты от возможных аварийных режимов в структуре электроэнергетической системы используются устройства релейной защиты и автоматики (РЗиА), работа которых основывается на информации о текущем состоянии электроэнергетической системы, в том числе о величине напряжения в электрической сети.

Для измерения напряжения в электрических сетях преимущественно применяют электромагнитные или емкостные трансформаторы напряжения (ТН). Хотя эти устройства предназначены для передачи информации, а не мощности, они отличаются значительными габаритами. Это вызвано самой трансформацией высокого напряжения, которая требует большой величины магнитного потока, что определяет габариты магнитопровода, а также надежной изоляции, как межвитковой, так и развязывающей первичные и вторичные цепи. Кроме того, в определенных аварийных режимах и электромагнитные и емкостные ТН могут инициировать феррорезонансные явления, способные усугубить развитие аварии.

Развитие электроэнергетики в рамках концепции цифровых подстанций и стандарта МЭК 61850 формирует новые требования к измерительным средствам. Информация в таких системах передается по оптоволоконным линиям, обладающим высокими диэлектрическими свойствами. Это создает предпосылки для разработки принципиально новых измерительных систем напряжения, в которых измерительный орган и устройство первичной обработки имеют гальваническую связь только с высоковольтной линией, будучи полностью изолированными от земли. Традиционные электромагнитные и емкостные ТН, несмотря на широкое распространение, обладают рядом недостатков: значительные массогабаритные показатели, наличие нелинейных элементов (магнитопроводов), склонность к феррорезонансу и аналоговый выход. Альтернативные решения – оптические трансформаторы или резистивные делители – либо сложны и дороги, либо имеют ограниченное применение.

В этой связи **актуальной** является задача разработки нового способа измерения высокого напряжения, лишенного указанных недостатков. Перспективным представляется подход, основанный на использовании в качестве измерительного органа системы гальванически связанных тел (СГСТ). Такой подход позволяет разместить всю измерительную электронику под потенциалом линии, а гальваническую развязку обеспечить по каналам передачи энергии (беспроводная передача) и информации (оптоволокно). Это открывает путь к созданию компактных, линейных и безопасных измерительных систем для цифровых подстанций.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в разработку и исследование средств измерения высокого напряжения внесли

отечественные и зарубежные ученые. С.В. Бирюковым разработаны теоретические основы построения электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля с чувствительными элементами различной геометрии. Полученные результаты имеют значение для обоснования выбора геометрии пассивного тела в разрабатываемой системе гальванически связанных тел. Направление бесконтактных D-dot датчиков (Цзин Ван, Чэнь Гао, Пэнчен Чжао) активно развивается, однако данному типу устройств свойственна существенная зависимость от позиционирования и влияния полей соседних фаз. Работы Л.Е. Дударева, М.Х. Зихермана, К.П. Кадомской посвящены исследованию феррорезонанса и разработке антирезонансных измерительных трансформаторов. В.Д. Лебедев и А.А. Яблоков занимались созданием измерительных трансформаторов с разомкнутыми магнитопроводами и разработкой моделей для анализа их характеристик. Р.Ф. Раскулов провел анализ влияния эксплуатационных факторов на точность измерений, выявив систематический характер погрешностей измерительных трансформаторов напряжения. Вопросы построения емкостных делителей и коррекции их нелинейных характеристик изучались А.М. Дымковым, В.Н. Вавиным, Чжоу Цяном и другими. В частности, вопросы кардинального улучшения массогабаритных показателей и полного исключения нелинейных электромагнитных связей из измерительного органа не нашли удовлетворительного решения. Это особенно актуально для современных цифровых подстанций и определяет необходимость поиска принципиально нового подхода, основанного на использовании системы гальванически связанных тел. Такой подход и составляет предмет настоящего исследования.

Целью исследования является разработка способа получения информации об электрическом потенциале высоковольтной линии электропередач, позволяющего на его основе проектировать измерительные системы с улучшенными массогабаритными показателями и линейными характеристиками.

Объектом исследования является электротехнический комплекс, включающий высоковольтную линию электропередач и присоединённые к ней через электрическое сопротивление элементы из электропроводящего материала, а **предметом исследования** является состояние электромагнитного поля в окрестностях рассматриваемого электротехнического комплекса.

Идея исследования заключается в использовании системы гальванически связанных тел для получения информации о потенциале высоковольтной линии без гальванической связи с землей, что позволяет улучшить массогабаритные показатели и исключить нелинейные электромагнитные связи.

Задачи исследования. Для достижения обозначенной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Синтез структуры, а также разработка математической и компьютерной моделей электротехнического комплекса в виде системы гальванически связанных тел, устройства сопряжения и системы питания, позволяющих получать информацию об электрическом потенциале высоковольтной линии электропередач.

2. Исследование влияния конструктивных параметров элементов

комплекса на параметры его математической модели и электромагнитную совместимость.

3. Разработка и изготовление прототипа измерительной системы, а также экспериментальная проверка его основных характеристик.

Научная новизна работы:

1. Впервые предложена структура системы измерения напряжения, в качестве измерительного органа которой выступает система гальванически связанных тел.

2. Разработана математическая модель системы гальванически связанных тел и устройства сопряжения как средства получения информации о величине напряжения линии электропередач.

3. Получены аналитические зависимости, связывающие эквивалентную собственную емкость пассивного тела системы гальванически связанных тел с её геометрической конфигурацией.

Теоретическая значимость. Результаты приведенных исследований направлены на дальнейшее развитие теории и математического описания систем гальванически связанных тел различной конфигурации, в том числе при наличии значимых внешних источников электрического поля.

Практическая значимость. Полученные зависимости, математическая и компьютерные модели, а также инженерные методики расчета позволяют на этапе проектирования определять параметры измерительной системы под конкретные технические условия для заданного класса напряжения. Разработанный и испытанный прототип подтверждает возможность создания компактных датчиков напряжения, не провоцирующих феррорезонансные явления, и совместимых с концепцией цифровой подстанции.

Методология и методы исследования. В работе применены: методы теории электромагнитного поля и метода конечных элементов для получения аналитических зависимостей, позволяющих получить информацию о величине электрического потенциала высоковольтной линии электропередач; методы теории автоматического управления и функционального анализа для оценки влияния параметров СГСТ на характеристики информационных сигналов, отражающих величину потенциала высоковольтной линии электропередач; методы компьютерного моделирования для предварительного подтверждения адекватности полученных математических зависимостей и предварительной оценки влияния на величину погрешности результатов измерений при наличии внешних электрических и магнитных полей; методы планирования и проведения эксперимента для подтверждения адекватности аналитически полученных результатов

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Информация об электрическом потенциале линии электропередач может быть получена с помощью системы гальванически связанных тел, одним из элементов которой является линия электропередач, вторым – тело из электропроводящего материала с конечными габаритами, не имеющее гальванической связи с землей, соединенные элементом, обладающим высоким электрическим сопротивлением.

2. Математическая модель системы гальванически связанных тел с ограничивающим сопротивлением описывается уравнениями

дифференцирующего звена, в связи с чем для получения сигнала, пропорционального напряжению линии электропередач относительно земли необходимо в устройстве сопряжения проводить интегрирование первичного измеренного сигнала.

3. Эквивалентная емкость пассивного тела зависит не только от формы и геометрических размеров, но и его расстояния относительно линий электропередач.

Степень достоверности полученных результатов работы. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечиваются корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений при теоретическом анализе предложенных методов, сходимостью расчетных и полученных экспериментально данных.

Личный вклад автора состоит в разработке математической и компьютерных моделей системы гальванически связанных тел, исследовании измерительного органа системы гальванически связанных тел с использованием компьютерного моделирования, определении корректирующих зависимостей для собственной емкости пассивного тела различной конфигурации, планировании и проведении экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных и Всероссийских конференциях: XVII всероссийской (девятой международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Иваново, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Перспективные технологии и материалы» (г. Севастополь, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2023» (г. Севастополь, 2023 г.); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» ICIE-2024 (г. Сочи, 2024 г.); Международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» UralCon-2024 (г. Магнитогорск, 2024 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (г. Чебоксары, 2024 г.); Международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» ICIE-2025 (г. Сочи, 2025 г.); Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2025» (г. Севастополь, 2025 г.); Международной научно-практической конференции «Кибернетика энергетических систем» (г. Новочеркасск, 2025 г.).

Публикации. Содержание диссертационной работы нашло отражение в 15 научных работах, среди которых 3 публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 3 публикации в изданиях из перечня ВАК, 10 материалов докладов на всероссийских и международных конференциях. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (183 наименования) и четырех приложений. Общий объем диссертации 183 страницы, 82 рисунка и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлена цель и определены задачи, объект и предмет исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, степень разработанности темы, степень достоверности и апробация результатов работы, представлена структура диссертации.

В первой главе сформулированы требования к измерительным органам преобразователей напряжения и проведен анализ конструкций и принципов действия индуктивных, оптических, емкостных и резистивных преобразователей, а также датчиков, основанных на измерении напряженности электрического поля вблизи высоковольтных линий электропередач.

Рассмотрены основные направления развития средств измерения напряжения. Отмечены преимущества оптических трансформаторов, а также ограничения их применения, обусловленные высокой стоимостью, сложностью измерительной системы и влиянием электрических полей соседних фаз. Проанализированы антирезонансные трансформаторы, применение которых осложняется сложностью расчета конструктивных параметров, резистивные и резистивно-емкостные делители, преимущественно используемые в цепях низкого напряжения.

Анализ показал перспективность разработки новых типов систем измерения напряжения, а именно датчиков напряжения, основанных на измерении напряженности электрического поля вблизи высоковольтных линий электропередач и не требующих гальванической развязки измерительного органа с ЛЭП.

Вторая глава посвящена анализу физических процессов в системе гальванически связанных тел, позволяющих получать информацию о величине электрического потенциала однофазной линии электропередач относительно земли при отсутствии гальванической связи измерительного органа с землей.

Внедрение стандарта МЭК 61850 предполагает возможность передачи информации от измерительного органа по оптическим каналам связи, которые являются диэлектриком, и позволяют обеспечить гальваническую развязку по каналу передачи информации. Это позволяет исключить необходимость гальванической развязки между высоковольтной линией электропередач и измерительным органом системы измерения напряжения. Функциональная схема данной системы приведена на рисунке 1.

Принцип работы предлагаемого измерительного органа системы измерения напряжения основан на использовании двух гальванически связанных тел, выполненных из проводящего материала (рисунок 2).

Электрический потенциал φ_1 формируется источником ЭДС, питающим линию электропередач, и является величиной, подлежащей измерению. Потенциал φ_2 определяется геометрией второго тела и величиной избыточного заряда Q. Учитывая, что φ_1 отражает напряжение линии относительно земли, его величина изменяется по синусоидальному закону. Потенциал φ_2 в силу наличия гальванической связи с φ_1 стремится выровнять с ним свое значение. Это

выравнивание происходит путем перетока зарядов между активным и пассивным телами.

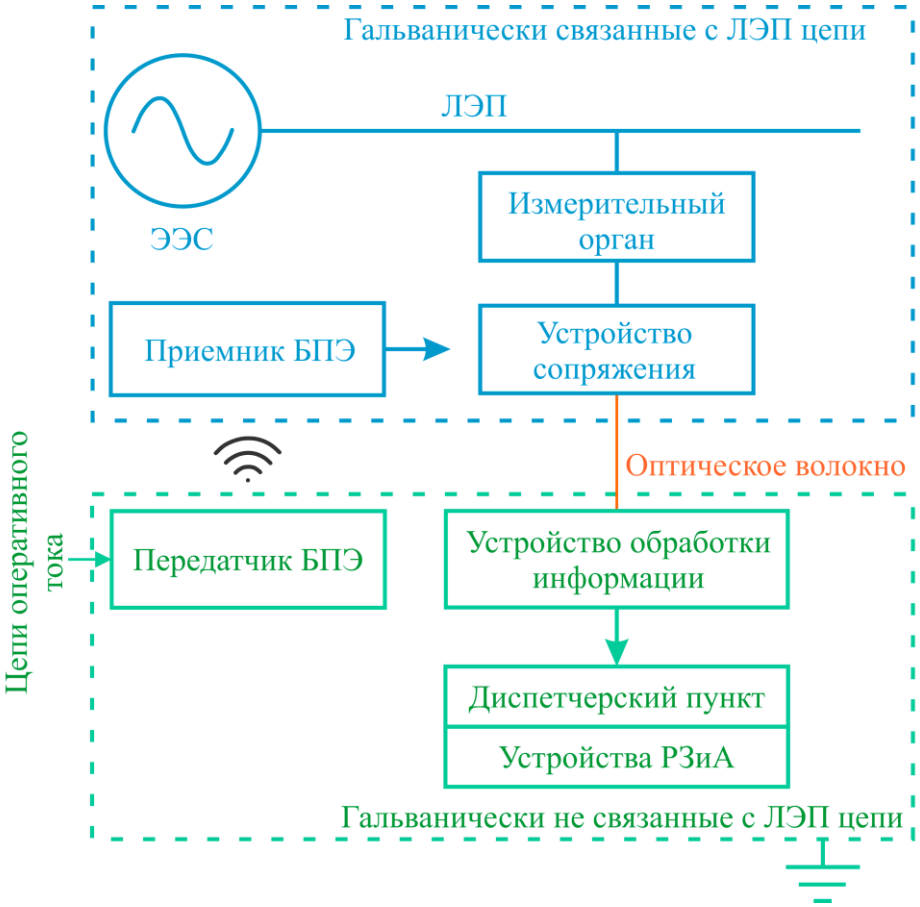


Рисунок 1 – Функциональная схема измерительной системы

Переток зарядов осуществляется не мгновенно, а с инерционностью, обусловленной ограничением скорости прохождения зарядов в единицу времени через сопротивление R. Таким образом, постоянное изменение потенциала φ_1 и стремление φ_2 к выравниванию с φ_1 формируют ток, протекающий через гальваническую связь R.

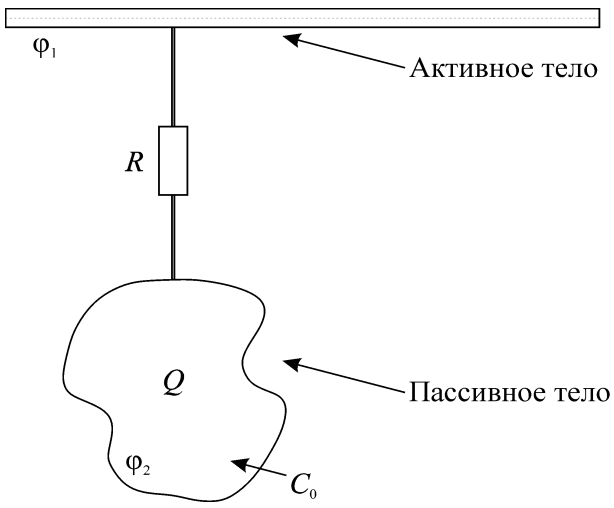


Рисунок 2 – Система гальванически связанных тел

Получение информации о напряжении провода линии электропередач путем измерения с последующей обработкой тока, протекающего через гальваническую связь с сопротивлением R, и лежит в основе принципа работы измерительного органа системы измерения напряжения на базе СГСТ. Говоря о влиянии величины сопротивления R на параметры системы, можно сделать выводы: при $R \to 0$ $\varphi_1(t) \approx \varphi_2(t)$, а при $R \to \infty$ пассивное тело остается незаряженным.

На рисунке 3 показана физическая модель системы гальванически связанных тел.

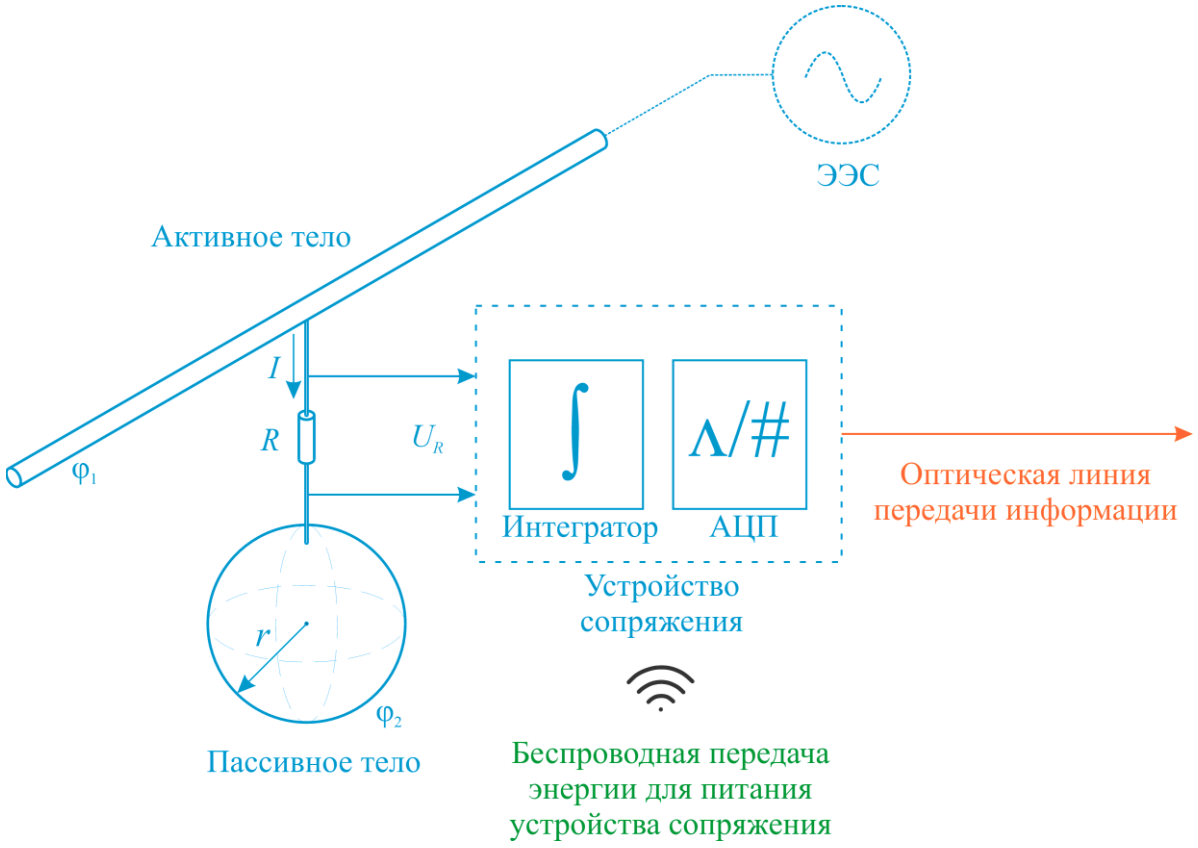


Рисунок 3 – Физическая модель системы гальванически связанных тел с независимыми каналами в цепях передачи энергии и информации

Величина тока, протекающего через сопротивление R, определяется уравнением:

$$I = \left(\varphi_1 - \varphi_2\right) / R. \quad (1)$$

Измеренный сигнал, снимаемый с измерительного резистора R, поступает на устройство сопряжения с большим входным сопротивлением и осуществляющим интегрирование измеренного сигнала. Идеология системы измерения напряжения предполагает, что измеренный таким образом сигнал будет преобразован в цифровой формат и его передача будет осуществляться по оптоволоконному кабелю, обеспечивая тем самым гальваническую развязку высокого потенциала линии от вторичных измерительных цепей. Питание устройства сопряжения предполагается посредством системы беспроводной передачи энергии, также обеспечивающей гальваническую развязку.

Электрический потенциал φ_1 рассматривается относительно земли и отражает фазное напряжение линии электропередач, подлежащее измерению. Электрический потенциал φ_2 выражен через величину электрического заряда Q_2 присутствующего на втором теле, который будет определяться как:

$$\varphi_2 = Q_2 / C_0. \quad (2)$$

Выразив электрический ток, как количество заряда, проходящего через сечение в единицу времени:

$$I = dQ / dt \quad (3)$$

и подставив (2) и (3) в (1) получена зависимость:

$$dQ / dt = (\varphi_1 - Q / C_0) / R, \quad (4)$$

где C_0 – собственная электрическая емкость пассивного тела, Ф.

Для дальнейшего анализа полученной математической модели применено преобразование Лапласа к уравнениям (3) и (4):

$$\left.\begin{aligned} Q(p)pR + Q(p)/C_0 &= \varphi_1(p); \\ Q(p)p &= I(p), \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

где p – оператор дифференцирования по времени.

Передаточная функция измерительного органа системы измерения напряжения имеет вид:

$$W(p) = \frac{U_R(p)}{\varphi_1(p)} = \frac{Tp}{Tp+1}. \quad (6)$$

Модель (6) описывает реальное дифференцирующее звено, коэффициент передачи которого при увеличении частоты стремится к единице. Структурная схема измерительного органа приведена на рисунке 4.

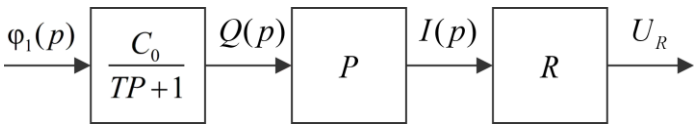


Рисунок 4 – Структурная схема измерительного органа системы измерения напряжения

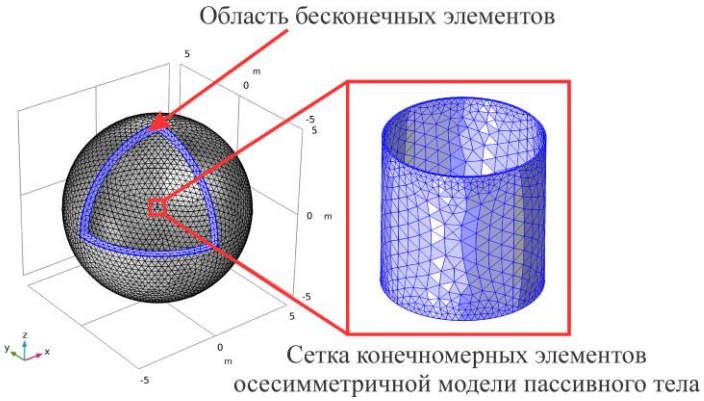
Собственная емкость сферического пассивного тела определяется по известной формуле:

$$\varphi_2 = Q / 4\pi\varepsilon_0 r,$$

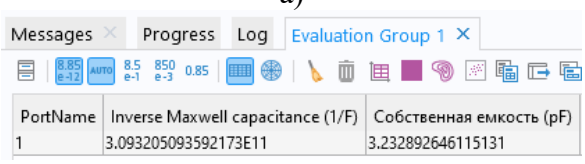
где r – радиус шара, м;

ε_0 – электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Для практической реализации рассматривается также цилиндрическое пассивное тело. Поскольку аналитической зависимости его собственной емкости от диаметра и длины нет, емкость рассчитана численно.



а)



б)

Рисунок 5 – Конечно-элементная модель для определения собственной емкости цилиндрического пассивного тела (а) и результаты расчета собственной емкости цилиндра (б)

На рисунке 5 приведены конечно-элементная модель и результаты расчета для полого цилиндра размером 50 × 50 мм.

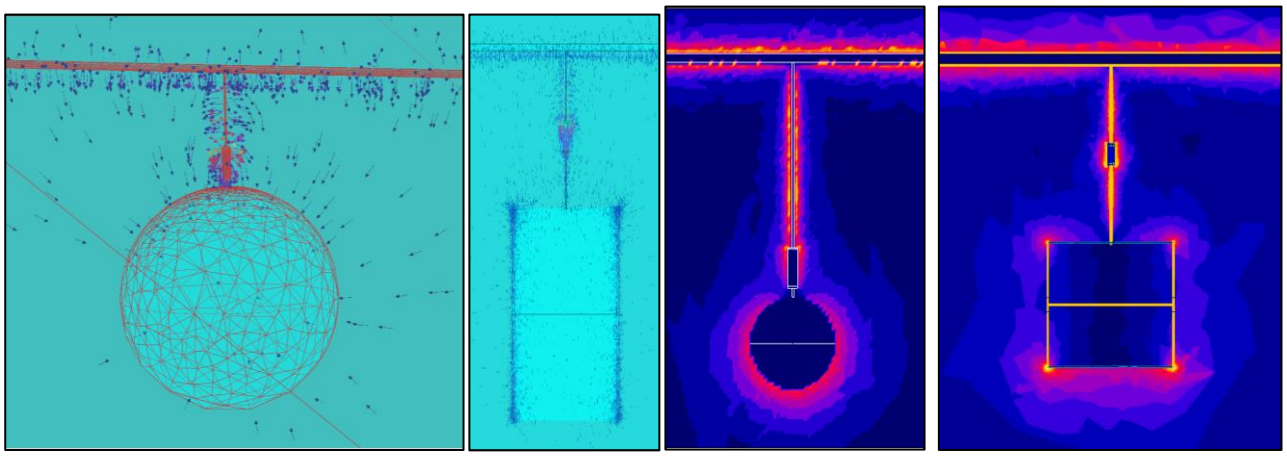
По результатам моделирования получены аналитические зависимости для определения собственной емкости пассивного тела цилиндрической формы с габаритами, ограниченными размерами: диаметром D от 0,05 до 0,1 м, длиной L от 0,01 до 0,1 м.

Эмпирическая функция, связывающая геометрические размеры цилиндрического тела

с его собственной емкостью, определяется выражением:

$$C_{0\text{цил}} = -28{,}94L^2 + 20{,}91L + 0{,}35 + D61{,}66L^{0{,}165}.$$

Адекватность математической модели проверена методом конечных элементов. На рисунке 6 показаны распределение напряжённости электрического поля (а) и поверхностной плотности зарядов (б) для СГСТ с шарообразным и цилиндрическим пассивными телами.



а) б)

Рисунок 6 – Распределение напряженности электрического поля (а) и поверхностной плотности зарядов (б) в окрестности СГСТ для шарообразного и цилиндрического пассивных тел

Моделирование показало неравномерное распределение напряжённости поля и плотности зарядов по поверхности тел: при удалении от активного тела напряжённость уменьшается, а плотность зарядов возрастает. Поэтому собственную емкость пассивного тела необходимо корректировать с учетом влияния на суммарный заряд пассивного тела электрических полей находящегося поблизости активного тела.

Проведено исследование влияния электрического поля линии электропередач, к которому подключен измерительный орган, на эквивалентную емкость пассивного тела (рисунок 7). Как можно увидеть из результатов моделирования – по мере увеличения расстояния между активным и пассивным телом эквивалентная емкость пассивного тела увеличивается. Причем при увеличении расстояния от пассивного тела до измерительного резистора (расстояние В) увеличение емкости происходит с большей интенсивностью, чем при увеличении расстояния от измерительного резистора до активного тела (расстояние А).

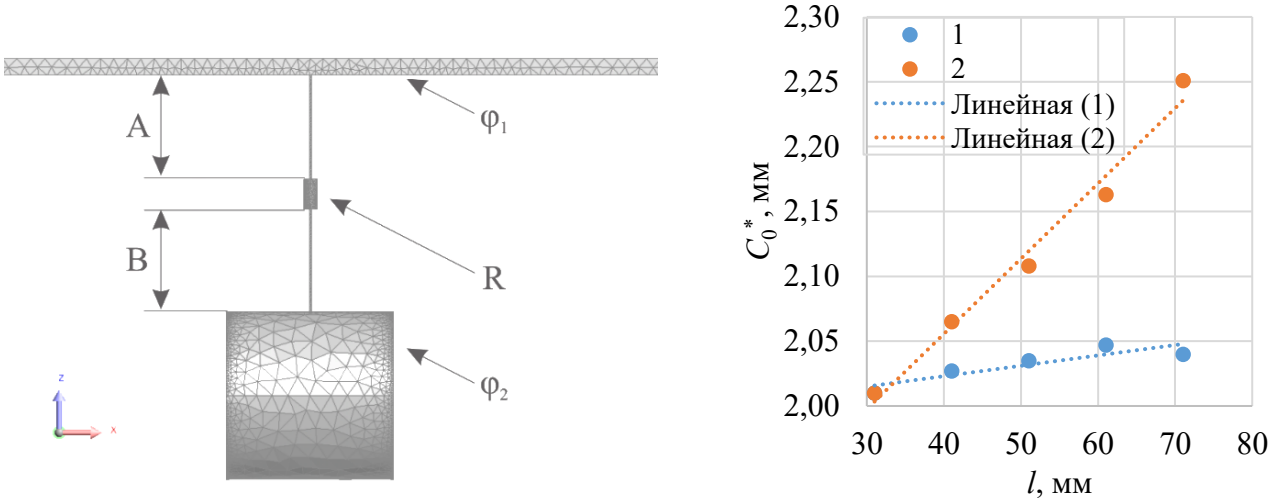
Кроме того, определялось распределение скалярного потенциала в окрестности измерительного органа. Оно рассчитано для случая со сферическим пассивным телом (рисунок 8, а) и с цилиндрическим телом (рисунок 8, б). Графики подтверждают дифференциальный характер измерительного органа.

Ключевой параметр модели – собственная емкость пассивного тела C_0 в реальных условиях зависит не только от параметров измерительной системы, но и от геометрии тела и его расстояния до ЛЭП. Моделирование показало линейный рост емкости с увеличением диаметра.

Влияние расстояния учитывается коэффициентом k – отношением эквивалентной емкости к емкости уединённого тела:

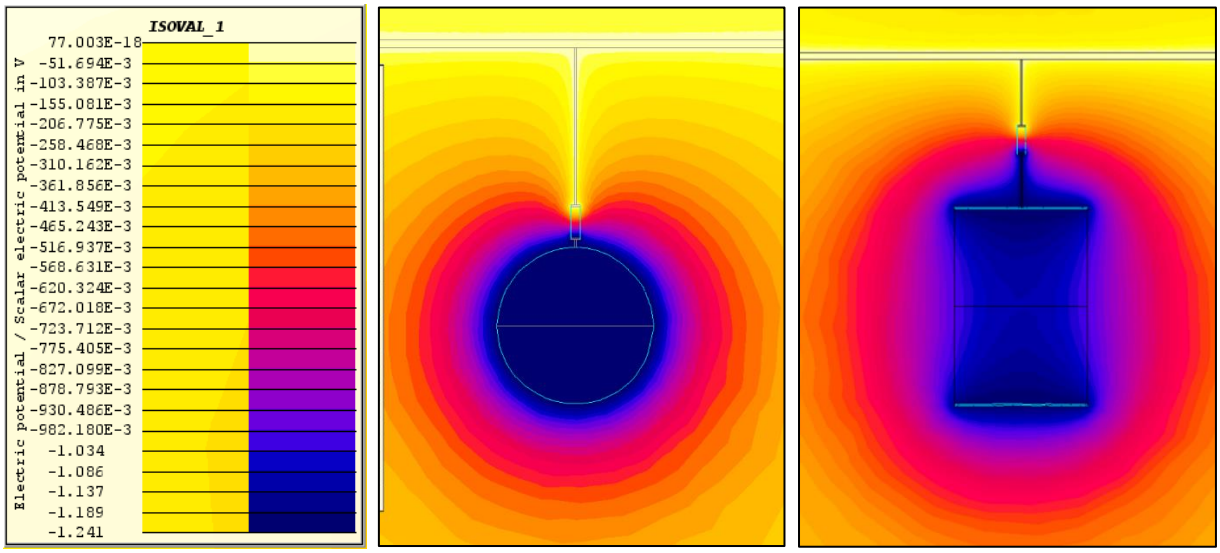
$$k = C_0^* / C_0, \quad (7)$$

где C_0^* – эквивалентная ёмкость пассивного тела по результатам моделирования; C_0 – собственная емкость уединенного пассивного тела.



а) б)

Рисунок 7 – Конечно-элементная компьютерная модель измерительного органа для параметрического исследования влияния удаления цилиндрического пассивного тела от линии электропередач (а) и зависимость эквивалентной емкости пассивного тела от расстояния до активного тела: 1 – изменение расстояния B; 2 – изменение расстояния A (б)



а) б)

Рисунок 8 – Распределение электрического потенциала системы гальванически связанных тел для шарообразного (а) и цилиндрического (б) пассивных тел в момент времени 0,01 с

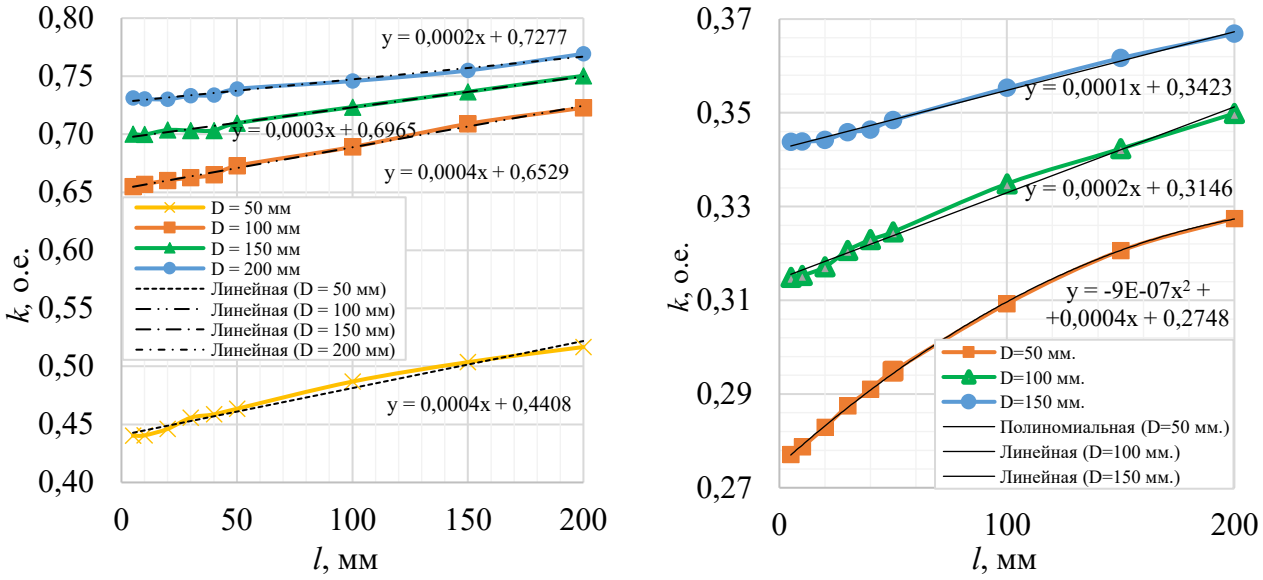
Зависимость коэффициента от расстояния близка к линейной. Погрешность линеаризации не превышает 2%, что подтверждает высокую точность модели.

Эквивалентная емкость пассивного тела рассчитывалась по формуле:

$$C_0^* = (\varphi_{1max} - \varphi_{2max}) / \omega \cdot R \cdot \varphi_{1max}, \quad (8)$$

где φ_{1max} и φ_{2max} – амплитудные значения потенциалов в соответствующих точках измерения, а именно на концах резистора.

По данным замеров построены зависимости коэффициента корректировки k эквивалентной емкости от диаметра D для цилиндра (рисунок 9, а) и шара (рисунок 9, б) при их удалении от линии электропередач l с линейной аппроксимацией.



а) б)

Рисунок 9 – Зависимости коэффициента корректировки k эквивалентной емкости от диаметра цилиндра D (а) и шара (б) при их удалении от линии электропередач l с линейной аппроксимацией

Такой характер изменения коэффициента k объясняется тем, что при выравнивании электрического потенциала пассивного тела относительно активного, часть потенциала формируется электрическим полем активного тела, в результате чего требуется меньшее количество электрического заряда на поверхности пассивного тела в сравнении с бесконечно удаленным пассивным телом для формирования того же значения электрического потенциала.

Таким образом, полученные корректирующие зависимости позволяют на этапе проектирования точно рассчитывать параметры измерительного органа для конкретных условий эксплуатации.

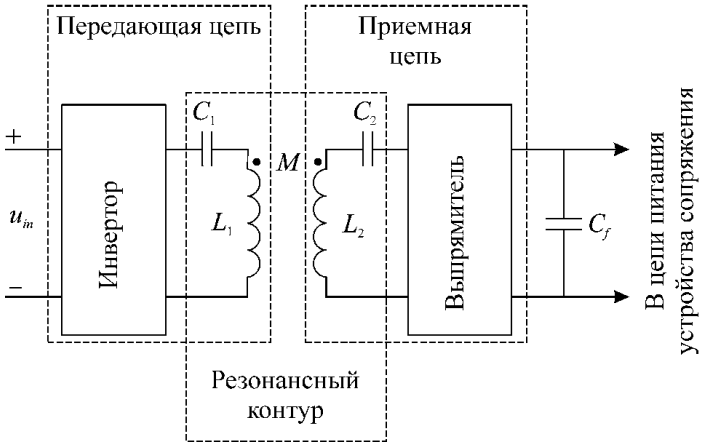


Рисунок 10 – Схема беспроводной системы питания устройства сопряжения с S-S топологией

Третья глава посвящена разработке системы питания устройства сопряжения. Необходимость непрерывной работы измерительной системы в том числе при отключенной ЛЭП (для целей РЗиА) исключила способы питания от поля ЛЭП, ТТ, лазера и т.п. В качестве базового решения выбрана система беспроводной передачи энергии (БПЭ) с резонансной S-S топологией (рисунок 10).

Данная топология обеспечивает стабильную передачу мощности при слабой связи между катушками и малую чувствительность резонансной частоты к изменению нагрузки.

Система обеспечивает двойную гальваническую развязку: по информации – через оптоволокно и по питанию – через воздушный зазор между катушками. В схему включён буферный накопитель на ионисторе для компенсации колебаний мощности. Параметры катушек оптимизированы для расстояния до 40 см: передающая (49 витков, 2,83 мГн); приёмная (38 витков, 0,44 мГн); рабочая частота равна 100 кГц; взаимная индуктивность: 17,6 мкГн. Данное решение обеспечивает надёжное питание при сохранении компактности приёмной части.

Учитывая, что измерительный орган системы измерения напряжения находится в непосредственной близости от катушек системы питания очевидно, что на него будут воздействовать их магнитные поля высокой частоты. В связи с чем требовалась оценка влияния этих полей на возможное внесение погрешности в измеряемый сигнал, а также оценка электромагнитной совместимости системы беспроводной передачи энергии с устройством сопряжения.

Оценка величины индукции магнитного поля проводилась исходя из конструктивных параметров размещения измерительного органа на уровне 60 мм выше катушки в функции от расстояния по горизонтальной оси.

Схема размещения элементов приведена на рисунке 11: 1 – устройство сопряжения; 2 – пассивное тело; 3 – приёмная катушка системы беспроводной передачи энергии.

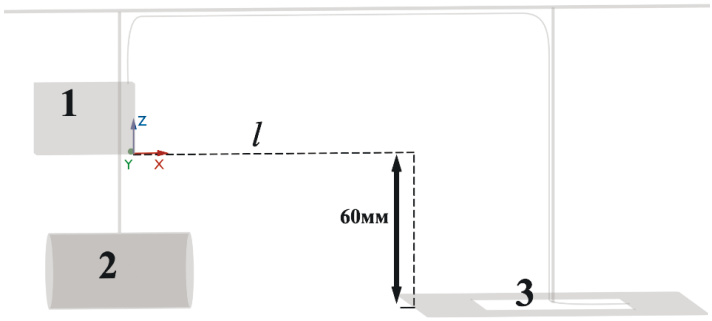


Рисунок 11 – Конструкция для проверки электромагнитной совместимости устройства сопряжения с системой беспроводной передачи энергии

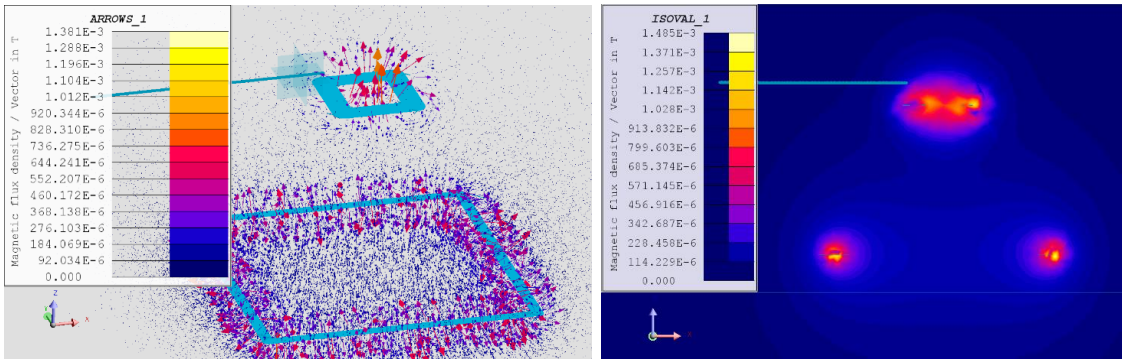
Для оценки ЭДС в контурах устройства сопряжения принимались следующие условия. ЭДС рассчитывалась по формуле:

$$E_{УС} = \omega \cdot B \cdot S,$$

где S – площадь платы устройства сопряжения.

Расчет индукции магнитного поля в окрестностях катушек системы беспроводной передачи энергии осуществлялся с использованием конечно-элементного моделирования. Для этого на основании математической модели рассчитан ток передающей катушки из условия величины тока принимающей катушки, равный 2 А.

На рисунке 12, а приведена визуализация результатов моделирования. Для оценки величины максимальной индукции магнитного поля катушек построено распределение величины магнитного поля, изображенное на рисунке 12, б.



а) б)

Рисунок 12 – Распределение магнитного поля в окрестности приемной и передающей катушек (а) и градиент магнитного поля в секущей плоскости XZ (б)

Так как установка устройства сопряжения системы измерения напряжения предполагается в окрестности принимающей катушки, для определения области с минимально допустимым значением индукции магнитного поля, построена зависимость амплитуды вектора напряженности магнитного поля в контрольной точке от ее расстояния до принимающей катушки (рисунок 13).

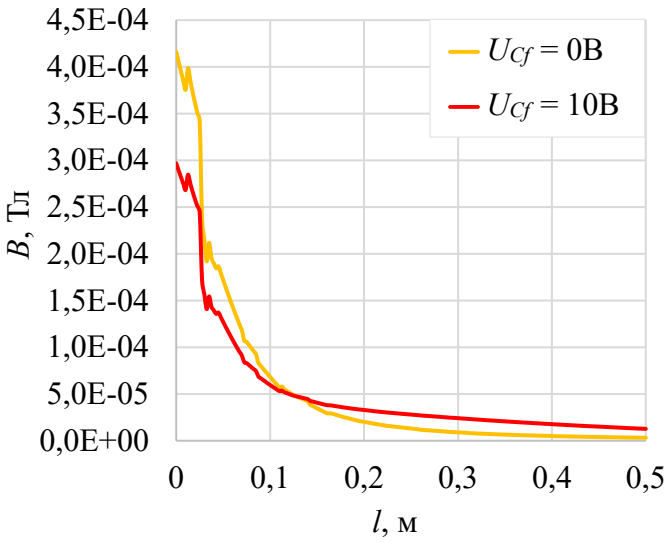


Рисунок 13 – Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до устройства сопряжения системы измерения напряжения гальванически связанных тел

Исходя из требований к стабильности питания микроконтроллера ($\Delta U_{пит} < 5\%$), максимально допустимая наведенная ЭДС принята равной 0,3 В. Для обеспечения электромагнитной совместимости нужно обеспечить такое расстояние l между катушкой и электронным блоком, при котором амплитуда индукции магнитного поля в контрольной точке будет иметь значение $B_{max} < 6{,}6$ мТл.

Анализируя полученные зависимости видно, что значение индукции магнитного поля не превышает этих значений. Таким образом, электромагнитная совместимость системы беспроводной передачи энергии с измерительным блоком системы измерения напряжения обеспечивается при всех возможных расстояниях между устройством сопряжения и приемной катушкой системы беспроводной передачи энергии.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментальной проверки разработанного электротехнического комплекса на базе системы гальванически связанных тел. На основании проведенных теоретических исследований разработан и изготовлен прототип измерительной системы, функциональная схема которого приведена на рисунке 14.

На представленной схеме гальваническая развязка по каналу передачи информации осуществляется с использованием оптического волокна, а по каналу передачи энергии для цепей питания устройства сопряжения за счет воздушного

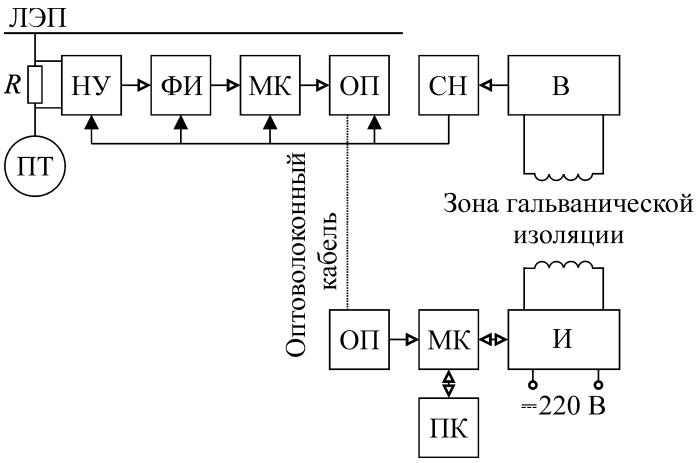
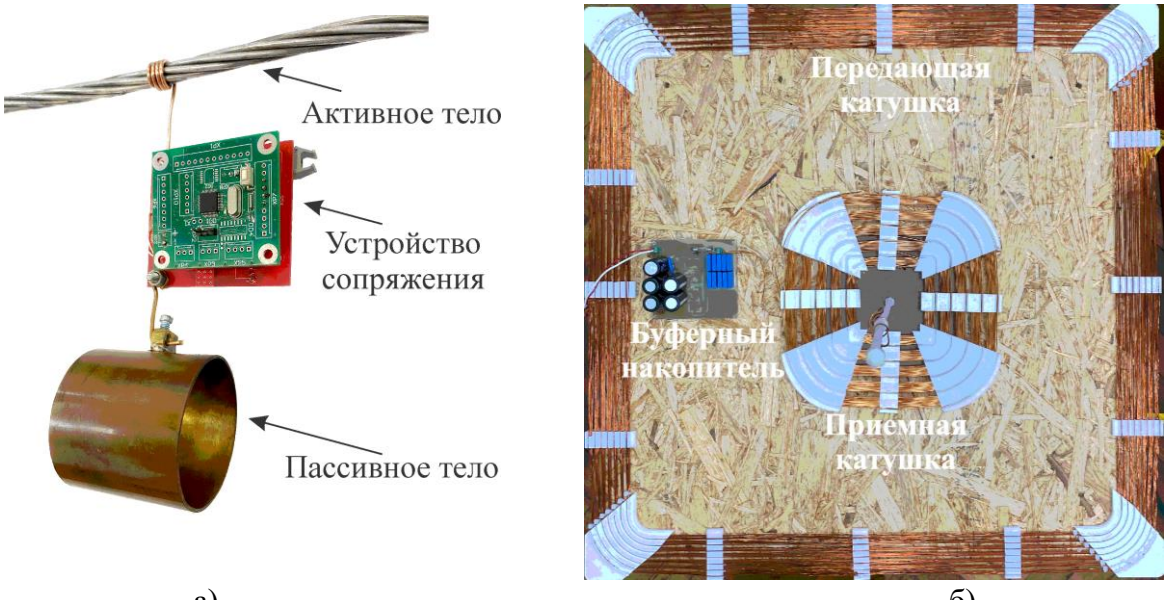


Рисунок 14 – Функциональная схема системы измерения напряжения на основе системы гальванически связанных тел

зазора между передающей и принимающей катушками. На схеме после нормирующего усилителя (НУ) измеренный сигнал с резистора, соединяющего пассивное тело (ПТ) с ЛЭП поступает на фильтр интегратор (ФИ), где осуществляется его фазовая коррекция. Обработанный таким образом измеренный сигнал в микроконтроллере (МК) преобразуется в цифровой вид и через оптический канал связи, посредством оптических преобразователей (ОП), поступает во вторичные измерительные цепи с возможностью вывода измеренной информации на персональный компьютер (ПК). В данном решении оптоволоконный кабель выступает в качестве гальванической развязки между измерительным органом и вторичными цепями. Учитывая, что в составе измерительного органа датчика напряжения имеются электронные блоки, гальванически связанные с линией электропередач и требующие для своей работы источника питания, в структуру датчика включена система беспроводной передачи энергии. Она состоит из инвертора (И), передающей и приемной катушек, выпрямителя (В) и стабилизатора напряжения (СН). При этом за счет воздушного промежутка между передающей и приемной катушками обеспечивается гальваническая развязка измерительного органа системы измерения напряжения от первичного источника, питающего инвертор.

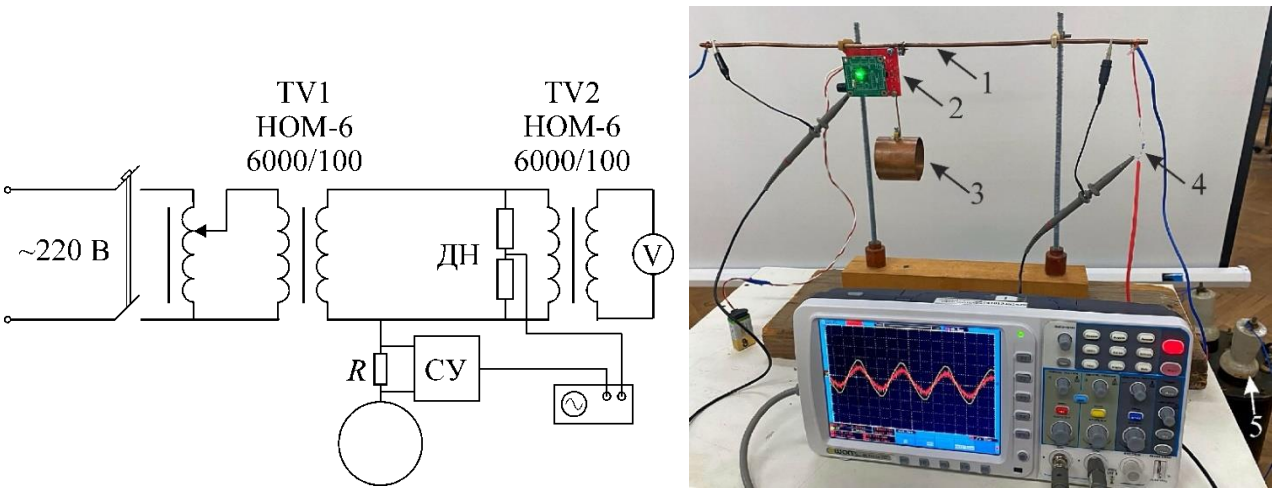
Внешний вид измерительного органа с устройством сопряжения, а также системы беспроводного питания приведены на рисунке 15.



а) б)

Рисунок 15 – Внешний вид измерительного органа СГСТ с устройством сопряжения (а) и системы беспроводного питания (б)

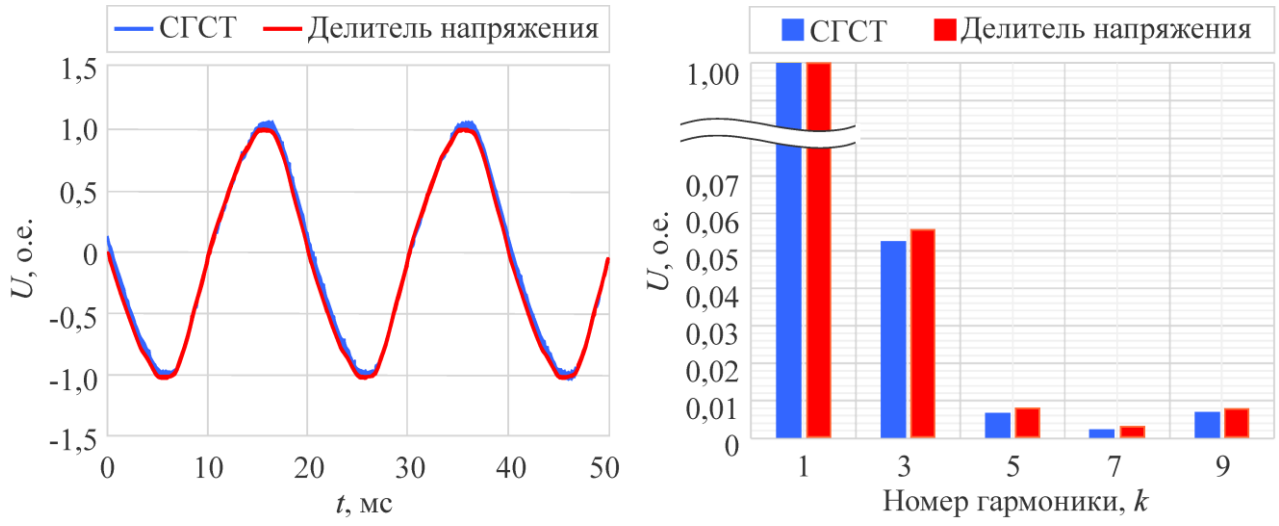
Для проверки результатов моделирования проведено две серии экспериментальных исследований. Чтобы проверить соответствие формы выходного сигнала разработанной системы форме напряжения, измеренного образцовым резистивным делителем при напряжении ЛЭП в пределах 0–2 кВ, была собрана экспериментальная установка, электрическая схема и внешний вид которой приведены на рисунке 16, а и б соответственно. На рисунке 16, б: 1 – ЛЭП, 2 – устройство сопряжения, 3 – пассивное тело, 4 – резистивный делитель, 5 – испытательный трансформатор.



а) б)

Рисунок 16 – Электрическая схема (а) и внешний вид экспериментальной установки (б)

На рисунке 17, а представлены осциллограммы сигналов с делителя напряжения и с разработанной системы. На рисунке 17, б показан их гармонический состав, полученный путем разложения в ряд Фурье.



а) б)

Рисунок 17 – Осциллограммы измеренных сигналов (а) и их гармонический состав (б)

Для оценки соответствия формы сигналов на выходе устройства сопряжения с формой сигнала на делителе выполнено нормирование результатов измерений. Максимальная относительная погрешность (0,32%) получена на третьей гармонике, что подтверждает высокую точность восстановления формы сигнала.

Второй эксперимент проводился на установке, позволяющей регулировать напряжение ЛЭП в пределах 5–30 кВ. Функциональная схема установки показана на рисунке 18.

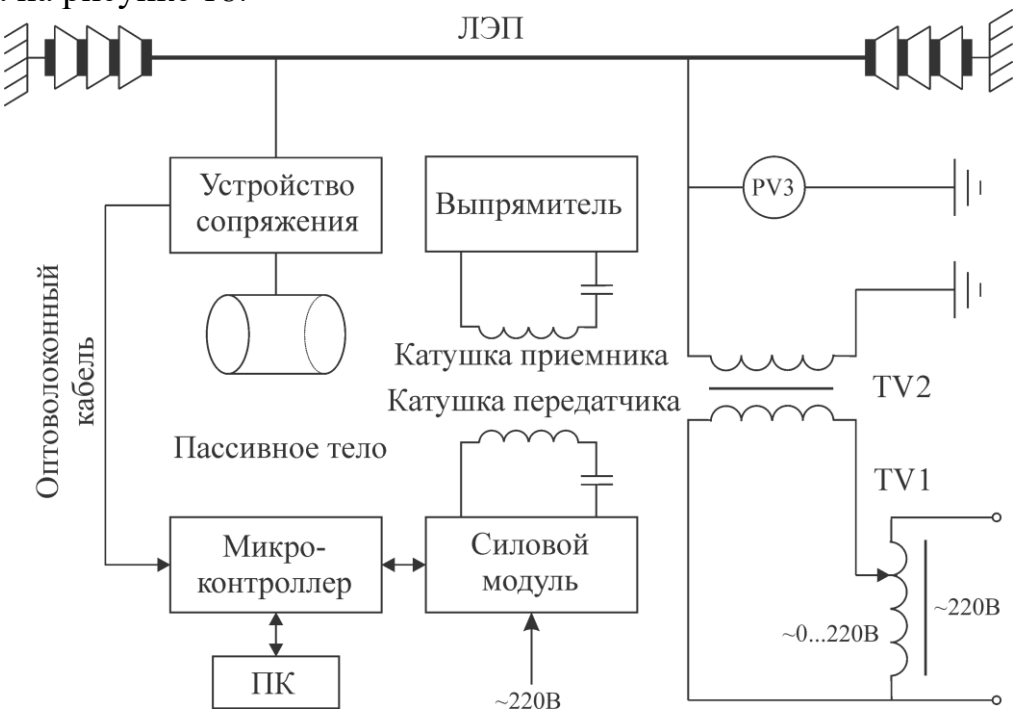
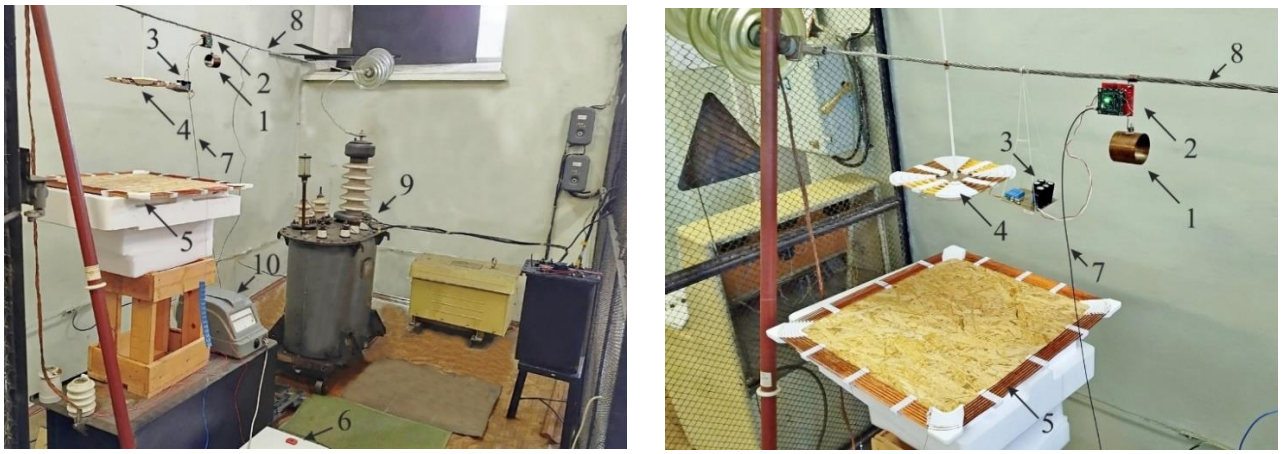


Рисунок 18 – Функциональная схема стенда для проверки работы системы измерения напряжения на базе СГСТ при напряжении ЛЭП 5–30 кВ

Целью испытаний являлась оценка линейности разработанной измерительной системы, для чего проведены измерения в диапазоне 5–30 кВ с шагом 5 кВ.

Внешний вид установки приведен на рисунке 19: 1 – пассивное тело, 2 – устройство сопряжения, 3 – плата выпрямителя, 4 – приемная катушка, 5 – передающая катушка, 6 – силовой модуль, 7 – оптоволоконный кабель, 8 – ЛЭП, 9 – испытательный трансформатор, 10 – киловольтметр.



а) б)

Рисунок 19 – Внешний вид экспериментальной установки для высоковольтных испытаний системы измерения напряжения: общий вид (а), система гальванически связанных тел с источником питания (б)

На рисунке 20 представлено сравнение выходного сигнала разработанной системы с показаниями U_1 киловольтметра С196 (PV3 на рисунке 18).

Среднеквадратичное отклонение, рассчитанное по результатам измерений, составило 2,2 %, что подтверждает линейность характеристики разработанной системы.

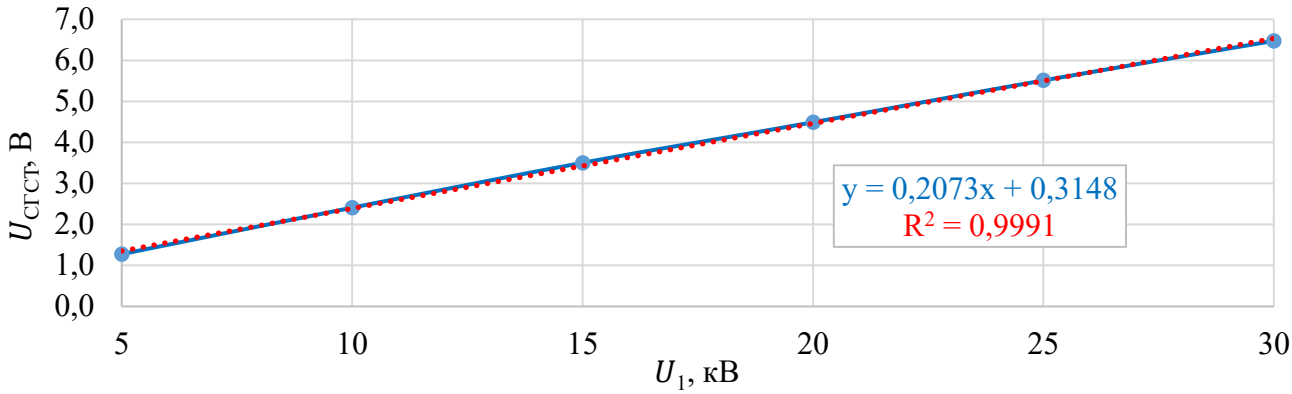


Рисунок 20 – Аппроксимирующая линейная функция зависимости выходного напряжения системы измерения напряжения от напряжения измеряемой линии

Для оценки линейности выходной характеристики по результатам измерений построена аппроксимирующая линейная функция:

$$U_{СГСТ} = 0,2073 \cdot U_1 + 0,3148.$$

На рисунке 21 показана форма измеренного сигнала при напряжении линии 30 кВ.

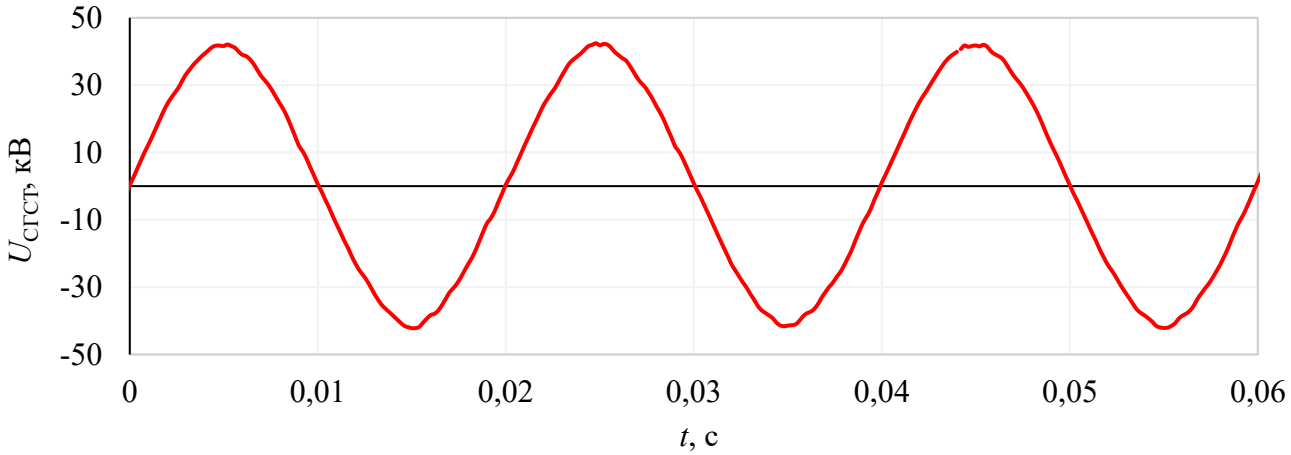


Рисунок 21 – Напряжение линии, полученное из данных замеров системы измерения напряжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, решена актуальная научно-техническая задача разработки нового способа получения информации о напряжении высоковольтных линий электропередач, позволяющего на его основе проектировать измерительные системы с улучшенными массогабаритными показателями, имеющей существенное значение для развития электроэнергетической отрасли народного хозяйства.

В ходе исследования получены следующие основные **результаты**:

1. Разработан принципиально новый способ получения информации об электрическом потенциале высоковольтной линии электропередач на базе системы гальванически связанных тел. Получено математическое описание и разработана компьютерная модель предложенной системы.

2. Исследованы и оптимизированы ключевые параметры комплекса. Получены аналитические зависимости, связывающие собственную и эквивалентную емкость пассивных тел цилиндрической (диаметром 0,05–0,1 м, длиной 0,01–0,1 м) и сферической форм с их геометрическими размерами и расстояниями до активного тела. Разработана и оптимизирована система беспроводной передачи энергии с S-S топологией для питания устройства сопряжения, и доказано, что при рабочих расстояниях (до 40 см для 35 кВ) уровень индуцируемых ЭДС обеспечивает электромагнитную совместимость с устройством сопряжения.

3. Экспериментально подтверждена работоспособность и основные функциональные характеристики прототипа измерительной системы. В результате испытаний выявлено:

а) прототип, испытанный при напряжении до 30 кВ имеет линейную характеристику в диапазоне 5–30 кВ, среднеквадратичное отклонение составило 2,2%;

б) форма выходного сигнала соответствует форме измеряемого напряжения со среднеквадратичным отклонением не превышающем 3,7%.

Практические рекомендации и перспективы дальнейших исследований.

Прогнозными предложениями по развитию объекта исследования являются разработка комплексной математической модели, учитывающей одновременное измерение напряжения на трех фазах и построение на базе нее алгоритмов обработки измеренной информации, а также разработка теории и устройства предпусковой идентификации параметров математической модели многофазной системы измерения напряжения, которое будет использоваться при установке системы на объектах сетевой инфраструктуры.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Завьялов, В. М. Способ измерения напряжения высоковольтных линий электропередач на основе системы гальванически связанных тел / В. М. Завьялов, **Н. Н. Смокталь**, А. Х. С. Велиляев, Ю. А. Майорова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 76–84. – DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-76-84.

2. Завьялов, В. М. Разработка и исследование беспроводной системы электропитания для датчика напряжения на базе системы гальванически связанных тел / В. М. Завьялов, А. Х. С. Велиляев, **Н. Н. Смокталь** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67, № 3. – С. 47–54. – DOI: 10.17213/0136-3360-2024-3-47-54.

3. Завьялов, В. М. Исследование влияния внешних электрических полей на эквивалентную емкость датчика напряжения на базе системы гальванически связанных тел / В. М. Завьялов, **Н. Н. Смокталь**, А. С. Велиляев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 66–76. – DOI: 10.14529/power250107.

Публикации в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (международные конференции):

4. Zavyalov, V. M. Study of Electromagnetic Compatibility of a Voltage Sensor Based on a System of Galvanically Coupled Bodies with a Wireless Energy Transmission System / V. M. Zavyalov, A. S. Velilyaev, **N. N. Smoktal** // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, 2024. – P. 342–347. – DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553887.

5. Zavyalov, V. M. Study of Frequency Characteristics of a Voltage Sensor Based on System of Galvanically Coupled Bodies / V. M. Zavyalov, **N. N. Smoktal**, A. S. Velilyaev // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk, 2024. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10718885.

6. Zavyalov, V. M. Determining the Correction Factor of Equivalent Capacitance for a Voltage Sensor Based on a System of Galvanically Coupled Bodies / V. M. Zavyalov, **N. N. Smoktal**, A. S. Velilyaev // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, 2025. – P. 292–297. – DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028370.

Публикации по результатам докладов на всероссийских и международных конференциях, индексируемые в РИНЦ:

7. **Смокталь, Н. Н.** Эволюция средств измерения в электроэнергетических системах. Электроэнергетика: Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 11–13 мая 2022 года. Том 3. – г. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – С. 98.

8. **Смокталь, Н. Н.** Исследование системы измерения напряжения на базе системы гальванически связанных тел / Н. Н. Смокталь, В. М. Завьялов, М. Б. Углова // Перспективные технологии и материалы: материалы Международной научно-практической конференции (Севастополь, 21–23 сентября 2022 г.). – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2022. – С. 279–283.

9. Завьялов, В. М. Анализ энергетических характеристик резонансного контура беспроводной зарядной станции при слабых связях и асимметрии параметров / В. М. Завьялов, **Н. Н. Смокталь**, А. С. Велиляев // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции (Севастополь, 18–21 сентября 2023 г.). – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2023. – С. 363–367. – EDN SMHZRV.

10. Завьялов, В. М. Исследование высоковольтного датчика напряжения на базе системы гальванически связанных тел / В. М. Завьялов, **Н. Н. Смокталь**, А. Х. С. Велиляев // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы VIII Международной научно-технической конференции (Чебоксары, 22 ноября 2024 г.). – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, 2024. – С. 273–279.

11. Завьялов, В. М. Цифровизация в электроэнергетике как драйвер развития новых измерительных систем / В. М. Завьялов, **Н. Н. Смокталь** // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2025: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 15–18 сентября 2025 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2025. – С. 412–416.

12. Завьялов, В. М. Исследование взаимного влияния электрических полей трехфазной электрической сети на показания датчиков напряжения на базе системы гальванически связанных тел с учетом диэлектрической проницаемости среды/ В. М. Завьялов, **Н. Н. Смокталь**, И.А. Сурпин // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2025: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции,, Севастополь, 15–18 сентября 2025 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2025. – С. 215-220.

13. Завьялов, В. М. Новый подход к измерению высокого напряжения промышленной частоты / В. М. Завьялов, **Н. Н. Смокталь** // XLVI международная научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем»: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Новочеркасск, 21–23 октября 2025 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, 2025. – С. 228–233.

Публикации в других изданиях:

14. Завьялов, В.М. Система гальванически связанных тел как способ измерения высокого напряжения / В. М. Завьялов, **Н. Н. Смокталь**, А. С. Велиляев // Энергетические установки и технологии. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 123–127.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

15. Свидетельство №2025696559 Российская Федерация, Программа обработки данных датчика напряжения на базе системы гальванически связанных тел: заявлено 08.12.2025: опубликовано 18.12.2025 / Завьялов В.М., **Смокталь Н.Н.**, Велиляев А.С.; патентообладатель ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – 10 КБ.: Python 3.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем:

[1-3] – постановка задачи, разработка теоретических положений и метода измерения, проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ результатов, формулирование выводов;

[4-6] – проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных результатов, формирование выводов;

[7, 12] – обзор литературных источников, формулирование выводов;

[8-11, 13, 14] – проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных результатов, формирование выводов;

[15] – разработка алгоритма и программная реализация обработки данных датчика напряжения, тестирование основных результатов.

Ссылка на бланк согласия на обработку персональных данных лица, предоставляющего отзыв на автореферат диссертации:

https://cloud.mail.ru/public/vDhz/6ivLWmTr7

Подписано в печать 28.10.2026 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 50/2026
Издательский центр Севастопольского государственного университета
299015, Севастополь, ул. Курчатова, 7