

На правах рукописи



ДУБКОВ Евгений Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ СИСТЕМ
БЕСПРОВОДНОГО ЗАРЯДА ДЛЯ ШАХТНОГО
АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

Специальность 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» и федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель: **Завьялов Валерий Михайлович**
Доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Осипов Александр Владимирович**,
доктор технических наук, доцент кафедры промышленной электроники ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Котин Денис Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

Защита состоится «22» декабря 2023 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.321.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел.: +7 (3842) 39-69-50, e-mail: markovso@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2023/dub/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» октября 2023 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



С.О. Марков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важную роль в экономике РФ занимает горно-металлургическая отрасль. Существенная доля добычи полезных ископаемых при этом осуществляется подземным способом. При этом большую роль в технологическом процессе добычи полезных ископаемых занимают рудничные локомотивы, которые обеспечивают доставку полезного ископаемого, оборудования и материалов в горных выработках. В качестве приводных механизмов рудничных локомотивов, как правило, используются либо дизельные двигатели, либо электрический привод. Существенным недостатком дизельных локомотивов является наличие выхлопных газов, что накладывает дополнительные требования для проветривания горных выработок.

Локомотивы, приводимые в движение электрическим приводом как, правило в качестве источника энергии используют тяговые аккумуляторные батареи. Это позволяет использовать такие локомотивы в том числе в угольных шахтах опасных по взрыву газа и пыли, поместив все силовое оборудование во взрывобезопасную оболочку. Недостатком таких локомотивов является то, что для зарядки тяговых аккумуляторов электровоз нужно вывести из технологического процесса перевозки грузов и доставить в специальное проветриваемое помещение, где осуществляется заряд тяговых аккумуляторов. Для выполнения процедуры заряда необходимо снять АКБ с электровоза, а после зарядки установить его на место. Из-за наличия взрывобезопасной оболочки отсека аккумуляторных батарей, процедура замены аккумуляторов является времязатратной. Помимо этого, данная технология подразумевает наличие комплектации аккумуляторных батарей как минимум в два раза больше количества локомотивов, что негативно отражается на капитальных затратах.

Избавиться от указанного недостатка можно путем применения системы беспроводной передачи энергии применительно к заряду аккумуляторных батарей шахтного электровоза. Это позволит осуществлять заряд тяговых аккумуляторов непосредственно на борту локомотива, оснастив зарядными станциями площадки в зоне технологического процесса локомотива, например, в зоне разгрузки, или специально оборудованных тупиках.

Степень разработанности темы исследования. Беспроводные зарядные станции последние годы стремительно развиваются применительно к электротранспорту. Основное направление исследований нацелено на поиск топологий резонансного контура, динамической зарядки, оптимизации параметров силового канала передачи энергии. Этими вопросами занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые – Горбунов Р.Л., Завьялов В.М., Поляков Н.А., Семькина И.Ю., Vilathgamuwa D.M., Wang W., Wu H., Kim H., Krestovnikov K., Zhang Z., Patil D., Haque M. S., Huynh P. S. и другие.

Однако все рассматриваемые вопросы относятся к общепромышленному исполнению, а вопрос безопасности использования таких устройств во взрывоопасной среде должным образом не исследован, что определяет актуальность исследований, представленных в данной диссертации.

Цель работы – получить научное обоснование возможности применения систем беспроводного заряда аккумуляторов для шахтного электротранспорта,

работающего в условиях предприятий подземной добычи полезных ископаемых опасных по газу и пыли.

Идея работы заключается в определении для рассматриваемых условий наилучшей топологии и конструкции системы беспроводного заряда аккумуляторов и создании для нее комплексной модели, позволяющей получить обоснование допустимых параметров и режимов работы систем беспроводного заряда аккумуляторов в условиях предприятий подземной добычи полезных ископаемых опасных по газу и пыли с позиций технической и электромагнитной совместимости, а также безопасности.

Задачи исследования:

1. Определить критерии оценки технических решений системы беспроводного заряда аккумуляторов с позиции применимости для шахтного аккумуляторного электротранспорта.

2. Выполнить оценку существующих технических решений системы беспроводного заряда аккумуляторов с использованием научных методов системного анализа.

3. Определить подходы к проектированию системы беспроводного заряда аккумуляторов на базе полученных лучших технических решений, обеспечивающие минимизацию факторов, влияющих на риски воспламенения пыле-газовоздушной смеси при использовании системы беспроводного заряда аккумуляторов.

4. Разработать систему беспроводного заряда для конкретного шахтного аккумуляторного электровоза.

5. Разработать комплексную модель системы беспроводного заряда аккумуляторов, объединяющую динамическую математическую модель в пространстве состояний на базе эквивалентных схем замещения и конечноэлементную модель в трехмерной постановке.

6. Провести лабораторные исследования электромагнитных и тепловых полей опытного образца системы беспроводного заряда аккумуляторов и установить степень адекватности разработанной комплексной модели.

7. Обосновать допустимые с позиции безопасности в условиях предприятий подземной добычи полезных ископаемых опасных по газу и пыли параметры и режимы работы систем беспроводного заряда аккумуляторных батарей или показать, что применение таких систем в рассматриваемых условиях невозможно.

Научная новизна работы:

1. Впервые предложен набор критериев, позволяющих обосновать конструктивное и схмотехническое решение для системы беспроводного заряда шахтного электротранспорта.

2. Впервые получены зависимости, позволяющие для конкретных габаритных размеров металлического тела определить граничное амплитудное значение индукции магнитного поля, находясь ниже которого, температура поверхности данного металлического предмета за счет индукционного нагрева гарантированно не поднимется выше предписываемой стандартом максимальной температуры поверхности оборудования.

3. Предложен алгоритм оптимизации параметров системы беспроводного заряда на этапе проектирования, отличающийся от известного обеспечения максимальной энергоэффективности при ограничениях по величине передаваемой мощности и максимальному превышению напряжения на конденсаторах резонансного контура при фиксированном входном напряжении.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке алгоритма оптимизации параметров резонансного контура системы беспроводной передачи энергии, в получении зависимостей, позволяющих определять граничные значения индукции магнитного поля, гарантирующие безопасную работу системы беспроводной передачи энергии во взрывоопасной атмосфере.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики поиска наилучшего технического решения беспроводной зарядной станции для эксплуатации в условиях атмосферы опасной по газу и пыли, в разработке зависимостей, лежащих в основу оценки безопасности применения беспроводной зарядной станции на стадии проектирования. Практическая значимость подтверждается рекомендацией к практическому внедрению результатов работы компании ООО «НПФ Мехатроника-Про».

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использовались методы компьютерного моделирования, теории электромагнитного поля, теории тепломассопереноса, методы теории автоматического управления, методы планирования и проведения эксперимента.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Наилучшим решением для системы беспроводного заряда рудничного электровоза является следующая совокупность схмотехнических и конструктивных решений: двухуровневый высокочастотный инвертор в режиме источника напряжения; пассивный выпрямитель; последовательная топология индуктивно-емкостного контура; прямоугольное конструктивное исполнение приемной и передающей катушек.

2. При оптимизации системы беспроводного заряда аккумуляторов рудничного электровоза по принципу максимальной энергоэффективности с учетом ограничений по величине передаваемой мощности и максимальному превышению напряжения на конденсаторах резонансного контура, единственной независимой переменной величиной для заданной геометрии и выбранных материалов обмоток катушек является число витков.

3. Система беспроводного заряда для рудничного электровоза, работающая в условиях предприятия подземной добычи полезных ископаемых опасных по взрыву газа и пыли, технически реализуема, и существуют такие конструктивные исполнения и режимы ее работы, при которых обеспечиваются условия взрывобезопасности.

Достоверность научных положений подтверждается корректным применением математических методов и моделей, адекватность которых реальным процессам подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований; удовлетворительной сходимостью результатов, полученных теоретически и экспериментально при проведении лабораторных испытаний; приме-

нением современного оборудования; сходимостью теоретически полученных результатов и результатов компьютерного моделирования с результатами, полученными экспериментально.

Личный вклад автора заключается в получении результатов, составляющих основу диссертации. Непосредственно были разработаны и реализованы алгоритмы, описанные в работе. Создание лабораторных установок для исследования системы беспроводной передачи энергии для заряда аккумуляторных батарей шахтного электровоза, построение компьютерных моделей, приведенных в работе.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Анализ технических решений систем беспроводной передачи энергии (глава 1), методология оценки опасности воспламенения пыле-газо-воздушной смеси, обоснование критериев и анализ иерархии технических решений (глава 2), конечноэлементная модель области электромагнитного взаимодействия, оценка безопасности применения системы беспроводного заряда и экспериментальная оценка постороннего металлического предмета выполнены при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021-138/3), параметрическая оптимизация резонансного контура (глава 3) и динамическая модель, и ее экспериментальная проверка (глава 4) выполнены при поддержке внутреннего гранта СевГУ, № 34/06-31. Полученные теоретические и практические результаты работы используются в учебном процессе ФГАОУ ВО «СевГУ» для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и рекомендованы к использованию в работе в «НПФ Мехатроника-Про» (г. Томск).

Апробация работы. Основное содержание работы, ее отдельные положения и результаты докладывались и получили одобрение на следующих конференциях:

II Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития современной науки» (г. Анапа, 2020 г), Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021» (г. Севастополь, 2021 г), The 10th Anniversary Russian-Chinese Symposium “Clean Coal Technologies: Mining, Processing, Safety, and Ecology” (г. Кемерово, 2021 г.), VIII Международная научно-практическая конференция «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (г. Прокопьевск, 2022 г), Международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии и материалы» (г. Севастополь, 2022 г) Международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии и материалы» (г. Севастополь, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из которых 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 публикации в изданиях, индексируемых Scopus, Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, приложений и содержит 177 страниц текста, 65 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 250 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и идея работы, поставлены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, а также научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены вопросы развития шахтного электротранспорта и особенности его эксплуатации. Отмечено, что одним из перспективных направлений развития шахтного аккумуляторного электротранспорта является его оснащение системой беспроводной передачи энергии для заряда аккумуляторных батарей, так как такая технология открывает возможность заряда тяговых аккумуляторов во взрывоопасной среде.

В связи с этим был произведен анализ современных технологий беспроводной передачи энергии, рассмотрены варианты топологии активных элементов, участвующих в передаче энергии, схемные решения силовых полупроводниковых преобразователей энергии, использующихся в системах беспроводной передачи энергии, и особенности их функционирования.

На основании проведенного анализа были сформулированы цель и задачи исследований.

Во **второй главе** рассматриваются значимые факторы проектирования системы беспроводного заряда для рудничного электротранспорта с позиции опасности воспламенения пыле-газо-воздушной атмосферы. Для проведения такой оценки была рассмотрена конструктивная схема системы беспроводного заряда аккумуляторов рудничного электровоза, показанную на рисунке 1.

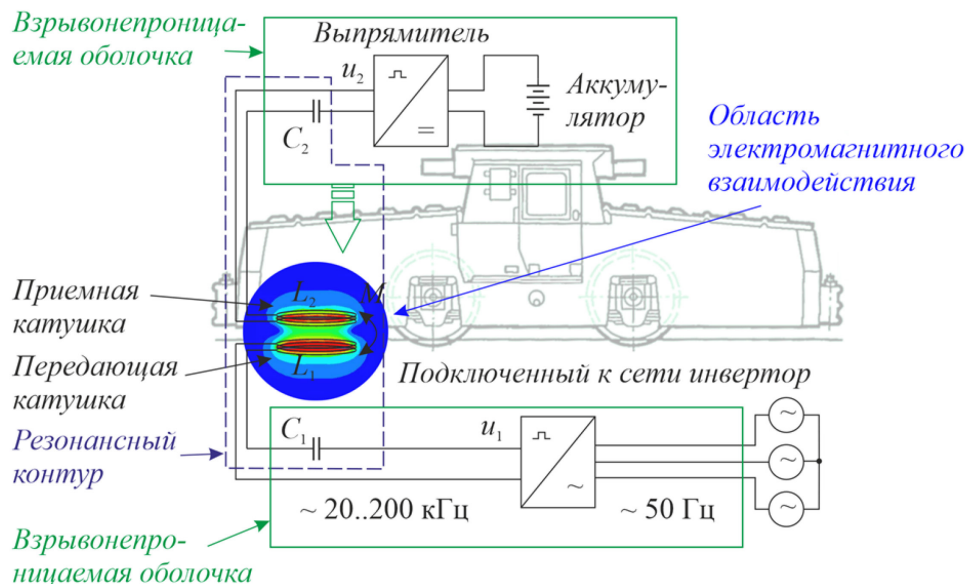


Рисунок 1 - Увеличенная конструктивная схема системы беспроводного заряда аккумуляторов рудничного электровоза

Результаты проведенного анализа показали, что при использовании для токоведущих элементов таких средств защиты, как взрывонепроницаемая оболочка и заливка компаундом, наибольшую опасность воспламенения представляет открытое пространство между катушками, где сосредоточено переменное

магнитное поле. Данная опасность возникает при возможном попадании в него постороннего электропроводящего предмета, который может нагреться до температуры воспламенения газопылевой среды вихревыми токами.

Определение безопасной величины индукции магнитного поля рассчитывалось исходя из закона сохранения энергии, согласно которому величина энергии, которая может преобразоваться в тепловую, не может превысить энергии магнитного поля в объеме v , занятом проводящем предметом:

$$W_m = \int_v \frac{B^2}{2\mu_0} dv \quad (1)$$

где B – индукция магнитного поля, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

В то же время, энергия, выделяемая в виде тепла в проводящем теле будет рассеиваться в окружающее пространство, и в установившемся режиме мощность, выделяемая в виде тепла, будет отвечать уравнению:

$$P = \alpha \tau \quad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности; τ – превышение температуры проводящего предмета над температурой окружающей среды.

В результате вывода уравнений теплового баланса были получены зависимости предельной величины индукции магнитного поля от габаритов проводящего тела. На рисунке 2 показаны данные зависимости для кубических проводящих тел при частоте изменения магнитного поля 100 кГц. Нахождение индукции магнитного поля ниже граничных линий гарантирует, что предмет не нагреется выше предельной температуры, соответствующего температурного класса.

Такой подход к оценке взрывобезопасности системы беспроводной передачи энергии не ограничивает использование тех или иных конструктивных или схемотехнических решений системы беспроводного заряда рудничного электровоза и может применяться в качестве инструмента для оценки уже готового технического решения.

Проведенный анализ существующих систем беспроводного заряда для аккумуляторов электромобилей показал, что вариантов их конструкций и схемотехнических решений слишком много, чтобы, рассматривая систему беспроводного заряда для аккумуляторов рудничного электровоза, допустить произвольный выбор какого-то одного варианта.

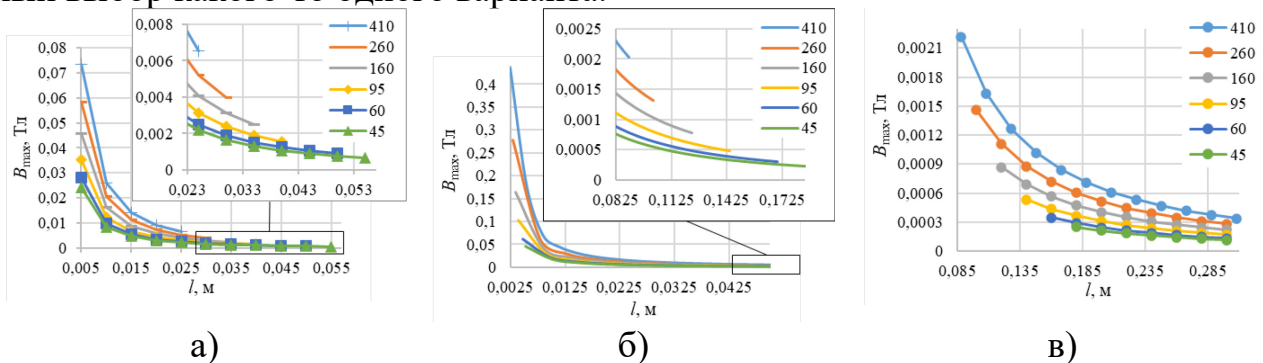


Рисунок 2 - Предельное амплитудное значение магнитной индукции для разных значений параметра $PrGr$: а) $PrGr \leq 500$; б) $500 < PrGr < 2 \cdot 10^7$; в) $PrGr \geq 2 \cdot 10^7$

В связи с этим, для выбора конкретных конструкций и схемотехнических решений, наиболее отвечающих рассматриваемым условиям, были использованы методы системного анализа.

Для рассматриваемой системы при выборе критериев для оценки решений будем опираться на набор критериев эффективности и безопасности. Полный набор критериев, представленный в иерархической форме, приведен на рисунке 3.

В соответствии с приведенной иерархией попарно сопоставлялись все полученные критерии. Составление матрицы парных сравнений (МПС) позволило определить относительную важность каждого критерия для решения рассматриваемой задачи. Поскольку для сравнения полученных критериев нельзя использовать количественные показатели, для оценки была использована семнадцатизначная шкала Саати. В результате вычислений коэффициент относительной важности для решения этой задачи приведен на рисунок .

Полученный результат свидетельствует, что при оценке применимости технических решений систем беспроводного заряда аккумуляторных батарей для рудничного электровоза руководствоваться следует температурой поверхности оборудования электровоза, обусловленной тепловыделением элементов системы беспроводного заряда, заключенных во взрывонепроницаемую оболочку, а также энергией электромагнитного поля в области взаимодействия приемной и передающей катушек, величиной передаваемой мощности и КПД системы. Данные критерии служат для фильтрации заведомо непригодных технических решений и для первичного ранжирования пригодных. Остальные критерии следует учитывать только в случае анализа технических решений, представляющих собой близкие альтернативы.

В итоге получаем в качестве возможных решений двухуровневую иерархию с описанием основных элементов системы беспроводной передачи энергии, показанную на рисунке 5.

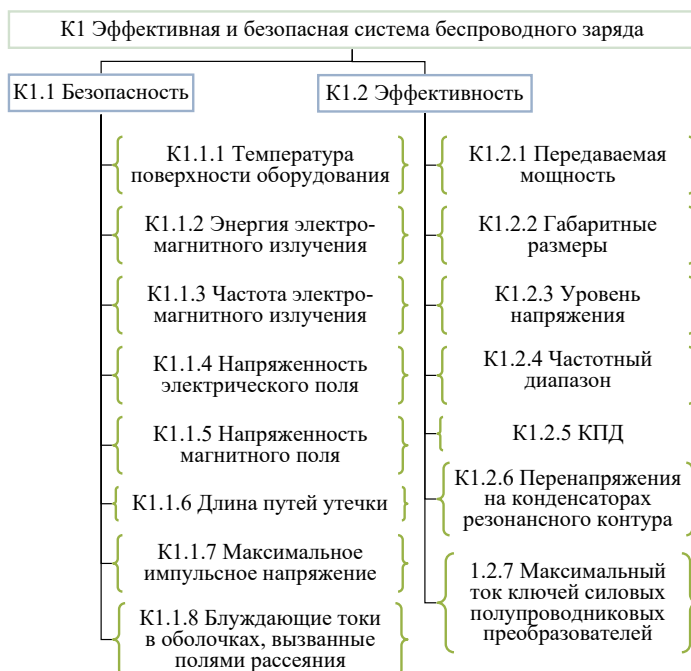


Рисунок 3 - Иерархия критериев

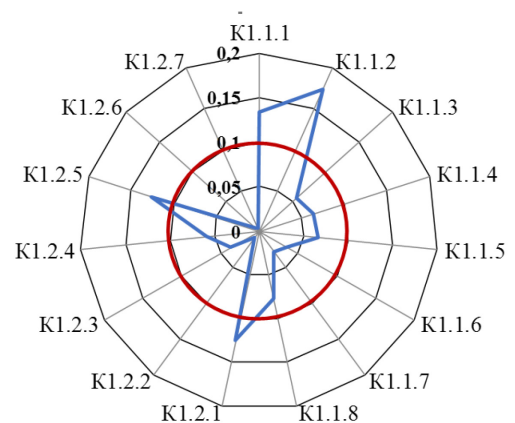


Рисунок 4 - Коэффициенты относительной важности критериев



Рисунок 5 - Иерархия решений

Общее решение R вбирает в себя по одному из элементов второго уровня решений $R1-R4$, которые могут комбинироваться между собой. Принимая во внимание, что парное сравнение есть отношение весов рассматриваемых решений относительно рассматриваемого критерия, а вес комбинационного решения определяется произведением весов составляющих его решений, МПС общих решений R определяется как произведение Кронекера для МПС решений $R1$, $R2$, $R3$ и $R4$. Исходя из этого для системы беспроводного заряда аккумуляторного электровоза составляется электрическая схема показана на рисунке 6 высокочастотный инвертор – двухступенчатый преобразователь в режиме источника напряжения, в качестве выпрямителя - пассивный силовой преобразователь постоянного тока, компенсационная цепь – последовательного соединения, катушки – прямоугольные.

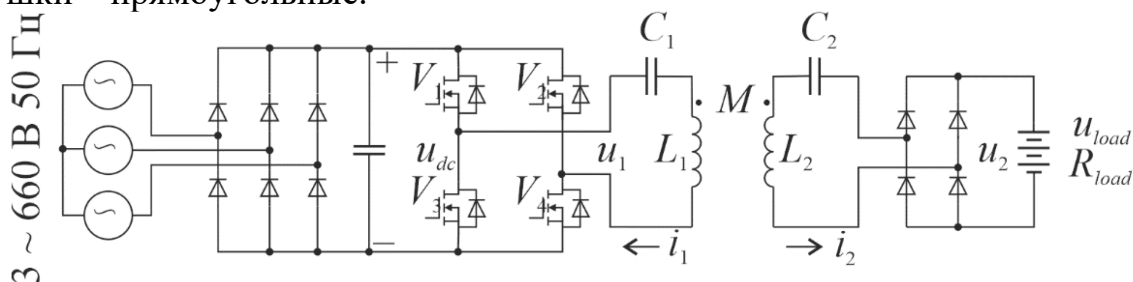


Рисунок 6 - Электрическая схема системы беспроводного заряда аккумуляторов рудничного электровоза

В третьей главе произведена разработка системы беспроводного заряда для шахтного аккумуляторного электровоза. Для получения конкретного схемотехнического решения необходимо учитывать, как параметры элементов, так и режимы работы системы. Это следует делать, исходя из максимальной эффективности, и для этого используют два подхода. Первый применяется на этапе

разработки и выполняет оптимизацию эффективности системы беспроводной передачи энергии, второй – при эксплуатации и обеспечивает наилучшую эффективность при изменяющихся условиях эксплуатации. Полный набор факторов, влияющих на эффективность системы беспроводного заряда, приведен на рисунке 7.



Рисунок 7 - Факторы, влияющие на эффективность системы беспроводного заряда

Данные факторы могут вступать в противоречие, в результате чего получается две разные концепции: принцип максимальной передачи мощности и принцип максимальной энергоэффективности. При проектировании системы беспроводного заряда аккумуляторов шахтового электровоза будем придерживаться второго принципа, но с использованием граничных условий.

Разные авторы по-разному подходят к процессу описания оптимизации и поэтому, чтобы увязать взаимосвязь всех параметров системы с рабочей частотой в частотной области, опишем функцией энергоэффективности:

$$\xi_1(\theta, \omega) = \eta = \frac{P_{load}}{P_{in}} = \frac{A_{i2}^2 R_{load}}{\operatorname{Re}(W_{i1})} \quad (3)$$

где $\operatorname{Re}(W_{i1})$ – реальная часть передаточной функции по току первичной цепи; A_{i2} – уравнение амплитудно-частотной характеристики передаточной функции по току вторичной цепи.

- функцией, определяющей количество передаваемой мощности при постоянстве питающего напряжения:

$$\xi_2(\theta, \omega) = A_{i_2} \geq \frac{I_{2n}}{U_{in\max}} \quad (4)$$

где I_{2n} – номинальный ток приемной цепи; $U_{in\max}$ – максимальное напряжение, получаемое от источника питания.

- функцией, определяющей превышение напряжения на конденсаторах передающей и принимающей цепей над питающим напряжением:

$$\begin{aligned} \xi_3(\theta, \omega) &= \frac{|U_{C1}|}{|U_{in}|} = A_{U_{C1}} \leq \frac{U_{C1\max}}{U_{in\max}}; \\ \xi_4(\theta, \omega) &= \frac{|U_{C2}|}{|U_{in}|} = A_{U_{C2}} \leq \frac{U_{C2\max}}{U_{in\max}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $U_{C1\max}$, $U_{C2\max}$ – максимальное допустимое напряжение на конденсаторах передающей цепи и приемной цепи соответственно; $A_{U_{C1}}$, $A_{U_{C2}}$ – уравнения амплитудно-частотной характеристики передаточных функций по напряжениям соответствующих конденсаторов.

Полученные параметры позволяют проводить оптимизацию на этапе проектирования применительно к рудничному электровозу. Алгоритм предложенной параметрической оптимизации показан на рисунке 8.

В качестве объекта для проектирования беспроводной зарядной станции рудничного электровоза будем рассматривать рудничный электровоз марки А 5,5 600-У5. При проектировании будем использовать схемотехническое решение системы беспроводного заряда, приведенное на рисунке 6, а конструктивное решение – на рисунке 9.

Все элементы передающей цепи размещены в специальном шкафу, элементы приемной цепи, кроме приемной катушки, – в аккумуляторном отсеке. Передающая катушка располагается на боковой поверхности шкафа, а приемная на боковой поверхности аккумуляторного отсека локомотива с габаритами 3000×700 мм. Для обеспечения взрывозащиты катушки заливаются компаундом. На данном электровозе установлен литий-ионный аккумулятор ЛИАБ-70 ТРВ БК. $U_{ном} = 130$ В, I_{max} заряда = 270 А, но для обеспечения стабильности заряда ограничим его величиной 260 А. Следовательно, R_{load} равно 0,5 Ом. Резонансная частота принята равной 90 кГц.

Емкость конденсаторов передающей и приемной цепи $C_1 = C_2 = C$ определяется численными методами с помощью специально написанной компьютерной программы.

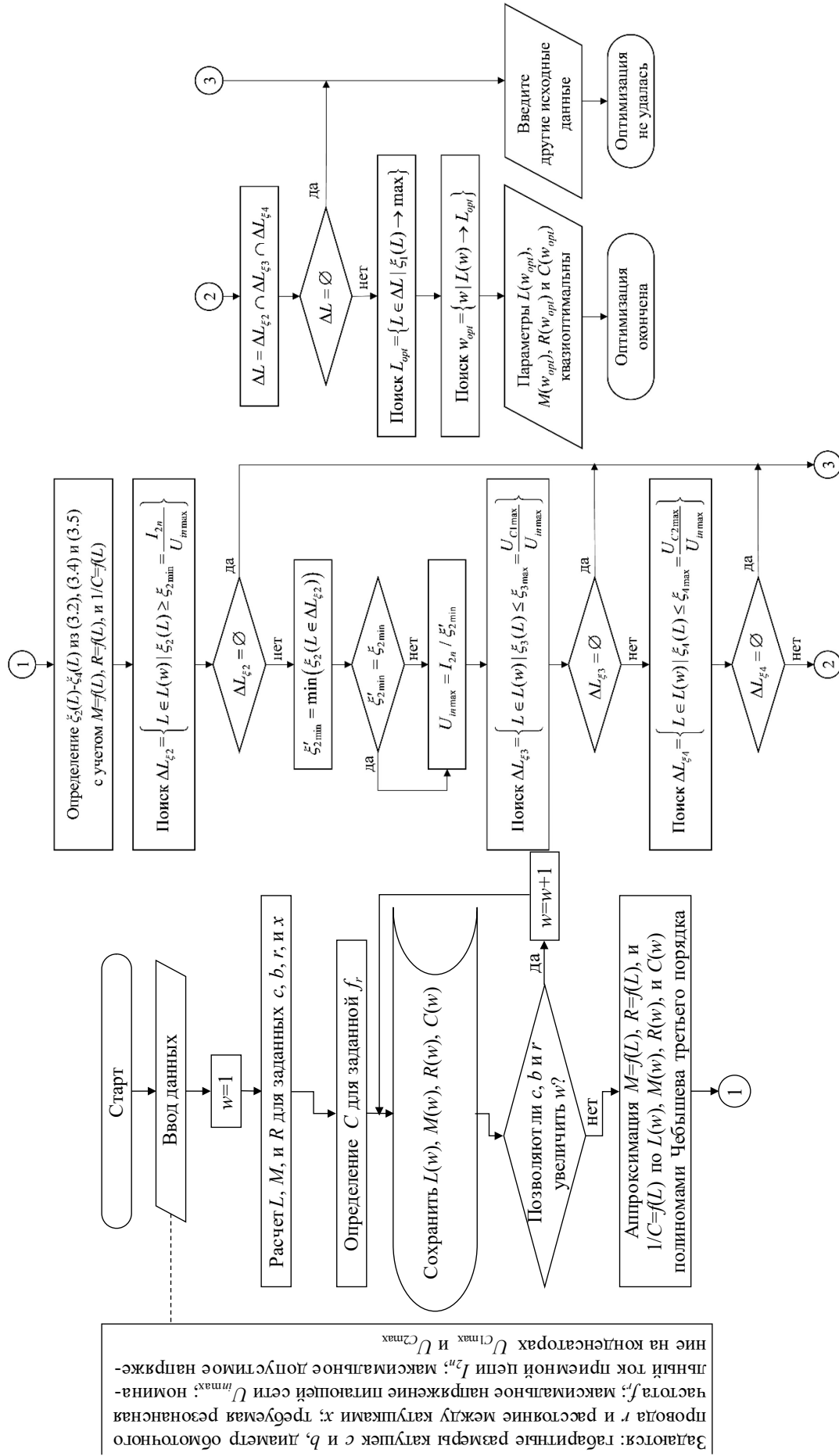


Рисунок 8 - Алгоритм параметрической оптимизации

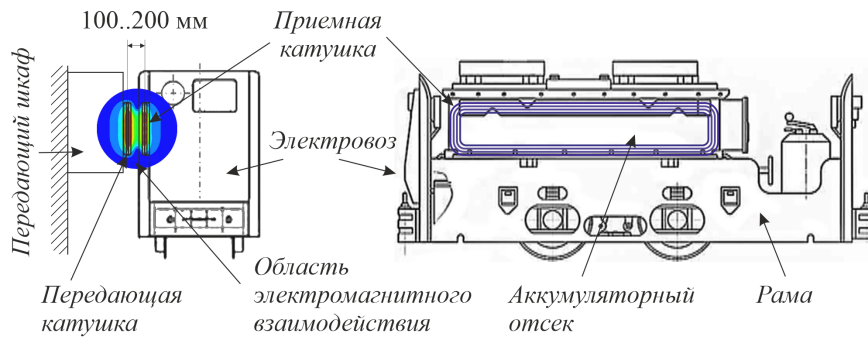


Рисунок 9 - Конструктивное исполнение системы беспроводного заряда для рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5

Таким образом индуктивности катушек $L_1 = L_2 = L$ и их внутренние сопротивления $R_1 = R_2 = R$ определяются следующим образом:

$$L = \frac{1}{\pi} \mu_0 w^2 (b+c) \left[\ln \frac{2bc}{r} - \frac{c}{b+c} \ln (c + \sqrt{b^2 + c^2}) - \frac{b}{b+c} \ln (b + \sqrt{b^2 + c^2}) + \frac{2\sqrt{b^2 + c^2}}{b+c} - \frac{1}{2} + 0,447 \frac{r}{c+b} \right], \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; w – число витков; b и c – длина и ширина катушки по внешней границе; r – ширина шага намотки, который принят равным 15 мм;

$$R = w \rho_m \frac{2(b+c) - 2rw}{S}, \quad (7)$$

где S – сечение обмоточного провода, в качестве которого выбран высоковольтный высокочастотный провод ЛЭЛОР-Е номинальным сечением 50 мм² и максимальным диаметром 15 мм; ρ_m – его удельное сопротивление.

Взаимная индуктивность рассчитывается как:

$$M = w^2 \frac{\mu_0}{\pi} \left[c \ln \left(\frac{c + \sqrt{c^2 + x^2}}{c + \sqrt{c^2 + b^2 + x^2}} \frac{\sqrt{b^2 + x^2}}{x} \right) + b \ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 + x^2}}{b + \sqrt{c^2 + b^2 + x^2}} \frac{\sqrt{c^2 + x^2}}{x} \right) + 2 \left(\sqrt{c^2 + b^2 + x^2} - (\sqrt{c^2 + x^2} - \sqrt{b^2 + x^2} + x) \right) \right], \quad (8)$$

где x – расстояние между катушками.

Расчетные значения параметров электрической схемы системы беспроводного заряда приведены в таблице 1 для разного числа витков.

Таблица 1 – Расчетные параметры электрической схемы системы беспроводного заряда для рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5

Число витков w	L , мкГн	M , мкГн	R , Ом	C , мкФ	R_{load} , Ом
1	16,6	2,7	0,003	0,162	0,5
2	43,7	10,5	0,006	0,058	0,5
3	78,7	23,2	0,009	0,031	0,5

В результате исполнения алгоритма параметрической оптимизации установлено, что наибольшая энергетическая эффективность системы будет обеспечиваться при $w = 1$, для которого значение функции энергоэффективности ξ_1 , равное расчетному значению КПД резонансного контура, составляет 0,994. Кроме того, такое решение является конструктивно наиболее простым. Следовательно, именно такая конструкция принимается для дальнейшего исследования.

В четвертой главе проведен анализ взрывобезопасности системы беспроводного заряда на примере рудничного электровоза А-5,5-600-У5. Ранее было установлено, что анализ взрывобезопасности системы беспроводной передачи энергии в горных выработках опасных по взрыву газа и пыли необходимо понимать распределение магнитного поля высокой частоты в области электромагнитного взаимодействия между катушками. С этим поможет справиться компьютерное моделирование в трехмерной постановке, которое учитывает физические свойства материалов катушек и свойства окружающей среды. Необходимо применение конечноэлементной модели в сочетании с динамической моделью элементов электрической схемы системы беспроводной передачи энергии. Такая комплексная модель была реализована с использованием пакетов прикладных программ MatLab Simulink и Altair Flux.

Динамическая модель системы беспроводного заряда была реализована в среде MatLab Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystems, как это показано на рисунке 10.

Для проверки адекватности описанной модели были проведены экспериментальные исследования с лабораторными образцами систем беспроводного заряда различной мощности.

Первая серия экспериментов выполнялась для подтверждения адекватности компьютерной модели в MatLab Simulink при анализе во временной области. Для этих экспериментов использовался лабораторный образец системы беспроводного заряда со следующими параметрами: $L_1=L_2=100$ мкГн, $M=10$ мкГн, $R_1=R_2=0,01$ Ом, $C_1=C_2=33$ нФ, $R_{load}=6$ Ом, показанный на рисунке 11 (макетный образец электровоза А 5,5 600-У5 в масштабе 1:10).

Эксперименты проводились при напряжении источника питания 24 В, частоте на выходе высокочастотного инвертора 91 кГц и скважности импульсов 0,28. В ходе экспериментов проводились замеры напряжений на катушках и конденсаторах передающей и приемной цепи u_{L1} , u_{C1} и u_{L2} , u_{C2} соответственно. Те же величины для тех же условий моделировались в MatLab Simulink. Полученные результаты показаны на рисунке 12.

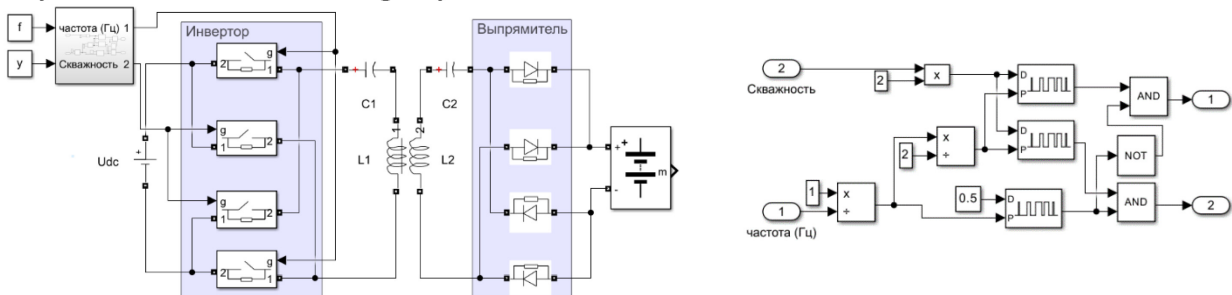


Рисунок 10 - Динамическая модель системы беспроводного заряда в MatLab Simulink

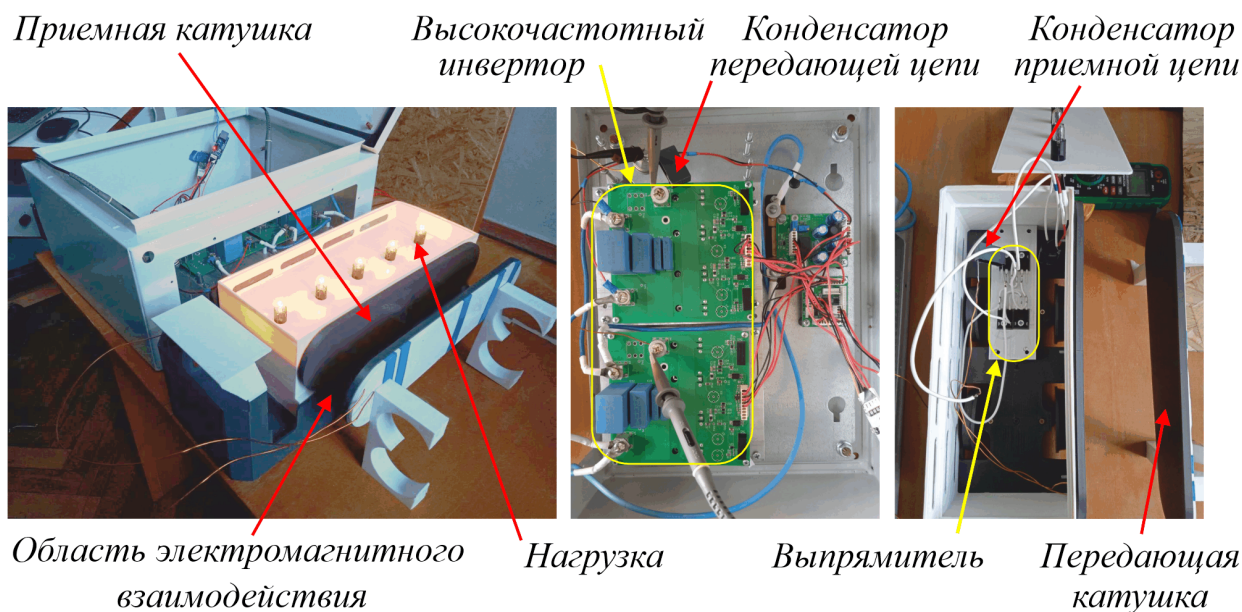


Рисунок 11 - Макетный образец электровоза А 5,5 600-У5 в масштабе 1:10, оснащенный системой беспроводного заряда

Вторая серия экспериментов выполнялась для подтверждения адекватности математической модели при анализе в частотной области, а также при оценке КПД системы. Для этих экспериментов использовался лабораторный образец системы беспроводного заряда мощностью 3,6 кВт, показанный на рисунке 13. Данный лабораторный образец имеет зарядный ток аккумуляторной батареи 36 А и зарядное напряжение 100 В, таким образом эквивалентное сопротивление нагрузки равно 2,8 Ом.

Полученные результаты показаны на рисунке 14, где в частотной области приведены критерии эффективности ξ_1 - ξ_4 , вычисленные по данным моделирования и экспериментов. Графики, обозначенные как «идеальная модель», получены в соответствии с идеальными условиями, при этом параметры модели соответствуют измеренным параметрам лабораторного образца. Графики «модель с учетом скин-эффекта» получены для увеличенных значений R_1 и R_2 . Графики «эксперимент» строго соответствуют измеренной информации, а графики «эксперимент с коррекцией потерь» относятся только к определению КПД и получены по измеренным данным с поправкой на ΔP_{trans} , ΔP_{diodes} , ΔP_{ctrl1} и ΔP_{ctrl2} .

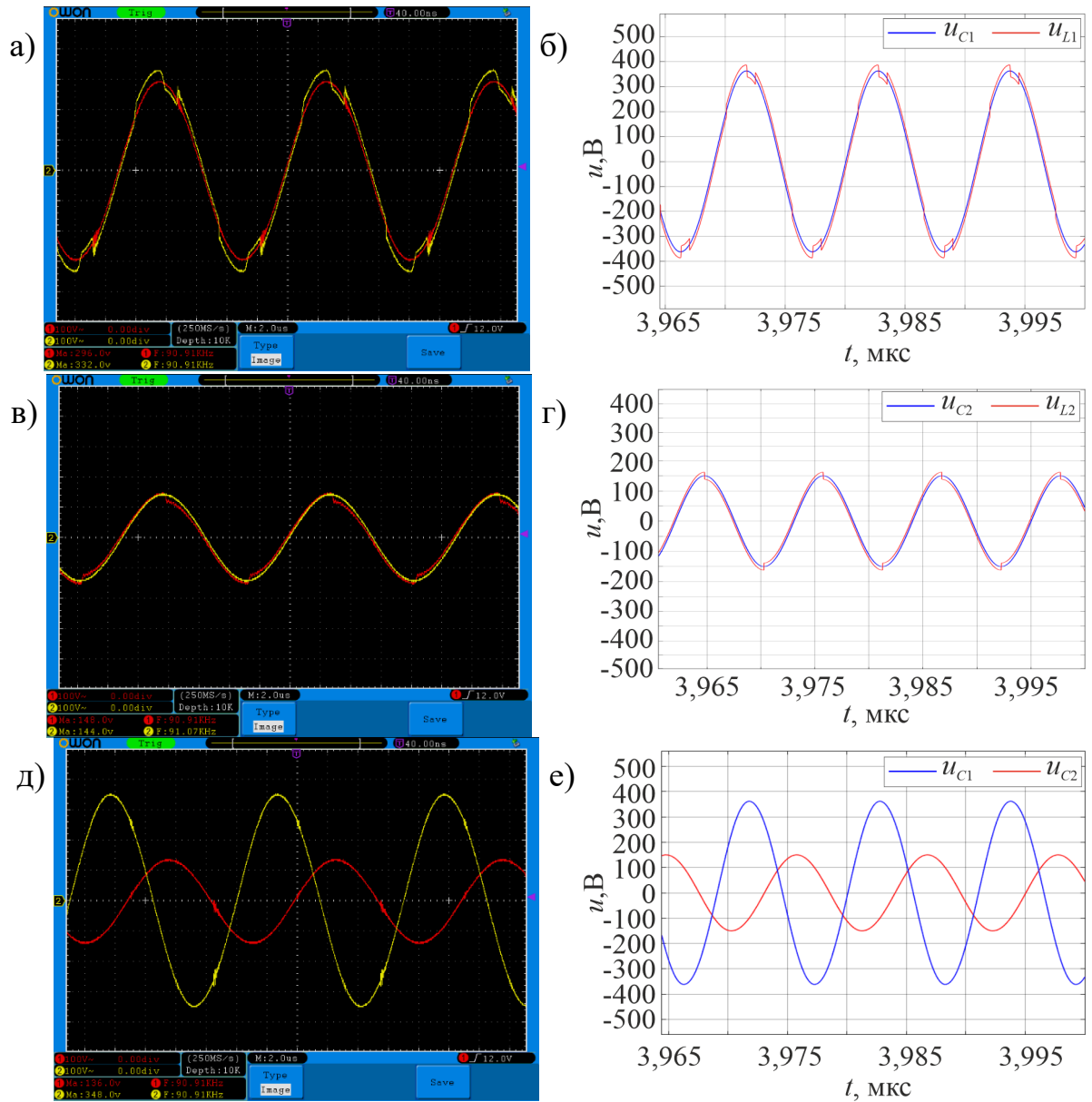


Рисунок 12 - Результаты экспериментов на макетном образце электровоза:

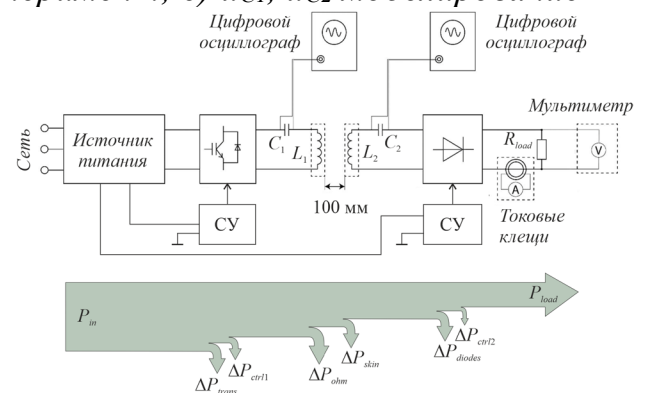


Рисунок 13 - Лабораторный образец системы беспроводного заряда мощностью 3,6 кВт: а) фотография оборудования; б) блок-схема

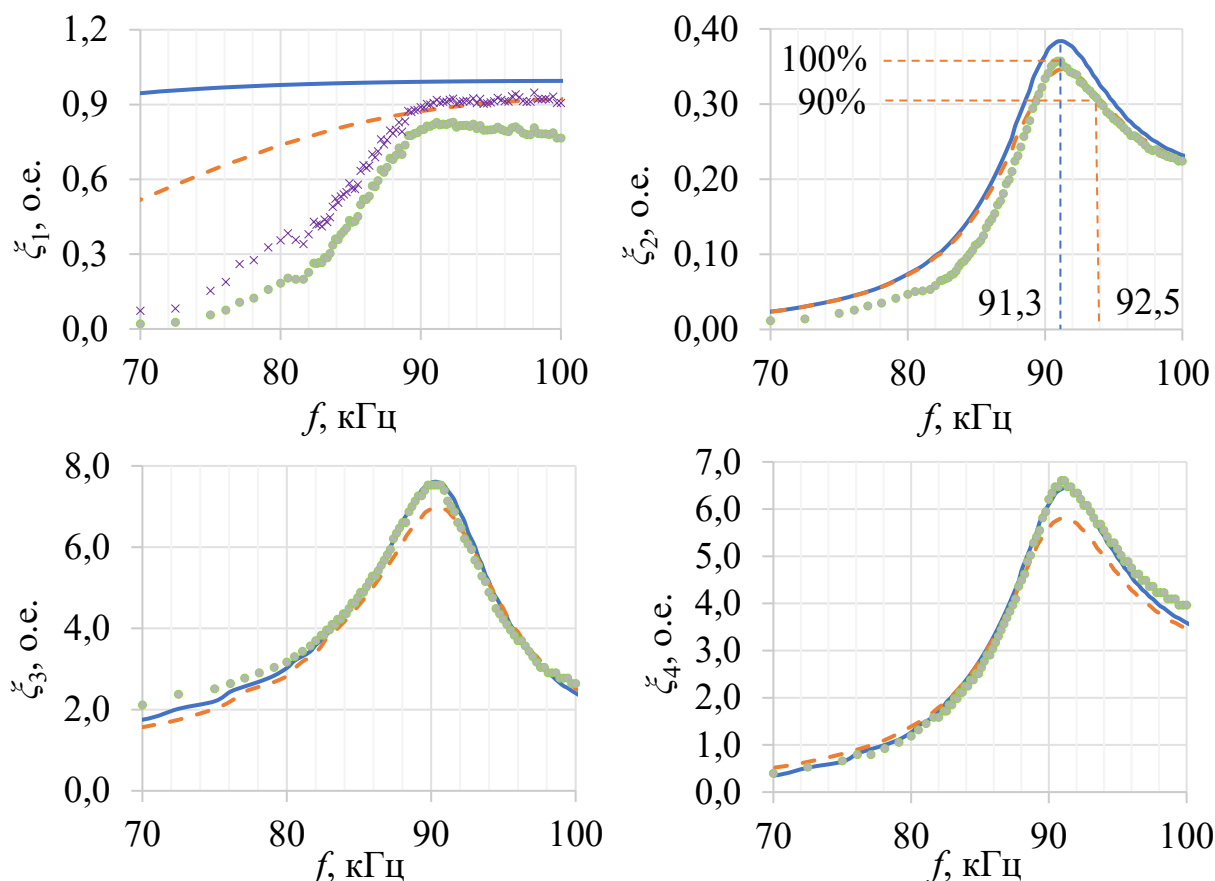


Рисунок 14 - Критерии эффективности ξ_1 - ξ_4 в частотной области: идеальная модель (сплошная линия); модель с учетом скин-эффекта (пунктирная линия); эксперимент (линия, маркированная точками); эксперимент с коррекцией потерь (линия, маркированная крестами)

Сравнение моделирования и эксперимента целесообразно проводить не на идеальной модели, а на модели, учитывающей скин-эффект. Такое сравнение показывает хорошую сходимость на резонансной частоте. При проектировании рассчитывалась резонансная частота 90 кГц, а лабораторный образец системы беспроводного заряда имеет $f_r=91.3$ кГц. Наблюдаемое небольшое отклонение резонансной частоты от расчетной вызвано отклонениями параметров и асимметрией резонансного контура. Наименьшая средняя разница наблюдается для напряжений на конденсаторах передающей и приемной цепей. Полученный экспериментально зарядный ток сходится с моделью. Коэффициент полезного действия, полученный непосредственно в ходе эксперимента, представляет собой КПД всей системы беспроводного заряда, включая вспомогательное оборудование. Он имеет максимальное значение 82,9% на частоте 92,3 кГц. КПД с поправкой на потери имеет максимальное значение 94,8% на частоте 98,1 кГц, что слишком далеко от резонансной частоты. Учитывая диапазон частот f_0 от 91,3 до 92,5 кГц, средний КПД с поправкой на потери составляет 91%, а в идеальных условиях, когда скин-эффект в проводах катушек полностью подавлен, максимальный КПД имеет значение 99,2 %. Все вышеизложенное подтверждает адекватность математической модели.

Динамическая модель используется для получения исходных данных для конечноэлементного моделирования в трехмерной постановке с использованием пакета прикладных программ Altair Flux. Внешний вид модели приведен на рисунке 15. Адекватность данной конечноэлементной модели проверялась экспериментально с использованием лабораторного образца системы беспроводного заряда мощностью 3,6 кВт. Измерялись значения индукции магнитного поля с помощью миллитесламетра ТПУ-01.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента по полю векторов показывает их качественное соответствие, однако не может использоваться для количественной оценки. Для выполнения количественной оценки формировалась картина распределения в пространстве модуля вектора магнитной индукции, показанная на рисунке 16, при этом, поскольку конструкция катушки симметрична и обмотка намотана равномерно, картина распределения обладает центральной симметрией и для наглядности отображена лишь ее четверть.

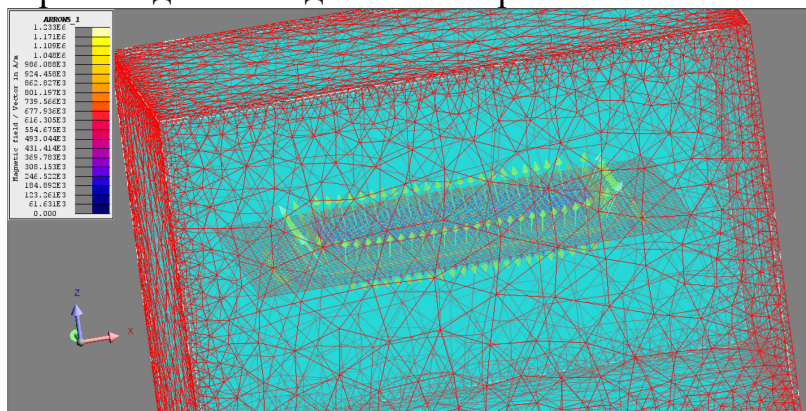


Рисунок 15 - Конечноэлементная модель в Altair Flux

Для каждой полученной точки измерительной информации был определен диапазон отклонений модуля вектора магнитной индукции, обусловленных погрешностью измерения, а результаты моделирования сопоставлены с этим диапазоном. При этом было установлено, что минимальная ширина диапазона составляет от $\pm 2\%$, максимальная ширина диапазона – от минус 23 до плюс 18 %, и ни в одном узле сетки измерения модуль вектора магнитной индукции, полученный моделированием, не выходит за границы диапазона. Это подтверждает адекватность используемой конечноэлементной модели в Altair Flux и возможность ее использования для оценки безопасности применения системы беспроводного заряда аккумуляторов во взрывоопасной атмосфере.

Несмотря на подтвержденную адекватность комплексной модели, были проведены исследования индукционного нагрева металлических предметов кубической формы разного размера и разных материалов, оказавшихся между катушками. Кубы были цельно заполненные из алюминия и железа с длиной ребра 10, 30 и 50 мм. Так как процесс нагрева инерционный, то и процесс измерения нагрева был длительным, время эксперимента около 60 минут. Наибольшему нагреву подвергся металлический куб с длиной ребра 50 мм, достигнув температуры 55,4 °С. Предметы из алюминия нагревались на 30% меньше температуры,

чем железные кубы. Таким образом температура нагрева не превышает температуры воспламенения в соответствии с 1 температурным классом, что подтверждает адекватность методики оценки безопасного уровня напряженности магнитного поля.

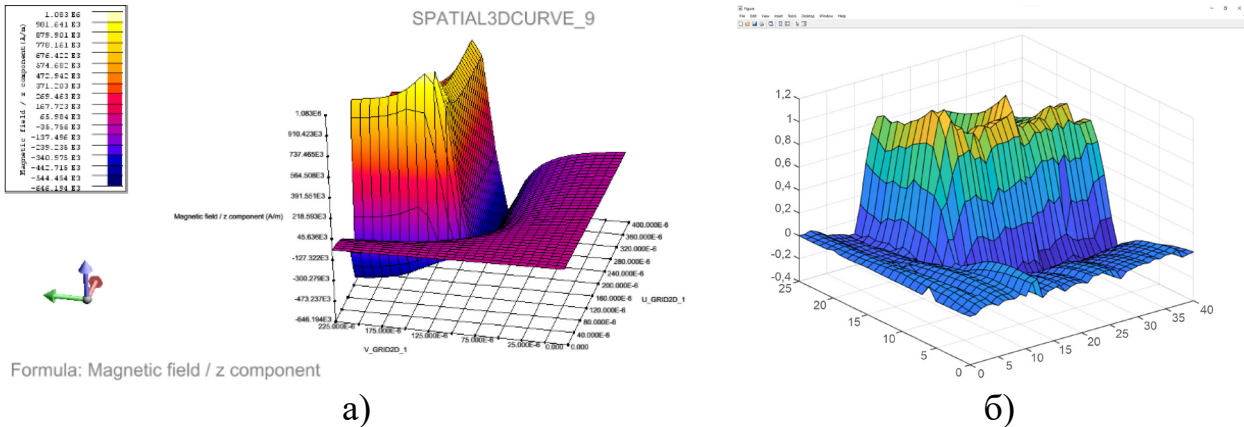


Рисунок 16 - Распределение в пространстве модуля вектора магнитной индукции: а) конечно-элементное моделирование; б) данные измерений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной научной задачи исследования возможности применения беспроводной зарядной станции шахтового электровоза, работающего во взрывоопасной среде, имеющее важное теоретическое и практическое значение и являющееся существенным вкладом в развитие горного машиностроения.

Основные научные и практические результаты выполненной работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что наилучшим решением для системы беспроводного заряда рудничного электровоза является следующая совокупность схемотехнических и конструкционных решений: двухуровневый высокочастотный инвертор в режиме источника напряжения; пассивный выпрямитель; последовательная топология индуктивно-емкостного контура; прямоугольное конструктивное исполнение приемной и передающей катушек.

2. Определено, что при выборе рабочей частоты, обеспечивающей максимум КПД, мощность беспроводной передачи энергии будет иметь локальный минимум, в результате чего возникают два противоречащих принципа оптимизации систем беспроводного заряда: принцип максимальной передачи мощности и принцип максимальной энергоэффективности.

3. Определено, что для системы беспроводного заряда аккумуляторов рудничного электровоза А-5,5-600-У5 квазиоптимальным по принципу максимальной энергоэффективности, но с использованием граничных условий, будет следующий набор параметров: $L=16,6$ мкГн, $M=2,7$ мкГн, $R=0,003$ Ом, $C=0,162$ мкФ, $R_{load}=0,5$ Ом.

4. Доказано, что математическая модель системы беспроводного заряда, построенная на базе эквивалентной схемы замещения, позволяет производить анализ и во временной, и в частотной области.

5. Установлено, что компьютерная модель в MatLab Simulink обеспечивает моделирование переходных процессов в системе беспроводного заряда с точностью до 3,28 %.

6. Установлено, что при учете дополнительных потерь, связанных со скин-эффектом, а также потерь в транзисторах высокочастотного инвертора, в диодах мостового выпрямителя и в системах управления передающей и приемной цепи, математическая модель системы беспроводного заряда позволяет с высокой адекватностью оценивать КПД в рабочем диапазоне частот.

7. Определено, что в отсутствии смещения между катушками системы беспроводного заряда при слое изоляции обмоток толщиной 20 мм будут обеспечены условия, при которых попадание между передающей и приемной катушками любого металлического предмета не вызовет его нагревания до температур, способных воспламенить взрывоопасную атмосферу предприятия подземной добычи полезных ископаемых. При возникновении смещения катушек, если величина смещения не превышает 30% от длины катушки, данные условия будут обеспечиваться при толщине изоляции 30 мм.

8. Экспериментально установлено, что температура нагрева постороннего металлического предмета в условиях, сопоставимых с условиями эксплуатации системы беспроводного заряда для рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5, недостаточна для воспламенения атмосферы опасной по газу и пыли.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в распространении полученных результатов на другие типоразмеры и виды горного оборудования.

Основные положения диссертации опубликованы:

в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Завьялов В. М. К вопросу оценки взрывобезопасности высокочастотного переменного магнитного поля в условиях атмосферы опасной по газу и пыли / В. М. Завьялов, **Е.А. Дубков**, И.Ю. Семькина, В.В. Колодяжный // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 2. – С. 3-11.

2. Завьялов В.М. Оценка возможности использования беспроводной зарядной станции для шахтного электровоза / В.М. Завьялов, **Е.А. Дубков**, И.Ю. Семькина, В.В. Колодяжный // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 3 (167). – С. 22-28.

3. Завьялов В.М. Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза/ Семькина И.Ю., **Дубков Е.А.**, Велиляев А.-Х.С. // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 1-15.

в изданиях Scopus, Web of Science:

4. Zavylov V. M. Criteria for Choosing of Resonant Circuit Parameters of Wireless Power Transfer Charging System / Zavylov, S. A. Abeidulin, **E. A. Dubkov** [et al.] // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2022. – Vol. 18, No. 1. – DOI 10.22068/IJEEE.18.1.2236. – EDN PJEOQP.

5. Semykina I. On the possibility of wireless battery charging in a gaseous-and-dusty mine / I. Semykina, V. Zavyalov, **E. Dubkov**, A. H. Veliliaev // E3S Web of Conferences : The 10th Anniversary Russian-Chinese Symposium “Clean Coal

Technologies: Mining, Processing, Safety, and Ecology”, Kemerovo, 19–21 октября 2021 года. Vol. 303. – Kemerovo: EDP Sciences, 2021. – P. 01032. – EDN XWUAQY.

Прочие публикации по теме исследования:

6. Завьялов В. М. Оптимизация параметров резонансного контура системы беспроводной передачи энергии / В. М. Завьялов, С. А. Абейдулин, С. В. Гайдук, **Е. А. Дубков** [и др.] // Технологии энергообеспечения. Аппараты и машины жизнеобеспечения : Сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции, Анапа, 17 сентября 2020 года. Том Часть 1. – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2020. – С. 252-261. – EDN AVAOZY.

7. Завьялов, В. М. Перспективы совершенствования аккумуляторных локомотивов для горных предприятий, опасных по взрыву газа и пыли / В. М. Завьялов, **Е. А. Дубков** // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2021 : сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 20–23 сентября 2021 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2021. – С. 248-251. – EDN UEMKEY.

8. Семькина, И. Ю. Обоснование критериев оценки технических решений систем беспроводного заряда аккумуляторных батарей для рудничного электротранспорта / И. Ю. Семькина, **Е. А. Дубков**, В. М. Завьялов // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 13–14 апреля 2022 года. – Прокопьевск: Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева" в г. Прокопьевске, 2022. – С. 88-93. – EDN DUSMWI.

9. Семькина И. Ю. Обзор систем беспроводного заряда, применимых для шахтного электротранспорта / И. Ю. Семькина, **Е. А. Дубков**, В. М. Завьялов, М. Б. Углова // Перспективные технологии и материалы: Материалы Международной научно-практической конференции, Севастополь, 21–23 сентября 2022 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2022. – С. 239-243. – EDN BYVJQU.

10. Семькина И. Ю. Анализ распределения индукции магнитного поля в окрестностях катушки прямоугольного профиля системы беспроводной передачи энергии / И. Ю. Семькина, В. М. Завьялов, **Е. А. Дубков**, М. Б. Углова // Перспективные технологии и материалы : Материалы Международной научно-практической конференции, Севастополь, 21–23 сентября 2022 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2022. – С. 235-238. – EDN YEVRZK.

11. **Дубков Е. А.** Возможность применения технологии беспроводной зарядки для аккумуляторных локомотивов в опасных средах / **Е. А. Дубков**, В.

В. Колодяжный // Энергетические установки и технологии. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 119-122. – EDN MFAJVL.

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

[1-4] – проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных результатов, формирование выводов;

[5-8] – обработка, описание и визуализация данных, формулирование выводов;

[9] – обзор литературных источников, формулирование выводов;

[10, 11] – общая редактура статьи.

Подписано в печать 16.10.2023 г. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд. л. 1,5

Тираж 110 экз. Заказ №50/2003

Издательский центр Севастопольского государственного университета
299015, Севастополь, ул. Курчатова, 7

