ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза

В.М.ЗАВЬЯЛОВ[1], **И.Ю.СЕМЫКИНА**[2]✉, **Е.А.ДУБКОВ**[1], **А.С.ВЕЛИЛЯЕВ**[1]

[1] *Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*

[2] *Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Завьялов В.М., Семыкина И.Ю., Дубков Е.А., Велиляев А.С. Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428-442. EDN JSNTAQ

Аннотация. Развитие электротранспорта обладает высоким потенциалом энергосбережения: энергосберегающее управление движением способно снизить объем потребляемых ресурсов, а интеграция с сетью электроснабжения обеспечивает возможность выравнивания суточных графиков нагрузки. Это справедливо для предприятий подземной добычи полезных ископаемых. Ключевым звеном интеграции электротранспорта с сетью является зарядная инфраструктура с перспективой разработки систем беспроводного заряда. Внедрение таких систем в подземных условиях сопряжено с вопросами энергетической эффективности и обеспечения взрывобезопасности. Рассматривается разработка системы беспроводного заряда на примере рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5. Схемные и конструктивные решения сформированы с использованием метода анализа иерархий по результатам сопоставления существующих технических решений для отдельных узлов системы по критериям энергоэффективности и безопасности. Разработана комплексная компьютерная модель, позволяющая проводить исследование переходных процессов в электрической схеме системы беспроводного заряда и в трехмерной постановке определять параметры высокочастотного магнитного поля в пространстве передающей и приемной катушек. Предложен подход к оценке опасности воспламенения рудничной атмосферы на основе анализа индукции высокочастотного магнитного поля в области электромагнитного взаимодействия между катушками системы беспроводного заряда. Подход с использованием комплексной компьютерной модели применен к разработанной системе. Исследование показало, что система беспроводного заряда для рудничного электровоза в условиях предприятия подземной добычи полезных ископаемых, опасных по газу и пыли, технически реализуема и существуют конструктивные решения, при которых она взрывобезопасна.

***Ключевые слова*:** рудничный электровоз; система беспроводного заряда аккумуляторов; метод анализа иерархий; эффективность; взрывобезопасность; комплексная компьютерная модель; индукция магнитного поля

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-03-2021-138/3.

Поступила: 14.03.2023 ***Принята: 20.06.2023*** ***Онлайн: 19.07.2023*** ***Опубликована: 19.07.2023***

Введение. Энергосбережение и снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду являются одним из актуальных мировых направлений развития науки и техники [1]. Это направление объединяет исследования в области электротранспорта, развитие которого обладает значительным потенциалом энергосбережения. Например, в КНР, где парк электромобилей составляет более 50 % от мирового [2], замещение электротранспортом автомобилей с двигателями внутреннего сгорания способно сэкономить потребление ископаемого топлива на 50-60 % [3], что в абсолютном выражении оценивается в 40,99 млн т условного топлива к 2025 г. [4].

Заметную позицию в этой области занимает концепция интеграции электромобилей в сети электроснабжения V2G (от англ. vehicle-to-grid), которая позволяет снижать пиковый спрос на электроэнергию и корректировать профиль потребления в сети [5, 6]. Концепция V2G предусматривает множество составляющих, обеспечивающих энергосбережение, например системы управления движением электромобиля [7], системы мониторинга автомобильных аккумуляторов [8], сложную зарядную инфраструктуру и др. [9]. Зарядная инфраструктура является ключевым звеном интеграции электромобилей в сети электроснабжения и может быть реализована с использованием проводных и беспроводных технологий [10].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428-442
© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

По сравнению с проводными системы беспроводного заряда, кроме влияния на энергоэффективность, способствуют повышению автономности электротранспорта, так как не требуют участия человека в процессе заряда аккумуляторов [11]. Это преимущество позволяет рассмотреть возможности внедрения систем беспроводного заряда для промышленного электротранспорта, функционирующего в условиях повышенной опасности для персонала. Подобной отраслью промышленности является подземная добыча полезных ископаемых, для которой активно ведется разработка безлюдных технологий. В работе [12] описан опыт внедрения безлюдных технологий на подземном руднике в КНР, где для транспортировки полезных ископаемых использовались дизельные погрузчики, хотя в настоящее время в подземной добыче зафиксирован переход от дизельного транспорта к электрическим аккумуляторным аналогам [13]. Система беспроводного заряда для этих задач является перспективным решением.

В России на предприятиях подземной добычи полезных ископаемых распространенным видом аккумуляторного электротранспорта является электровозная откатка. Системы беспроводного заряда для рудничных электровозов способны снизить эксплуатационные затраты и длительность процедуры заряда аккумуляторов, поскольку снимают предписанную требованиями безопасности необходимость отключать аккумулятор и переносить его для заряда на поверхность в специально оборудованное помещение [14]. Совмещение процедуры заряда аккумуляторов с технологическими операциями погрузки и разгрузки рудничных электровозов обеспечивает стабильно высокий уровень заряда аккумуляторов, в результате чего такие системы облегчают работу систем автоматического управления тяговых электроприводов. Это позволяет точно формировать требуемое тяговое усилие, которое может существенно варьироваться в зависимости от профиля пути, коэффициента сцепления с рельсами и других факторов [15].

Важной особенностью применения систем беспроводного заряда для аккумуляторов рудничных электровозов являются условия их эксплуатации, поскольку значительная часть предприятий подземной добычи полезных ископаемых в России являются опасными по газу и пыли. Исследования [16, 17] посвящены оценке факторов, влияющих на повышенный риск перегрева элементов системы беспроводного заряда. Разработка такого устройства для рудничного электровоза должна предусматривать оценку взрывобезопасности. Задачей исследования является научное обоснование технических решений системы беспроводного заряда аккумуляторов рудничного электровоза, обеспечивающих одновременно высокую энергетическую эффективность и взрывобезопасность системы.

Методы. *Принцип работы систем беспроводного заряда и его основные компоненты*. Работа систем беспроводного заряда (рис.1, *а*) строится на принципе индуктивной и магнитно-резонансной связи между стационарно размещаемой передающей катушкой и подвижной приемной катушкой, устанавливаемой на рудничном электровозе (рис.1, *б*) [18, 19]. Передающая и приемная катушки входят в индуктивно-емкостную компенсационную цепь резонансного контура, на который подается напряжение с помощью специального высокочастотного инвертора. Создаваемое передающей катушкой высокочастотное магнитное поле наводит напряжение в приемной катушке, которое через силовой преобразователь постоянного тока передается в цепи заряда аккумулятора. Когда система работает в резонансном режиме, беспроводная передача энергии осуществляется с высокой эффективностью. Системы беспроводного заряда в диапазоне мощностей 5-100 кВт работают при расстоянии между катушками от 50 до 200 мм и имеют КПД выше 90 % [20]. Энергетическая эффективность системы беспроводного заряда определяется в большей степени схемотехническими решениями, а взрывобезопасность зависит преимущественно от конструктивных решений.

На рудничном электровозе все элементы приемной цепи, кроме приемной катушки, размещаются в аккумуляторном отсеке, а элементы передающей цепи – в специальном шкафу. Это позволяет обеспечить взрывозащиту вида «взрывонепроницаемая оболочка» для всех элементов системы, кроме катушек, для которых подобное размещение будет выступать экраном, препятствующим беспроводной передаче энергии [21]. Катушки в целях взрывозащиты могут быть заизолированы или залиты компаундом, однако область электромагнитного взаимодействия между ними будет располагаться непосредственно в атмосфере предприятия подземной добычи полезных ископаемых, а следовательно, анализу подлежит влияние электромагнитного поля на взрывобезопасность.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

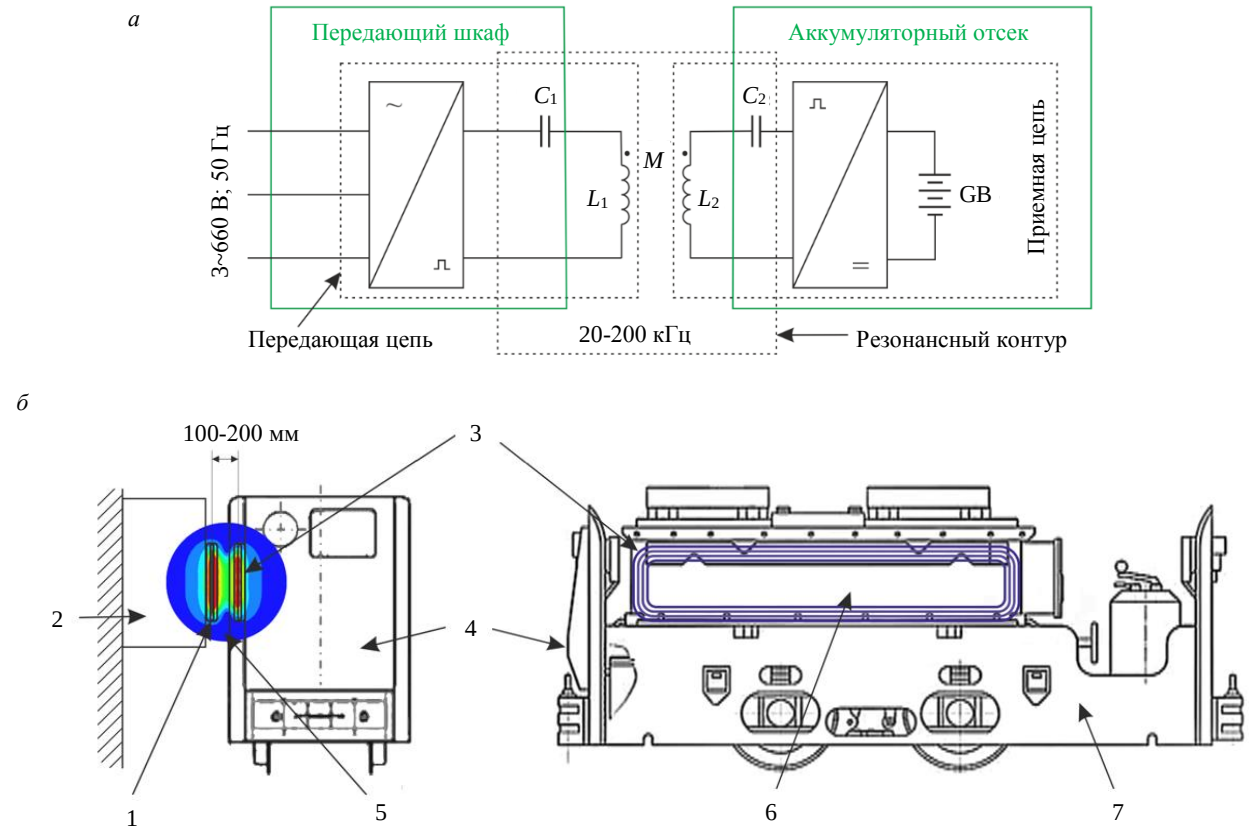


Рис.1. Система беспроводного заряда на примере рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5:
а – структурная схема; *б* – возможное конструктивное исполнение

1 – передающая катушка; 2 – передающий шкаф; 3 – приемная катушка; 4 – электровоз;
5 – область электромагнитного взаимодействия; 6 – аккумуляторный отсек; 7 – рама

Обоснование схемотехнического решения. Анализ схемотехнических решений для системы беспроводного заряда может быть выполнен с использованием метода анализа иерархий [22]. Предполагается для каждого из возможных решений выполнить парные сравнения относительно критериев оценки, которым решение должно удовлетворять, после чего определить локальные приоритеты решений относительно каждого критерия и глобальные приоритеты, определяющие итоговое схемотехническое решение.

Рассматриваемые критерии оценки: температура поверхности оборудования К1; энергия электромагнитного излучения К2; передаваемая мощность К3; КПД К4 [23]. В качестве возможных решений рассматривается двухуровневая иерархия, описывающая основные элементы системы беспроводного заряда (табл.1).

Таблица 1

Иерархия решений

Первый уровень		Второй уровень	
Номер	Элемент системы беспроводного заряда	Номер	Наименование решения
R1	Высокочастотный инвертор	R1.1	Матричные
		R1.2	Источник тока
		R1.3	Источник напряжения
R2	Силовой преобразователь постоянного тока	R2.1	Пассивный
		R2.2	Активный
		R2.3	Синхронный
R3	Компенсационная цепь	R3.1	Последовательная
		R3.2	Параллельная
		R3.3	Гибридная
R4	Катушки	R4.1	Круглые
		R4.2	Прямоугольные
		R4.3	Поляризованные

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428-442
© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

Для высокочастотных инверторов R1 существует высокая вариативность схемных решений [24, 25]. Они разделяются на преобразователи с одноступенчатым и двухступенчатым преобразованием энергии. Первые построены по принципу матричных преобразователей R1.1 и из-за отсутствия промежуточного звена постоянного тока обладают меньшими габаритами и большим суммарным КПД, поэтому в приемной цепи, а следовательно, и в цепи питания аккумуляторных батарей появляются гармоники двукратной частоты сети. Двухступенчатые преобразователи, несмотря на проигрыш по массе габаритным характеристикам, гораздо больше распространены, поскольку такое схемотехническое решение применяется в широком спектре электротехнических приложений, хорошо отлажено, имеет высокий потенциал оптимизации набора компонентов и их параметров, что может нивелировать разницу в КПД.

По принципу действия двухступенчатые преобразователи могут работать в режиме источника тока R1.2 и напряжения R1.3. Инверторы, работающие в режиме источника тока, как правило, применяются для резонансного контура с параллельным подключением конденсаторов компенсационной цепи для смягчения токовой нагрузки и перенапряжений, а также улучшения гармонического состава тока в передающей катушке. По сравнению с другими типами инверторов они отличаются меньшей токовой нагрузкой на все элементы силовых преобразователей, что обуславливает меньшие потери в полупроводниковых ключах. Этот эффект достигается за счет применения мощной катушки индуктивности, обладающей высокими габаритами, поэтому такие инверторы проигрывают по массогабаритным показателям инверторам, работающим в режиме источника напряжения.

Силовой преобразователь постоянного тока R2 в цепи заряда аккумулятора представляет собой пассивный R2.1 или активный R2.2 выпрямитель либо синхронный преобразователь постоянного тока R2.3. Пассивный выпрямитель построен на мостовых диодных схемах, наиболее распространен из-за простоты и минимальных габаритов, однако из-за нелинейности при значительном изменении тока нагрузки провоцирует существенное снижение коэффициента связи катушек [26]. Активный выпрямитель предусматривает замену диодов транзисторами и за счет регулируемого фазового сдвига обеспечивает согласование полных сопротивлений, однако требует относительно сложной системы управления [27, 28]. Альтернативой активному выпрямителю, обеспечивающей согласование полных сопротивлений, является синхронный преобразователь постоянного тока, состоящий из диодного моста и повышающего преобразователя [29]. Активный выпрямитель и синхронный преобразователь не работают в разомкнутых схемах.

Компенсационная цепь R3 резонансного контура различается топологией размещения индуктивностей и емкостей относительно передающей и приемной катушек и базово разделяется на последовательную R3.1 и параллельную R3.2 [30, 31]. Последовательная топология обычно используется совместно с источниками напряжения, имеет больший коэффициент передачи по мощности и меньшую чувствительность к изменению взаимной индукции между передающей и приемной катушками [32]. Параллельная топология, как правило, используется с источниками тока и требует применения дополнительной последовательной катушки индуктивности, что усложняет систему. Эта топология обеспечивает большее полное сопротивление и легче управляется.

Кроме последовательной и параллельной, существуют гибридные топологии R3.3, предполагающие размещение параллельной компенсирующей емкости в передающей цепи и последовательной в приемной цепи либо использование одновременно нескольких компенсационных индуктивностей и емкостей в разных вариациях подключения. Они применяются для снижения чувствительности к отклонениям взаимного расположения передающей и приемной катушек [33], переключения режима заряда аккумуляторов с постоянным током и с постоянным напряжением [34], снижения чувствительности к изменениям нагрузки [35] и других специфических задач.

Приемная и передающая катушки R4 могут иметь различные конструктивные исполнения [36, 37], которые разделяются на неполяризованные (круглые R4.1 и прямоугольные R4.2) и на поляризованные R4.3 (соленоидные, плоские биполярные, конструкции double D и др.). Круглые обеспечивают наиболее высокий коэффициент связи и КПД для сопоставимой активной массы и площади катушки. Прямоугольные несколько уступают, но работают лучше, чем поляризованные, в отношении полей рассеяния в вертикальном и поперечном направлениях. Поляризованные более устойчивы к отклонениям взаимного расположения катушек по сравнению с круглыми и прямоугольными.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

Поскольку оценка иерархии решений в количественном выражении затруднительна, для составления матрицы парных сравнений (МПС) будет использоваться 17-значная шкала Саати*. При анализе, помимо характеристик отдельных решений, учитываются ограничения, накладываемые конструктивным исполнением. Например, если сравниваемые решения отличаются габаритами, с учетом ограниченного объема взрывонепроницаемой оболочки для более крупной альтернативы потребуется снизить мощность элементов. Составим МПС для локальных приоритетов решений первого уровня R1-R4 по критерию К1.

Детально рассмотрены высокочастотные инверторы R1 относительно температуры поверхности оборудования К1. Поскольку R1.1 имеют меньшие габариты и больший КПД, их греющие потери меньше, а значит, температура поверхности оборудования ниже. Решения R1.2 и R1.3 приняты равнозначными. Таким образом,

$$C_{\text{K1,R1}} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{R1.1} \\ \text{R1.2} \\ \text{R1.3} \end{matrix}.$$

Аналогично получены МПС для R2-R4 по К1:

$$C_{\text{K1,R2}} = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{R2.1} \\ \text{R2.2} \\ \text{R2.3} \end{matrix}; \; C_{\text{K1,R3}} = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{R3.1} \\ \text{R3.2} \\ \text{R3.3} \end{matrix}; \; C_{\text{K1,R4}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{R4.1} \\ \text{R4.2} \\ \text{R4.3} \end{matrix}.$$

Все полученные МПС высоко согласованы. Индексы согласованности $k_{\text{ИСК1R1}}$-$k_{\text{ИСК1R4}}$, отношения согласованности $k_{\text{ОСК1R1}}$-$k_{\text{ОСК1R4}}$ для МПС составляют:

$$k_{\text{ИСК1R1}} = 0 \le 0{,}1; \; k_{\text{ИСК1R2}} = 0 \le 0{,}1; k_{\text{ИСК1R3}} = 0{,}08 \le 0{,}1; k_{\text{ИСК1R4}} = 0 \le 0{,}1;$$

$$k_{\text{ОСК1R1}} = 0 \le 0{,}2; \; k_{\text{ОСК1R2}} = 0 \le 0{,}2; k_{\text{ОСК1R3}} = 0{,}14 \le 0{,}2; k_{\text{ОСК1R4}} = 0 \le 0{,}2,$$

что свидетельствует о корректности вынесенной оценки.

Общее решение R вбирает 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:

$$C_{\text{K1,R}} = C_{\text{K1,R1}} \otimes C_{\text{K1,R2}} \otimes C_{\text{K1,R3}} \otimes C_{\text{K1,R4}}.$$

Для наглядности раскроем произведение Кронекера для двух последних сомножителей, демонстрирующее повышение размерности матриц:

$$C_{\text{K1,R3}} \otimes C_{\text{K1,R4}} = \left(C_{\text{K1,R3}_{(i,j)}} C_{\text{K1,R4}} \right) = \begin{pmatrix} C_{\text{K1,R3}_{(i,j)}} \begin{pmatrix} C_{\text{K1,R4}_{(1,1)}} & C_{\text{K1,R4}_{(1,2)}} & C_{\text{K1,R4}_{(1,3)}} \\ C_{\text{K1,R4}_{(2,1)}} & C_{\text{K1,R4}_{(2,2)}} & C_{\text{K1,R4}_{(2,3)}} \\ C_{\text{K1,R4}_{(3,1)}} & C_{\text{K1,R4}_{(3,2)}} & C_{\text{K1,R4}_{(3,3)}} \end{pmatrix} \end{pmatrix},$$

следовательно, $C_{\text{K1,R}}$ является матрицей размерности 81×81.

Следует учитывать, что не каждые решения второго уровня совместимы. Например, высокочастотный инвертор в режиме источника тока R1.2 неэффективно совмещать с последовательной топологией компенсационной цепи R3.1. Это значит, что иерархия не является полной, а следовательно, оценка нереализуемых комбинаций и их обратных величин в соответствующем месте должна заменяться на ноль. Далее из полученной МПС вычисляется вектор локальных приоритетов решений

* *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428-442
© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

$$V_{\mathrm{K1,R}} = \left(V_{\mathrm{K1,R}_{(i)}}\right) = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} C_{\mathrm{K1,R}_{(i,j)}}}}{\sum_{k=1}^{n}\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} C_{\mathrm{K1,R}_{(k,j)}}}},$$

где $n = 81$.

Аналогичным образом последовательно по каждому критерию К2-К4 для общих решений R получены МПС $C_{\mathrm{K2,R}}$-$C_{\mathrm{K4,R}}$. Далее из МПС вычислены векторы локальных приоритетов решений $V_{\mathrm{K2,R}}$-$V_{\mathrm{K4,R}}$. Путем объединения $V_{\mathrm{K1,R}}$-$V_{\mathrm{K4,R}}$ получен общий вектор локальных приоритетов решений V_{R}, из которого определяется вектор глобальных приоритетов:

$$G_{\mathrm{R}} = V_{\mathrm{R}} V_{\mathrm{K}} = \left(V_{\mathrm{K1,R}}, V_{\mathrm{K2,R}}, V_{\mathrm{K3,R}}, V_{\mathrm{K4,R}}\right) V_{\mathrm{K}},$$

где V_{K} принят равным [23]

$$V_{\mathrm{K}} = \left(0{,}133;\quad 0{,}147;\quad 0{,}125;\quad 0{,}127\right)^{T}.$$

Наилучшим решением будет являться то, для которого значение $G_{\mathrm{R}_{(i)}}$ максимально. Полученный результат показывает, что глобальным приоритетом в рассматриваемом случае обладает решение $\mathrm{R}_{(56)} = \mathrm{R1.3} \cup \mathrm{R2.1} \cup \mathrm{R3.1} \cup \mathrm{R4.2}$, для которого $G_{\mathrm{R}_{(56)}} = 0{,}102$.

Электрическая схема данного решения приведена на рис.2, параметры элементов схемы определялись с учетом параметров литийионного аккумулятора ЛИАБ-70 ТРВ-БК, которым оснащается рудничный электровоз марки А-5,5-600-У5. Аккумулятор имеет номинальное напряжение 130 В и максимальный ток заряда 270 А. Для обеспечения надежности номинальный зарядный ток принят равным 260 А, так как при регулировании возможны кратковременные токовые всплески, таким образом, эквивалентное сопротивление нагрузки R_{load} равно 0,5 Ом.

Параметры передающей и приемной катушек определялись исходя из заданного конструктива (данные П.Л.Калантарова, Л.А.Цейтлина). Катушки имеют одинаковую конструкцию, т.е. индуктивности катушек $L_1 = L_2 = L$ и их внутренние сопротивления $R_1 = R_2 = R$, при этом размеры приемной катушки ограничены внешними габаритами аккумуляторного отсека электровоза 3000×700 мм, а расстояние между катушками принято равным 100 мм, что, с одной стороны, достаточно для гарантированного зазора при движении электровоза, а с другой стороны, позволяет сохранить сильную связь между катушками. Тогда индуктивности передающей и приемной катушек определяются следующим образом:

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

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. Взаимная индуктивность рассчитывается как

$$M = w^2 \frac{\mu_0}{\pi}\left[c\ln\left(\frac{c+\sqrt{c^2+x^2}}{c+\sqrt{c^2+b^2+x^2}}\frac{\sqrt{b^2+x^2}}{x}\right) + b\ln\left(\frac{b+\sqrt{b^2+x^2}}{b+\sqrt{c^2+b^2 e x^2}}\frac{\sqrt{c^2+x^2}}{x}\right) + \right.$$

$$\left. + 2\left(\sqrt{c^2+b^2+x^2} - \left(\sqrt{c^2+x^2} - \sqrt{b^2+x^2} + x\right)\right)\right],$$

где x – расстояние между катушками.

Внутренние сопротивления катушек

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

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

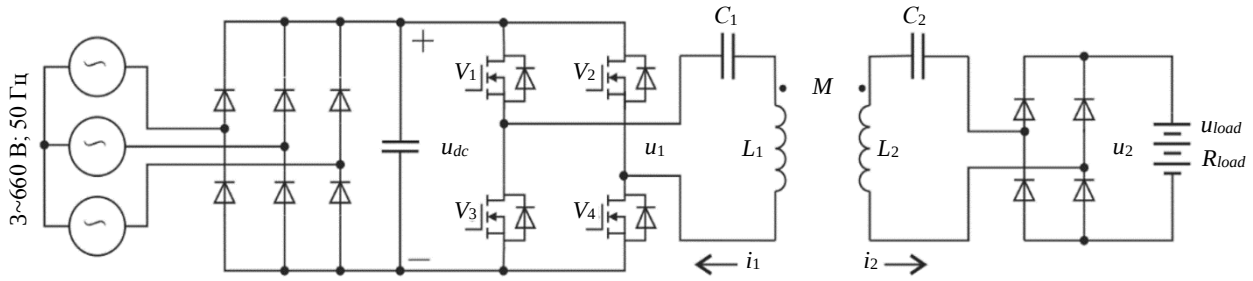


Рис.2. Электрическая схема системы беспроводного заряда

где S – сечение обмоточного провода, в качестве которого выбран высоковольтный высокочастотный провод ЛЭЛОР-Е номинальным сечением 50 мм^2 и максимальным диаметром 15 мм; ρ_m – его удельное сопротивление.

Параметры катушек и нагрузки при заданной резонансной частоте определяют емкость конденсаторов компенсационной цепи, емкости передающей и приемной цепи одинаковы, т.е. $C_1 = C_2 = C$. Определить аналитическое выражение для C затруднительно, поскольку уравнение, описывающее резонансную частоту f_r для системы, показанной на рис.2, имеет высокую размерность. Поэтому емкость C определяется численными методами с помощью специально написанной компьютерной программы. Резонансная частота выбирается согласно рекомендациям стандарта SAE J2954, f_r = 90 кГц.

Расчетные значения параметров электрической схемы системы беспроводного заряда приведены в табл.2 для разного числа витков передающей и приемной катушек. Расчетное значение КПД получено как возможный максимум на всем диапазоне рабочих частот для системы беспроводного заряда без учета коммутационных и кондуктивных потерь в полупроводниковых ключах, диэлектрических потерь в конденсаторах резонансного контура и используется только для сопоставления энергетической эффективности разных конструктивных вариантов одного устройства. Полученные данные показывают, что наибольшая энергетическая эффективность системы будет обеспечиваться при w = 1, такое решение является конструктивно наиболее простым. Следовательно, именно такая конструкция принимается для дальнейшего рассмотрения. Полученное схемотехническое и конструктивное решение является основой для оценки влияния параметров магнитного поля системы беспроводного заряда аккумуляторов на взрывобезопасность в условиях атмосферы, опасной по газу и пыли.

Таблица 2

Расчетные параметры электрической схемы

Число витков w	L, мкГн	M, мкГн	R, Ом	C, мкФ	КПД	i_2/u_1, А/В
1	16,6	2,7	0,003	0,162	0,994	от 0,606 до 2
2	43,7	10,5	0,006	0,058	0,988	от 0,15 до 1,96
3	78,7	23,2	0,009	0,031	0,983	от 0,07 до 1,93

Определение условий безопасной эксплуатации. С учетом размещения во взрывонепроницаемых оболочках всех элементов системы беспроводного заряда, за исключением передающей и приемной катушек, единственным источником опасности, способным воспламенить взрывоопасную среду, является область электромагнитного взаимодействия между катушками. Моделирование температурных полей показывает, что в нормальных условиях высокочастотное переменное магнитное поле не является источником тепла и нагрев атмосферы между катушками происходит в основном в силу законов тепломассопереноса от омических потерь в обмоточных проводах [38, 39]. Однако ситуация принципиально меняется в случае попадания между катушками посторонних металлических предметов, в которых высокочастотное переменное магнитное поле будет наводить вихревые токи. Так как удельная теплоемкость металлов, как правило, низкая, омические потери от протекания вихревых токов могут вызывать значительное повышение температуры.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428-442
© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

Для оценки возможности чрезмерного нагрева постороннего металлического предмета примем, что мощность, выделяемая в виде тепла, не может превышать мощности магнитного поля, ограниченного объемом металлического предмета, в котором протекают вихревые токи. Принимая допущения, что высокочастотное переменное магнитное поле в каждой точке пространства изменяется синусоидально с угловой частотой ω, а распределение магнитной индукции по объему постороннего металлического предмета V является равномерным, мощность магнитного поля, преобразовываемая в тепло, будет определяться выражением

$$P_m = \frac{\omega B_{\max}^2 V}{\mu_0 \mu}, \qquad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость среды; $B_{\max}$ – амплитудное значение индукции магнитного поля.

Температура, до которой посторонний металлический предмет будет нагреваться, определяется тепловым равновесием, потенциал теплового поля распределен по объему металлического предмета равномерно, а теплопередача осуществляется за счет естественной конвекции (данные С.С.Кутателадзе, В.М.Боришанского):

$$\tau = \frac{P_m}{\alpha}, \qquad (2)$$

где τ – превышение температуры металлического предмета над температурой окружающей среды; α – коэффициент температуропроводности, зависящий от формы и размера нагреваемого предмета, а также произведения числа Прандтля Pr и числа Грасгофа Gr.

Величина τ определяется по ГОСТ 31610.0-2019, в соответствии с ним для оборудования группы I, предназначенного для применения в подземных выработках шахт и наземных строениях, опасных по газу и пыли, максимальная температура поверхности, на которой маловероятно отложение угольной пыли в виде слоя, должна быть не более 450 °С, температура окружающей среды принята равной 40 °С.

Анализируя выражения (1) и (2), определим предельную величину амплитудного значения магнитной индукции, гарантирующую, что максимально возможная температура поверхности тела, подвергающегося нагреву вихревыми токами, не будет превышать 450 °С:

$$\begin{cases} B_{\max} = \sqrt{\dfrac{\mu_0 \mu \tau}{\omega l^3} A_1 \sqrt[8]{\dfrac{\tau}{l^5}}} \text{ при } l \le 2{,}574 \text{ мм}; \\ B_{\max} = \sqrt{\dfrac{\mu_0 \mu \tau}{\omega l^3} A_2 \sqrt[4]{\dfrac{\tau}{l}}} \text{ при } 2{,}574 < l < 88{,}044 \text{ мм}; \\ B_{\max} = \sqrt{\dfrac{\mu_0 \mu \tau}{\omega l^3} A_3 \sqrt[3]{\tau}} \text{ при } l \ge 88{,}044 \text{ мм}, \end{cases}$$

где A_1, A_2, A_3 – коэффициенты, зависящие от температуры воздуха; l – длина ребра куба.

Зависимость предельного значения $B_{\max}$ от l для данных условий приведена на рис.3. Учитывая, что расстояние между катушками принято равным 100 мм, длина ребра постороннего металлического предмета кубической формы не может превышать этого значения. Следовательно, амплитудное значение индукции магнитного поля рассматриваемой системы в любой точке пространства, куда может попасть посторонний предмет, не должно превышать 1,929 мТл. Определить,

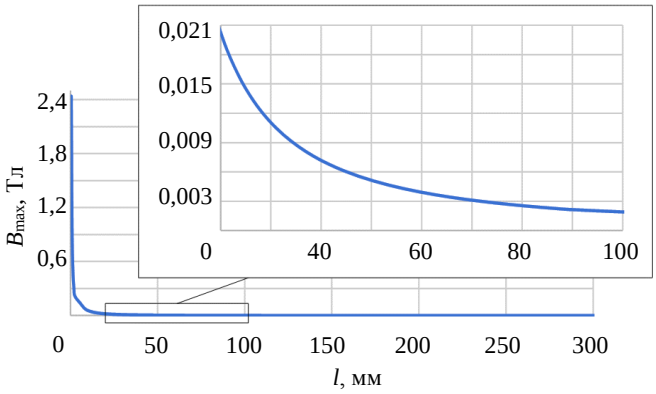


Рис.3. Предельное амплитудное значение магнитной индукции

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

выполняется ли данное условие для рассматриваемой системы беспроводного заряда, можно с использованием компьютерного моделирования.

Комплексная компьютерная модель. Моделирование системы беспроводного заряда позволяет в трехмерной постановке определять параметры высокочастотного магнитного поля в пространстве передающей и приемной катушек с учетом физических свойств материалов, из которых они состоят, и свойств окружающей среды. Применение конечно-элементных моделей в сочетании с динамической моделью элементов электрической схемы системы беспроводного заряда позволяет описывать переходные процессы, в том числе изменение выделяемой энергии магнитного поля. Такая комплексная модель реализована с использованием пакетов прикладных программ MatLab Simulink и Altair Flux.

Модель системы беспроводного заряда в MatLab Simulink имеет следующие допущения: выпрямительная ступень преобразования энергии в высокочастотном инверторе является идеальной, а напряжение в звене постоянного тока неизменно; полупроводниковые ключи инвертора и выпрямители идеализированы и не описывают коммутационные потери и потери проводимости; конденсаторы компенсационной цепи идеализированы и не описывают диэлектрические потери. Модель выполнена с использованием библиотеки SimPowerSystems, что обеспечивает высокий уровень ее адекватности, поскольку элементы данной библиотеки широко апробированы (рис.4).

Модель передающей и приемной катушек и области их электромагнитного взаимодействия выполнена на базе трехмерного чертежа, представляющего собой два элемента на основе изогнутых цилиндров с поперечным сечением 50 мм^2, прямоугольных в плане, с размерами 3000×700 мм, размещенных с наложением в плане на расстоянии 100 мм между осями цилиндров. При моделировании использовалась динамическая сетка с автоматическим выбором размера конечных элементов, обеспечивающим на каждом шаге расчета ошибку не более $1 \cdot 10^{-6}$ Тл.

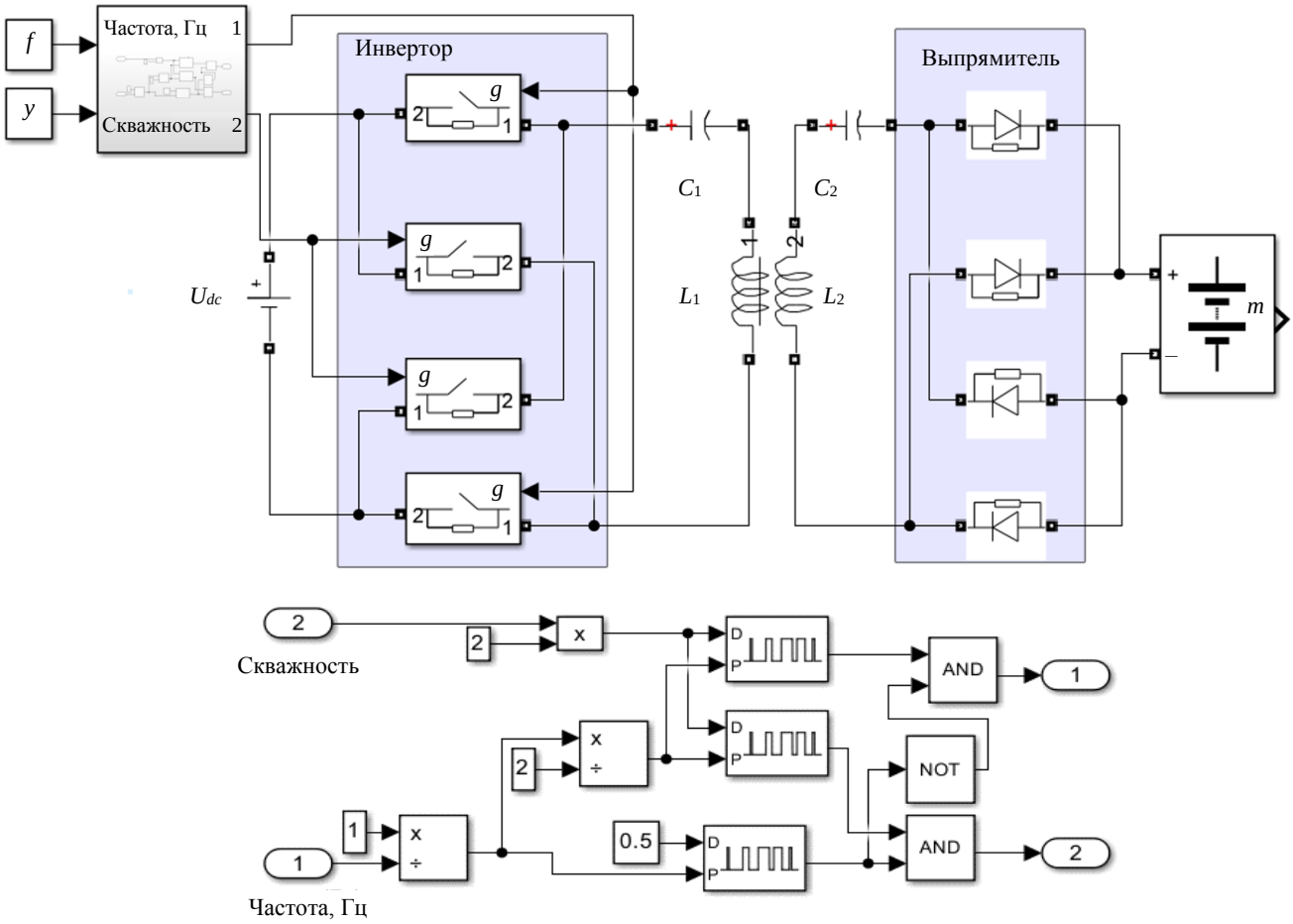


Рис.4. Модель системы беспроводного заряда в MatLab Simulink

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428-442
© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

Обсуждение результатов. *Макетные испытания.* Для демонстрации реализуемости системы беспроводного заряда описанной конструкции и подтверждения адекватности компьютерной модели изготовлен макетный образец электровоза в масштабе 1:10, оснащенный системой беспроводного заряда, имеющей следующие параметры: $L_1 = L_2 = 100$ мкГн; $M = 10$ мкГн; $R_1 = R_2 = 0{,}01$ Ом; $C_1 = C_2 = 33$ нФ; $R_{load} = 6$ Ом (рис.5). Высокочастотный инвертор построен на транзисторах марки IRFP90N20DPBF с номинальным напряжением 200 В и током 94 А, а выпрямитель – на диодах Шоттки марки VS-80CPQ150-N3 с номинальным током 40 А и напряжением 150 В. В качестве источника питания использовался источник питания постоянного тока Delta Elektronika SM330-AR-22 мощностью 3300 Вт. В качестве измерительного оборудования при макетных испытаниях использовались тепловизор Fluke TiS20 и осциллограф DS1074Z-S.

Макетные испытания проводились при напряжении источника питания 24 В, частоте на выходе высокочастотного инвертора 91 кГц и скважности импульсов 0,28. В ходе испытаний 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 рис.6.

Термограмма демонстрирует работоспособность системы беспроводного заряда, является косвенным инструментом, показывающим распределение в пространстве электромагнитного поля (рис.6, *а*). Источником тепла в области электромагнитного взаимодействия является нагрев проводников катушек протекающими по ним токами, причем центральная область катушек имеет существенно меньшую температуру.

Осциллограммы показывают замеры напряжений, где цена деления по шкале напряжения равна 100 В, а по шкале времени – 2 мкс (рис.6, *б, г, е*). Соответствующие им напряжения, полученные с помощью моделирования, показаны на рис.6, *в, д, ж*. Сопоставление результатов моделирования и эксперимента свидетельствует, что за исключением микропереходных процессов при коммутации полупроводниковых ключей наблюдается количественное и качественное соответствие рассматриваемых напряжений как по амплитуде, так и по фазе. Максимальное расхождение результатов моделирования и эксперимента составляет 3,28 %, что говорит о высокой адекватности компьютерной модели (см. рис.4). Данный результат является основанием для использования описанной выше комплексной компьютерной модели в целях исследования взрывобезопасности системы беспроводного заряда для рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5.

Результаты моделирования. С использованием комплексной компьютерной модели проведено исследование параметров магнитного поля в области электромагнитного взаимодействия системы беспроводного заряда для рудничного электровоза марки А-5,5-600-У5. Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе анализировались динамические процессы, определялись параметры тока передающей и приемной цепи, которые на втором этапе использовались как входные данные для моделирования магнитного поля.

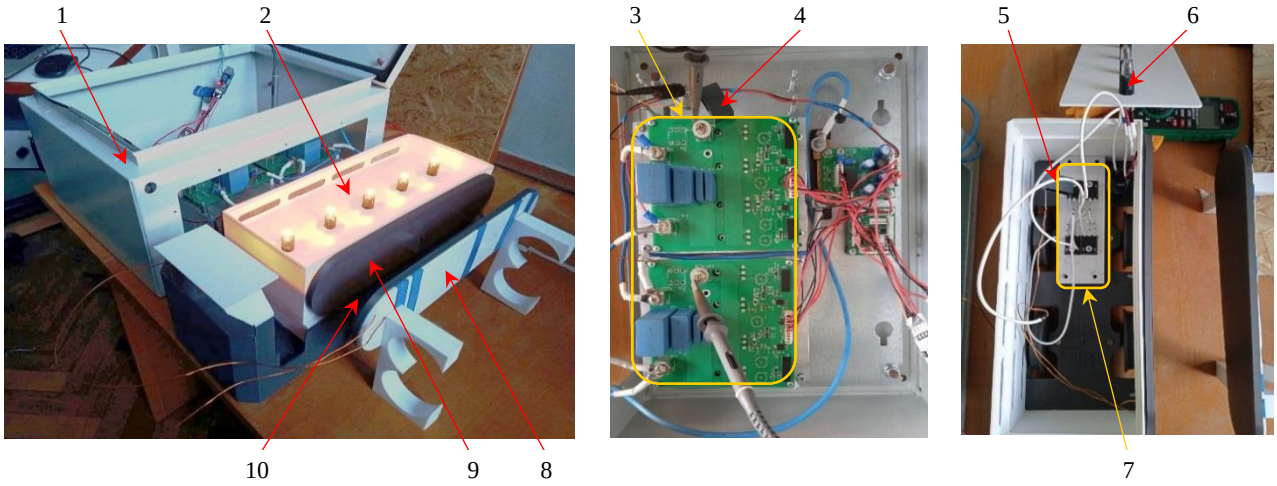


Рис.5. Макетный образец электровоза, оснащенный системой беспроводного заряда

1 – передающий шкаф; 2 – макет электровоза; 3 – высокочастотный инвертор; 4 – конденсатор передающей цепи; 5 – конденсатор приемной цепи; 6 – нагрузка; 7 – выпрямитель; 8 – передающая катушка; 9 – приемная катушка; 10 – область электромагнитного взаимодействия

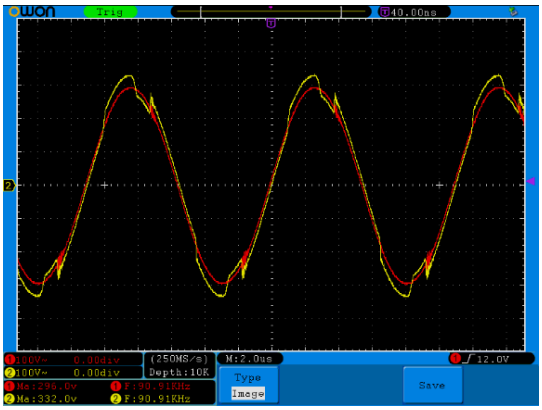
Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

а

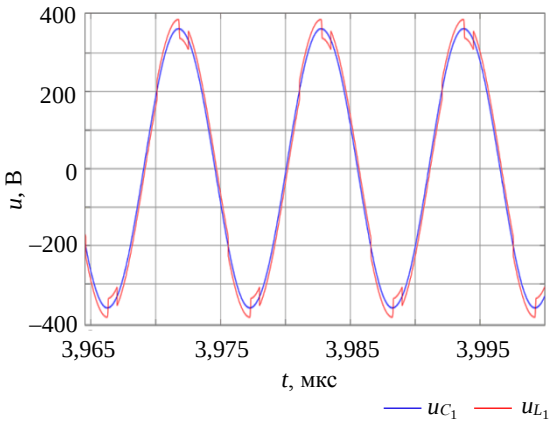


Рис.6. Результаты макетных испытаний:
а – термограмма;
б – эксперимент u_{L_1}, u_{C_1};
в – моделирование u_{L_1}, u_{C_1};
г – эксперимент u_{L_2}, u_{C_2};
д – моделирование u_{L_2}, u_{C_2};
е – эксперимент u_{C_1}, u_{C_2};
ж – моделирование u_{C_1}, u_{C_2}

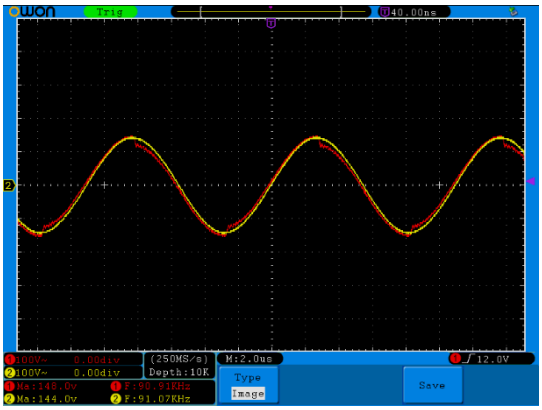
б



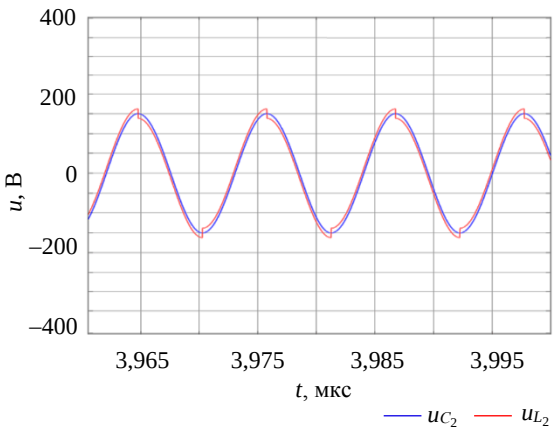
в



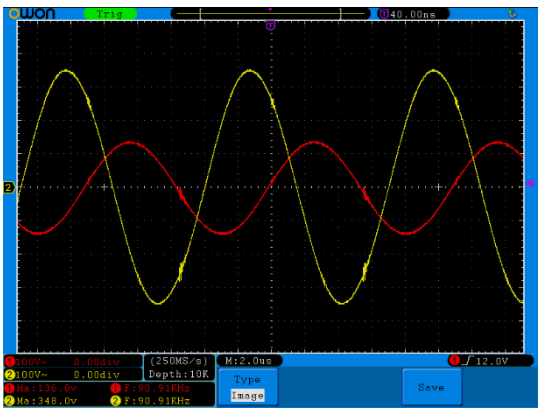
г



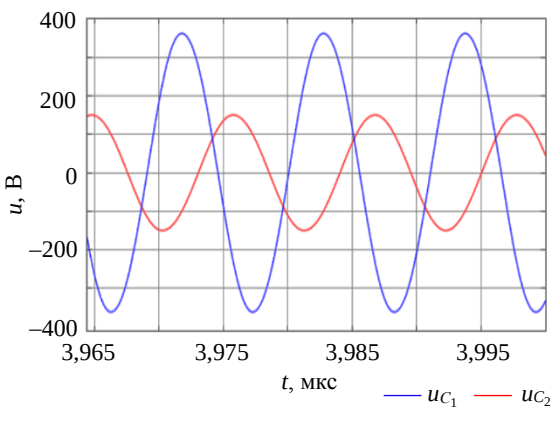
д



е



ж



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428-442
© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

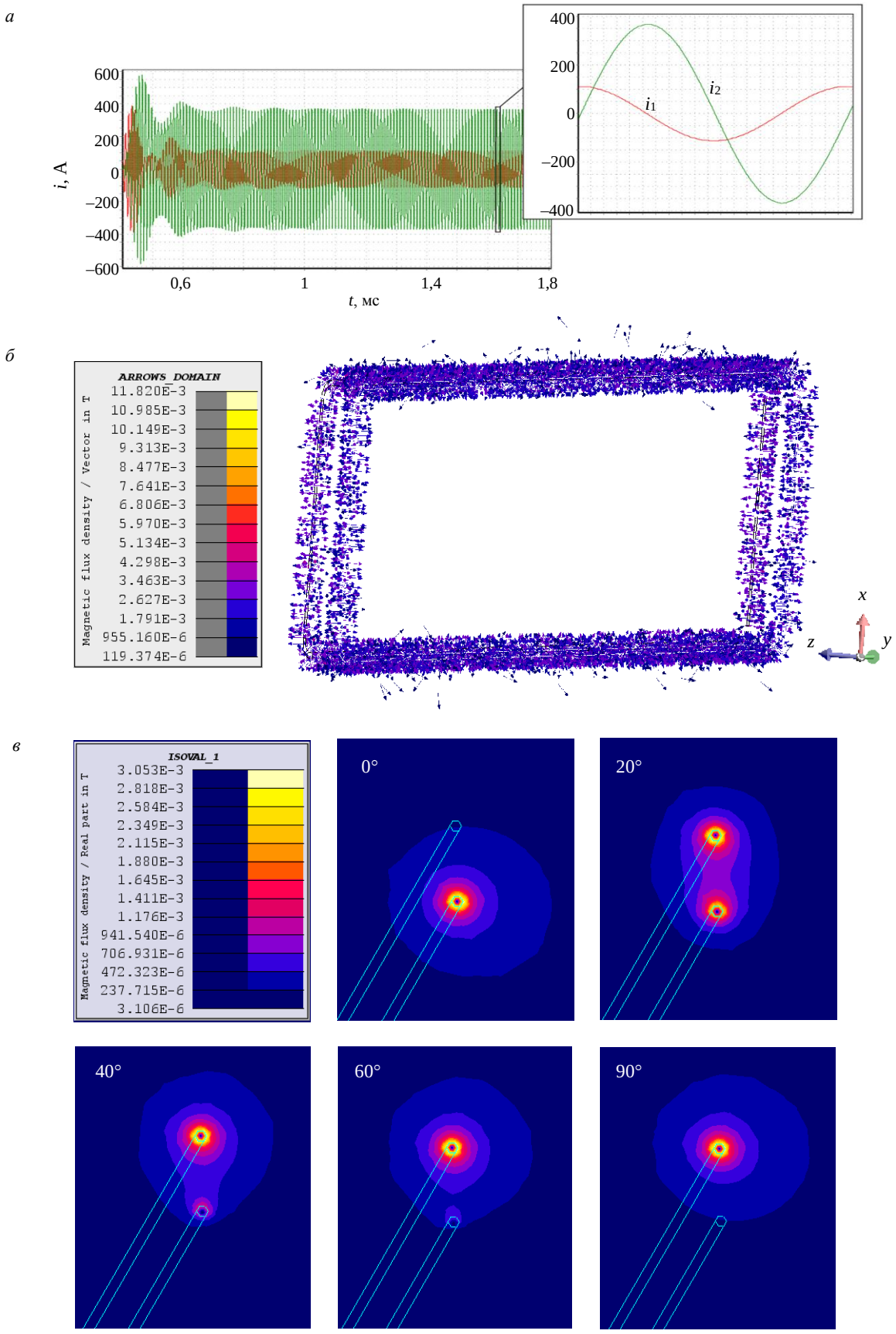


Рис.7. Результаты моделирования: *а* – переходные процессы i_1 и i_2; *б* – поле векторов магнитной индукции для значения фазы 20°; *в* – распределение магнитной индукции в окрестностях обмоточного провода катушек для значений фазы 0, 20, 40, 60 и 90°

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

При работе с моделью в MatLab Simulink на входе системы устанавливались рабочая частота и скважность. Система рассчитывалась для резонансной частоты, равной 90 кГц, на этой частоте отмечается максимум тока приемной цепи i_2 при постоянстве напряжения на входе резонансного контура u_1, коэффициент передачи по току $i_2/u_1 = 2$ А/В. КПД беспроводной передачи энергии на данной частоте равен 0,988 при теоретическом максимуме для системы 0,994. Следовательно, целесообразным является выбор рабочей частоты, отличающейся от резонансной, чтобы соблюдался баланс между стремлением к максимуму КПД и обеспечением требуемого зарядного тока.

В рассматриваемом случае требуется зарядный ток 260 А, амплитудное значение тока i_2 составляет 368 А. Учитывая, что минимальный теоретический коэффициент передачи по току $i_2/u_1 = 0{,}606$ А/В, амплитудное значение напряжения u_1 должно быть не менее 607 В. При трехфазном сетевом напряжении с действующим фазным значением 660 В напряжение звена постоянного тока составит 891 В, требуемый зарядный ток будет обеспечен на любой рабочей частоте. Исходя из этого, в качестве рабочей частоты выбрана частота 97,1 кГц, на которой обеспечивается максимум КПД. Скважность, обеспечивающая напряжения на входе резонансного контура, равна 0,68.

Полученные для описанных условий токи i_1 и i_2 показаны на рис.7, *а*. Амплитудные значения токов, фазовый сдвиг между ними использовались как входные данные для конечноэлементной модели, определяющей распределенное в пространстве поле векторов магнитной индукции в течение периода изменения токов. Результаты моделирования магнитного поля в области электромагнитного взаимодействия приведены на рис.7, *б*, *в*. Они показывают, что индукция высокочастотного магнитного поля за пределами окрестностей обмоточного провода передающей и приемной катушек имеет пренебрежимо малое значение и в центре прямоугольника 3000×700 равна нулю. Это говорит о достаточно высокой электромагнитной совместимости и безопасности для людей по критериям СанПиН 1.2.3685-21.

При рассмотрении магнитного поля в окрестностях обмоточного провода катушек установлено, что максимальная индукция поля за пределами обмоточного провода составляет 3,548 мТл, однако уже на удалении 18 мм индукция магнитного поля не превышает 1,929 мТл. Поскольку изначально предполагалось катушки заизолировать или заливать компаундом, при слое изоляции 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 атмосферу предприятия подземной добычи полезных ископаемых. Дополнительно может использоваться снижение зарядного тока, что пропорционально замедлит процесс заряда аккумулятора рудничного электровоза, однако повысит надежность системы против взрыва.

Заключение. Исследование показало, что система беспроводного заряда для рудничного электровоза, работающая в условиях предприятия подземной добычи полезных ископаемых, опасных по газу и пыли, технически реализуема и существуют такие конструктивные исполнения и режимы ее работы, при которых она взрывобезопасна. Полученные схемотехнические и конструктивные решения могут использоваться в качестве основы для разработки конструкторских и технологических документов, необходимых для изготовления опытного образца системы беспроводного заряда и последующего направления в сертификационный орган для проведения испытаний на соответствие требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 012/2011.

Внедрение системы беспроводного заряда для рудничных электровозов и других аналогичных систем шахтного транспорта способно повысить эффективность добычи за счет снижения эксплуатационных затрат, обусловленных необходимостью отключать аккумуляторы для зарядки за пределами взрывоопасной зоны. В случае реализации на крупных рудничных транспортных системах концепции интеграции электрического транспорта в сеть электроснабжения предложенная система может использоваться для выравнивания нагрузки, обеспечивая повышение энергоэффективности всего предприятия.

Дальнейшее исследование системы беспроводного заряда состоит в уточнении ее динамической модели с учетом коммутационных потерь и потерь проводимости в силовых полупроводниковых ключах, диэлектрических потерь в конденсаторах компенсационной цепи, что позволит оценивать КПД всей системы беспроводного заряда, а не только КПД беспроводной передачи энергии. Целесообразно дальнейшее исследование высокочастотного магнитного поля в области

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.М.Завьялов, И.Ю.Семыкина, Е.А.Дубков, А.С.Велиляев, 2023

электромагнитного взаимодействия в условиях отклонений во взаимном расположении катушек, таких как чрезмерное сближение и удаление, горизонтальное и угловое смещение. Дополнительно в качестве развития системы возможна оптимизация ее параметров, а также внедрение замкнутой системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Weilong Wang, Xiaodong Yang, Jianhong Cao et al.* Energy internet, digital economy, and green economic growth: Evidence from China // Innovation and Green Development. 2022. Vol. 1. Iss. 2. № 100011. DOI: 10.1016/j.igd.2022.100011

2. *Jie Xiong, Shuyan Zhao, Yan Meng et al.* How latecomers catch up to build an energy-saving industry: The case of the Chinese electric vehicle industry 1995-2018 // Energy Policy. 2022. Vol. 161. № 112725. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112725

3. *Zhifeng Que, Shixue Wang, Weiyi Li.* Potential of energy saving and emission reduction of battery electric vehicles with two type of drivetrains in China // Energy Procedia. 2015. Vol. 75. P. 2892-2897. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.584

4. *Hong-Mei Deng, Yun-Peng Zhang, Jing Li et al.* Research on energy saving potential and countermeasures in China's transport sector // Energy Reports. 2022. Vol. 8. S. 6. P. 300-311. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.098

5. *Bibak B., Tekiner-Mogulkoc H.* Influences of vehicle to grid (V2G) on power grid: An analysis by considering associated stochastic parameters explicitly // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2021. Vol. 26. № 100429. DOI: 10.1016/j.segan.2020.100429

6. *Gough R., Dickerson C., Rowley P., Walsh C.* Vehicle-to-grid feasibility: A techno-economic analysis of EV-based energy storage // Applied Energy. 2017. Vol. 192. P. 12-23. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.01.102

7. *Laiqing Xie, Yugong Luo, Donghao Zhang et al.* Intelligent energy-saving control strategy for electric vehicle based on preceding vehicle movement // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 130. P. 484-501. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.05.027

8. *Augello A., Gallo P., Sanseverino E.R. et al.* Certifying battery usage for V2G and second life with a blockchain-based framework // Computer Networks. 2023. Vol. 222. № 109558. DOI: 10.1016/j.comnet.2023.109558

9. *Mastoi M.S., Shenxian Zhuang, Munir H.M. et al.* An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 11504-11529. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.09.011

10. *Mohammed S.A.Q., Jin-Woo Jung.* A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles: Classification/Common Topologies/Future Research Issues // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 19572-19585. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3055027

11. *Cirimele V., Diana M., Freschi F., Mitolo M.* Inductive power transfer for automotive applications: state-of-the-art and future trends // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. № 5. P. 4069-4079. DOI: 10.1109/TIA.2018.2836098

12. *Jian-guo Li, Kai Zhan.* Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment // Engineering. 2018. Vol. 4. Iss. 3. P. 381-391. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.013

13. *Jäderblom N.* From Diesel to Battery Power in Underground Mines. A Pilot Study of Diesel Free LHDs: Master of Science Thesis in Industrial Design Engineering. Luleå: Luleå University of Technology, 2017. 75 p.

14. *Semykina I., Zavyalov V., Dubkov E., Veliliaev A.-H.* On the possibility of wireless battery charging in a gaseous-and-dusty mine // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 303. № 01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202130301032

15. *Борисов С.В., Колтунова Е.А., Кладиев С.Н.* Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 114-121. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12

16. *Songyan Niu, Hang Yu, Shuangxia Niu, Linni Jian*. Power loss analysis and thermal assessment on wireless electric vehicle charging technology: The over-temperature risk of ground assembly needs attention // Applied Energy. 2020. Vol. 275. № 115344. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115344

17. *Lijuan Xiang, Ze Zhu, Jindong Tian, Yong Tian.* Foreign Object Detection in a Wireless Power Transfer System Using Symmetrical Coil Sets // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 44622-44631. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2908866

18. *Ahmad A., Alam M.S., Chabaan R.* A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2018. Vol. 4. № 1. P. 38-63. DOI: 10.1109/TTE.2017.2771619

19. *Abou Houran M., Xu Yang, Wenjie Chen*. Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics // Electronics. 2018. Vol. 7. Iss. 11. № 296. DOI: 10.3390/electronics7110296

20. *Foote A., Onar O.C.* A review of high-power wireless power transfer // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 22-24 June 2017, Chicago, USA. IEEE, 2017. P. 234-240. DOI: 10.1109/ITEC.2017.7993277

21. *Semykina I.Yu., Zavyalov V.M., Krylov V.N.* Research of the Laboratory Prototype for the Battery Charging System Based on Wireless Power Transfer // 21th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 29 June – 3 July 2020, Chemal, Russia. IEEE, 2020. P. 324-330. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153521

22. *Qizhi Liu.* Identifying and correcting the defects of the Saaty analytic hierarchy/network process: A comparative study of the Saaty analytic hierarchy/network process and the Markov chain-based analytic network process // Operations Research Perspectives. 2022. Vol. 9. № 100244. DOI: 10.1016/j.orp.2022.100244

23. *Семыкина И.Ю., Дубков Е.А., Завьялов В.М.* Обоснование критериев оценки технических решений систем беспроводного заряда аккумуляторных батарей для рудничного электротранспорта // Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России», 13-14 апреля 2022 г., Прокопьевск, Россия. Прокопьевск: филиал КузГТУ в г. Прокопьевске, 2022. С. 88-93.

24. *Huynh P.S., Ronanki D., Vincent D., Williamson S.S.* Overview and Comparative Assessment of Single-Phase Power Converter Topologies of Inductive Wireless Charging Systems // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 9. № 2150. DOI: 10.3390/en13092150

25. *Kripalakshmi T., Deepa T.* A Comprehensive Review of High-frequency Transmission Inverters for Magnetic Resonance Inductive Wireless Charging Applications in Electric Vehicles // IETE Journal of Research. 2021. P. 1-11. DOI: 10.1080/03772063.2021.1905089

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

26. *Bing Cheng, Liangzong He, Le Li et al.* Improved wireless power transfer system utilizing a rectifier with nonlinear resistance compression characteristic // Applied Energy. 2023. Vol. 331. № 120365. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120365

27. *Zhong W.X., Hui S.Y.R.* Maximum Energy Efficiency Tracking for Wireless Power Transfer Systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30. № 7. P. 4025-4034. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2351496

28. *Di Capua G., Femia N., Lisi G.* Impact of losses and mismatches on power and efficiency of Wireless Power Transfer Systems with controlled secondary-side rectifier // Integration. 2016. Vol. 55. P. 384-392. DOI: 10.1016/j.vlsi.2016.04.005

29. *Hongchang Li, Jie Li, Kangping Wang et al.* A Maximum Efficiency Point Tracking Control Scheme for Wireless Power Transfer Systems Using Magnetic Resonant Coupling // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30. № 7. P. 3998-4008. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2349534

30. *Shuyu Cao, Htet Ye Yint Naing, Naayagi R.T. et al.* Wireless Charging Resonant Converter Topology Study Based On Analytical Design Computation // 3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies, 5-7 March 2021, Shillong, Meghalaya, India. IEEE, 2021. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICEPE50861.2021.9404462

31. *Mude K.N., Aditya K.* A Comprehensive Review and Analysis of Two-Element Resonant Compensation Topologies for Wireless Inductive Power Transfer Systems // Chinese Journal of Electrical Engineering. 2019. Vol. 5. № 2. P. 14-31. DOI: 10.23919/CJEE.2019.000008

32. *Jayalath S., Khan A.* Design, Challenges, and Trends of Inductive Power Transfer Couplers for Electric Vehicles: A Review // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2021. Vol. 9. № 5. P. 6196-6218. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3042625

33. *Jianwei Mai, Yijie Wang, Yousu Yao, Dianguo Xu.* Analysis and Design of High-Misalignment-Tolerant Compensation Topologies With Constant-Current or Constant-Voltage Output for IPT Systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. Vol. 36. № 3. P. 2685-2695. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3014687

34. *Xiaohui Qu, Hongdou Han, Siu-Chung Wong et al.* Hybrid IPT Topologies With Constant Current or Constant Voltage Output for Battery Charging Applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30. № 11. P. 6329-6337. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2396471

35. *Siqi Li, Weihan Li, Junjun Deng et al.* A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2015. Vol. 64. № 6. P. 2261-2273. DOI: 10.1109/TVT.2014.2347006

36. *Marques E.G., Mendes A.M.S.* Optimization of transmitter magnetic structures for roadway applications // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 26-30 March 2017, Tampa, USA. IEEE, 2017. P. 959-965. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930812

37. *Bandyopadhyay S., Venugopal P., Jianning Dong, Bauer P.* Comparison of Magnetic Couplers for IPT-Based EV Charging Using Multi-Objective Optimization // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68. № 6. P. 5416-5429. DOI: 10.1109/TVT.2019.2909566

38. *Chunbo Zhu, Chaoye Fu, De'an Wang et al.* Thermal Simulation and Optimization Study for Magnetic Coupler of Static Electric Vehicle Wireless Power Transfer Systems // 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 11-14 August 2019, Harbin, China. IEEE, 2019. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8921715

39. *Chunming Wen, Qing Xu, Minbo Chen et al.* Thermal Analysis of Coupled Resonant Coils for an Electric Vehicle Wireless Charging System // World Electric Vehicle Journal. 2022. Vol. 13. Iss. 8. № 133. DOI: 10.3390/wevj13080133

***Авторы*: В.М.Завьялов,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0001-8485-9864* (*Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*), **И.Ю.Семыкина,** *д-р техн. наук, старший научный сотрудник, arinasemykina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6874-1735* (*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*), **Е.А.Дубков,** *старший преподаватель, https://orcid.org/0000-0003-0065-8681* (*Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*), **А.С.Велиляев,** *ассистент, https://orcid.org/0000-0002-3944-4042* (*Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0