

УДК 621.31

Численное компьютерное моделирование системы активного экранирования при зарядке электромобиля по бесконтактной технологии

Куркова О. П.

Постановка проблемы: технология бесконтактной зарядки электротранспорта является одной из самых перспективных на сегодняшний день. Однако ее внедрение связано с целым рядом проблем, одной из которых является утечка электромагнитного поля (ЭМП). Утечка ЭМП снижает КПД бесконтактных зарядных устройств (БЗУ). Электромагнитные излучения, возникающие вокруг зарядной станции, могут создавать угрозу безопасности людей, влиять на работоспособность электронных устройств электромобиля, оказывать отрицательное воздействие на экологию. Проблема электромагнитной безопасности является важным моментом при проектировании БЗУ, которая может быть решена путем использования пассивного или активного экранирования. **Целью исследований** являлось формирование основополагающих научно-теоретических положений для создания активной динамической защиты от электромагнитного излучения на базе четырех резистивно-емкостных контуров, обладающей высокой экранирующей способностью в реальных условиях эксплуатации БЗУ, в то же время, оказывающей минимальное негативное влияние на эффективность передачи мощности. В качестве факторов, отображающих реальные условия эксплуатации БЗУ, были выбраны параметры возможной несоосности обмоток индуктивности «транслятора» и «приемника», а также возможного изменения величины воздушного зазора между ними. Для достижения поставленной цели был решен целый ряд частных задач по исследованию: взаимосвязи параметров режимов функционирования БЗУ и экранирующей системы; характера изменений взаимной индуктивности между обмоткой «транслятора» и контурами защитного экрана; влияния на утечку магнитного поля режимов функционирования экранирующей системы, расположения обмотки «приемника» и других аспектов. **Используемые методы и технологии:** для решения поставленных задач использовались методы построения 3D моделей и моделей в виде эквивалентных электрических схем, методы компьютерного моделирования и схемотехнического анализа с использованием программных комплексов ANSYS Maxwell, в том числе специального приложения для проектирования БЗУ, и ANSYS Simplorer. ANSYS Maxwell использовался как инструмент 3D-моделирования и анализа электромагнитных полей. ANSYS Simplorer - как дополнение к ANSYS Maxwell для оптимизации электрических параметров и прогнозирования эффективности БЗУ. **Новизна результата:** научно-теоретическое обоснование качественного и количественного подтверждения высокой экранирующей способности исследуемой экранирующей системы, физико-математическое описание функционирования системы и обоснование оптимальных условий и режимов ее функционирования. Принципиально новым научным результатом в области изучения технологии бесконтактной зарядки являются выявленные взаимосвязи и закономерности взаимодействия обмоток индуктивности БЗУ и резистивно-емкостных контуров защитного экрана, а также обоснование возможности их использования в качестве индикатора несоосности «транслятора» и «приемника» и воздушного зазора между ними. **Практическая значимость:** результаты могут быть использованы при создании си-

Библиографическая ссылка на статью:

Куркова О. П. Численное компьютерное моделирование системы активного экранирования при зарядке электромобиля по бесконтактной технологии // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 33-63. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-33-63

Reference for citation:

Kurkova O. P. Numerical computer simulation of the active shielding system when charging an electric vehicle using contactless technology. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 1, pp. 33-63 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-33-63

стемы экранирования, прогнозирования эффективности и безопасности БЗУ, а также при создании систем управления и телеметрии БЗУ для зарядки электромобилей.

Ключевые слова: электромобиль, бесконтактное магнитно-резонансное зарядное устройство, транслятор, приемник, напряженность магнитного поля, утечка магнитного поля, электромагнитное излучение, экранирующий эффект, взаимная индуктивность, эффективность передачи мощности, моделирование, эквивалентная модель.

Введение

Электроприводные транспортные средства (ТС), в том числе автономные электромобили, являются альтернативой традиционным транспортным средствам, работающим на дорогостоящих углеводородных топливах, и приобретают все большую популярность во всем мире. Бесконтактная магнитно-резонансная зарядка - одна из перспективных технологий зарядки электро-транспорта, обладающая целым рядом преимуществ по сравнению с широко используемой в настоящее время технологией «plug-in» [1]. Однако ее внедрение связано с целым рядом проблем, одной из которых является утечка электромагнитного поля (ЭМП) в процессе передачи мощности. Утечка ЭМП снижает эффективность процесса зарядки. Одновременно электромагнитные излучения, возникающие вокруг зарядной станции, могут создавать угрозу безопасности человеку и другим живым организмам, влиять на работоспособность других электрических и электронных устройств электромобиля, оказывать отрицательное воздействие на экологию окружающей среды. Результаты подробных исследований возможного влияния бесконтактных зарядных станций (БЗС) электромобилей на человека, находящегося в зоне зарядной площадки, были проведены и опубликованы в Международном журнале экологических исследований и общественного здравоохранения еще в 2017 году специалистами Школы электротехники Юго-Восточного Университета (Китайская Народная Республика) [2]. На основании результатов этих исследований и исследований других авторов определено, что создаваемые БЗС должны соответствовать требованиям, установленным нормами Международной комиссией по защите от неионизирующего излучения (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ICNIRP RL 2010: напряженность электрического поля не должна превышать значения $8,3 \cdot 10^{-2}$ кВ/м; значение напряженности магнитного поля не должно быть более 21,0 А/м; плотность магнитного потока – не более $2,7 \cdot 10^{-5}$ Тл [3]. Требования по безопасности БЗС внесены в соответствующую нормативную документацию Международной организации по стандартизации (International Organization for Standardization – ISO) [4]. В обеспечение этих требований установлены допустимые значения диапазонов рабочих частот бесконтактных зарядных устройств (БЗУ) - от 81.38 кГц до 90 кГц. При создании БЗУ разработчиками создаются различные варианты конструктивных решений по экранированию обмоток индуктивности «транслятора» и «приемника» БЗУ. Указанные выше требования должны учитываться также при выдаче рекомендаций по допустимым значениям воздушных зазоров и несоосности между «транслятором» и «приемником» БЗУ, а на протяжении всей сессии зарядки электромобиля должен осуществляться непрерывный контроль состоя-

ния защищенности от электромагнитных полей водителя, пассажиров, бортовой электронной аппаратуры ТС, живых организмов, находящихся в прилегающей к БЗУ области, посредством специальных датчиков в составе подсистемы телеметрии БЗС, что предусматривается в алгоритме управления процессом зарядки [1].

Проблема экранирования обмоток индуктивности «трансляторов» и «приемников» БЗУ разработчиками решается путем создания специальных систем пассивных или активных экранов. За последние годы в различных странах проводились исследования технологий электромагнитного экранирования для уменьшения утечки ЭМП БЗУ. В настоящее время существует три основных способа экранирования: пассивное экранирование, резонансная петля реактивного тока и активное экранирование [5 – 8]. В качестве пассивных экранов используются, как правило, экраны из металлических материалов. Экраны реализуют возможность для создания электродвижущей силы (ЭДС) в направлении, противоположном направлению, создаваемому обмотками магнитной связи в виде вихревых токов, что способствует подавлению электромагнитного излучения. Однако одновременно это приводит и к снижению коэффициента связи между обмотками индуктивности «транслятора» и «приемника» и, как следствие, к увеличению потерь в процессе передачи мощности. Способ экранирования «резонансная петля реактивного тока» основан на том, что при размещении экранирующей катушки с замкнутым контуром с соответствующей емкостью вокруг передающих обмоток индуктивности «транслятора» и «приемника», соответственно, создается компенсирующая ЭДС, противоположная падающему полю, что значительно уменьшает утечку ЭДС в системе. Принцип технологии активного экранирования заключается в устранении утечки ЭМП за счет создания компенсирующего ЭДС с направлением вектора, противоположного падающему ЭДС. В этой технологии активный экранирующий контур, должен располагаться на периферии передающей системы БЗУ и снабжен независимым источником питания, что является принципиальным отличием. При этом эффективность экранирования достигается за счет регулировки источника питания экранирующего контура. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. В таблице 1 кратко представлены основные особенности различных способов экранирования.

Из таблицы 1 видны очевидные преимущества способа активного экранирования перед двумя другими упомянутыми выше способами. Особенную ценность преимущества способа активного экранирования приобретают при создании БЗУ высокой мощности – от 11 кВт и более, что становится все более актуальным в последнее время с целью расширения возможностей применения БЗС не только для зарядки электрокаров, но и других видов транспортных средств, например: электробусов, грузового транспорта и других более энергоемких ТС. Однако, для практической реализации данного способа экранирования необходимо осуществить весьма сложный многопараметрический расчет конструктивных и рабочих параметров экранирующей системы, что вызвано взаимосвязями не только этих параметров между собой, но и с магнитными и электрическими параметрами функционирования самого БЗУ. Решение этой проблемы

может значительно облегчить использование методов компьютерного инженерного моделирования и схемотехнического анализа с использованием современных специальных программных продуктов. Построение моделей и моделирование позволит не только более точно рассчитать конструкцию и рекомендуемые рабочие режимы экранирующей системы, но и спрогнозировать уровень безопасности БЗУ на основе выявления параметрических взаимосвязей и набора данных о динамике изменений топологии формирования и уровней напряженности магнитного поля, его рассеивании и утечках. В связи с этим любые исследования в этой области являются весьма актуальными.

Таблица 1 – Особенности технологий экранирования БЗУ

Технология экранирования	Преимущества	Недостатки
Пассивное экранирование	- простота конструкции, - простота управления	- большой дополнительный занимаемый объем и масса, - невысокая эффективность экранирования, - существенное снижение КПД БЗУ
Резонансный контур реактивного тока	- небольшой дополнительный занимаемый объем, - простая конструкция, - незначительное влияние на КПД БЗУ	- невысокая эффективность экранирования
Активное экранирование	- высокая эффективность экранирования, - небольшой дополнительный занимаемый объем, - незначительное влияние на КПД БЗУ	- сложность расчета конструктивных и рабочих параметров экранирующей катушки

Анализ состояния вопроса

Как уже говорилось выше, вопрос экранирования БЗУ является одним из ключевых вопросов при их создании.

Первые предположения о возможности использования технологии активного экранирования при создании БЗУ для электромобилей были высказаны специалистами Korea Advanced Institute of Science and Technology – KAIST (Тэджон, Республика Корея) и Hyundai Motor Company (Соннам, Республика Корея) еще в 2013 году [8]. Однако ввиду отсутствия представления каких-либо результатов теоретической и экспериментальной доскональной научной проработки данная технология до настоящего времени не нашла своего широкого практического применения при создании коммерческих бесконтактных зарядных станций для электротранспорта. В рекомендациях SAE J 2954 «Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology. Recommended Practice (RP)» («Беспроводная передача энергии для легко

подключаемых устройств/электромобилей и методика выравнивания. Рекомендация практика»), выпущенных Society of Automotive Engineers (SAE) – международной Ассоциацией Автомобильных Инженеров, в мае 2016 года и актуализированных в августе 2022 года (5 редакция), для конструкции БЗУ предусматривается использование только систем пассивного экранирования [9]. Учитывая преимущества технологии активного экранирования, исследования, ставящие своей целью изучение отдельных аспектов данной проблемы, продолжаются специалистами, занимающимися созданием БЗУ различного назначения, по сей день. Результаты этих исследований периодически появляются в научных докладах на международных конференциях, публикуемых, как правило, издательством всемирно известного Института инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE). Если на начальном этапе создания БЗУ вопрос экранирования рассматривался исследователями в основном с точки зрения достижения максимальной эффективности беспроводной передачи энергии, то в последние годы изучение данного вопроса своей целью ставят обеспечение безопасности БЗУ. Однако наибольшее количество результатов, представленных в публикациях, носит характер описания разработчиками непосредственно конкретных конструктивных решений для создания защитных экранов, в том числе принцип действия которых основан на технологии активного экранирования. При этом мало кто из авторов уделяет внимание теоретическому обоснованию своих решений, позволяющему эти решения оптимизировать, унифицировать и масштабировать с целью расширения возможностей применения, то есть тому, что могут обеспечить приемы компьютерного инженерного моделирования. Поэтому наибольший научный и практический интерес представляют результаты исследований, полученные именно в этом направлении.

В связи с этим, прежде всего хотелось бы отметить результаты исследований, проводимых в Graduate School of Green Transportation Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) совместно с Hanyang University (Сеул, Республика Корея) под научным руководством профессора Сынен Ан. Например, профессором Сынен Ан и специалистами его научной группы в 2020 году при создании конструкции экранирующей системы и метода независимого управления системой активного экранирования БЗУ мощностью 0,3 кВт для малого беспилотного летательного аппарата (БПЛА) вертикальных взлета/посадки были разработаны: векторная геометрическая модель рассеивания магнитного поля и ее физико-алгебраическое описание, а также модель эквивалентной электрической схемы, на основе которых было осуществлено моделирование (в том числе с использованием компьютерного программного обеспечения ANSYS Maxwell simulation) изменения магнитного поля в зависимости от радиуса экранирующего контура и его положения по вертикали относительно передающих обмоток индуктивности БЗУ с оптимизацией тока экранирования [10]. Одновременно с эффективностью экранирования отслеживалась эффективность передачи энергии. С учетом целевой задачи (БЗУ малой мощности для БПЛА) построение моделей и исследования проводились авторами для конструкции БЗУ, имеющего одинаковые обмотки индуктивности «транслято-

ра» и «приемника» кольцевого типа с наружным диаметром 95 мм и внутренним 35 мм (индуктивность 53,5 мкГн). Расстояние между обмотками «транслятора» и «приемника» составляло от 10 мм до 30 мм. Для экранирования использовался одноконтурная система. При этом рассматривались три варианта типоразмера экранирующих контуров: контур диаметром 150 мм, диаметром 200 мм и диаметром 250 мм. Экранирующий контур располагался над обмоткой индуктивности «приемника». Передающая и приемная обмотки индуктивности и экранирующий контур располагались коаксиально. При этом в процессе исследований применялся стационарный режим экранирования. Структура БЗУ в целом строилась на основе последовательно-последовательной компенсационной топологии. На рис. 1 показана модель исследуемой авторами БЗУ с одноконтурной системой экранирования в виде эквивалентной электрической схемы.

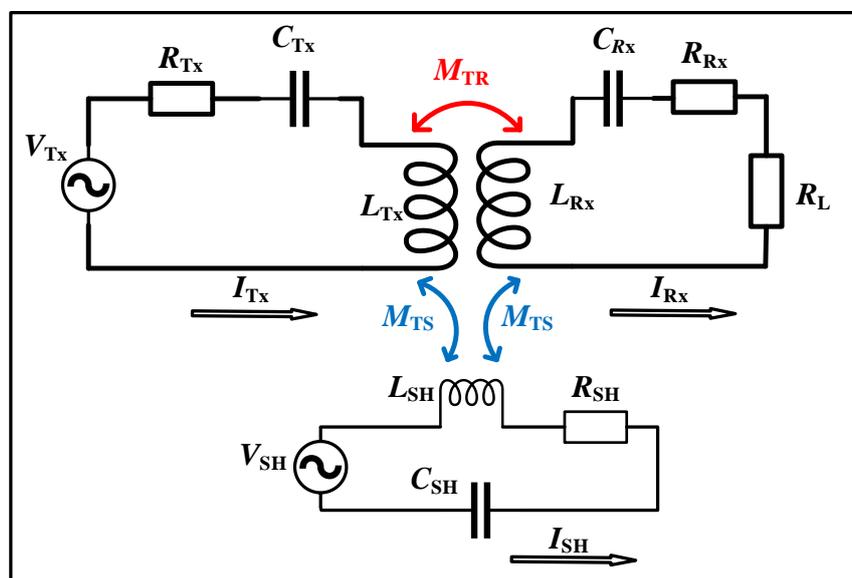


Рис. 1. Модель БЗУ в виде эквивалентной электрической схемы с одноконтурной активной экранирующей системой [10]

Результаты моделирования, представленные авторами, показали, что предложенная система активного экранирования обеспечивает уменьшение среднего магнитного поля рассеяния на 68,85 %, тогда, как известно, пассивные экраны обеспечивают уменьшение магнитного поля рассеивания, как правило, только на 50 – 55 %. Снижение эффективности передачи мощности при этом, как утверждают авторы, составило 1,92 %. Однако, данные результаты, полученные применительно к БЗУ для БПЛА, существенно отличающимся по конструкции и имеющими более низкие технические характеристики относительно требуемых для зарядки электромобилей, не могут быть непосредственно использованы при создании БЗУ для электромобилей, но могут служить основой для дальнейших исследований.

В это же время доктором Silvano Cruciani с коллегами по факультету электротехники и автоматизации Sapienza – Università di Roma (Рим, Италия)

была предложена идея создания системы активного экранирования БЗУ электромобиля мощностью 7,7 кВт, конструктивно соответствующего рекомендациями SAE J 2954 для данного класса, но включающего 4 экранирующих контура, охватывающих по периметру передающие обмотки индуктивности устройства: два полуконтур со стороны «транслятора» и два со стороны «приемника», располагаемые в области площадей, соответствующих размеру корпуса электромобиля [11]. В составе конструкции «транслятора» БЗУ предусматривалась плоская обмотка индуктивности прямоугольной формы с размерами по внешнему периметру 650 мм на 500 мм, формируемая из 8 витков. В составе конструкции «приемника» БЗУ предусматривалась квадратная обмотка индуктивности с размерами по внешнему периметру 380 мм на 380 мм, формируемая из 10 витков. Расстояние между «транслятором» и «приемником» принималось равным 250 мм. Рабочая частота БЗУ – 85 кГц. Габаритные размеры экранирующих контуров по внешнему периметру составляли 1400 мм на 600 мм. Режим экранирования – стационарный. Авторами была представлена эквивалентная схема системы и алгоритм оптимизации расчета параметров экранирующих контуров. На рис. 2 показаны структура и модель в виде эквивалентной электрической схемы исследуемого авторами БЗУ. Моделирование авторами производилось с использованием программного комплекса COMSOL, основанного на решении методом конечных элементов уравнений магнитно-квазистатического поля. Расчеты проводились поэтапно. На первом этапе моделировалось распределение магнитного поля без учета экранирующих контуров. На втором этапе поочередно попарно исследовались два экранирующих контура «транслятора» и два контура «приемника» БЗУ. На третьем этапе совместно исследовалось распределение магнитного поля с учетом всех четырех экранирующих контуров. При построении конечно-элементной модели сетка состояла из 258547 тетраэдрических элементов 2-го порядка, а степени свободы уравнений составляли 1906778. Используемая методика исследований позволила авторам получить автономные данные об изменениях распределения магнитного поля по точкам, относительно направлений каждой из трех осей декартовой системы координат. Для реализации процедуры оптимизации для каждой точки использовался алгоритм градиентного спуска, реализуемый с использованием программного комплекса MATLAB. Большой объем вычислительных операций привел к необходимости принятия авторами в процессе исследований целого ряда допущений. Полученные результаты носили характер качественной оценки процессов экранирования и передачи мощности. При этом, в процессе проведения исследований авторы акцентировали свое основное внимание на вопросах достижения минимизации потерь эффективности передачи мощности. Результаты исследований показали, что оптимизация токов экранирующих контуров позволяет добиться минимизации потерь эффективности системы в части передачи мощности. При наличии четырех экранирующих контуров исследователи смогли представить один из вариантов параметрических соотношений, обеспечивший снижение коэффициента полезного действия (КПД) моделируемого БЗУ с 91,2 % до 90,6 %, то есть менее 1 %. Однако данные, приведенные авторами, о соотношениях значений магнитной индукции (B), определенных в горизон-

тальной плоскости в зоне «транслятора» на расстоянии от центра обмотки индуктивности в диапазоне от нуля до 100 см, показывают, что создаваемый системой экранирующий эффект составляет от 55 % до 67 %.

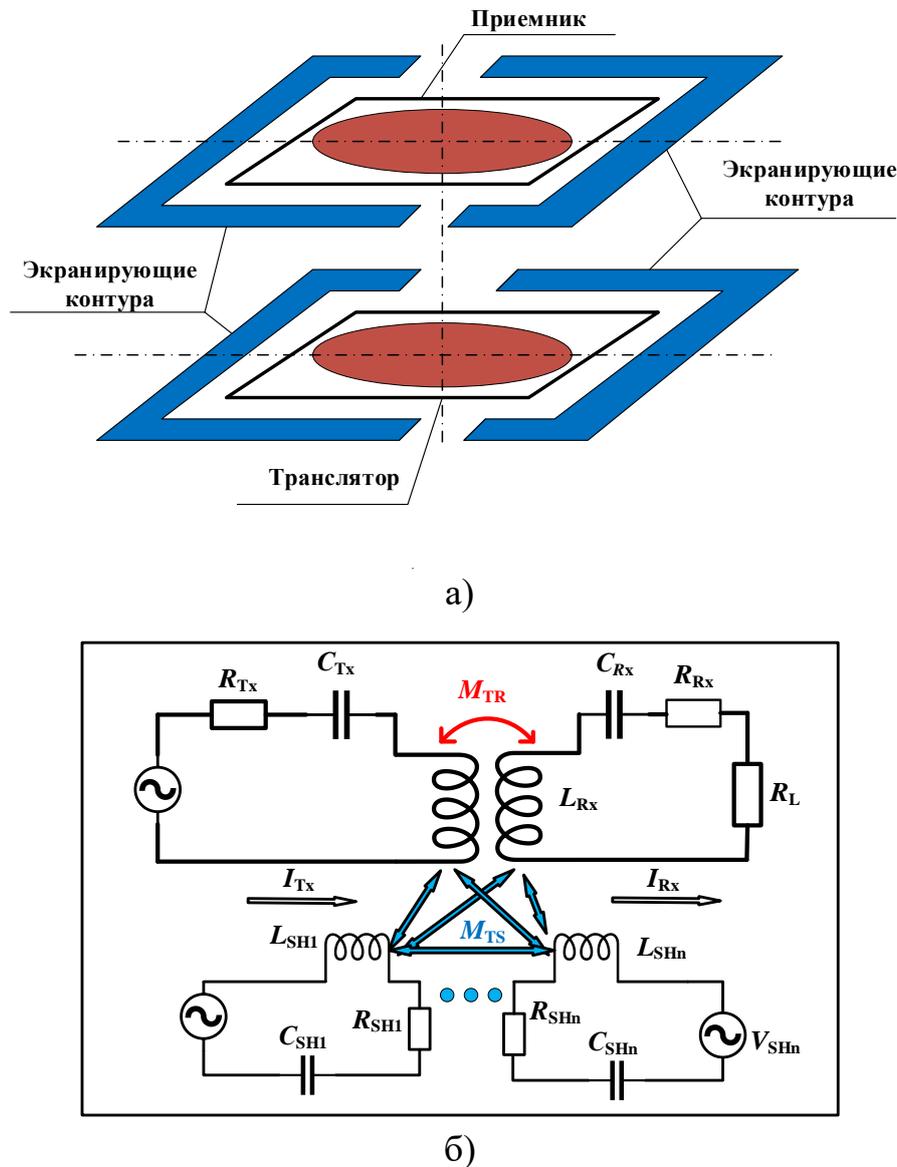


Рис. 2. Конструктивная схема и модель в виде эквивалентной электрической схемы БЗУ с активной системой экранирования с четырьмя полуконтурами [11]

В дальнейшем в 2021 году исследователями из School of Electrical and Information Engineering Tianjin University (Тяньцзинь, Китайская Народная Республика) Юань Ли, Шумэй Чжан и Цзэ Чэн в развитие данного научного направления была предложена усовершенствованная технология активного экранирования [12] по сравнению к технологии, которая представлялась в работе [10]. Усовершенствование заключалось в том, что с целью повышения экранирующего эффекта и сведения к минимуму ухудшение характеристик передачи энергии было предложено использовать активный экран, состоящий из двух полуконтуров (каждая полупетля эквивалентна половине окружности). Авторы показали, что ЭДС, генерируемая двумя экранирующими полуконтурами, со-

гласуется с направлением ЭДС передающих обмоток индуктивности БЗУ. В этом случае два полуконтра создают двойной эффект экранирования. Одновременно, уменьшая утечку, такая система обеспечивает повышение эффективности передачи мощности по сравнению с одноконтурной системой. Кроме этого, исследователи учли, что электромобили различных марок могут иметь различный клиренс, то есть расстояние между обмотками индуктивности «транслятора» и «приемника» может изменяться. В связи с этим авторами был предложен динамический режим экранирования, обеспечиваемый за счет управления источником питания активных экранирующих контуров с целью поддержания утечки на стабильном уровне. Исследователями разработан и представлен алгоритм управления динамическим режимом в зависимости от расстояния между «транслятором» и «приемником». В процессе исследований авторами были разработаны векторная геометрическая модель и ее описание (по аналогии с методикой построения модели, представленной в работе [10]), а также модель эквивалентной электрической схемы БЗУ с учетом двух экранирующих полуконтуров, на основе которых был выполнен модельный анализ системы. Моделирование проводилось с использованием программных продуктов ANSYS Maxwell (3D) и ANSYS Simplorer. При построении моделей предполагалось, что БЗУ имеет одинаковые обмотки индуктивности кольцевого типа с наружным диаметром 200 мм и количеством витков равным 10 (индуктивность 28,3 мкГн). Расстояние между обмотками «транслятора» и «приемника» динамически варьировалось от 10 мм до 200 мм с шагом 10 мм. Наружный диаметр экранирующих контуров составлял 230 мм. Передающая и приемная обмотки индуктивности и экранирующие полуконтра располагались коаксиально. Структура БЗУ строилась на основе последовательно-последовательной компенсационной топологии. Рабочая частота исследуемого БЗУ – 85 кГц. На рис. 3 показана модель исследуемой авторами БЗУ в виде эквивалентной электрической схемы. Результаты модельного анализа, представленные авторами, показали, что предложенная схема динамического экранирования с двумя полуконтра способна экранировать примерно 70 % утечки электромагнитного поля, вызывая снижение эффективности передачи не более 3,1 %. Кроме этого, было установлено, что с увеличением расстояния между «транслятором» и «приемником» эффективность экранирования становится более заметной и при расстоянии 150 мм может составлять 77,4 %, тогда как при расстоянии 50 мм – 69,4 %. При этом авторами продемонстрирована возможность при использовании активного динамического экранирования с двумя полуконтра стабильно удерживать плотности магнитного потока в допустимом в соответствии с ICNIRP RL 2010 безопасном пределе – не более $2,7 \cdot 10^{-5}$ Т.

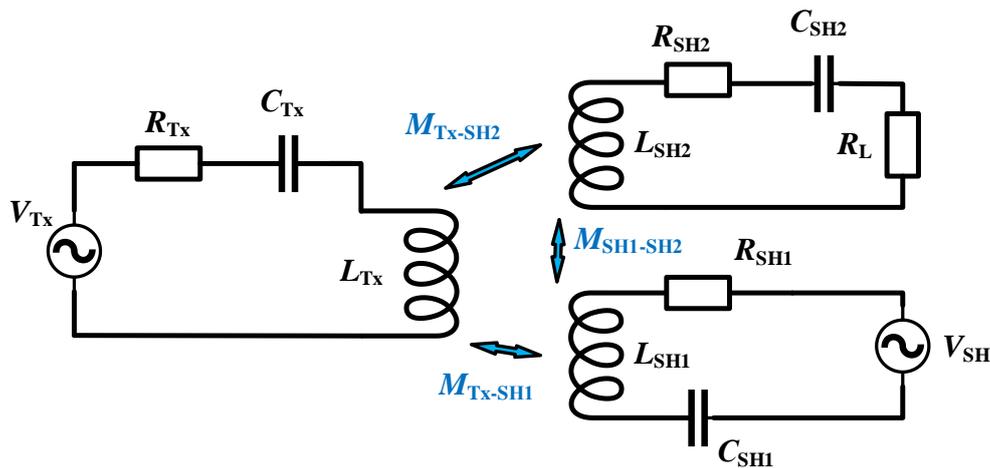


Рис. 3. Модель БЗУ с системой экранирования с двумя полуконтурными в виде эквивалентной электрической схемы [12]

Хотя результаты исследований, представленные авторами в работах [11] и [12], и показали возможность достижения экранирующего эффекта, практическое применение предложенных конструкций приводит к значительному увеличению занимаемого устройствами объема за счет размещения экранирующих контуров, по своим габаритам превосходящим габариты «транслятора» и «приемника». Сложность системы управления БЗУ при динамическом режиме также значительно возрастает, прежде всего, за счет необходимости ввода дополнительного инверторного управления. Все это в конечном счете приводит к значительному увеличению стоимости БЗУ в целом. При этом конструкция и технические характеристики БЗУ, результаты модельного анализа которого представлены авторами в работе [12], согласуются с рекомендациями SAE J 2954 только для устройств малой мощности (не более 3 кВт), применяемых в качестве зарядных устройств электромобилей личного (домашнего) использования. Задача экранирования таких БЗУ, как показывает опыт, вполне возможно и целесообразно решать на основе технологии пассивного экранирования, не требующей существенных дополнительных затрат как при их проектировании, так и при их эксплуатации. При всей безусловной научной ценности представленных исследователями из School of Electrical and Information Engineering Tianjin University результатов, они не могут быть непосредственно использованы при создании БЗУ большой мощности от 11 кВт и более.

Кроме этого, как показал проведенный анализ состояния вопроса, ряд аспектов, влияющих на формирование магнитного поля и уровень утечек, например, возможное смещение «транслятора» и «приемника» при парковке ТС на зарядной площадке, еще остаются за границей проведенных ранее исследований, результаты которых в настоящее время представлены в материалах научных публикаций и докладов, и требуют дополнительного изучения. Например, только в 2022 году профессором Сынен Ан (KAIST) и специалистами его научной группы в дополнение к ранее представленным [10], были опубликованы результаты первых лабораторных исследований по возможности управления активным экранированием в условиях несоосности «транслятора» и «приемника»

[13]. Исследователями показано, что смещение «транслятора» и «приемника» относительно друг друга, уменьшая коэффициент сцепления обмоток индуктивности и снижая эффективность передачи мощности, что было давно известно специалистам в этой области, одновременно увеличивает утечку, то есть понижает эффективность системы экранирования. На основе этого, авторами выдвинуто предположение, что данным процессом можно управлять путем управления силой тока и фазой экранирующей системы в соответствии с характеристиками утечки магнитного поля. Данный способ управления был проверен авторами с помощью моделирования и лабораторных экспериментов при аналогичных исходных данных, при которых ранее проводились ими исследования в 2020 году. В результате проведенных исследований авторам удалось показать, что в условиях несоосности управляя системой экранирования можно повысить ее эффективность с 49,22% до 61,74%. Однако этих первичных лабораторных результатов недостаточно для разработки рекомендаций по проектированию и создания полноценной активной системы экранирования высокой мощности БЗУ для электротранспортных средств. Кроме этого, предложенный авторами способ управления системой экранирования требует дополнительного интегрирования ее с системой точных измерений параметров магнитного поля рассеивания непосредственно в процессе сессии зарядки. Таким образом, отсутствие научных результатов всесторонних исследований технологии и конструкций устройств активного экранирования тормозит создание и внедрение систем активного экранирования в конструкции БЗС для автономного электротранспорта: электромобилей, электробусов, грузовых электроприводных транспортных средств и т.д.

Цель исследования и постановка задач

Целью исследований, результаты которых частично представлены в настоящей статье, являлось формирование основополагающих научно-теоретических положений для создания активной динамической системы защиты от ЭМИ, обладающей высокой экранирующей способностью в реальных условиях эксплуатации коммерческих общественных БЗС для электромобилей, в то же время, оказывающей минимальное негативное влияние на эффективность передачи мощности.

В качестве факторов, отображающих реальные условия эксплуатации БЗС в соответствии с алгоритмом управления сессией зарядки, представленным ранее в публикации [1], были выбраны параметры возможной несоосности обмоток индуктивности «транслятора» и «приемника» в виду неточности парковки ТС на зарядной площадке, а также параметры возможного изменения величины воздушного зазора между ними относительно номинального проектного значения в виду высокой вероятности различий клиренса ТС, подлежащих зарядке. Как следствие этого, система защиты должна обеспечивать выполнение своих функций в динамическом режиме функционирования.

Конструкция системы защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ) должна быть компактной, не увеличивать значительно площади и объемы, за-

нимаемые БЗУ на зарядной площадке, обеспечить отсутствие необходимости увеличения массы и габаритов устройств «приемника» на борту ТС.

Поставленная цель, по мнению автора, могла быть достигнута путем создания активной экранирующей системы на базе четырех симметричных резистивно-емкостных контуров, коаксиально расположенных относительно обмотки индуктивности «транслятора».

Так как ранее задачи совместимости «транслятора» и «приемника» БЗУ рассматривались и решались автором только с точки зрения максимизации эффективности передачи мощности и практически почти не учитывали влияние на этот процесс экранирующей системы [1], [14–16], для достижения вновь поставленной цели необходимо было решить следующие частные задачи:

- подтвердить высокую экранирующую способность предложенной активной экранирующей системы, определив численные значения экранирующего эффекта и характер его изменений по мере удаленности от обмотки индуктивности «транслятора»;
- исследовать и описать взаимосвязь параметров режимов функционирования БЗУ и параметров режимов функционирования экранирующей системы;
- определить и обосновать оптимальные условия и параметры режимов функционирования экранирующей системы, обеспечивающие минимизацию магнитного поля утечки и максимизацию КПД БЗУ;
- исследовать влияние параметров режимов функционирования экранирующей системы (тока защитного экрана) на формирование и рассеивание магнитного поля между «транслятором» и «приемником» БЗУ;
- исследовать процесс возникновения и характер изменений взаимной индуктивности между обмоткой «транслятора» и контурами защитного экрана в процессе сессии зарядки;
- исследовать и выявить закономерности влияния изменений расположения обмотки «приемника» относительно обмотки «транслятора» и контуров защитного экрана.

Методы исследований

В качестве базового объекта для проведения исследований было принято рассматривать БЗУ с конструктивными и рабочими параметрами класса «WPT3/Z2».

Для решения поставленных задач использовались методы построения 3D моделей и моделей в виде эквивалентных электрических схем, компьютерного моделирования и схемотехнического анализа с использованием программных комплексов ANSYS Maxwell 3D simulation и ANSYS Simplorer [17, 18].

Программный комплекс ANSYS Maxwell использовался для 3D-моделирования методом конечных элементов (МЭК) процессов формирования, определения параметров и анализа электромагнитных полей. Комплекс ANSYS Maxwell был выбран в качестве инструмента при проведении исследований, так как на сегодня он имеет в своем составе новое специальное приложение для проектирования беспроводных зарядных устройств, позволяющее прогноиро-

вать связи индуктивности, изменения параметры обмоток и устанавливая требуемые диапазоны смещений, а также имитировать рассеяние магнитных полей за пределы основной зоны действия устройства, прогнозировать влияние экранов. Кроме этого, при необходимости, данное приложение позволяет путем моделирования прогнозировать температурные состояния обмоток «транслятора» и «приемника», а также анализировать и оптимизировать схемы топологий силовой электроники БЗУ. Использование данного приложения позволяет исследователям и инженерам значительно оперативнее решать поставленные задачи, достигая более высоких результатов, одновременно снижая себестоимость работ и создаваемой продукции.

Программный комплекс ANSYS Simplorer, предназначенный для проектирования сложных силовых электронных и электрических управляемых систем, имеющий в своем составе обширную компонентную библиотеку, в процессе исследований использовался как дополнение к ANSYS Maxwell для моделирования и оптимизации электрических параметров и прогнозирования эффективности работы топологических схем БЗУ. Этот комплекс был выбран как инструмент при проведении исследований, так как изначально предусмотренная создателями взаимосвязь ANSYS Simplorer и ANSYS Maxwell позволяет осуществлять моделирование сложных систем, в том числе БЗУ, практически по мультимедийной технологии.

Результаты исследований

Руководствуясь закономерностями, выявленными авторами предшествующих исследований, в процессе проведенных исследований, результаты которых представлены в настоящей публикации, была предложена и проанализирована компактная многоконтурная конструкция активной экранирующей системы, схематично показанная на рис. 4. Экранирующая система представляла собой четыре расположенные симметрично относительно обмотки индуктивности транслятора (T_x) экранирующих резистивно-емкостных контура (SS1; SS2; SS3; SS4) из нержавеющей стали.

Процесс функционирования данной экранирующей системы анализировался на основе разработки моделей в виде эквивалентных электрических схем. На рис. 5 показана модель экранирующей системы (без приемника) в виде эквивалентной электрической схемы.

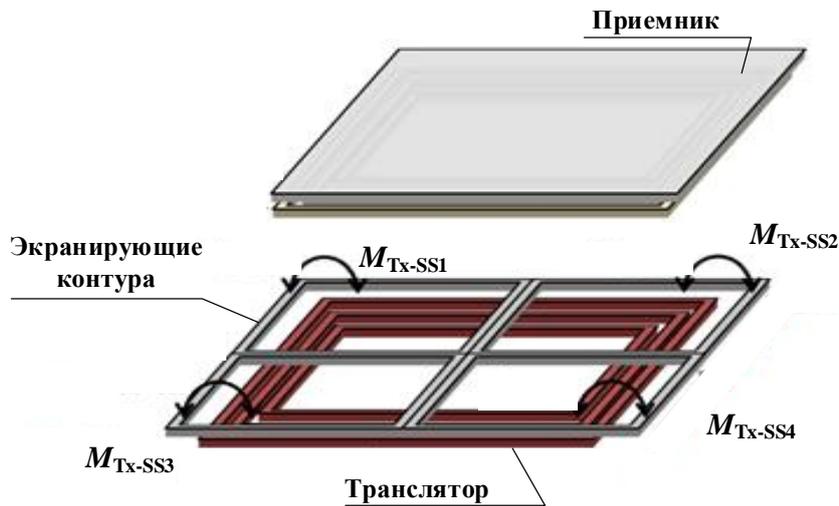


Рис. 4. Конструктивная схема экранирующей системы

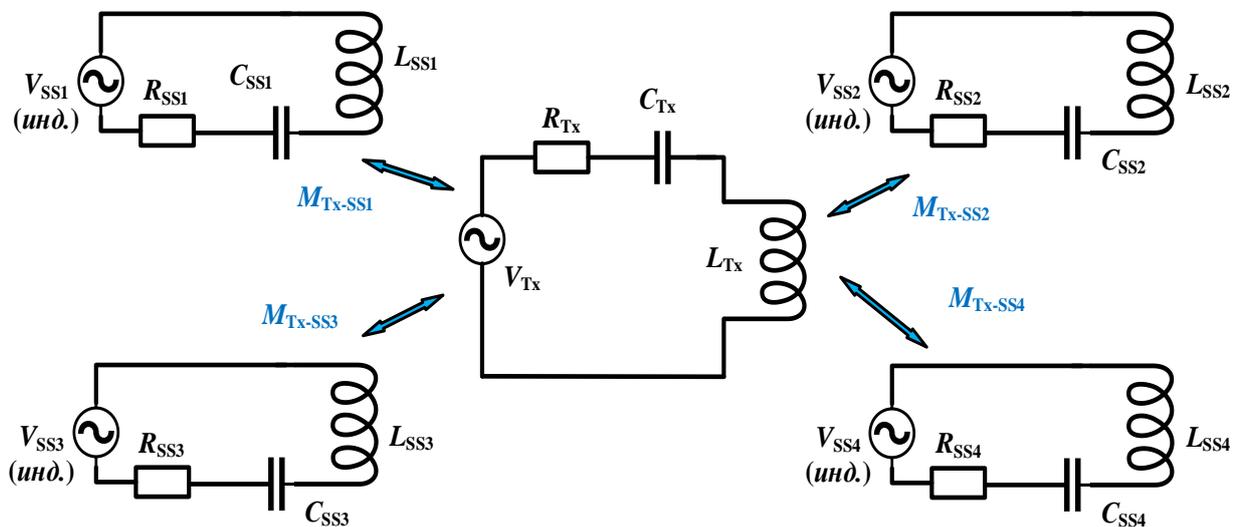


Рис. 5. Модель экранирующей системы в виде эквивалентной электрической схемы (без приемника)

На этапе, когда зарядка электромобиля еще не началась, между обмоткой T_x и каждым контуром SS возникает взаимная индуктивность, которая может быть представлена как:

$$M_{T_x-SS} = k \sqrt{L_{T_x} L_{SS}}, \quad (1)$$

где L_{T_x} и L_{SS} – собственные индуктивности обмотки T_x и контура SS, k – коэффициент пропорциональности.

При этом ввиду симметричности контуров должно выполняться условие:

$$M_{T_x-SS_1} = M_{T_x-SS_2} = M_{T_x-SS_3} = M_{T_x-SS_4} \quad (2)$$

Когда электромобиль встает на зарядку, возникают новые взаимные индуктивности между обмоткой T_x и обмоткой «приемника» (R_x), а также между экраном (SS) и «приемником» (R_x). При этом взаимная индуктивность между T_x и SS также будет изменяться относительно первоначального значения.

Применяя закон Кирхгофа для расчета цепей при наличии взаимной индуктивности, можно найти изменение взаимной индуктивности между T_x и SS , вызванное подключением «приемника». На рис. 6 показана модель, демонстрирующая этот процесс, в виде эквивалентной схемы.

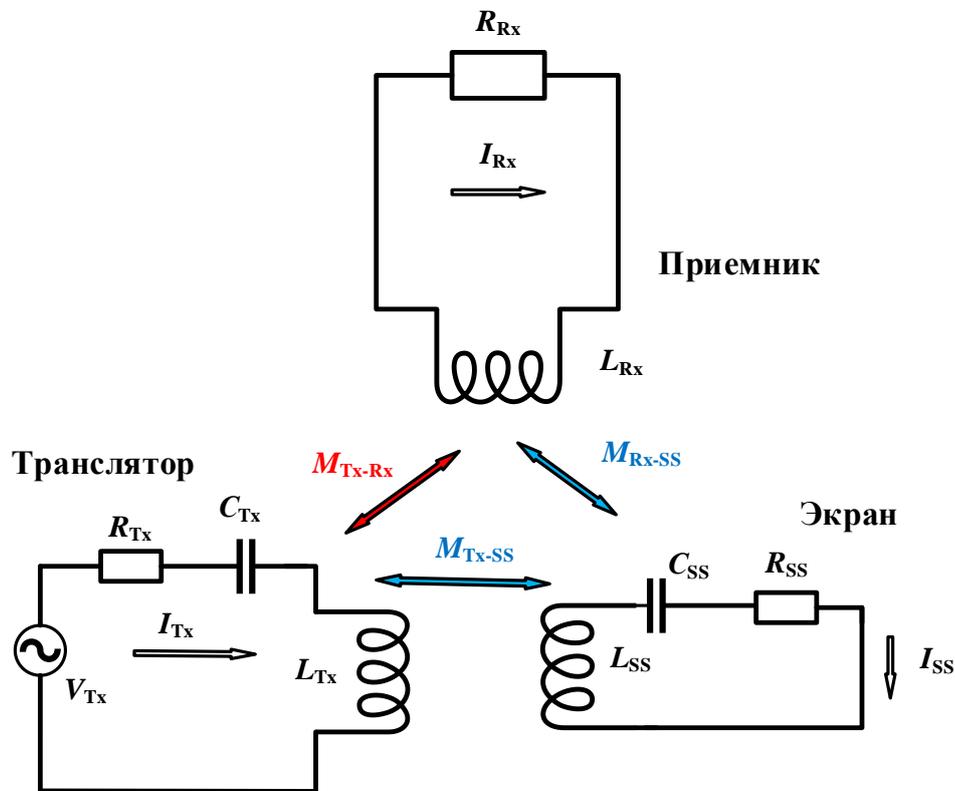


Рис. 6. Модель в виде эквивалентной электрической схемы, демонстрирующая процесс изменения взаимной индуктивности T_x и SS относительно первоначального значения на этапе сессии зарядки электромобиля при подключении «приемника»

Для этой схемы будет справедливо записать:

$$0 = (R_{R_x} + j\omega L_{R_x}) I_{R_x} + j\omega M_{T_x-R_x} I_{T_x} + j\omega M_{SS-R_x} I_{SS} \quad (3)$$

$$V_{T_x} = (R_{T_x} + j\omega L_{T_x} + \frac{1}{j\omega C_{T_x}}) I_{T_x} - j\omega M_{T_x-SS} I_{SS} - j\omega M_{T_x-R_x} I_{R_x} \quad (4)$$

$$0 = (R_{SS} + j\omega L_{SS} + \frac{1}{j\omega C_{SS}}) I_{SS} - j\omega M_{T_x-SS} I_{T_x} + j\omega M_{SS-R_x} I_{R_x} \quad (5)$$

Следовательно, изменение первоначальной взаимной индуктивности между T_x и SS можно представить следующим образом:

$$M = M_{T_x-SS} - j \frac{\omega M_{T_x-R_x} M_{SS-R_x}}{R_{R_x} + j\omega L_{R_x}} \quad (6)$$

Отсюда видно, что взаимная индуктивность между T_x и каждым из контуров SS будет изменяться в зависимости от местоположения «приемника».

Кроме этого, как видно из рис. 3, напряжение в каждом контуре SS благодаря симметрии индуцируется по закону Фарадея и для каждого контура SS будет иметь одинаковые значения.

Если представить магнитное поле, создаваемое в системе БЗУ, как взаимосвязь магнитной индукции ($B_{\text{БЗУ}}$) и напряженности магнитного поля ($H_{\text{БЗУ}}$):

$$B_{\text{БЗУ}} = \mu_0 \mu H_{\text{БЗУ}}, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость, то выражение для наведенного индуцированного напряжения ($V_{\text{инд}}$) в контуре SS будет иметь вид:

$$V_{\text{инд}} = -j\omega B_{\text{БЗУ}} e^{-j\omega t} S, \quad (8)$$

где S – площадь сечения проводника.

Тогда ток контура SS соответственно можно рассчитать, как:

$$I_{\text{SS}} = \frac{V_{\text{инд}}}{L_{\text{SS}}} = - \frac{j\omega B_{\text{БЗУ}} e^{-j\omega t} S}{(j\omega L_{\text{SS}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{SS}}}) + R_{\text{SS}}} \quad (9)$$

Если импеданс емкости контура SS (C_{SS}) больше импеданса индуктивности контура SS (L_{SS}), резонансная частота SS становится больше рабочей частоты системы БЗУ. Тогда SS будет работать в емкостной области. В этом случае ток SS будет равен:

$$I_{\text{SS}} = \frac{V_{\text{инд}}}{L_{\text{SS}}} = - \frac{j\omega B_{\text{БЗУ}} e^{-j\omega t} S}{(j\omega L_{\text{SS}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{SS}}}) + R_{\text{SS}}} \cong - \frac{\omega^2 B_{\text{БЗУ}} e^{-j\omega t} S}{\frac{1}{C^*}}, \quad (10)$$

где

$$\frac{1}{\omega C_{\text{SS}}} \gg \omega L_{\text{SS}};$$

$$\frac{1}{C^*} = \frac{1}{C_{\text{SS}}} - \omega^2 L_{\text{SS}}.$$

При этом в емкостной области ток SS совпадает по фазе с магнитным полем. Таким образом магнитное поле утечки увеличивается.

Если импеданс емкости контура SS (C_{SS}) меньше импеданса индуктивности контура SS (L_{SS}), резонансная частота становится меньше рабочей частоты системы БЗУ. Тогда SS будет работать в индуктивной области. В этом случае ток SS будет равен:

$$I_{\text{SS}} = \frac{V_{\text{инд}}}{L_{\text{SS}}} = - \frac{j\omega B_{\text{БЗУ}} e^{-j\omega t} S}{(j\omega L_{\text{SS}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{SS}}}) + R_{\text{SS}}} \cong - \frac{B_{\text{БЗУ}} e^{-j\omega t} S}{L^*}, \quad (11)$$

где

$$\frac{1}{\omega C_{\text{SS}}} \ll \omega L_{\text{SS}};$$

$$L^* = L_{SS} - \frac{1}{\omega^2 C_{SS}}.$$

Таким образом, работающий в индуктивной области SS, будет иметь разность фаз в 180 градусов относительно магнитного поля, создаваемого системой БЗУ, и, следовательно, тем самым будет уменьшать магнитное поле утечки.

Из представленных выше описаний эквивалентных схем и рассуждений об условиях функционирования рассматриваемой экранирующей системы, учитывая, что взаимная индуктивность между T_x и каждым из контуров SS изменяется в зависимости от местоположения «приемника», можно предположить, что эта система контуров SS может выполнять не только функцию экранирования, но и функция индикации смещения обмоток «транслятора» и «приемника» относительно друг друга путем определения положения «приемника» относительно контуров SS.

Для проверки справедливости представленных выше рассуждений в рамках исследований было осуществлено компьютерное моделирование процесса функционирования БЗУ, оснащенной предлагаемой системой экранирования.

За базовый вариант исполнения БЗУ для осуществления моделирования было принято устройство, соответствующее по своим конструктивным и рабочим параметрам классу «WPT3/Z2» БЗУ для автономного электротранспорта в соответствии с классификацией введенной Международной электротехнической комиссией (МЭК) в стандарте IEC 61980-1:2020 [19]. В соответствии с этой классификацией БЗУ разделяются на классы по пяти уровням номинальной выходной мощности, трем уровням рабочего воздушного зазора между «транслятором» и «приемником», а также по двум видам топологии обмоток индуктивности «транслятора» и «приемника». БЗУ класса «WPT3/Z2» должны обеспечивать номинальную выходную мощность ($P_{b,out}$) в диапазоне $7,7 \text{ кВт} < P_{b,out} \leq 11,1 \text{ кВт}$ при рабочем воздушном зазоре от 140 мм до 210 мм. При этом МЭК приняты две основные топологические схемы обмоток индуктивности «транслятора» и «приемника»: плоская одноконтурная (топология «D») и плоская биконтурная (топология «DD»). Разные типы обмоток формируют магнитные поля различной конфигурации: обмотки типа «D» формируют коаксиальное магнитное поле, обмотки типа «DD» – поперечное магнитное поле. На основании имеющихся исследовательских научных данных, стандартом международным стандартом ISO 19363 определено, что для контуров одинаковой топологии, допустимые отклонения центров «транслятора» и «приемника» могут составлять по оси X (горизонтальная ось, совпадающая с продольной осью ТС по длине и направлением движения) не более ± 75 мм, по оси Y (горизонтальная ось, совпадающая с поперечной осью ТС по ширине) не более ± 100 мм [4]. При этом предполагается, что данные отклонения могут неизбежно возникать при парковке ТС. Магнитная совместимость обмоток различной топологии обеспечивается путем определения требований к распределению магнитного поля вокруг оптимальных точек выравнивания. При этом в любом случае, в соответствии с требованиями, изложенных в стандарте ISO 19363,

БЗУ должно обеспечивать эффективность (КПД) передачи мощности при нулевых отклонениях соосности «транслятора» и «приемника» не менее 85 %, а при асимметрии их позиционирования не менее 80 %. Ранее результаты исследований, посвященные методике оценки магнитной и электрической совместимости бесконтактных зарядных устройств для автономного электротранспорта, но не учитывающие аспекты экранирования, представлялись автором данной статьи в публикации [15]. При проведении настоящих исследований были выбраны обмотки индуктивности транслятора и приемника топологии «D». Обмотка T_x состояла из 8 витков, обмотка R_x – 9 витков, SS – 2 витка. Параметры индуктивности базового варианта БЗУ, выбранного для моделирования, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры индуктивности контуров базового варианта БЗУ, [мкГн]

	T_x	R_x	SS_1	SS_2	SS_3	SS_4
T_x	37,68	6,86	0,65	0,65	0,65	0,65
R_x		43,81	0,69	0,69	0,69	0,69
SS_1			4,10	1,08	0,73	0,15
SS_2				4,10	0,15	0,73
SS_3					4,10	1,08
SS_4						4,10

На первом этапе исследований осуществлялось моделирование с целью выявления разницы взаимной индуктивности между каждым контуром SS и обмоткой T_x при перемещении обмотки R_x по плоскости (X-Y) параллельно плоскости обмотки T_x . Всего было установлено 3384 расчетные точки: 67 по оси X и 52 по оси Y. Результаты моделирования представлены на рис. 7.

Из полученных данных, представленных на рис. 7, видно, что взаимная индуктивность каждого контура SS и обмотки T_x , как и предполагалось ранее, изменяется в зависимости от расположения «приемника». При этом разница становится более значительной при приближении SS к «приемнику» и может достигать до 40 %. Этот факт более наглядно представлен на диаграммах показанных в таблице 3. Из данных таблицы 3 четко видно, что, когда «приемник» и «транслятор» точно сопряжены (соосны), разность взаимных индуктивностей всех контуров SS и обмотки T_x одинакова.

На втором этапе исследований осуществлялось моделирование с целью выявления характера рассеивания (утечки) магнитного поля.

Модель БЗУ с экранирующими контурами SS в виде эквивалентной электрической схемы представлена на рис. 8. Электрические параметры модели представлены в таблице 4.

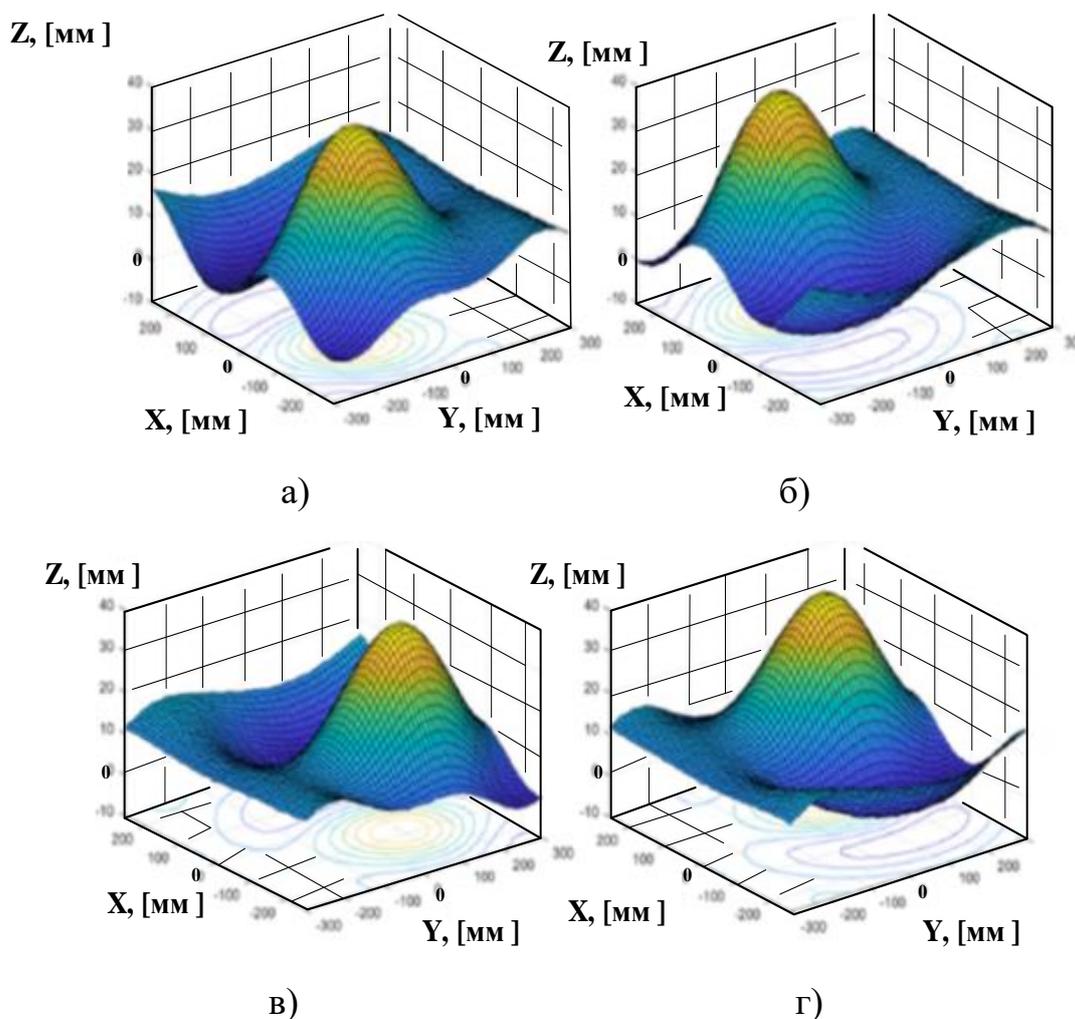
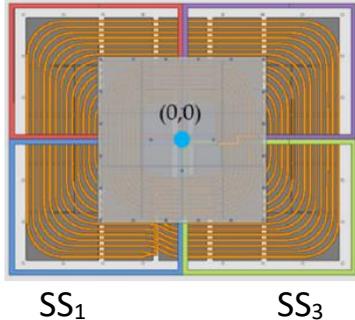
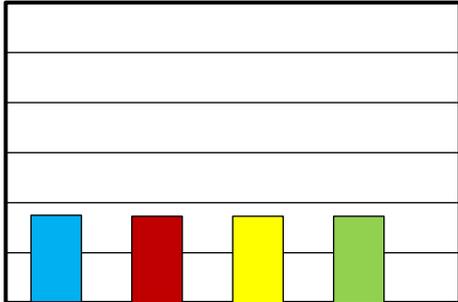
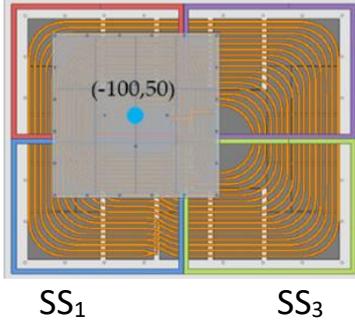
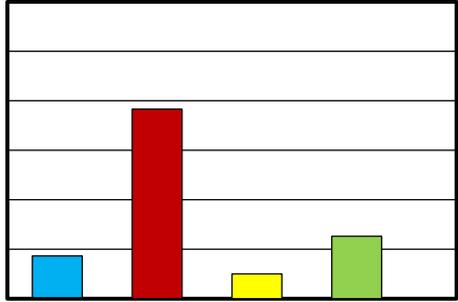
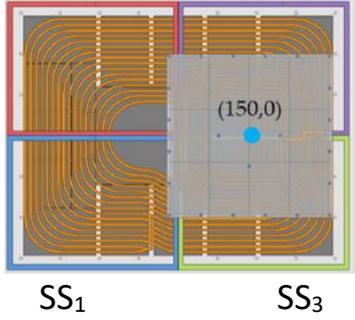
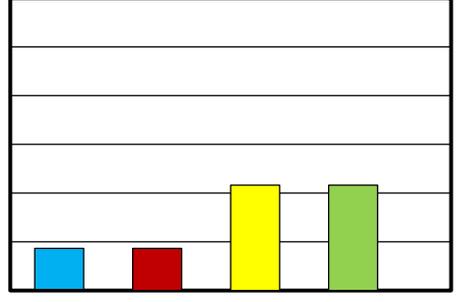


Рис. 7. Изменение взаимной индуктивности между контурами SS и обмоткой T_x в зависимости от положения R_x относительно первоначального значения в % (■ – 0 %, ■ – 20 %, ■ – 40 %):

а) контур SS₁, б) контур SS₂, в) контур SS₃, г) контур SS₄

Как уже известно, ток, протекающий в контуре SS, снижает эффективность передачи мощности системы из-за потерь в самом контуре SS. Когда величина тока SS велика, эффект экранирования увеличивается, но эффективность передачи мощности снижается. Величина тока контура SS изменяется в соответствии с резонансной частотой контура. Резонансная частота контура SS должна быть меньше рабочей частоты системы БЗУ, чтобы функционирование осуществлялось в индуктивной области. Если резонансная частота низкая, то полное сопротивление на рабочей частоте будет увеличиваться, следовательно, величина тока контура SS будет меньше. Если резонансная частота высокая, то импеданс на рабочей частоте будет небольшим, а величина тока контура SS должна увеличиться.

Таблица 3 – Изменения значений взаимной индуктивности между контурами SS и обмоткой T_x в зависимости от положения R_x

Взаимное расположение T_x , SS и R_x	Изменение значений взаимной индуктивности, относительно первоначального значения, [%]										
	<p>$\Delta M, \%$</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>SS</th> <th>$\Delta M, \%$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SS1</td> <td>~18</td> </tr> <tr> <td>SS2</td> <td>~18</td> </tr> <tr> <td>SS3</td> <td>~18</td> </tr> <tr> <td>SS4</td> <td>~18</td> </tr> </tbody> </table>	SS	$\Delta M, \%$	SS1	~18	SS2	~18	SS3	~18	SS4	~18
SS	$\Delta M, \%$										
SS1	~18										
SS2	~18										
SS3	~18										
SS4	~18										
	<p>$\Delta M, \%$</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>SS</th> <th>$\Delta M, \%$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SS1</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>SS2</td> <td>~38</td> </tr> <tr> <td>SS3</td> <td>~5</td> </tr> <tr> <td>SS4</td> <td>~13</td> </tr> </tbody> </table>	SS	$\Delta M, \%$	SS1	~10	SS2	~38	SS3	~5	SS4	~13
SS	$\Delta M, \%$										
SS1	~10										
SS2	~38										
SS3	~5										
SS4	~13										
	<p>$\Delta M, \%$</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>SS</th> <th>$\Delta M, \%$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SS1</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>SS2</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>SS3</td> <td>~22</td> </tr> <tr> <td>SS4</td> <td>~22</td> </tr> </tbody> </table>	SS	$\Delta M, \%$	SS1	~10	SS2	~10	SS3	~22	SS4	~22
SS	$\Delta M, \%$										
SS1	~10										
SS2	~10										
SS3	~22										
SS4	~22										

В процессе исследований рассматривались три возможных варианта, при которых с применением экранирующих контуров SS могло произойти снижение эффективности передачи мощности (КПД) на 1 %, 2 % и 3 %, то есть исходно задавались условия в пределах допустимых значений, установленных международным стандартом ISO 19363 [4]. Результаты моделирования этих трех вариантов сравнивались с результатами, полученными для модели без использования контуров SS, которая было принята в качестве эталонной. Значения расчетных параметров выходной мощность, эффективности передачи мощности и тока всех четырех вариантов приведены в таблице 5. Моделирование

осуществлялось при условии точной центровки «приемника» относительно «транслятора».

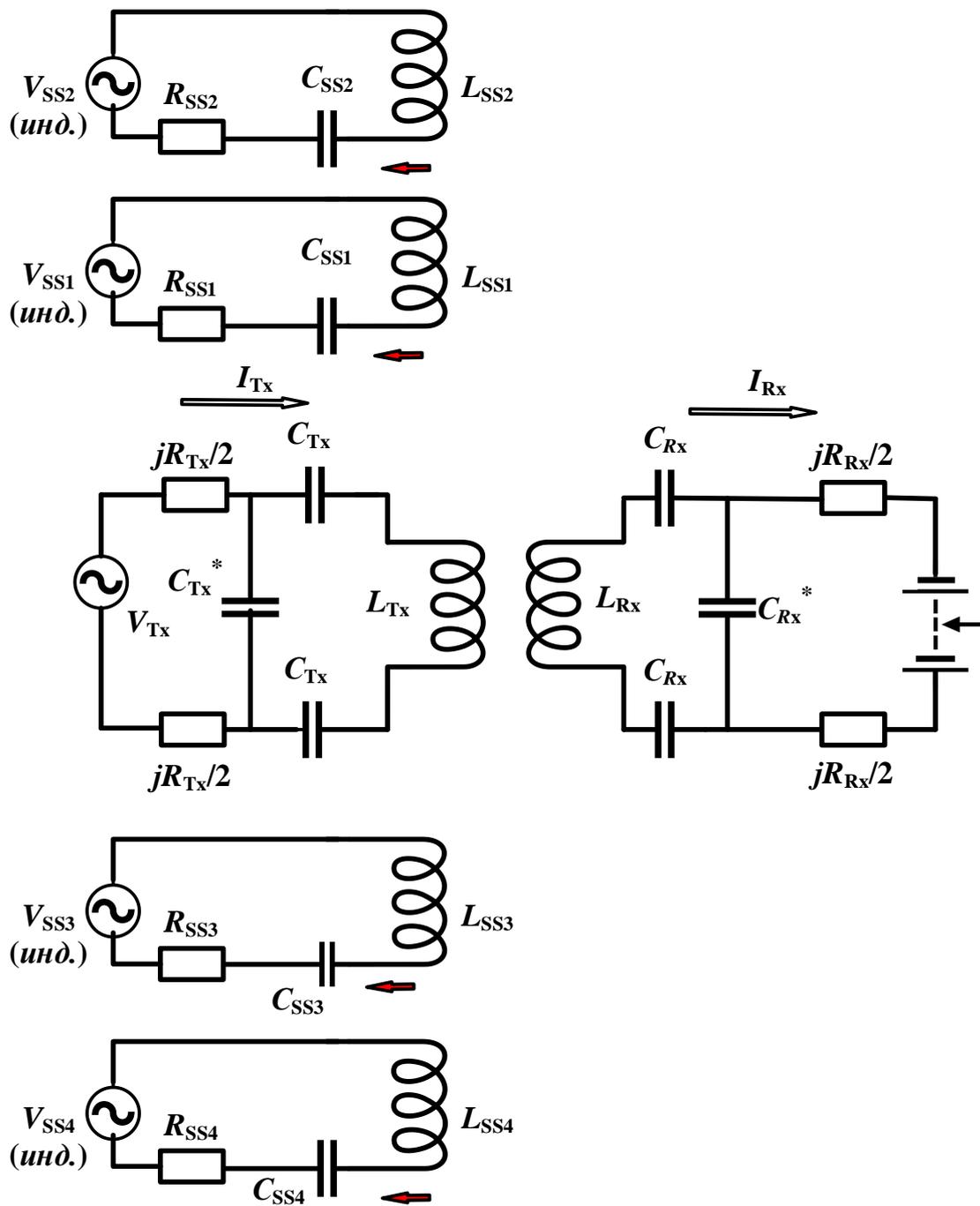


Рис. 8. Модель БЗУ с экранирующими контурами SS в виде эквивалентной электрической схемы

Таблица 4 – Электрические параметры исследуемой эквивалентной модели БЗУ

Параметр	Единица измерения	Значение
L_{Tx}	мкГн	37,68
L_{Rx}	мкГн	43,81
L_{SS}	мкГн	4,1
jX_{Tx}	Ом	5,3
jX_{Rx}	Ом	-1,4
Рабочая частота	кГц	85

Таблица 5 – Значения параметров выходной мощности, эффективности передачи мощности и тока сравниваемых моделей

Параметр	Эталонная модель	Модель – вариант 1	Модель – вариант 2	Модель – вариант 3
P_{out} , [кВт]	10			
КПД _{БЗУ} , [%]	93,24	92,12	91,31	89,96
I_{Tx} , max	81,88 $\angle 0^\circ$	82,95 $\angle 0^\circ$	82,99 $\angle 0^\circ$	87,00 $\angle 0^\circ$
I_{Rx} , max	72,74 $\angle -90^\circ$	71,95 $\angle -90^\circ$	71,57 $\angle -90^\circ$	72,82 $\angle -90^\circ$
I_{SS} , max	----	56,44 $\angle 180^\circ$	70,90 $\angle 180^\circ$	124,77 $\angle 180^\circ$

Результаты моделирования магнитного поля представлены в таблице 6.

Результаты моделирования, представленные в таблице 6, наглядно показывают наличие экранирующего эффекта при использовании экрана, состоящего из контуров SS. При этом видно, что при увеличении тока I_{SS} , экранирующий эффект существенно увеличивается.

Для определения численного значения экранирующий эффект (SE) принято рассчитывать, как:

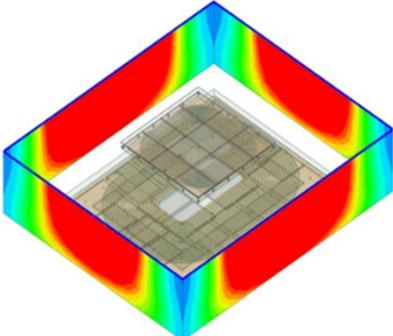
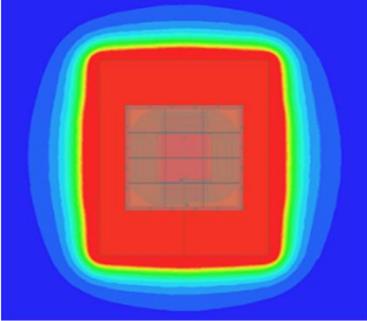
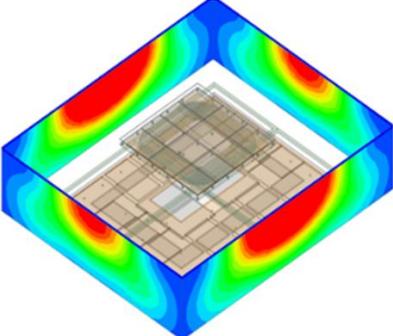
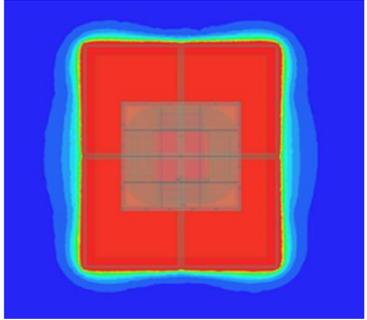
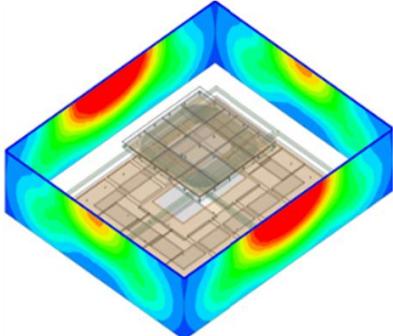
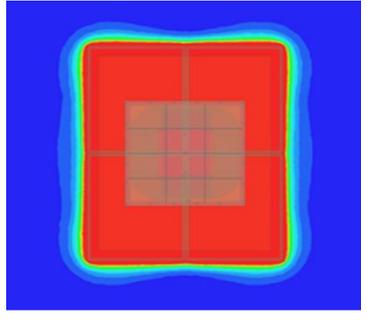
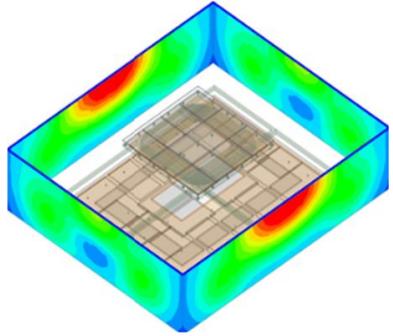
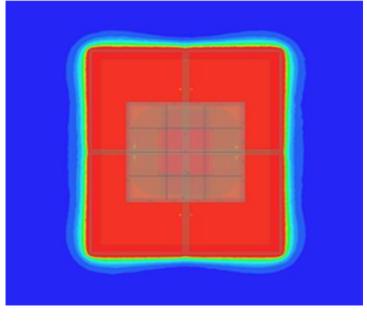
$$SE = \left(1 - \frac{B_{\text{факт}}}{B_{\text{эталон}}}\right) 100\% \quad (12)$$

Непосредственно магнитное поле рассеяния было определялось на расстоянии от 150 мм до 350 мм от T_x .

На рис. 9 показано изменение магнитного поля рассеивания и экранирующего эффекта в зависимости от удаленности от «транслятора».

Из графиков, представленных на рис. 9 б видно, что экранирующий эффект увеличивается при увеличении тока I_{SS} и для модели вариант 3 на расстоянии 200 мм может составлять 76 %, что значительно выше результатов, представленных в публикации [11], и соизмеримо с результатами, представленными в работе [12].

Таблица 6 – Результаты моделирования магнитного поля, [мкТл]

3D-аксонометрия	Вид сверху
■ – 1000 мкТл, ■ – 500 мкТл, ■ – 0 мкТл	
Эталонная модель	
	
Модель – вариант 1	
	
Модель – вариант 2	
	
Модель – вариант 3	
	

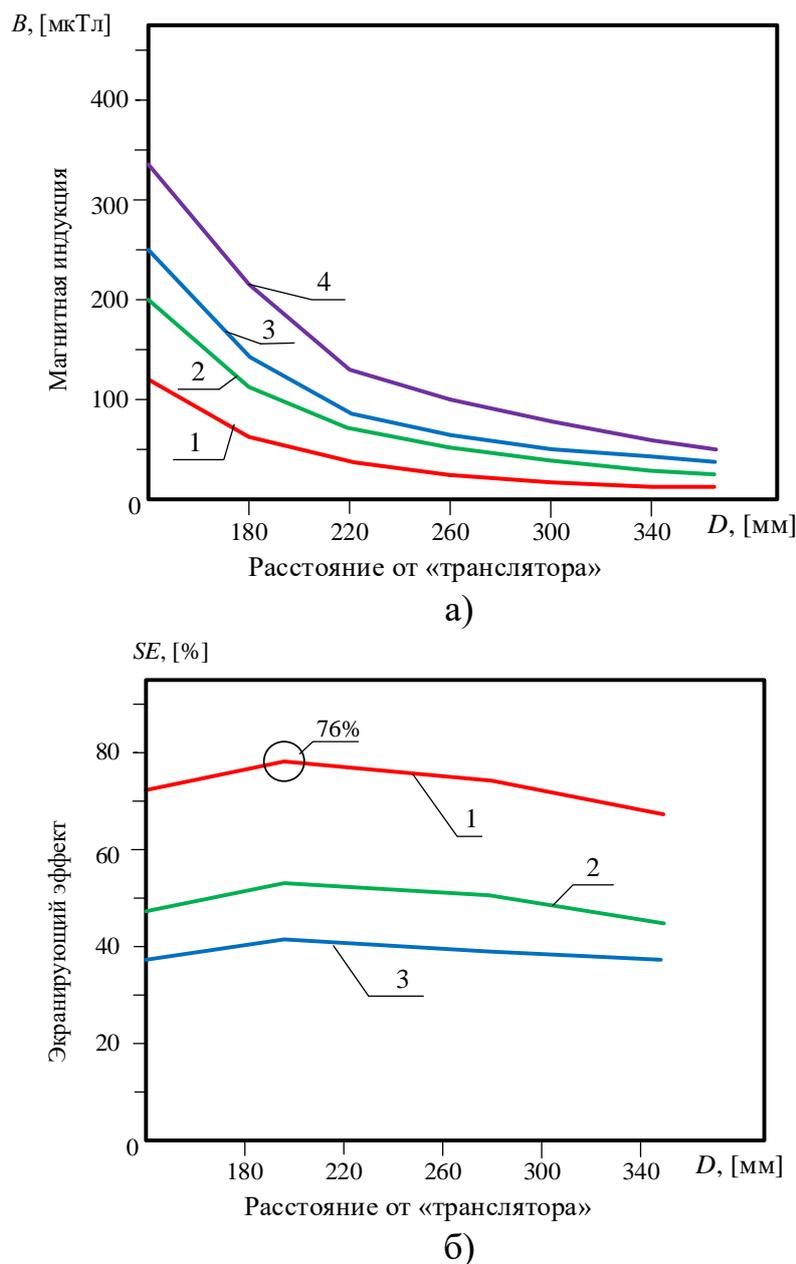


Рис. 9. Изменение магнитного поля рассеивания (а) и экранирующего эффекта (б) в зависимости от удаленности от «транслятора»: график 1 – модель вариант 3, график 2 – модель вариант 2, график 3 – модель вариант 1, график 4 – эталонная модель

Заключение

Таким образом в результате проведенных исследований путем компьютерного моделирования и системного анализа была подтверждена высокая экранирующая способность предложенной активной экранирующей системы, состоящей из четырех симметричных резистивно-емкостных контуров, коаксиально расположенных относительно обмотки индуктивности «транслятора». При этом показано, что для достижения уменьшения магнитного поля утечки необходимо, чтобы импеданс емкости экранирующего контура был меньше импеданса индуктивности, а его резонансная частота была меньше рабочей ча-

стоты БЗУ, то есть, чтобы экранирующий контур функционировал в индуктивной области. Это может быть достигнуто тогда, когда экранирующий контур будет иметь разность фаз относительно магнитного поля, создаваемого системой БЗУ, 180 градусов.

Кроме этого в результате проведенных исследований выявлена закономерность, свидетельствующая о том, что взаимная индуктивность между обмоткой «транслятора» и контурами защитного экрана изменяется в процессе всех стадий сессии зарядки: от нулевого цикла, когда электромобиль отсутствует на БЗС и зарядка еще не началась, до этапа зарядки, когда ТС припарковано на БЗС с совмещением «транслятора» и бортового «приемника» и включена передача мощности, и далее, когда ТС покидает БЗС. При этом установлено, что взаимная индуктивность каждого из контуров защитного экрана и обмотки «транслятора» изменяется в зависимости от расположения обмотки «приемника». Изменение взаимной индуктивности пропорционально площади перекрытия обмоткой «приемника» соответствующего контура защитного экрана. Причем это изменение взаимной индуктивности более существенно проявляется, если воздушный зазор между «транслятором» и «приемником» уменьшается. Данная выявленная в процессе исследований закономерность свидетельствует о том, что комплекс симметрично коаксиально расположенных над «транслятором» экранирующих контуров можно использовать также для индикации как горизонтального смещения обмоток «транслятора» и «приемника», то есть в качестве средства контроля точности парковки ТС на зарядной площадке, так и в качестве индикатора фактического зазора между «транслятором» и «приемником», что также необходимо в виду возможных различий клиренса ТС, поступающих на одну и ту же зарядную площадку.

Все проведенные исследования носили целенаправленно прикладной характер. Практическая значимость результатов исследований состоит в том, что создание БЗУ с использованием системы защиты от ЭМИ на базе четырех симметричных независимых резистивно-емкостных контуров, коаксиально расположенных относительно обмотки индуктивности «транслятора», позволит не только обеспечить требуемую безопасность процесса зарядки ТС, сохранив проектные значения КПД БЗУ, но и обеспечить компактность конструкции БЗС, а также снизить его стоимость благодаря отсутствию необходимости дополнительного создания и оснащения БЗС специальными системами контроля фактических рассогласований соосности «транслятора» и «приемника» и фактического воздушного зазора между ними. Текущие данные о взаимной индуктивности между обмоткой «транслятора» и контурами защитного экрана одновременно могут служить в качестве исходных данных как для управления током экранирующего контура, так и для настройки параметров режимов передачи мощности, упростив тем самым алгоритм управления БЗУ.

Новизной результатов исследований, прежде всего, являются: научно-теоретическое обоснование качественного и количественного подтверждения высокой экранирующей способности исследуемой экранирующей системы, физико-математическое описание функционирования системы, обоснование оптимальных условий и режимов ее функционирования. Принципиально новым

научным результатом в области изучения технологии бесконтактной магнитно-резонансной зарядки являются выявленные параметрические взаимосвязи и закономерности взаимодействия обмоток индуктивности БЗУ и резистивно-емкостных контуров защитного экрана, а также обоснование возможности их использования в качестве индикатора несоосности «транслятора» и «приемника» и воздушного зазора между ними.

В дальнейшем, на основе уже полученных результатов, автором планируется реализация работ по созданию комплексного алгоритма управления БЗУ, оснащенного активной динамической четырехконтурной резистивно-емкостной системой экранирования, а также работ по формированию базы данных на основе выявленных функциональных зависимостей взаимной индуктивности и тока экранирующего контура для БЗУ различных классов в соответствии с ISO 19363.

Литература

1. Куркова О.П. Сетевая информационная модель коммуникационных связей между электромобилем и бесконтактным магнитно-резонансным зарядным устройством // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 286-313. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-286-313. [Электронный ресурс]. – URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2022-03/10-Kurkova.pdf> (дата обращения 09.12.2022).

2. Wen F., Huang X. Human Exposure to Electromagnetic Fields from Parallel Wireless Power Transfer Systems // International Journal of Environmental Research and Public Health, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2017. Vol. 14(2). No 157. 15 p. DOI: 10.3390/ijerph14020157. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/journal/ijerph> (дата обращения 04.01.2023).

3. ICNIRP Guidelines: Forlimiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz) // Health Phys, 2010. No 99(6). P. 818 – 836. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86. [Электронный ресурс]. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21068601/> (дата обращения 05.01.2023).

4. ISO 19363:2020 (E). International Standard. Electrically propelled road vehicles. Magnetic field wireless power transfer. Safety and interoperability requirements. Edition 1.0 2020-04. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2020. 46 p.

5. Tan L., Elnail K.E.I., Ju M., Huang X. Comparative Analysis and Design of the Shielding Techniques in WPT Systems for Charging EVs // Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). 2019. Vol. 12. No 2115. 20 p. DOI: 10.3390/en12112115. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2115> (дата обращения 03.11.2022).

6. Wen F., Huang X. Optimal Magnetic Field Shielding Method by Metallic Sheets in Wireless Power Transfer System // Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). 2016. Vol. 9. No 733. 15 p. DOI: 10.3390/en9090733. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/9/733> (дата обращения 03.11.2022).

7. Kim S., Park H.-H., Kim J., Ahn S. Design and Analysis of a Resonant Reactive Shield for a Wireless Power Electric Vehicle // Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2014. Vol. 62. No 4. P. 1057 – 1066. DOI: 10.1109/TMTT.2014.2305404. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1109/TMTT.2014.2305404> (дата обращения 09.12.2022).

8. Choi S.Y., Gu B.W., Lee S.W., Lee W.Y., Huh J.; Rim C.T. Generalized Active EMF Cancel Methods for Wireless Electric Vehicles // Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 29. No 11. P. 5770–5783. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2295094. [Электронный ресурс]. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6684288> (дата обращения 11.01.2023).

9. SAE J2954_202208. Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology. Recommended Practice (RP). Edition 5.0 2022-08. Warrendale, Pannsylvania: Society of Automotive Engineers International (SAE), 2022. 201 p.

10. Kim J., Ahn J., Huh S., Kim K., Ahn S. A Coil Design and Control Method of Independent Active Shielding System for Leakage Magnetic Field Reduction of Wireless UAV Charger // Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE). Transactions on Communications. 2020. Vol. E103-B. No 9. P. 889–898. DOI: 10.1587/transcom.2019MCI0001. [Электронный ресурс]. – URL: https://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=B&lang=E&year=2020&fname=e103-b_9_889&abst= (дата обращения 26.12.2022).

11. Cruciani S., Campi T., Maradei F., Feliziani M. Active Shielding Design and Optimization of a Wireless Power Transfer (WPT) System for Automotive // Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). 2020. Vol. 13. No 5575. 12 p. DOI: 10.3390/en13215575. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5575> (дата обращения 16.01.2023).

12. Li Y., Zhang S., Cheng Z. Double-Coil Dynamic Shielding Technology for Wireless Power Transmission in Electric Vehicles // Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). 2021. Vol. 14. No 5271. 15 p. DOI: 10.3390/en14175271. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5271> (дата обращения 17.01.2023).

13. Ahn J., Kim J., Park D., Kim H., Ahn S. An Active Shielding Control Method for a Wireless Power Transfer System under Misalignment Conditions // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. 2022. Vol. 22. No 1. P. 56 – 63. DOI: 10.26866/jees.2022.1.r.61. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Active-Shielding-Control-Method-for-a-Wireless-Ahn-Kim/476fc000716e0977890a5c129832402ecbfccf32> (дата обращения 15.12.2022).

14. Куркова О.П., Ефимов В.В. Численное компьютерное моделирование и оптимизация схемотехнических решений бесконтактных зарядных устройств для электроприводных транспортных средств // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 64–88. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10305. [Электронный ресурс]. – URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/05-Kurkova.pdf> (дата обращения 20.01.2023).

15. Куркова О.П. Методика оценки совместимости бесконтактных зарядных устройств, поставляемых различными производителями для создания общественной инфраструктуры зарядки автономного электротранспорта // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 104-125. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10105. [Электронный ресурс]. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2021-01/05-Kurkova.pdf> (дата обращения 20.01.2023).

16. Куркова О.П. МРРТ-алгоритм управления частотными характеристиками как инструмент повышения энергоэффективности процесса бесконтактной магнитно-резонансной зарядки электротранспорта // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 99–124. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-99-124. [Электронный ресурс]. – URL: <https://sccs.intelgr.com/archive/2021-04/06-Kurkova.pdf> (дата обращения 20.01.2023).

17. ANSYS Maxwell // Официальный сайт компании «ANSYS, Inc.». [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ansys.com/applications/wireless-charging-simulation> (дата обращения 05.11.2022).

18. ANSYS Simplorer // Официальный сайт компании «ANSYS, Inc.». [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/electromagnetics/introduction-to-ansys-simplorer> (дата обращения 18.11.2022).

19. IEC 61980-1:2020. International Standard. Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2020-11. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2020. 54 p.

References

1. Kurkova O.P. Network information model communication links between an electric vehicle and a contactless magnetic-resonance charger. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 286–313. doi: 10.24412/2410-9916-2022-3-286-313. Available at: <https://sccs.intelgr.com/archive/2022-03/10-Kurkova.pdf> (accessed 09 December 2023) (in Russian).

2. Wen F., Huang X. Human Exposure to Electromagnetic Fields from Parallel Wireless Power Transfer Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2017, vol. 14 (2), no. 157, 15 p. doi: 10.3390/ijerph14020157. Available at: <https://www.mdpi.com/journal/ijerph> (accessed 04 January 2023).

3. ICNIRP Guidelines: Forlimiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Phys*, 2010, no. 99(6), pp. 818 – 836. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21068601/> (accessed 05 January 2023).

4. ISO 19363:2020 (E). International Standard. Electrically propelled road vehicles. Magnetic field wireless power transfer. Safety and interoperability requirements. Edition 1.0 2020-04. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2020. 46 p.

5. Tan L., Elnail K.E.I., Ju M., Huang X. Comparative Analysis and Design of the Shielding Techniques in WPT Systems for Charging EVs. *Energies*,

Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2019, vol. 12, no. 2115, 20 p. doi: 10.3390/en12112115. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2115> (accessed 03 November 2022).

6. Wen F., Huang X. Optimal Magnetic Field Shielding Method by Metallic Sheets in Wireless Power Transfer System. *Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2016, vol. 9, no 733, 15 pp. doi: 10.3390/en9090733. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/9/733> (accessed 03 November 2022).

7. Kim S., Park H.-H., Kim J., Ahn S. Design and Analysis of a Resonant Reactive Shield for a Wireless Power Electric Vehicle. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, vol. 62, no. 4, pp. 1057 – 1066. doi: 10.1109/TMTT.2014.2305404. Available at: <https://www.sci-hub.ru/10.1109/TMTT.2014.2305404> (accessed 09 December 2022).

8. Choi S.Y., Gu B.W., Lee S.W., Lee W.Y., Huh J.; Rim C.T. Generalized Active EMF Cancel Methods for Wireless Electric Vehicles. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 29, no. 11, pp. 5770–5783. doi: 10.1109/TPEL.2013.2295094. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6684288> (accessed 11 January 2023).

9. SAE J2954_202208. Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology. Recommended Practice (RP). Edition 5.0 2022-08. Warrendale, Pannsylvania, Society of Automotive Engineers International (SAE), 2022. 201 p.

10. Kim J., Ahn J., Huh S., Kim K., Ahn S. A Coil Design and Control Method of Independent Active Shielding System for Leakage Magnetic Field Reduction of Wireless UAV Charger. *Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE), Transactions on Communications*, 2020, vol. E103-B, no. 9, pp. 889–898. doi: 10.1587/transcom.2019MCI0001. Available at: https://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=B&lang=E&year=2020&fname=e103-b_9_889&abst= (accessed 26 December 2022).

11. Cruciani S., Campi T., Maradei F., Feliziani M. Active Shielding Design and Optimization of a Wireless Power Transfer (WPT) System for Automotive. *Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2020, vol. 13, no 5575, pp. 1–12. doi: 10.3390/en13215575. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5575> (accessed 16 January 2023).

12. Li Y., Zhang S., Cheng Z. Double-Coil Dynamic Shielding Technology for Wireless Power Transmission in Electric Vehicles. *Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2021, vol. 14, no. 5271, pp. 1 – 15. doi: 10.3390/en14175271. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5271> (accessed 17 January 2023).

13. Ahn J., Kim J., Park D., Kim H., Ahn S. An Active Shielding Control Method for a Wireless Power Transfer System under Misalignment Conditions. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 56 – 63. doi: 10.26866/jees.2022.1.r.61. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Active-Shielding-Control-Method-for-a>

Wireless-Ahn-Kim/476fc000716e09778_90a5c129832402ecbfccf32 (accessed 15 December 2022).

14. Kurkova O.P., Efimov V.V. Computational Modeling and Circuit Solutions Optimization of the Contactless Chargers of the Electric Vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 64–88. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10305. Available at: <https://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/05-Kurkova.pdf> (accessed 20 January 2023) (in Russian).

15. Kurkova O.P. Methodology for assessing the compatibility of contactless chargers supplied by various manufacturers to create a public charging infrastructure for autonomous electric vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 1, pp. 104–125. doi: 10.24411/2410-9916-2021-10105. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2021-01/05-Kurkova.pdf> (accessed 20 January 2023) (in Russian).

16. Kurkova O.P. MPPT algorithm frequency control as a tool for improving the energy efficiency of the process of contactless magnetic resonance charging of electric vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 4, pp. 99–124. doi: 10.24412/2410-9916-2021-4-99-124. Available at: <https://sccs.intelgr.com/archive/2021-04/06-Kurkova.pdf> (accessed 20 January 2023) (in Russian).

17. Official website company «ANSYS, Inc.». ANSYS Maxwell. Available at: <https://www.ansys.com/applications/wireless-charging-simulation> (accessed 05 November 2022).

18. Official website company «ANSYS, Inc.». ANSYS Simplorer. Available at: <https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/electromagnetics/introduction-to-ansys-simplorer> (accessed 18 November 2022).

19. IEC 61980-1:2020. International Standard. Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2020-11. Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2020. 54 p.

Статья поступила 25 февраля 2023 г.

Информация об авторе

Куркова Ольга Петровна – доктор технических наук. Профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов: системный анализ и моделирование сложных технических систем и процессов. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Адрес: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67А.

Numerical computer simulation of the active shielding system when charging an electric vehicle using contactless technology

O. P. Kurkova

Problem statement: the technology of contactless charging of electric vehicles is one of the most promising today. However, its implementation is associated with a number of problems, one of which is the leakage of the electromagnetic field. Leakage of electromagnetic field reduces the efficiency of contactless chargers. Electromagnetic radiation generated around the charging station can pose a threat to the safety of people, affect the performance of electronic devices of an electric vehicle, and have a negative impact on the environment. The problem of electromagnetic safety is an important point in the design of contactless charger, which can be solved by using passive or active shielding. **The aim of the research** was the formation of fundamental scientific and theoretical provisions for the creation of active dynamic protection against electromagnetic radiation based on four resistive-capacitive circuits, which has a high shielding ability in real operating conditions of the contactless chargers, at the same time, having a minimal negative impact on the efficiency of power transmission. The parameters of possible misalignment of the inductance windings of the "translator" and "receiver", as well as a possible change in the size of the air gap between them, were selected as factors reflecting the actual operating conditions of the contactless chargers. To achieve this goal, a number of specific research tasks were solved: the relationship between the parameters of the operating modes of the contactless chargers and the shielding system; the nature of changes in the mutual inductance between the winding of the "translator" and the contours of the protective shield; the effect on the leakage of the magnetic field of the modes of operation of the shielding system, the location of the winding of the "receiver", etc. **Methods and technologies used:** to solve the tasks, methods of constructing 3D models and models in the form of equivalent electrical circuits, methods of computer modeling and circuit analysis using ANSYS Maxwell software complexes, including a special application for the design of contactless charger, and ANSYS Simplorer were used. ANSYS Maxwell was used as a tool for 3D modeling and analysis of electromagnetic fields. ANSYS Simplorer - as an addition to ANSYS Maxwell for optimizing electrical parameters and predicting the efficiency of contactless charger. **Novelty of the result:** scientific and theoretical substantiation of qualitative and quantitative confirmation of the high screening capacity of the screening system under study, physical and mathematical description of the functioning of the system and justification of optimal conditions and modes of its functioning. A fundamentally new scientific result in the field of studying contactless charging technology is the revealed interrelationships and patterns of interaction between the inductance windings of the contactless charger and the resistive-capacitive circuits of the protective shield, as well as the justification of the possibility of their use as an indicator of the misalignment of the "translator" and "receiver" and the air gaps between them. **Practical significance:** the results can be used in the creation of a system of shielding, forecasting the efficiency and safety of contactless charger, as well as in the creation of control systems and telemetry of contactless charger for charging electric vehicles.

Keywords: electric vehicle, contactless magnetic resonance charger, translator, receiver, magnetic field strength, magnetic field leakage, electromagnetic radiation, shielding effect, mutual inductance, power transmission efficiency, simulation, equivalent model.

Information about Author

Olga Petrovna Kurkova – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Facilities. St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Fields of research: system analysis and modeling of complex technical systems and processes. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Address: Russia, 190000, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, letter A.