УДК 621.31

Методика оценки совместимости бесконтактных зарядных устройств, поставляемых различными производителями для создания общественной инфраструктуры зарядки автономного электротранспорта

Куркова О. П.

Постановка проблемы и частной задачи: С наблюдаемым в последние годы явным расширением сегмента глобального рынка бесконтактных зарядных устройств (БЗУ) для автономного электротранспорта при формировании на их основе проектов региональных зарядных инфраструктур остро встала проблема обеспечения совместимости устройств различных разработчиков и производителей, и как следствие этого - проблема необходимости унификации создаваемых и поставляемых на рынок БЗУ. Целью исследований являлась разработка методики и критериев оценки совместимости БЗУ различных классов и конструктивных конфигураций. Используемые методы и технологии: для решения поставленной задачи использовались основные инструменты системного анализа: факторный анализ, математическое моделирование, критериальный анализ процесса передачи энергии методом магнитно-резонансной индукции и условий совместимости «трансляторов» и «приемников» БЗУ. Для численных расчетов магнитных параметров БЗУ использовался программный комплекс «MATLAB toolbox Simulink». Новизна результата: основной новизной результата исследований является создание универсальной методики анализа и комплексной оценки совместимости различных классов БЗУ с «Tesla-pack» различной конфигурации. Научная новизна методики заключается в том, что: анализ и оценка осуществляется путем последовательного анализа и оценки магнитной и электрической совместимости «трансляторов» и «приемников» БЗУ, а в качестве основного критерия принят суммарный импеданс «приемника» и «нагрузки», рефлектирующий на стороне «транслятора»; оценка совместимости осуществляется путем сопоставления его фактических значений с нормированными расчетными показателями, устанавливаемыми в рамках граничных условий, определяемых исходя из того, что БЗУ должно обеспечить требуемые для зарядки ТС диапазоны значений выходных мощности и напряжения. В качестве инструмента реализации методики разработана универсальная математическая модель, описывающая процесс взаимодействия «транслятора» и «приемника» в виде функциональной алгебраической зависимости рефлектирующего импеданса от импеданса вторичного устройства и магнитных параметров БЗУ. Практическая значимость: разработанная методика при ее использовании не требует детальных исходных данных о структуре принципиальных электрических схем модулей электроники и конструктивных особенностях обмоток индуктивности анализируемых БЗУ. Методика и результаты расчетов, выполненных для четырех основных конфигураций «Tesla-pack» БЗУ, могут быть использованы при проектировании новых устройств с целью повышения уровня их унификации, а также для тестирования поставляемых на рынок БЗУ различных разработчиков и производителей на предмет совместимости.

Ключевые слова: электроприводное автономное транспортное средство, зарядная инфраструктура, бесконтактное зарядное устройство, магнитно-резонансная индукция, взаимная индукция, импеданс, мощность, напряжение, ток, математическая модель, совместимость.

Библиографическая ссылка на статью:

Reference for citation:

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.

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 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10105.

Ведение

Создание новых моделей и расширение использования батарейного электротранспорта является интенсивно развивающимся направлением развития инфраструктуры общественного, корпоративного и личного транспорта. Электроприводной транспорт обладает неоспоримыми преимуществами по отношению к транспортным средствам (TC) на углеводородных энергоносителях. Однако потребительская привлекательность электроприводных TC пока ограничивается все еще из-за неразвитой инфраструктуры зарядных станций (3C). Наиболее перспективными для формирования общественной зарядной инфраструктуры являются зарядные устройства, функционирование которых основано на использовании принципов бесконтактной передачи электроэнергии через «воздушный зазор» методом магнитно-резонансной индукции. Главными преимуществами использования этих устройств являются безопасность, комфортность, в том числе для лиц с ограниченными физическими возможностями, и энергоэффективность.

На сегодня на зарубежном мировом рынке уже предлагаются различные варианты бесконтактных зарядных устройств (БЗУ) для электротранспорта с уровнями мощности от 3,7 кВт до 200 кВт и выше. Разработчиками и производителями этих зарядных устройств являются специализированные предприятия малого и среднего бизнеса, являющиеся в основном дочерними производителей энергетического либо крупных мировых компаниями оборудования (Evatran, Bambardier, Continentel и др.), либо крупных компаний автопроизводителей, таких как: Tesla, Toyota, Nissan, General Motors, BMW, Volvo и других, стремящихся повысить конкурентоспособность своего модельного ряда ТС. Каждый из «игроков» этого сегмента рынка при создании зарядных устройств использует различные конструктивные конфигурации, конфигурации «транслятора» прежде всего магнитных катушек (располагаемого грунтовой зарядной «приемника» на площадке) И электроэнергии (располагаемого непосредственно TC). При этом на предлагаемые ими зарядные устройства рассчитаны на различные уровни мощности и на зарядку ТС с различными геометрическими (величиной клиренса, ширины колеи и т.д.) и энергетическими параметрами (емкость, напряжение и ток бортового «накопителя» – модуля тяговых аккумуляторных батарей). Однако, создавая свои модели БЗУ, разработчики, как правило, заранее осуществляют их «привязку» к конкретной модели или модельному ряду транспортных средств, что значительно ограничивает возможности более широкого распространения не только самих зарядных устройств данного типа, но и технологии бесконтактной зарядки в целом. В работе [1] информация о вариантах БЗУ, предлагаемых в соответствующем сегменте мирового рынка зарубежными разработчиками производителями, представлена И более подробно. Авторами отмечено, что российских аналогов БЗУ для электроприводных транспортных средств с аналогичными техническими характеристиками на сегодняшний день на рынке пока не представлено. При российскими ЭТОМ авторами показано, что В последние десять лет авторазработчиками и автопроизводителями активно ведутся работы по

созданию электроприводных транспортных средств различного назначения. В нескольких городах России уже проходят тестовую эксплуатацию электробусы: «КамАЗ», «ЛиАЗ». «Volgabus», «ГАЗ». Созданы первые модели грузопассажирских фургонов и мини-бусов («Next electro», «Эльтавр-Як», «Эльтавр-Дилижанс» и др.), электромобилей («LADA Ellada EV», «LADA Vesta EV» «Кама-1», «Zetta City Modul», «ОВУМ», «CV-1» и др.), электробагги («UV-4» и «OV-2») и электрокаров («5E-Tigabo» и др.), электромотоциклов Moto-UM-1» и «SM-1»), транспортных средств специального («Urban назначения (грузовик-мусоровоз КАМАЗ-53198 «Чистогор», грузовые электротележки «ЕТ-20122», грузопассажирские электрокары «ГЕРДАКАР» и др.). Учитывая, что зарубежный опыт уже показал, что технология беспроводной электротранспорта на сегодняшний день не является чем-то зарядки супероригинальным, но обладает целым рядом преимуществ, а также то, что исследования по созданию и применению отечественных образцов БЗУ пока носят несистемный единичный характер, что также показано авторами в работе [1], неизбежно растет интерес российских потребителей к возможности адаптации моделей БЗУ различных зарубежных поставщиков к условиям российского сегмента рынка электротранспорта и созданию на их основе общедоступных или локальных зарядных инфраструктур.

Исходя из этого, при формировании общедоступной зарядной инфраструктуры на базе магнитно-резонансных зарядных устройств неизбежно встает вопрос унификации – обеспечения функциональной совместимости зарядных устройств различных производителей с различными уровнями мощности и рабочими «дорожными просветами» между «транслятором» и «приемником», позволяющей использовать одно и тоже зарядное устройство для зарядки различных TC, в том числе с различными параметрами бортовых «накопителей». При решении проблемы унификации необходимо помнить и о сохранении заявленного производителем уровня эффективности самого зарядного устройства – КПД (η), определяемого как отношение активной мощности, подаваемой на нагрузку (бортовой «накопитель»), к активной мощности, поставляемой от сетевого источника напряжения.

Анализ состояния вопроса

В настоящее время согласно классификации, введенной Международной электротехнической комиссией (МЭК) [2], БЗУ классифицируются по пяти уровням номинальной выходной мощности ($P_{b,out}$), трем уровням рабочего воздушного зазора (Z), а также по двум видам топологии катушек индуктивности «транслятора» и «приемника». Классификация БЗУ по уровням номинальной выходной мощности и величине рабочего воздушного зазора приведена в таблице 1.

Известно, что эффективность передачи энергии посредствам БЗУ зависит от величины воздушного зазора между первичной и вторичной обмотками индуктивности, так как его увеличение влияет на взаимную индуктивность и коэффициент сцепления, что было подробно рассмотрено авторами в работах [1, 3, 4] и работах других авторов. Согласно требований МЭК [2], «трансляторы» устройства БЗУ класса Z2 должны обеспечивать зарядку TC с установленными на них «приемниками» БЗУ класса и Z2, и Z1. Аналогично, «трансляторы» устройства БЗУ класса Z3 должны обеспечивать зарядку TC с установленными на них «приемниками» БЗУ класса Z3, Z2 и Z1. Таким образом, «трансляторы» БЗУ класса Z3 являются наиболее универсальными в плане обеспечения совместимости относительно использования для зарядки TC с различными значениями клиренса.

| | Номинальная вы- | Рабочий воздуш- | |
|------------|-------------------------------|----------------------------|--|
| Класс БЗУ | ходная мощность | ный зазор (<i>Z</i>), мм | |
| | $(P_{b,out}),$ к B т | | |
| MF-WPT1-Z1 | | от 100 до 150 | |
| MF-WPT1-Z2 | $P_{\mathrm{b,out}} \leq 3,7$ | от 140 до 210 | |
| MF-WPT1-Z3 | | от 170 до 250 | |
| MF-WPT2-Z1 | | от 100 до 150 | |
| MF-WPT2-Z2 | $3,7 < P_{\rm b,out} \le 7,7$ | от 140 до 210 | |
| MF-WPT2-Z3 | | от 170 до 250 | |
| MF-WPT3-Z1 | | от 100 до 150 | |
| MF-WPT3-Z2 | $7,7 < P_{b,out} \le 11,1$ | от 140 до 210 | |
| MF-WPT3-Z3 | | от 170 до 250 | |
| MF-WPT4-Z1 | | от 100 до 150 | |
| MF-WPT4-Z2 | $11, 1 < P_{b,out} \le 22$ | от 140 до 210 | |
| MF-WPT4-Z3 | | от 170 до 250 | |
| MF-WPT5-Z1 | | от 100 до 150 | |
| MF-WPT5-Z2 | $22 < P_{b,out}$ | от 140 до 210 | |
| MF-WPT5-Z3 | | от 170 до 250 | |
| | | | |

Таблица 1 – Классификация БЗУ, введенная МЭК

С точки зрения классификации БКУ, МЭК рассматривает две основные топологические схемы обмоток индуктивности «транслятора» и «приемник»: плоская кольцевая (топология «D») (рис. 1а) и плоская биконтурная (топология «DD») (рис. 1б). Разные типы обмоток формируют магнитные поля различной конфигурации: обмотки типа «D» формируют коаксиальное магнитное поле, обмотки типа «DD» – поперечное магнитное поле. Конструкции, в которых используются обмотки с 3D-контурами (например, топология типа «DDQ» и др.), не классифицируются МЭК в качестве самостоятельного класса устройств, т.к. данные конструктивные особенности не оказывают концептуального влияния на физический принцип сопряжения первичной («транслятора») и вторичной («приемника») обмоток для обеспечения процесса передачи энергии. При этом использование в составе «транслятора» и «приемника» обмоток с различными типами топологий контуров индуктивности является вполне допустимым, а в некоторых случаях (в зависимости от функционального назначения БЗУ) и наиболее оптимальным вариантом.



Рис. 1. Основные виды топологий контуров обмоток индуктивности БЗУ: а – схема «D»; б – схема «DD»

Известно, что на эффективность передачи энергии оказывает влияние не только величина воздушного зазора, но и фактор асимметрии. Результаты исследований этой закономерности представлены в работах ряда зарубежных и российских исследователей [1, 4, 5, 6, 7, 8]. В частности, в представленных в публикациях результатах исследований, выполняемых под руководством до-М. А. Амелиной («Национальный исследовательский университет пента «МЭИ») показано влияние несоосности «транслятора» и «приемника» на эффективность процесса передачи энергии [5, 7]. Исследователем процессов передачи энергии методом магнитно-резонансной индукции применительно к БЗУ для транспортных средств А. Karalis в работе [6] представлены результаты исследований, проведенных совместно с другими специалистами в лаборатории Массачусетском технического института, по влиянию фактора ассиметрии, вероятность которой определяется неточностью парковки. Различия топологий контуров «транслятора» и «приемника» также приводит к асимметрии при формировании магнитного поля. Данный факт показан результатами исследований, представленных в пособии для разработчиков БЗУ авторов J. Miller, A. Daga, B. Long и P. Schrafel (американская Национальная лаборатория ORNL и «Momentum Dynamics Corporation») [8]. В работе [1] авторами также представлены результаты исследований влияния фактора асимметрии на собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток, их взаимную индуктивность и коэффициент сцепления, но вызванной различиями наружных радиусов и количеством витков обмоток «транслятора» и «приемника». Всеми авторами показано, что несоосность «транслятора» и «приемника» приводит к снижению эффективности процесса передачи энергии, что, в свою очередь, вызывает необходимость заведомо введения определенных ограничений по величине возможных смещений. Поэтому и в части обеспечения совместимости БЗУ различных конструктивных типов одним из важнейших является требование по центровке «транслятора» и «приемника».

На основании имеющихся исследовательских научных данных, стандартом ISO 19363 [9] определено, что для контуров одинаковой топологии, допустимые отклонения центров могут составлять по оси X (горизонтальная ось, совпадающая с продольной осью TC по длине и направлением движения) не более \pm 75 мм, по оси Y (горизонтальная ось, совпадающая с поперечной осью TC по ширине) не более \pm 100 мм. При этом предполагается, что данные отклонения могут неизбежно возникать при парковке TC. Магнитная совместимость обмоток различной топологии обеспечивается путем определения требований к распределению магнитного поля вокруг оптимальных точек выравнивания. Стандартом ISO 19363 также определено, что при различных топологиях контуров индуктивности «транслятора» и «приемника» между ними может существовать несколько точек центровки, располагаемых в определенных областях «толерантности» (рис. 2), расположение которых должно быть определено разработчиком БЗУ в процессе проектирования и в обязательном порядке указано им в эксплуатационной документации на устройство. Основные требования по обеспечению совместимости при этом должны обеспечиваться, в первую очередь, относительно конструкции первичного устройства («транслятора»).



Рис. 2. Примеры расположения областей центровки контуров индуктивности «транслятора» и «приемника» БЗУ, приводимые в стандарте ISO 19363: 1 – центр контура «транслятора»; 2 – область «толерантности»; 3 – направления движения TC

В любом случае, согласно требований, изложенных в стандарте ISO 19363, БЗУ должно обеспечивать эффективность (КПД) передачи мощно-

сти при нулевых отклонениях соосности «транслятора» и «приемника» не менее 85 %, а при асимметрии их позиционирования не менее 80 %.

Таким образом, видно, что вопрос обеспечения совместимости БЗУ различных классов и различных производителей является проблемой многоплановой, но требующей решения еще на этапе их разработки.

Теоретические основы создания БЗУ для транспортных средств изложены в заслуживающих наибольшего внимания работах специалистов американской Национальной лаборатории ORNL, выполняемых под курированием одного из выдающихся ученых в данном направлении John M. Miller, а также в работах исследователей независимой научно-исследовательской лаборатории «SINTEF Energy Research» (Норвегия), выполняемых под научным руководством Giuseppe Guidi – [3, 8, 10, 11, 12] и ряде других работ авторов. Из числа работ российских авторов наибольший интерес представляют результаты исследований теоретических аспектов процессов передачи энергии методом магнитнорезонансной индукции, представленные группой молодых исследователей под руководством к.т.н. доцента кафедры ЭиМТ «Национального исследовательского университета «МЭИ» Марины Аркадьевны Амелиной в публикациях [5, 7, 13] и ряде других работ специалистов кафедры.

С теоретической точки зрения, в целом любое БЗУ включает две основных функциональных составных части:

- катушечная система (так называемый «Tesla-pack»), состоящая из обмоток индуктивности первичного («транслятора») и вторичного устройства («приемника») и характеризуемая значениями параметров собственных индуктивностей (L₁, L₂) обмоток и их взаимной индуктивностью (M);
- система электроники, подключаемая к обмоткам первичного и вторичного устройства, в целом обеспечивающая требуемые параметры выходной мощности (*P*_{b,out}) и выходного напряжения (*U*_{b,out}).

Обе составные части взаимозависимы на системном уровне и могут в определенной степени компенсировать параметрические изменения друг друга.

Для обеспечения совместимости «транслятора» и «приемника» при использовании технологии передачи энергии методом бесконтактной магнитнорезонансной индукции должны одновременно обеспечиваться их магнитная и электрическая совместимости.

Магнитная совместимость обеспечивается тогда, когда поддерживается необходимый уровень магнитного потока, создаваемого первичным устройством («транслятором»), во всех диапазонах взаимных положений обмоток «транслятора» и «приемника».

Электрическая совместимость обеспечивается тогда, когда импеданс (Z_2) , как комплексное сопротивление, который формируется электроникой вторичного устройства («приемника» и нагрузки), подается на вторичную обмотку и «отражается» на импедансе первичного устройства (Z_1) , тем самым оказывая влияние на работу всего первичного устройства. При этом Z_2 должен соответствовать некоему диапазону, когда электроника «транслятора» способна под-

держивать ток (*I*₁), требуемый для поддержания номинального значения магнитного потока.

При этом, результаты ранее проведенного компьютерного моделирования, представленные авторами ранее в работе [1], подтвердили связь между взаимной индуктивностью, величиной воздушного зазора и импедансами первичного и вторичного устройства БЗУ, а также между частотной характеристикой и импедансами.

В целом, как показал анализ всех выше упомянутых работ, а также других публикаций по данному направлению, все они посвящены либо теоретическим аспектам процесса передачи энергии через воздушный зазор методом магнитно-резонансной индукции, либо разработке и представлению вариантов конкретных технических решений для создания БЗУ для транспортных средств определенных видов. Вопросами унификации и комплексной совместимости БЗУ различных классов и конструктивных конфигураций до настоящего времени никто из исследователей и разработчиков не занимался.

Однако, исходя из уже известных основополагающих теоретических аспектов представлялось возможным разработать методику обеспечения комплексной совместимости «трансляторов» и «приемников» БЗУ различных классов и топологий на основе импеданса, замеряемого на клеммах первичной и вторичной обмоток.

Цель исследования и постановка задач

Целью исследований, результаты которых представлены непосредственно в настоящей статье, являлась разработка методики и критериев оценки совместимости БЗУ различных классов, которая могла бы быть использована разработчиками при создании БЗУ для повышения уровня унификации, а также при разработке и реализации проектов создания региональных зарядных общественных инфраструктур для автономного электротранспорта.

Для создания методики унификации, с точки зрения совместимости БЗУ различных классов с учетом факторов возможной асимметрии позиционирования «транслятора» и «приемника», прежде всего, необходимо было выработать и принять концептуальный подход к рассмотрению вопроса совместимости. Этот подход должен был носить общий для всех конструктивных вариантов БЗУ характер, и не должен был бы зависеть от топологии обмоток индуктивности и/или электронной конфигурации первичного и вторичного устройства.

Для выработки концепции необходимо было провести исследования в виде факторного анализа, определить параметры и разработать функциональные зависимости для описания взаимосвязи составных частей БЗУ («транслятора» и «приемника»), их магнитной и электрической совместимости.

Методы и технологии исследований

Для решения поставленных задач использовались основные инструменты системного анализа: факторный анализ, математическое моделирование, критериальный анализ процесса передачи энергии методом магнитно-резонансной

индукции и условий комплексной совместимости «трансляторов» и «приемников» БЗУ.

Для численных расчетов магнитных параметров «Tesla-pack» БЗУ использовался программный комплекс «MATLAB toolbox Simulink».

Результаты исследований

В результате проведенных исследований для описания системы БЗУ были определены следующие параметры:

- магнитные параметры, представляемые как множество значений для каждой точки центровки: $F(x, y, z) = \{M, L_1, L_2\};$
- импеданс электроники вторичного устройства (Z₂) для всех возможных значений выходной мощности (P_{b,out}) и выходного напряжения (U_{b,out});
- импеданс электроники первичного устройства (Z₁), как функция Z₂ и магнитных параметров.

Схема концепции параметрического описания системы БЗУ представлена на рис. 3.

Исходя из условий магнитной и электрической совместимости, приведенных выше, можно предположить, что импедансы Z_1 и Z_2 могут создавать некое общее многомерное импедансное пространство и могут выступать в качестве определенного рода «компенсанта» для обеспечения условий совместимости.

Из этого следовало, что задача создания методики обеспечения совместимости может быть сведена к задаче создания математической модели нахождения параметрических характеристик этой пространственной области и установления диапазонов нормированных значений взаимной индуктивности и импедансов Z₁ и Z₂.

Далее рассмотрим справедливость этого предположения.



Рис. 3. Схема концепции параметрического описания системы БЗУ: 1 – подключение БЗУ к сети электропитания; 2 – модуль электроники первичного устройства: 2а – преобразователь, 2б – контур емкостной компенсации; 3 – «Tesla-pack» БЗУ: обмотки первичного и вторичного устройств; 4 – электроника вторичного устройства: 4а – контур емкостной компенсации, 4б – преобразователь; 5 – нагрузка

Импеданс *Z*₁ можно выразить как:

$$Z_{1} = j(\omega L_{1}) + \frac{\omega^{2} M^{2}}{j(\omega L_{2}) + Z_{2}}$$

$$\tag{1}$$

где: ω – номинально принятая частота ($\omega = 2\pi f$);

М – взаимная индуктивность первичной и вторичной обмоток;

 L_1 – собственная индуктивность первичной обмотки (обмотки «транслятоpa»);

L₂ – собственная индуктивность вторичной обмотки (обмотки бортового «приемника»).

Второе слагаемое в выражении (1) представляет собой импеданс, «отраженный» от вторичного к первичному устройству. Параметры L_1 , L_2 в основном определяются непосредственно конструктивными параметрами обмоток первичного и вторичного устройств. Значения ω определяются из условий состояния резонанса, как было описано авторами ранее в работе [14] при рассмотрении основополагающих физических принципов бесконтактной передачи энергии методом магнитно-резонансной индукции.

Значение M существенным образом зависит от взаимного положения обмоток первичного и вторичного устройства и должно определяться для каждой точки с координатами (x, y, z) трехмерного пространства, что также было описано ранее в работе [14]. Поэтому для нахождения M необходимо рассматривать все возможные варианты классов БЗУ по min/max значений координаты взаимного позиционирования обмоток «Tesla-pack» по оси Z и все возможные варианты взаимного расположения обмоток по min/max значений координат по осям X и Y с учетом допустимых смещений в соответствии с требованиями, установленными стандартом [9], а также для каждого вида топологий обмоток.

С другой стороны, известно, что магнитный поток ($\Phi_{1\to 2}$), формируемый «транслятором» и направленный в сторону «приемника», функционально взаимосвязан как с магнитными параметрами, так и с поддерживающим его первичным током (I_1) и генерируемым им индуцированным напряжением (U_{i2}):

$$\Phi_{1\to 2} = k \frac{U_{i2}}{\omega w_2} \tag{2}$$

где *k* – коэффициент условной пропорциональности (как коэффициент «толерантности» с точки зрения совместимости «транслятора» и «приемника»).

Для более универсального представления при решении задач совместимости и унификации целесообразно рассматривать удельное значение магнитного потока – значение, отнесенное к величине первичного тока (I_1), при котором первичное устройство способно поддерживать этот магнитный поток:

$$\frac{\varphi_{1\to 2}}{I_1} = M_0 w_1 \tag{3}$$

где: M_0 – удельная взаимная индуктивность, определяемая как взаимная индуктивность M деленная на количество витков первичной и вторичной обмотки (w_1 и w_2 соответственно).

Множество значений $\{M_0\}=F_{norm}(x, y, z)$, полученные расчетным путем для каждого из множества возможных сочетаний типов топологий обмоток индуктивности «транслятора» и «приемника», могут быть использованы в качестве первичного нормированного показателя для оценки магнитной совместимости ($M_{0,norm}$).

В таблице 2 приведены расчетные значения M_0 для «Tesla-pack», когда обе обмотки имеют одинаковую схему топологий, либо в сочетании различных схем топологий.

| $\frac{1}{1} \frac{1}{1} \frac{1}$ | | | | | | | | |
|--|----------|--|-------|---------|--------|--------|--|--|
| Координаты | | | | | | | | |
| позиционирования | | | | | | | | |
| (сдвига) обмотки | | Удельная взаимная индуктивность (M_0), | | | | | | |
| «приемника» | | мкГн | | | | | | |
| относительно | | | | | | | | |
| «транслятора», | | | | | | | | |
| MM | | | | | 1 | | | |
| по | по оси Х | по оси У | «D-D» | «DD-DD» | «D-DD» | «DD-D» | | |
| оси Z | | | | | | | | |
| 100 | | | 1,430 | 3,763 | 2,674 | 1,550 | | |
| 150 | | | 0,904 | 2,320 | 1,492 | 0,877 | | |
| 140 | 0 | 0 | 0,988 | 2,544 | 1,663 | 0,972 | | |
| 210 | | | 0,528 | 1,359 | 0,804 | 0,479 | | |
| 170 | | | 0,754 | 1,937 | 1,207 | 0,716 | | |
| 250 | | | 0,371 | 0,967 | 0,546 | 0,322 | | |
| | | | | | | | | |
| 100 | | | 1,177 | 3,107 | 1,633 | 0,945 | | |
| 150 | | | 0,686 | 1,792 | 1,030 | 0,599 | | |
| 140 | | | 0,758 | 1,979 | 1,123 | 0,655 | | |
| 210 | +100 | +75 | 0,392 | 1,041 | 0,625 | 0,354 | | |
| 170 | | | 0,565 | 1,481 | 0,868 | 0,502 | | |
| 250 | | | 0,277 | 0,747 | 0,452 | 0,250 | | |
| | | | | | | | | |
| 100 | | | 1,088 | 3,067 | 1,676 | 1,090 | | |
| 150 | | | 0,639 | 1,766 | 0,939 | 0,614 | | |
| 140 | | | 0,705 | 1,950 | 1,049 | 0,688 | | |
| 210 | -100 | -75 | 0,371 | 1,030 | 0,495 | 0,315 | | |
| 170 | | | 0,530 | 1,462 | 0,756 | 0,491 | | |
| 250 | | | 0,264 | 0,741 | 0,328 | 0,202 | | |

Таблица 2 – Расчетные значения $\{M_0\}=F_{norm}(x, y, z)$

Если при сопряжении «транслятора» и «приемника» $\{M\} \in \{M_{0,norm}\}$ или отклонения значений составляют не более ± 10 %, то условия магнитной совместимости выполняются.

Значения Z₂ при этом должны вычисляться не только для каждой точки в пространстве, определенной координатами x, y, z, но и для каждого значения выходного напряжения (U_{b,out}) в установленном МЭК для TC диапазоне от 280 В до 450 В внутри каждого класса БЗУ, определяемого значениями выходной мощности $P_{b,out}$.

Для дальнейшего рассмотрения теоретических аспектов «отраженного» импеданса целесообразно концептуальную схему (рис. 3), представить более детально, как показано на рис. 4.



Рис. 4. Схема формирования «отраженного» импеданса

На схеме рис. 4 показано формирование импеданса вторичного устройства «отражающегося» на первичной стороне (Z_{Refl}). При этом в общем случае импеданс вторичного устройства представляет собой комплексное сопротивление компенсационного контура и нагрузки. Так как БЗУ рассматривается с точки зрения совместимости различных вариантов устройств, то условно импеданс вторичного устройства представим в виде двух составляющих, как показано на рис. 4:

- составляющей реального импеданса, принятого за исходное «эталонное» устройство – $\operatorname{Re}(Z_2)$;
- «мнимой» составляющей Im(Z₂), получаемой расчетным путем, необходимой для определения некой допустимой области значений импеданса, когда попадающие в нее значения Z₂ будут соответствовать условию совместимости с базовым первичным устройством.

При этом базовое первичное устройство условно можно представить, как некое «тестовое» устройство (на схеме обозначено как «DUT»), относительно которого вторичные устройства, установленные на ТС, должны обладать свойством совместимости. Соответственно импеданс Z₁, как показано на рис. 4, также будет включать две составляющие: собственный импеданс и Z_{Refl}.

Тогда Z₂ (как сопротивление, замеряемое на клеммах вторичной обмотки) можно представить, как:

$$Z_2 = \operatorname{Re}(Z_2) + j \operatorname{Im}(Z_2) \tag{4}$$

где: $\operatorname{Re}(Z_2)$ – реальная составляющая импеданса Z_2 ;

 $Im(Z_2)$ – «мнимая» составляющая импеданса Z_2 .

Выражение (1) можно представить, как:

$$Z_1 = jR_1 w_1^2 + Z_{\text{Refl}}, (5)$$

где: $R_1 = \omega L_1$ – реактивное сопротивление первичной обмотки, а «отраженный» импеданс будет равен:

$$Z_{\text{Refl}} = \frac{\omega^2 M_0^2 w_1^2 w_2^2}{jR_2 w_2^2 + \text{Re}(Z_2) + j \text{Im}(Z_2)} = \frac{\omega^2 M_0^2 w_1^2 w_2^2}{\text{Re}(Z_2) \left\{ 1 + j \frac{\text{Im}(Z_2) + R_2 w_2^2}{\text{Re}(Z_2)} \right\}},$$
(6)

где: $R_2 = \omega L_2$ – реактивное сопротивление вторичной обмотки;

*w*₁ и *w*₂ – количество витков первичной и вторичной обмотки соответственно;

 M_0 – удельная взаимная индуктивность, определяемая как взаимная индуктивность M деленная на количество витков w_1 и w_2 .

Если в выражении (6) принять, что:

$$\Delta = \frac{\text{Im}(Z_2) + R_2 w_2^2}{\text{Re}(Z_2)},$$
(7)

тогда выражение (6) будет иметь вид:

$$Z_{\text{Refl}} = \frac{\omega^2 M_0^2 w_1^2 w_2^2}{\text{Re}(Z_2)} \left[\frac{1}{(1+j\Delta)} \right] =$$
$$= \frac{\omega^2 M_0^2 w_1^2 w_2^2}{\text{Re}(Z_2)(1+\Delta^2)} (1-j\Delta)$$
(8)

Разделяя реальную и «мнимую» составляющие импеданса, получим:

$$\operatorname{Re}(Z_{\operatorname{Refl}}) = \frac{\omega^2 M_0^2 w_1^2 w_2^2}{\operatorname{Re}(Z_2)(1 + \Delta^2)}$$
(9)

$$Im(Z_{Refl}) = -\Delta \operatorname{Re}(Z_{Refl})$$
(10)

$$\left|Z_{\text{Refl}}\right| = \text{Re}(Z_{\text{Refl}})\sqrt{1 + \Delta^2}$$
(11)

$$\varphi(Z_{\text{Refl}}) = \operatorname{arctg}(-\Delta) \tag{12}$$

На рис. 5 представлен пример диаграммы совместимости как функция взаимозависимости $Im(Z_{Refl})$ и $Re(Z_{Refl})$, которую можно построить на основании выше приведенной математической модели.

На диаграмме (рис. 5) показано, что при условии, когда Δ =0, значение Z_{Refl} =А, что соответствует варианту, когда вторичная сторона полностью компенсирована, что является самым оптимальным вариантом с точки зрения совместимости устройств. При А>0 зона совместимости расширяется в сторону верхней допустимой границы, при A<0 зона совместимости сужается в сторону нижней допустимой границы.



Рис. 5. Диаграмма совместимости

Если установлены нормированные значения M_0 , то можно установить нормированные значения импедансов $Z_{\text{Refl,norm}}$ и $Z_{2,\text{norm}}$:

$$Z_{\text{Refl,norm}} = \frac{Z_{\text{Refl}}}{w_1^2} \tag{13}$$

$$Z_{2,\text{norm}} = \frac{Z_2}{w_2^2}$$
(14)

ИЛИ

$$Z_{\text{Refl,norm}} = \frac{\omega^2 M_0^2}{\text{Re}(Z_{2,\text{norm}})} \left[\frac{1}{(1+j\Delta)} \right] =$$

$$=\frac{\omega^2 M_0^2}{\operatorname{Re}(Z_{2,\text{norm}})(1+\Delta^2)} [(1-j\Delta)]$$
(15)

Имея значения нормированных импедансов, можно вычислить реальные значения первичной и вторичной мощности:

$$P_1 = \left| I_1 w_1 \right|^2 \operatorname{Re}(Z_{\operatorname{Refl,norm}})$$
(16)

$$P_{2} = \left| I_{2} w_{2} \right|^{2} \operatorname{Re}(Z_{2,\text{norm}})$$
(17)

и представить их взаимосвязь:

$$P_{1} = P_{2} \div \frac{|I_{1}w_{1}|}{|I_{2}w_{2}|} = \sqrt{\frac{\text{Re}(Z_{2,\text{norm}})}{\text{Re}(Z_{\text{Refl,norm}})}}$$
(18)

а также определить индуцированное напряжение на один оборот вторичной обмотки в зависимости от значений параметров вторичного тока и импеданса:

$$\frac{\left|I_{1}w_{1}\right|}{\left|I_{2}w_{2}\right|} = \frac{\operatorname{Re}(Z_{2,\operatorname{norm}})}{\omega M_{0}}\sqrt{(1+\Delta^{2})}$$
(19)

и описать зависимость между P_2 от тока I_1 и I_2 как:

$$|I_1 w_1| |I_2 w_2| = \frac{\sqrt{(1 + \Delta^2)}}{\omega M_0} P_2.$$
(20)

Таким образом, мы получаем математическую модель, описывающую взаимодействие «транслятора» и «приемника» БЗУ с помощью двух основных параметров нормированной удельной индуктивности ($M_{0,norm}$) и нормированного импеданса ($Z_{Refl,norm}$). При этом данная модель является практически «свободной» от структуры принципиальных электрических схем модулей электроники сопрягаемых устройств «транслятора» и «приемника», а также от детальных конструктивных особенностей компонентов «Tesla-pack». При этом значения параметров M, Z_1 , Z_2 и Z_{Refl} при сопряжении реальных устройств могут быть получены не только расчетным путем, но и проверены путем фактических замеров с использованием стандартных средств измерений с последующим сопоставлением с нормированными диапазонами.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана универсальная методика для анализа и комплексной оценки совместимости различных классов БЗУ с «Tesla-pack» различной конструктивной конфигурации, что является основной научной новизной.

При разработке методики исходно было показано, что:

- для обеспечения совместимости БЗУ должны одновременно выполняться условия магнитной и электрической совместимости их первичных («трансляторов») и вторичных («приемников») устройств;
- в процессе передачи энергии (когда катушки индуктивности «транслятора» и «приемника» взаимосвязаны потоком магнитной индукции)

импеданс «транслятора» складывается из его собственных реактивных сопротивлений и рефлектирующего («отражаемого») импеданса вторичного устройства (представляющего собой комплексное сопротивление «приемника» и «нагрузки»).

Научная новизна самой разработанной методики заключается в том, что:

- анализ и комплексная оценка совместимости БЗУ различных классов и конструктивных типов осуществляется путем последовательного анализа и оценки магнитной и электрической совместимости первичных («трансляторов») и вторичных («приемников») устройств – значения магнитных параметров, получаемых в результате оценки магнитной совместимости, используются в качестве исходных данных для определения электрических параметров БЗУ;
- 2) в качестве основного критериального параметра комплексной совместимости принят рефлектирующий импеданс (Z_{Refl}) – импеданс вторичного устройства как комплексный импеданс «приемника» и «нагрузки», «отраженный» на стороне «транслятора», являющийся одновременно функцией электрических и магнитных параметров БЗУ;
- оценка совместимости «транслятора» и «приемника» БЗУ осуществляется путем сопоставления фактических показателей Z_{Refl} с нормированными расчетными значениями (Z_{Refl,norm}) условие совместимости выполняется, если Z_{Refl} ∈ {Z_{Refl,norm}};
- 4) значения Z_{Refl,norm} устанавливается (вычисляется) в рамках граничных условий, определяемых исходя из того, что БЗУ должно обеспечить требуемые для зарядки транспортного средства диапазоны значений выходной мощности и выходного напряжения с уровнем показателя эффективности (КПД) не ниже установленного требованиями международной нормативной документации, что, в свою очередь, будет выполняться тогда, когда «транслятор» будет способен поддерживать ток в диапазоне, необходимом для поддержания требуемого уровня магнитного потока в «Tesla-pack»;
- 5) импеданс вторичного устройства (следовательно, и рефлектирующий импеданс Z_{Refl}) представляются в виде двух составляющих:
 - реальной составляющей (Re) показателя импеданса, определяемого для реального базового БЗУ;
 - мнимой составляющей (Im) показателя импеданса, получаемого расчетным путем, значение которого служит для определения возможности расширения границ некой допустимой области значений, когда вторичное устройство («приемник») совместимо с базовым «транслятором»;
- 6) по соотношению значений Re(Z_{Refl}) и Im(Z_{Refl}) осуществляется оценка степени совместимости «транслятора» и «приемника» БЗУ по уровню приближения к верхней или нижней границам допустимой области значений Z_{Refl};
- 7) в качестве критериального параметра магнитной совместимости (для более универсального представления процесса) дополнительно введен

в состав магнитных параметров БЗУ расчетный показатель – удельная взаимная индуктивность (M_0), определяемый как отношение взаимной индуктивности к количеству витков первичной и вторичной обмоток «Tesla-pack» для различных конструктивных исполнений «Tesla-pack» БЗУ соответствующего класса в зависимости от величины и ориентации смещений первичной и вторичной обмоток индуктивности относительно друг друга;

8) оценка магнитной совместимости «транслятора» и «приемника» БЗУ осуществляется путем сопоставления фактического значения M₀ с ее нормируемыми показателями M_{0,norm} – условие магнитной совместимости выполняется, если M₀∈ {M_{0,norm}}, когда допустимая трехмерная область {M_{0,norm}} находится внутри границ их значений, рассчитанных для минимальных и максимальных значений допустимых смещений первичной и вторичной обмоток относительно трех осей декартовой системы координат.

В качестве инструмента реализации методики разработана универсальная математическая модель (также являющаяся элементом новизны), описывающая процесс взаимодействия «транслятора» и «приемника» в виде функциональной алгебраической зависимости Z_{Refl} и $Z_{\text{Refl,norm}}$ от импеданса вторичного устройства и магнитных параметров БЗУ, а также ее графическое представление в виде «Диаграммы совместимости».

В разработанной математической модели для описания системы БЗУ используются следующие основные параметрические характеристики:

 магнитные параметры, представляемые как множество значений, определяемых для каждой точки центровки «транслятора» и «приемника» в пространственной области магнитного поля между ними: F(x, y, z)={M, L₁, L₂};

2) электрические параметры:

- импеданс электроники вторичного устройства (Z_2) для всех возможных значений выходной мощности ($P_{b,out}$) и выходного напряжения ($U_{b,out}$);
- импеданс электроники первичного устройства (Z₁), как функция Z₂ и магнитных параметров,

а также дополнительно введенные критериальные параметрические характеристики: удельная взаимная индуктивность (M_0) и рефлектирующий импеданс «приемника» на стороне «транслятора» (Z_{Refl}).

Кроме того, в процессе исследований выполнены расчеты и получены расчетные значения удельной взаимной индуктивности (M_0) для БЗУ классов Z1–Z3 в четырех вариантах исполнения «Tesla-pack» по топологии первичной и вторичной обмоток индуктивности: «D-D», «DD-DD», «DD-DD», «DD-D», диа-пазоны которых от «min» до «max» могут быть приняты в качестве множества $\{M_{0,norm}\}$.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что разработанная методика уже на этапе создания БЗУ теоретически и при необходимости экспериментально (с использованием стандартных средств из-

мерений) позволяет оценивать уровень унификации устройства в части совместимости его «транслятора» с множеством возможных вариантов «приемников», а также осуществлять оценку совместимости любого базового «транслятора» с «приемниками» ранее разработанных БЗУ либо расчетным путем (при наличии данных об основных технических характеристиках в сопроводительной эксплуатационной документации), либо экспериментально путем лабораторного тестирования (при отсутствии выше указанных данных), не имея детальной технической информации о его конструктивных особенностях.

Анализ и оценка совместимости поставляемых на рынок БЗУ различных классов и конструктивных конфигураций различных разработчиков и производителей с использованием созданной в рамках проведенных исследований методики позволяет при создании региональных общественных зарядных инфраструктур осуществлять их селективный отбор на предмет соответствия общесистемным инфраструктурным требованиям с учетом возможности применения для различных по виду и оснащенности автономных электроприводных TC.

В дальнейшем, на основе уже полученных результатов, является целесообразным и планируется автором реализация работ:

- по созданию специального стенда (аппаратно-программного комплекса) для тестирования различных типов БЗУ;
- по расширению массива данных о значениях {*M*_{0,norm}}, путем выполнения дополнительных расчетов для других более мощных классов БЗУ и конфигураций «Tesla-pack».

Литература

1. 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 (in Russian).

2. IEC 61980-1:2020 International Standard. Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2020-11. Geneva: IEC, 2020. 88 p.

3. Miller J., Chinthavali M., Onar O. Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging // IEEE. Journal of Emerging and Selected Topcs in Power Electronics. 2015. Vol. 3. № 1. P. 147-162.

4. Орхиментко В. Технология беспроводной подзарядки, часть 2 // Электронные компоненты и системы. 2014. № 12 (208). С. 11-19. – URL: http://www.ekis.kiev.ua/contents.php?common=208 (дата обращения 03.12.2020).

5. Амелина М. А., Амелин А. С., Поляков М. В. Исследование магнито-резонансной эффективности системы беспроводной передачи Информатика, энергии // Энергетика, Инновации: сборник трудов VI Международной научно-технической конференции. Том 2. – Смоленск: Универсум, 2016. – С. 16-20.

6. Kurs A., Moffatt R., Soljacic M. Simultaneous Mid-range Power Transfer to Multiple Devices // Applied Physics Letters. 2010. № 96.4. P. 044102. – URL:

https://dspace.mit.edu>openaccess-disseminate/1721.1/76681 (дата обращения 02.11.2020).

7. Амелина М. А., Амелин А. С., Поляков М. В. Исследование параметров системы беспроводной передачи энергии // Энергетика, Информатика, Инновации: сборник трудов VI Международной научно-технической конференции. Том 2. – Смоленск: Универсум, 2016. – С. 11-16.

8. Miller J., Daga A., Long B., Schrafel P. Wireless Power Transfer: A Developers Guide // IEEE. Conference on applied power electronics. Industry Session. Presentation of the report. Tampa, FL, 2017. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.psma.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-transportation-power-electronics/presentations/is112-wireless-power-transfer-developers-guide.pdf (дата обращения 18.11.2020).

9. 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: ISO, 2020. 46 p.

10. Daga A., Miller J., Long B., Kacergis R. Electric Fuel Pumps for Wireless Power Transfer – Enabling the Rapid Growth in the Electric Vehicle Market // IEEE. Power Electronics Magazine. 2017. Vol. 4. No 2. P. 24-35.

11. Guidi G., Suul J. Minimizing Converter Requirements of Inductive Power Transfer Systems with Constant Voltage Load and Variable Coupling Conditions // IEEE. Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. № 1. P. 6835-6844.

12. Guidi G., Suul J. Transient Control of Dynamic Inductive EV Charging and Impact on Energy Efficiency when Passing a Roadside Coil Section // IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies Wireless Power Transfer (Wow). 2018. 1-7 p. DOI: 10.1109/WoW.2018.8450893.

13. Амелин А. С., Амелина М. А. Исследование системы беспроводной передатчиком передачи энергии с однотактным резонансным Интеллектуальные информационные технологии, энергетика и экономика: VIX сборник трудов Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. - Смоленск: ООО "Принт-Экспресс", 2017. - С. 105-108.

14. Куркова О. П., Ефимов В. В. Система on-line мониторинга эффективности использования мощности гребного электродвигателя при эксплуатации судов в ледовых условиях // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 31-53. – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/03-Kurkova.pdf (дата обращения 10.11.2020).

References

1. 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 (in Russian).

2. IEC 61980-1:2020 International Standard. Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems. Part 1: General requirements. Edition 1.0 2015-07. Geneva, IEC, 2015. 88 p.

3. Miller J., Chinthavali M., Onar O. Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging. *IEEE. Journal of Emerging and Selected Topcs in Power Electronics*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 147-162.

4. Orkhimento V. The technology of wireless charging, part 2. *Electronic components and systems*, 2014, no. 12 (208), pp. 11-19. Available at: http://www.ekis.kiev.ua/contents.php?common=208 (accessed 03 December 2020) (in Russian).

5. Amelina M.A., Amelin A.S., Polyakov M.V. Investigation of the efficiency of a magnetic resonance system for wireless energy transmission. *Energy, Informatics, Innovations: proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference*, vol. 2. Smolensk, Universum, 2016, pp. 16-20. (in Russian)

6. Kurs A., Moffatt R., Soljacic M. Simultaneous Mid-range Power Transfer to Multiple Devices. *Applied Physics Letters*, 2010, no. 96.4, P. 044102. – URL: https://dspace.mit.edu>openaccess-disseminate/1721.1/76681 (accessed 02 November 2020).

7. Amelina M.A., Amelin A.S., Polyakov M.V. Investigation of the parameters of the wireless power transmission system. *Energy, Informatics, Innovations: proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference*, vol. 2. Smolensk, Universum, 2016, pp. 11-16 (in Russian).

8. Miller J., Daga A., Long B., Schrafel P. Wireless Power Transfer: A Developers Guide. *IEEE. Conference on applied power electronics. Industry Session. Presentation of the report,* Tampa, FL, 2017. Available at: https://www.psma.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-transportation-power-electronics/presentations/is112-wireless-power-transfer-developers-guide.pdf (accessed 18 November 2020).

9. 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, ISO, 2020, 46 p.

10. Daga A., Miller J., Long B., Kacergis R. Electric Fuel Pumps for Wireless Power Transfer – Enabling the Rapid Growth in the Electric Vehicle Market. *IEEE*. *Power Electronics Magazine*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 24-35.

11. Guidi G., Suul J. Minimizing Converter Requirements of Inductive Power Transfer Systems with Constant Voltage Load and Variable Coupling Conditions. *IEEE. Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 6835-6844.

12. Guidi G., Suul J. Transient Control of Dynamic Inductive EV Charging and Impact on Energy Efficiency when Passing a Roadside Coil Section. *IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies Wireless Power Transfer (Wow)*, 2018, 1-7 p. doi: 10.1109/WoW.2018.8450893.

13. Amelin A.S., Amelina M.A. Investigation of a wireless power transmission system with a single-cycle resonant transmitter. *Intellectual Information Technologies, Energy and Economics: proceedings of the VIX International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates*. Smolensk, «Print-Express, LLC», 2017, pp. 105-108 (in Russian).

14. Kurkova O.P., Efimov V.V. On-line Monitoring System Power Efficiency of a Propulsion Motor when Operating Ships in Ice Conditions. *Systems of Control*,

Communication and Security, 2018, no. 3, pp. 31-53. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/03-Kurkova.pdf (accessed 10 November 2020) (in Russian).

Статья поступила 18 января 2021 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, исследование физики магнитных полей, процессов дистанционной передачи электрической мощности без проводов, других процессов на основе формирования и распространения магнитных и волновых взаимодействий. Е-mail: aljaskaolga@mail.ru

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

Methodology for assessing the compatibility of contactless chargers supplied by various manufacturers to create a public charging infrastructure for autonomous electric vehicles

O. P. Kurkova

Problem statement and specific task: With the obvious expansion of the global market segment of contactless chargers for autonomous electric vehicles observed in recent years, when forming regional charging infrastructure projects based on them, the problem of ensuring the compatibility of devices of various developers and manufacturers has become acute, and as a result, the problem of the need to unify the equipment complexes created and supplied to the market. The aim of the research was to develop a methodology and criteria for evaluating the compatibility of contactless chargers of various classes and design configurations. Methods and technologies used: to solve the set tasks, the main tools of system analysis were used: factor analysis, mathematical modeling, criteria analysis of the process of energy transfer by the method of magnetic resonance induction and the compatibility conditions of "Translators" and "Receivers" of chargers. For numerical calculations of the magnetic parameters of the devices, the «MATLAB toolbox Simulink» software package was used. The novelty of the result: The main novelty of the research result is the creation of a universal methodology for analyzing and comprehensively evaluating the compatibility of various classes of contactless chargers with the "Tesla-pack" of various configurations. The scientific novelty of the method is that: the analysis and evaluation is carried out by sequential analysis and evaluation of the magnetic and electrical compatibility of the "Translators" and "Receivers" of devices, and the total impedance of the "Receiver" and "Load", reflecting on the side of the "Translator", is accepted as the main criterion. The compatibility assessment is carried out by comparing its actual values with the normalized design indicators set within the boundary conditions determined on the basis that the charger must provide the required ranges of output power and voltage values for charging the vehicle. As a tool for implementing the technique, a universal mathematical model is developed that describes the process of interaction between the "Translator" and the "Receiver" in the form of a functional algebraic dependence of the reflecting impedance on the impedance of the secondary device and the magnetic parameters of the charger. Practical significance: the developed method, when used, does not require detailed initial data on the structure of the basic electrical circuits of the electronics modules and the design features of the inductance windings of the analyzed devices. The methodology and results of calculations performed for the four main configurations of "Tesla-pack" devices can be used in the design of new devices in order to increase the level of their unification, as well as for testing the chargers supplied to the market by various developers and manufacturers for compatibility.

Key words: electric autonomous vehicle, charging infrastructure, contactless charger, magnetic resonance induction, mutual induction, impedance, power, voltage, current, mathematical model, compatibility

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". Field of research: system analysis and modeling of complex technical systems and processes, research of the physics of magnetic fields, processes of remote transmission of electric power without wires, and other processes based on the formation and propagation of magnetic and wave interactions. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

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