УДК 621.31

Численное компьютерное моделирование и оптимизация схемотехнических решений бесконтактных зарядных устройств для электроприводных транспортных средств

Куркова О. П., Ефимов В. В.

Постановка проблемы и частной задачи: Создание новых моделей и расширение использования батарейного электротранспорта является наиболее интенсивно развивающимся в настоящее время 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 ТС пока ограничивается все еще неразвитой инфраструктурой зарядных станиий (3С). Создание инфраструктуры 3С является одной из стратегических задач развития российского транспорта. Наиболее перспективной технологией зарядки электроприводных ТС является технология беспроводной бесконтактной зарядки. Главными преимуществами данной технологии являются универсальность относительно различных видов и марок ТС, безопасность и комфортность, энергоэффективность. Однако для обеспечения технологии быстрой бесконтактной зарядки ТС необходимо создание зарядных устройств высокой мощности от нескольких десятков до нескольких сотен кВт. Бесконтактные зарядные устройства (БЗУ) высокой мощности могут быть созданы на основе использования принципов передачи энергии методом магнитнорезонансной индукции. Однако создание таких БЗУ связано с целым рядом научно-технических вопросов, теоретические основы для решения которых еще недостаточно исследованы и определены в настоящее время. Целью работы являлось численное компьютерное моделирование и оценка эффективности различных вариантов схемотехнических решений создания БЗУ, выявление закономерностей влияния на их эффективность тех или иных факторов, выбор наиболее оптимального решения для создания БЗУ высокой мощности. Используемые методы и технологии: для решения задач численного компьютерного моделирования и схемотехнического анализа использовалось программное обеспечение «MATLAB toolbox Simulink» с библиотекой блоков «SimPowerSystems», включающие библиотеку компонентов для моделирования и симуляции электроэнергетических систем и инструменты для их анализа. Новизна: элементами новизны являются результаты моделирования, анализа и оценки эффективности четырех возможных схемотехнических решений БЗУ; выявленные закономерностей влияния на эффективность БЗУ, за основу конструкции которых приняты те или иные схемотехнические модели, таких факторов как: уровень частотного диапазона, емкость конденсаторов, величина расстояния между первичной и вторичной обмотками индуктивности, асимметрия геометрии и взаимного расположения обмоток; разработка методики укрупненного расчета ориентировочных значений выходных параметров для каждого варианта схемотехнических решений. Практическая значимость: использованные в процессе исследований модели могут быть использованы в качестве исходных прототипов при разработке БЗУ различного назначения с конкретными требованиями, сократить трудоемкость разработки и испытаний опытных образиов.

Ключевые слова: электроприводное транспортное средство, зарядная инфраструктура, бесконтактное зарядное устройство, магнитно-резонансная индукция, самоиндукция, взаимная

Библиографическая ссылка на статью:

Reference for citation:

URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/05-Kurkova.pdf

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.

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).

индукция, коэффициент сцепления, напряжение, ток, частота, мощность, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, моделирование, схемотехническое решение.

Введение

Создание новых моделей и расширение использования батарейного электротранспорта является наиболее интенсивно развивающимся в настоящее время направлением развития инфраструктуры общественного, корпоративного и личного транспорта: как в мире, так и в России. Все большее применение находят и электроприводные транспортные средства (TC) специального назначения для решения задач в гражданской и оборонной сферах: электроприводная уборочная техника для задач жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), ТС для решения локальных транспортно-логистических задач на предприятиях промышленности (электрокары, самоходные электрические платформы и тележки); передвижные транспортно-роботизированные комплексы и т.д. Наряду с поставками на российский рынок электроприводных ТС зарубежных производителей (Tesla, Volvo, Nissan, Toyota, BMW, Hyundai и др.), активно ведутся работы по расширению собственного российского модельного ряда, освоению и расширению производства различных видов электроприводных ТС: городских электробусов предприятиями КамАЗ, ЛиАЗ, Volgabus, ГАЗ; малотоннажных грузопассажирских фургонов и мини-бусов типа «Next electro» компанией СпецАвтоИнжиниринг; электромобилей «LADA Ellada» АвтоВАЗом; электромобилей (типа «Иж CV-1»), электромотоциклов (типа «Urban Moto-UM-1» и «SM-1»), электробагги (типа «UV-4» и «OV-2») концерном «Калашников»; ТС специального назначения Сарапульским электрогенераторным заводом, Камышинским Машиностроительным заводом и рядом других российских предприятий. Несмотря на более высокую стоимость электроприводных ТС, все они обладают неоспоримыми преимуществами по отношению к ТС на углеводородных энергоносителях. Преимуществами электроприводных ТС являются не только экологичность, бесшумность, простота и легкость управления, но и экономичность при эксплуатации ввиду значительно более низких затрат на топливо и техническое обслуживание, что позволяет владельцу ТС довольно-таки быстро окупить свои первоначальные вложения. Благодаря этому, по прогнозам аналитического агентства «АВТОСТАТ», российский парк электромобилей уже к 2020 году может достичь 200 тысяч единиц. Однако потребительская привлекательность электроприводных ТС пока ограничивается все еще неразвитой инфраструктурой зарядных станций (ЗС).

Анализ состояния вопроса

Для создания зарядной инфраструктуры на сегодня разработано несколько вариантов технологий зарядки TC, каждой из которых присущи свои достоинства и недостатки. Наиболее освоенными и применяемыми являются «контактные» технологии зарядки: прежде всего, технология, основанная на кабельной передаче электроэнергии – технология «plug-in». Технология зарядки, основанная на передаче электроэнергии через токоприемник менее популярна, но также находит свое применение, в основном для зарядки/подзарядки городских электробусов на маршрутах движения. Особый интерес во всем мире в последние пять – десять лет вызывает, так называемая, технология беспроводной бесконтактной зарядки TC. Физическую основу технологии бесконтактной зарядки составляет способ трансляции электроэнергии через воздушный зазор между двумя катушками индуктивности – между «транслятором» и «приемником».

Возможность дистанционной беспроводной трансляции электроэнергии через воздушный («немагнитный») зазор между двумя катушками индуктивности доказана еще Майклом Фарадеем и Николой Тесла в конце XIX века. В настоящее время бесконтактные беспроводные зарядные устройства (БЗУ) для гаджетов в различном конструктивном исполнении, основанные на явлении взаимоиндукции (поддерживающие технологию стандарта «Qi»), уже перестают быть экзотикой. Стандарт Qi предполагает две разновидности зарядки: зарядку низкой мощности – до 5 Вт (наиболее распространенная) и высокой мощности – до 120 Вт, создающих силу тока 1 А – 2 А. Все эти БЗУ используют неионизирующие частотные диапазоны и не оказывают вредного физиологического воздействия на человека. Главное преимущество БЗУ, по отношению к традиционным проводным зарядным устройствам – это их универсальность относительно различных моделей гаджетов ввиду отсутствия необходимости использования соответствующих разъемов-соединителей. Некоторые конструктивные исполнения БЗУ позволяют осуществлять одновременную зарядку двух и более гаджетов. Время зарядки соизмеримо или немного больше, чем при использовании традиционной проводной технологии. Но БЗУ стандарта Qi способны осуществлять трансляцию электроэнергии только тогда, когда зазор между объектом зарядки и зарядным устройством составляет не более 3 см -5 см. Эффективность существующих на сегодня БЗУ по стандарту Qi может составлять от 75 % до 95 % и опять же, в зависимости от конструктивного исполнения, в той или иной степени обеспечивающего компенсацию «рассеивания» мощности. Однако БЗУ с диапазоном мощности от 5 Вт до 120 Вт не пригодны для зарядки ТС. Для зарядки ТС в зависимости от его вида необходима мощность от нескольких единиц до нескольких сотен киловатт. Одним из вариантов решения задачи достижения возможности трансляции энергии киловаттных диапазонов мощности на большие расстояния (в частности, соответствующие клиренсу ТС) может являться построение принципиальной структурнофункциональной схемы БЗУ на основе технологии бесконтактной передачи энергии методом магнитно-резонансной индукции. Использование резонанса при увеличении расстояния между «транслятором» и «приемником» (первичной и вторичной обмотками индуктивности) обеспечивает возможность поддержания магнитной связи между ними, уменьшения рассеивания энергии, а при увеличении уровня частотного диапазона – поддержания наведенного напряжения на вторичной обмотке без необходимости значительного увеличения тока на первичной обмотке. Ключевой вопрос создания структурнофункциональной схемы такого БЗУ заключается в достижении максимально возможного уровня эффективности системы в целом.

Теоретические основы явления магнитно-резонансной индукции впервые были исследованы в 2005 – 2007 годах в Массачусетском технологическом ин-

ституте (США). В настоящее время во многих зарубежных странах различные компании-разработчики ведут активное освоение технологии бесконтактной передачи энергии методом магнитно-резонансной индукции применительно к созданию на ее основе зарядной инфраструктуры для ТС как в статическом, так динамическом исполнении (для зарядки TC непосредственно в процессе движения). Активное участие в этом процессе принимают и сами предприятияавтопроизводители. Их участие в основном сводится к адаптации производимых моделей ТС к технологии бесконтактной зарядке. В качестве лидеров в этом направлении можно назвать, прежде всего, американские компании: «Evatran, LLC», созданное в 2009 году и уже наладившее серийный выпуск и предлагающего на мировом рынке семейство бесконтактных БЗУ «Plugless Power» («GEN 1 SYSTEM» – 3,2 кВт и «GEN 2 SYSTEM» – 7,2 кВт), и «Momentum Dynamics Corporation», созданную в 2012 году и предлагающую бесконтактные зарядные устройства мощностью 50 кВт, 75 кВт и 200 кВт и имеющую в своем «портфеле» уже целый ряд реализованных проектов на их базе. «WiTricity Corporation» (США), основанной в 2007 году и работающей только на основе лицензионных соглашений с автопроизводителями, созданы проекты БЗУ 3,6 кВт, 7,7 кВт и 11 кВт. БЗУ для ТС, предлагаемые указанными выше компаниями, обладают эффективностью до 95 %. Деятельность той и другой компании в научном плане курируется специалистами национальной лаборатории Министерства энергетики США – Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Разработки, представляемые другими американскими, азиатскими и европейскими компаниями, работающими в этом направлении, носят пока характер экспериментальных или опытных образцов и обладают более низкими потребительскими качествами. Однако уже в 2017 году SAE (Society of Automotive Engineers) разработан и принят к руководству стандарт SAE TIR J2954 «Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In / Electric Vehicles and Alignment Methodology», определяющий основные требования к БЗУ для ТС (требования по уровням мощности – пока до 22 кВт, допустимым диапазонам частот – до 90 кГцит.д.).

Первый опыт эксплуатации БЗУ для ТС показал их неоспоримую привлекательность по сравнению с «контактными» зарядными станциями как для владельцев ТС и автопроизводителей, так и для владельцев сетей зарядных терминалов и распределительных сетевых энергетических компаний. Привлекательность БЗУ для владельцев ТС заключается в повышения уровней безопасности и комфортности процесса зарядки при любых погодных условиях. Владельцев сетей зарядных терминалов привлекает отсутствие необходимости использования специальных земельных участков или производственных площадей для размещения комплексов зарядного оборудования, возможность снижения эксплуатационных расходов на содержание зарядных устройств (сокращения расходов на техническое обслуживание и ремонт) и увеличения выручки от реализации услуг. Распределительные энергетические компании во внедрении БЗУ видят один из вариантов решения задачи энергосбережения, благодаря возможности создания на их основе распределенной зарядной инфраструктуры для городского общественного транспорта, а, следовательно, снижения пиковых

нагрузок, что неизбежно при использовании даже технологии кабельной ночной зарядки автобусов в автопарках. При этом БЗУ по сравнению с традиционными «контактными» зарядными станциями оказывают меньшее влияние на централизованные сети электроснабжения в части генерации возможных гармонических искажений. Автопроизводителей (особенно производителей электробусов и таксомоторов), кроме вышеуказанных преимуществ, что в сумме увеличивает популярность электрических ТС и создает предпосылки для увеличения объемов их реализации, также привлекает возможность перехода от технологий зарядки в депо на технологию быстрой подзарядки ТС на маршрутах движения (на промежуточных и конечных остановках, на парковках). При этом конструктивная адаптация ТС под технологию бесконтактной зарядки создает возможность для значительного сокращения необходимого количества бортовых аккумуляторных батарей (АБ) и тем самым возможность снижения массы и увеличения пассажировместимости ТС. Кроме этого автоматические БЗУ расширяют потенциальные возможности для создания ТС будущего – беспилотных электроприводных ТС, как практически единственный оптимальный вариант технологии их подзарядки. Однако российских аналогов БЗУ с аналогичными техническими характеристиками на сегодняшний день на рынке не представлено. Имеющиеся результаты российских разработок по созданию БЗУ различного назначения ограничиваются пока уровнями мощности до 500 Вт.

По результатам анализа публикаций, представленных российскими специалистами, как представляющие наибольший теоретический и практический интерес, можно отметить работы авторов Лепетаев А.Н. в соавторстве с Клыпиным Д.Н. [1] и Горского О.В. [2], посвященные созданию и моделированию БЗУ для подзарядки литий-ионных АБ имплантируемых в тело человека по медицинским показаниям электронных устройств, в частности кардиостимуляторов. Однако устройства данного типа оснащаются АБ емкостью порядка всего 0,5 А ч, требующими подзарядки один раз в один или даже в два года. Для их подзарядки достаточно БЗУ с передаваемой мощностью от 2,5 Вт до 5 Вт. При этом расстояние между обмотками «транслятора» и «приемника» может составлять не более 40 мм. Поэтому вышеназванными авторами путем компьютерного моделирования электромагнитных полей с использованием программного обеспечения «FlexPDE» показана возможность создания БЗУ для подкожных и внутримышечных имплантатов на основе индукционного, а не магнитнорезонансного метода передачи энергии.

Работы Герасимова В.А. и Филоженко А.Ю. в соавторстве с другими специалистами, посвященные созданию БЗУ для подводных, в том числе роботизированных, объектов [3], [4], [5], также представляют неоспоримый интерес, так как именно этими отечественными исследователями показана возможность создания БЗУ, обеспечивающих передачу мощности уже до 500 кВт. Группа этих специалистов в предлагаемых ими БЗУ используют метод именно магнитно-резонансной индукции. Однако авторы в своей работе [5], посвященной исследованиям параметрических характеристик БЗУ путем построения его математической модели с использованием программного обеспечения «Micro-Cap», моделируют устройство лишь исходя из одного принятого ими схемотехнического решения резонансной компенсации, а именно решения, построенного по «последовательно-параллельной» схеме. Результатом принятия авторами такого ограниченного методического подхода к решению задачи создания БЗУ для подводных роботизированных объектов, в свою очередь, приводит авторов к получению ограниченных эксплуатационных характеристик создаваемого устройства: как по уровню передаваемой мощности (500 Вт), так и по уровню допустимого расстояния между «транслятором» и «приемником» энергии (порядка 8 мм – 10 мм).

Представленная авторами настоящей статьи в своей предыдущей работе система измерения крутящего момента судового гребного вала [6], также включала в своем составе подробно описанное устройство бесконтактного on-line электропитания тензорезистивных сенсоров, основанное на методе магнитнорезонансной индукции. Конструкция устройства была рассчитана на возможность бесконтактной передачи электроэнергии на уровне не более 50 Вт, что было достаточно, исходя из поставленной задачи. При этом оригинальностью конструкции устройство являлось то, что она была выполнена в виде динамического устройства передачи энергии, когда «транслятор» имел неподвижный четырех-секционный массив перекрывающихся обмоток индуктивности, а «приемник» - секционный кластер последовательно соединенных обмоток индуктивности, непрерывно движущийся относительно обмоток «транслятора», но постоянно находящийся в области создаваемого его обмотками магнитного поля. В конструкции «Tesla-pack» устройства не использовался ферромагнитный сердечник, а эффект рассеивания дополнительно компенсировался посредствам использования специальных наполнителей из магнитопрозрачных каучуков и аморфных магнитомягких материалов. Воздушный зазор между «транслятором» и «приемником» не должен был превышать 10 мм – 15 мм. Однако исследований по моделированию, детальному анализу и оценке всех возможных схемотехнических решений для создания БЗУ высокой мощности с возможностью трансляции электроэнергии на расстояния в несколько сотен миллиметров, результаты которых представлены в настоящей статье, ранее нами, как и другими российскими исследователями, не проводилось.

В публикациях, представленных в открытом доступе зарубежными разработчиками, довольно-таки широко представлена общая информация о принципиальном подходе к решению проблемы создания БЗУ. Безусловно заслуживают внимания научные публикации по данному направлению представителей Массачусетского технологического института (США), специалисты которого, как уже указывалось выше, являются первооткрывателями принципов магнитно-резонансной индукции. Например, работы А. Karalis и М. Soljacic, выполненные в соавторстве с другими исследователями университета и, посвященные рассмотрению физических основ беспроводной передачи электроэнергии в целом [7], [8] (и ряд других работ указанных авторов), в том числе методом магнитно-резонансной индукции. Особый интерес представляют публикации John M. Miller – выдающегося ученого американской Национальной лаборатории ORNL, пожизненного члена IEEE и SAE, посвященные результатам работ по созданию БЗУ высокой мощности именно для TC, выполненных совместно с

группой разработчиков компании «Momentum Dynamics Corporation» [9], [10], [11] (и ряд других публикаций J. Miller и специалистов компании). Однако данные публикации в большей степени содержат информацию либо о преимуществах в целом БЗУ по отношению к другим видам зарядных устройств для ТС, либо о готовых концептуальных конструктивных вариантах и технических характеристиках БЗУ для TC, созданных и предлагаемых компанией «Momentum Dynamics Corporation». При этом, даже в такой публикации как «Wireless Power Transfer: A Developers Guide» [9], авторами детально не раскрываются схемотехнические и технологические решения БЗУ, как правило, являющиеся «ноухау» компании, а тем более не приводятся результаты исследований, отражающие закономерности в функционировании БЗУ, позволяющие разработчику самому оптимизировать техническое решение при создании БЗУ с конкретными потребительскими качествами или проводить оценку эффективности того или иного предлагаемого ему технического решения. Отсутствие именно такой исходной научно-технической информации во многом тормозит развитие и внедрение БЗУ высокой мощности для ТС.

Цель исследования и постановка задач

Основной проблемой, которую необходимо решить при разработке схемотехнических решений БЗУ высокой мощности, является проблема конфигурирования магнитного поля между «транслятором» и «приемником» таким образом, чтобы обеспечивалась возможность получения требуемого уровня наведенного напряжения и снижения уровня утечки (потери мощности). Для этого необходимо решить две основные задачи: с одной стороны, необходимо найти оптимальное схемотехническое решение для конструкции непосредственно самого «Tesla-pack» (корпусированных первичной и вторичной обмоток индуктивности «транслятора» и «приемника»), с другой стороны, необходимо найти оптимальное общее схемотехническое решение для построения БЗУ – схемы подключения «Tesla-pack» к внешнему источнику напряжения, нагрузке и встраиваемому резонансному емкостному управляющему контуру компенсации утечки с высокочастотным импульсным преобразователем (инвертором). Обе эти задачи являются довольно-таки сложными и многофакторными, решения которых могут быть найдены путем численного компьютерного моделирования и системного анализа различных вариантов схемотехнических решений. При этом при создании инфраструктуры БЗУ для российского сегмента ТС необходимо учитывать, с одной стороны, технические характеристики АБ, используемых в ТС российского производства, и требования к режимам их зарядки, с другой стороны, особенности российской энергосистемы (например, ее отличия от североамериканской).

Основной целью проведенных исследований, результаты которых представлены непосредственно в настоящей статье, являлось моделирование и оценка эффективности различных вариантов схемотехнических решений резонансной компенсации, выявление закономерностей влияния на эффективность тех или иных факторов, выбор наиболее оптимальной топологии схемы резонансной компенсации для создания БЗУ высокой мощности. Кроме этого ставилась задача разработки методики расчета выходных параметров для каждого рассматриваемого варианта схемотехнических решений.

Методы и технологии исследований

Для решения задач численного компьютерного моделирования и схемотехнического анализа использовалось программное обеспечение «MATLAB toolbox Simulink» с библиотекой блоков «SimPowerSystems», включающие библиотеку компонентов для моделирования и симуляции электроэнергетических систем и инструменты для анализа [12].

Схемотехническое решение модели БЗУ предусматривало наличие резонансных емкостей как в составе «транслятора» (первичный компенсирующий конденсатор – C_1), так и в составе «приемника» (вторичный компенсирующий конденсатор – C_2). Импеданс инвертора имитировал первичный резистор (R_1), а сопротивление нагрузки имитировал нагрузочный резистор (R_2).

В процессе исследований был проведен анализ всех возможных четырех схем подключения резонансной компенсации к катушкам индуктивности «Tesla-pack», принимаемых за основу схемотехнических решений БЗУ: «последовательно-последовательно» («sequential-sequential» – SS), «параллельно-параллельно» («parallel-parallel» – PP), «параллельно-последовательно» («parallel-sequential» – PS) и «последовательно-параллельно» («sequential-parallel» – SP). Все четыре варианта схемотехнических решений исследуемых моделей представлены на рис. 1.

Моделирование осуществлялось при условии идентичности входных и выходных параметров: входной сигнал источника – 3 кВ (напряжение – 230 В); передаваемая мощность – 3 кВт (минимальный уровень по стандарту SAE TIR J2954); мощность нагрузки – 3 кВт. Конструкция и геометрические размеры базового «Tesla-pack» также принимались идентичными: наружные радиусы первичной и вторичной катушек индуктивности – 300 мм; радиус парамагнитного отражателя – 50 см; радиус ферромагнитной подложки – 400 мм. В качестве проводника для формирования катушек индуктивности принимался многожильный кабель диаметром 12 мм (диаметр проволоки – 0,1 мм).

На рис. 2 представлено упрощенное схематическое изображение конструкции «Tesla-pack».

Важнейшей характеристикой БЗУ является его эффективность. Поэтому моделирование, прежде всего, было направлено на анализ и оценку именно эффективности того или иного схемотехнического решения. В качестве показателей эффективности были приняты: коэффициент мощности (k) – отношение активной мощности к полной мощности и КПД (η) – отношение активной мощности, подаваемой на нагрузку, к активной мощности, поставляемой от источника напряжения.

В процессе моделирования также проводилось исследование чувствительности той или иной схемы подключения резонансной компенсации к изменениям таких основных факторов как:

1) изменение частотного диапазона;

- 2) изменение расстояния между первичной и вторичной катушками индуктивности (между «транслятором» и «приемником»);
- 3) изменение количества витков в катушках индуктивности;
- 4) изменение соотношения радиусов первичной и вторичной катушек индуктивности;
- 5) отклонение параметров компенсационных емкостей от значений соответствующих состоянию резонанса;
- 6) и ряда других факторов.



Рис. 1. Варианты схемотехнических решений исследуемых моделей БЗУ: а – схема SS; б – схема PP; в – схема SP; г – схема PS



Рис. 2. Упрощенное схематическое изображение конструкции «Tesla-pack» для БЗУ ТС

Результаты исследований

Результаты моделирования схемотехнических решений БЗУ показали, что тип схемы компенсации определяет: является ли система источником постоянного выходного напряжения или постоянного выходного тока. Системы БЗУ, построенные по схемам SS и PP могут рассматриваться как источники постоян-

ного тока, по схемам SP и PS – как источники постоянного напряжения. Так, например, моделирование показало, что системы БЗУ, построенные по схеме SS с взаимной индуктивностью обмоток порядка $5,5 \cdot 10^{-5}$ Гн, при питании от напряжения 230 В и при частоте 40 кГц и 20 кГц могут произвести ток выхода 16 А и 36 А соответственно. Системы БЗУ, построенные по схеме PP с взаимной индуктивностью обмоток порядка $2,5 \cdot 10^{-6}$ Гн, при частоте 20 кГц могут произвести также ток выхода порядка 32 А. Системы БЗУ, построенные по схеме PS с взаимной индуктивностью обмоток порядка 32 А. Системы БЗУ, построенные по схеме PS с взаимной индуктивностью обмоток порядка 32 А. Системы БЗУ, построенные по схеме PS с взаимной индуктивностью обмоток порядка $8,5 \cdot 10^{-6}$ Гн, при частоте 20 кГц могут обеспечить напряжение на выходе 230 В. Системы, построенные схеме SP с взаимной индуктивностью обмоток $1,7 \cdot 10^{-5}$ Гн, при частоте 20 кГц и 40 кГц могут обеспечить напряжение на выходе 420 В. При этом, эф-фективность трансляции энергии будет составлять порядка 96 % – 99 %.

Оценка эффективности различных схем показала, что при одних и тех же конструктивных параметрах КПД системы увеличивается с увеличением уровня частотного диапазона. Например, на рис. 3 представлены данные оценки КПД системы, смоделированной по схеме SP в зависимости от частоты. Модель принималась из условия, что первичная обмотка «Tesla-pack» (обмотка «транслятора») выполнена из 25 витков, вторичная обмотка (обмотка «приемника») – из 4 витков, наружный радиус обеих обмоток составлял 25 мм, а расстояние между «транслятором» и «приемником» – 250 мм. Коэффициент мощности при моделировании условно принимался равным единице. При этом система должна была обеспечить напряжение на выходе 420 В.

Однако максимизация частотного диапазона может иметь и ряд отрицательных последствий и не только, связанных с обеспечением санитарногигиенической безопасности. Поэтому при более детальном исследовании чувствительности систем БЗУ различных конфигураций к изменениям частотного диапазона моделировалось влияние изменения частоты на собственные и взаимную индуктивности обмоток в составе «Tesla-pack».



Рис. 3. Влияние изменений частоты (*(()*) на КПД БЗУ (*(η* – КПД).

В процессе моделирования частота варьировалась в диапазоне от 10 кГц до 90 кГц с шагом 20 кГц. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Для моделирования использовалась базовая модель «Tesla-pack» с расстоянием между «транслятором» и «приемником» равным 200 мм.



Рис. 4. Влияние изменений частоты (ϖ) на собственные индуктивности первичной (L_1) и вторичной (L_2) обмоток, взаимную индуктивность (M), коэффициент сцепления (φ) обмоток «Tesla-pack» *БЗУ* и сопротивление катушки индуктивности (R_1, R_2)

Из данных, представленных на рис. 4 видно, что индуктивности не зависят от частоты, но увеличение частоты приводит к увеличению сопротивления, несмотря на использование в конструкции обмоток многожильного кабеля. При этом необходимо учитывать, что полный импеданс «транслятора» и полный импеданс «приемника» складывается не только из сопротивления обмоток, но и сопротивлений компенсаторов и сопротивления нагрузки. Для сохранения требуемого уровня эффективности системы необходимы дополнительные конструктивные меры для компенсации нарастающего сопротивления.

В процессе исследований было также проведено моделирование влияния изменения емкостей компенсационных конденсаторов (C_1 и C_2), используемых для сохранения энергии, на эффективность всех четырех схемотехнических решений.

Моделирование производилось в двух вариантах условий: при C_1 =const; $C_2 \neq$ const, $(50 \% Cr) \leq C_2 \leq (150 \% Cr)$ и при C_2 =const; $C_1 \neq$ const, $(50 \% Cr) \leq C_1 \leq (150 \% Cr)$, где Cr – значение емкости, соответствующее расчетному резонансному состоянию системы.

Для моделирования использовались модели систем БЗУ, подключаемых к источнику питания 230 В. Частота принималась фиксированной для всех вариантов и составляла 20 кГц. Модели типа SS и PP предусматривали подключение к сопротивлению нагрузки 10 Ом, а SP и PS – 5 Ом. Таким образом, используемые модели номинально имитировали уровень передаваемой мощности 10 кВт – 13 кВт.

На рис. 5 представлены результаты моделирования влияния емкостей на эффективность систем БЗУ, построенных по SS, PP, SP и PS схемам.



Рис. 5. Влияние изменений значений емкости компенсационных конденсаторов (*C*₁, *C*₂) на эффективность систем ($\eta - K\Pi Д$; *k* – коэффициент мощности): а, б – схема SS; в, г – схема PP; д, е – схема SP; ж, з – схема PS

Продолжение рис. 5



Рис. 5. Влияние изменений значений емкости компенсационных конденсаторов (*C*₁, *C*₂) на эффективность систем ($\eta - K\Pi Д$; *k* – коэффициент мощности): a, б – схема SS; в, г – схема PP; д, е – схема SP; ж, з – схема PS

Из диаграмм, представленных на рис. 5, видно, что системы, проектируемые по схемам SS или SP, менее чувствительны к отклонениям значений C_2 от значений, соответствующих условиям резонанса, чем системы, в основу которых принимаются схемотехнические решения PP или PS. Системы, проектируемые по схемам PP или PS менее чувствительны к отклонениям значений C_1 , чем системы, в конструкциях которых используются схемы SS или SP. При исследовании чувствительности систем БЗУ различных конфигураций к изменениям расстояния между «транслятором» и «приемником», первоначально исследовалось влияние изменения воздушного зазора на собственные и взаимную индуктивности самих обмоток в составе «Tesla-pack». Величина воздушного зазора варьировалась в диапазоне от 100 мм до 500 мм с шагом 100 мм. Результаты исследований представлены на рис. 6.



Рис. 6. Влияние расстояния между «транслятором» и «приемником» (δ) на собственные индуктивности первичной (L_1) и вторичной (L_2) обмоток, взаимную индуктивность (M), коэффициент сцепления (φ) обмоток «Tesla-pack» и сопротивление катушки индуктивности (R_1, R_2)

Данные диаграмм, представленных на рис. 6, подтверждают известную закономерность того, что увеличение расстояния в основном влияет на величину взаимной индукции и коэффициент сцепления. При этом, однако, видно, что значения самоиндукций при малых расстояниях также изменяются и стабилизируются только при его увеличении. Аналогично происходят изменения сопротивления. Данный эффект можно объяснить наличием в конструкции «Tesla-pack» ферромагнитной подложки и парамагнитного отражателя как со стороны «транслятора», так и со стороны «приемника», создающих определенный «эффект близости». Это важно учитывать при проектировании БЗУ, так как изменение собственных индуктивностей может привести к тому, что система может выйти из состояния резонанса.

Далее исследовалось поведение каждой из четырех схем БЗУ при изменении расстояния между «транслятором» и «приемником». Нахождение закономерностей и анализ результатов этих исследований очень важны для проектирования БЗУ ТС, т.к. различные марки ТС имеют различный клиренс, а устройство БЗУ должно быть унифицированным. В процессе моделирования компенсационные емкости принимались одинаковыми для всех четырех схем компенсации, частота оставалось фиксированной и составляла 20 кГц. Системы подключались к источнику питания 230 В. Величина воздушного зазора варьировалась от 100 мм до 300 мм с шагом 100 мм. На рис. 7 представлены результаты моделирования эффективности систем БЗУ, построенных по SS и PP, SP и PS схемам – зависимости коэффициента мощности и КПД от величины воздушно-го зазора между обмоткой «транслятора» и обмоткой «приемника».

Из данных, приведенных на рис. 7 видно, что система с параллельной компенсацией со стороны «транслятора» менее чувствительна к уменьшению расстояния, чем система с последовательной компенсацией. Схема с последовательной компенсацией со стороны «транслятора» обладает преимуществом при необходимости трансляции большого количества энергии на большие расстояния, а схема с параллельной компенсацией – большого количества энергии на небольшие расстояния (когда клиренс TC не превышающие 200 мм – 250 мм).

Еще одной задачей, которую необходимо решить при принятии схемотехнического решения в процессе проектирования БЗУ для ТС, является задача оценки фактора асимметрии. Моделирование, результаты которого представлены выше, проводилось в основном при условии, что обмотки «транслятора» и «приемника» геометрически идентичны. Однако в ряде зарубежных источников, представляющих информацию о БЗУ различного назначения, встречается описание конструкций, в которых используются «Tesla-pack» с различными геометрическими размерами, например, когда диаметр обмотки «транслятора» больше диаметра обмотки «приемника». Принципиально известно, что увеличение длины проводника, число витков и радиуса обмоток должно увеличить взаимную индуктивность, но при одновременном увеличении и сопротивления проводника. При этом надо помнить, что на коэффициент связи будет влиять и равномерность распределения проводников. Поэтому в рамках проведенных исследований не только выполнялись расчеты необходимых значений радиусов, количества витков первичной и вторичной обмоток, но было проведено моделирование процесса и при асимметричных обмотках «Tesla-pack».

Для моделирования использовалась базовая модель БЗУ с частотой 20 кГц. Расстояние между «транслятором» и «приемником» – 200 мм.

Задача моделирования решалась при условии, что соотношение геометрических размеров конструкций обмотки, ферромагнитной подложки и парамагнитного отражателя «транслятора» принималось фиксированным. Внешний радиус обмотки «транслятора» составлял 300 мм, количество витков – 5. Изменению подлежали только параметры обмотки «приемника». Внешний радиус варьировался как в сторону уменьшения, так в сторону увеличения от базового значения (300 мм) в диапазоне от 100 мм до 500 мм, количество витков изменялось аналогично изменялось относительно базового значения (5 витков) от 1 до 10 витков. При этом моделирование осуществлялось при автономном варьировании параметрами: либо изменялся радиус при фиксированном количестве витков, либо изменялось количество витков при фиксированном радиусе.

Результаты моделирования представлены на рис. 8.

Из данных, представленных на рис. 8а, видно, что при большой разнице в значениях радиусов первичной и вторичной обмоток, происходит сдвиг проводников относительной друг друга и их рассогласование, что соответственно приводит к уменьшению коэффициента сцепления.



Рис. 7. Влияние расстояния между «транслятором» и «приемником» (δ) на эффективность систем (η – КПД; k – коэффициент мощности): a – схема SS; б – схема PP; в – схема SP; г – схема PS

Данные, представленные на рис. 8б, свидетельствуют, что когда количество витков в обмотке «приемника» больше чем в обмотке «транслятора», коэффициент связи (даже при возрастании взаимной индукции) увеличивается незначительно. Этот эффект опять же можно объяснить рассогласование центровки проводников между собой.

Однако варьируя асимметрией двух обмоток можно добиться и определенленного положительного эффекта. Например, достичь того, что при определенном соотношении количества витков первичной и вторичной обмоток взаимная индукция будет больше, чем самоиндукция вторичной обмотки, но меньше самоиндукции первичной обмотки. При этом самоиндукция первичной обмотки должна быть значительно выше и самоиндукции вторичной обмотки, и взаимной индукции.



Рис. 8. Влияние изменений радиуса (r_2) и количества витков (N_2) обмотки «приемника» на собственные (L_1, L_2) и взаимную (M) индуктивности, коэффициент сцепления (φ) обмоток «Tesla-pack» БЗУ

На рис. 9 представлены результаты моделирования такого варианта, когда при прочих равных условиях, количество витков в обмотке «транслятора» составляло 25 витков, а количество витков в обмотке «приемника» варьировалось от 1 до 5 витков. Самоиндукция обмотки «транслятора» в данном случае значительно больше и самоиндукции обмотки «приемника», и «взаимной» индукции, поэтому на диаграмме рис. 9 не показана. Этот эффект вполне целесообразно использовать при построении БЗУ на основе схем компенсации SP или PS, когда требуется достижение и удержание желаемого уровня выходного напряжения.



Рис. 9. Соотношение собственной индуктивности обмотки «приемника» (L_2) с взаимной индуктивностью (M) и коэффициентом сцепления «Tesla-pack» (φ) при значительном соотношении количества витков в обмотке «транслятора» (N_1) относительно обмотки «приемника» (N_2)

В целом для того, чтобы уменьшить рассогласование обмоток «Teslapack», когда количество витков в обмотке «приемника» меньше чем количество витков в обмотке «транслятора» необходимо соответственно уменьшать радиус обмотки «приемника».

Магнитное поле, создаваемое в «Tesla-pack» практически однородно по площади плоскости между обмотками «транслятора» и «приемника». «Приемник», имеющий меньший внешний наружный радиус обмотки, чем радиус обмотки «транслятора», но расположенный в зоне перекрытия площадью «транслятора», будет получать соответствующее количество магнитного потока. Однако индуктивность рассеивания (утечка) при этом будет увеличиваться. Аналогично важным моментом, влияющим на эффективность БЗУ для TC является точность центровки «транслятора» и «приемника» или, с практической точки зрения, точность позиционирования TC относительно платформы «транслятора». Уменьшение рассеивания может быть достигнуто путем конфигурирования конструкции обмотки «транслятора»: выбора оптимальной формы, секционирования и т.д. Однако представление решения задачи моделирования конфигурации конструкционной формы обмотки «транслятора» выходит за рамки настоящей статьи и требует отдельного рассмотрения. Аналогично отдельного рассмотрения требует и вопрос выбора конструкционных материалов для создания БЗУ.

На данном этапе исследований был также разработан, представленный в таблице 1, массив аналитических выражений для ориентировочного укрупненного расчета выходных параметров для каждого схемотехнического решения. Представленные выражения для расчета выходных параметров будут справедливы и могут быть использованы, если только принять, что обмотки и конденсаторы «идеальны», т.е. не имеют внутреннего сопротивления.

Тип	Выходной	Формула	Условные обозначения
схемы	параметр	для расчета выходного	
		параметра	
	выходной	r İ r	$I_{\text{вых}}$ – выходной ток;
SS	ток	$I_{gbix} = \frac{1}{\omega M} U_1$	$U_{\text{вых}}$ – выходное напряже-
		00111	ние;
	выходной	I - M II	<i>U</i> ₁ – напряжение входа;
PP	ток	$I_{GBLX} = \frac{1}{j\omega(L_1L_2 - M^2)}O_1$	М – взаимная индуктив-
		J (12)	ность;
	выходное	$U = \frac{L_2}{U}$	ω – частота;
SP	напряжение	\mathcal{S}_{GBIX} M°	<i>L</i> ₁ – индукция обмотки
	выходное	$M_{II} = M_{II}$	«транслятора»;
PS	напряжение	$U_{BDIX} = \frac{1}{L_1} U_1$	<i>L</i> ₁ – индукция обмотки
	I	1	«приемника»
			<i>j</i> – фазор (фазовый вектор)

Таблица 1 – Расчет ориентировочных значений	і выходных параметров
для различных типов схемотехнических	решений БЗУ ТС

Заключение

Результаты проведенных исследований еще раз подтвердили реальную возможность создания БЗУ высокой мощности (мощности кВт-диапазонов) на физической основе принципа дистанционной бесконтактной трансляции электроэнергии методом магнитно-резонансной индукции, даже если из условий эксплуатации БЗУ существует необходимость увеличения расстояния между «транслятором» и «приемником» до нескольких сотен миллиметров. При этом данные БЗУ при практическом их применении, например, для зарядки и подзарядки различных видов TC, могут обладать весьма высоким уровнем эффективности.

Научная новизна полученных в рамках проведенных исследований результатов, прежде всего, заключается в том, что впервые путем компьютерного численного моделирования с использованием программного обеспечения типа «Simulink» получены данные по комплексной оценке эффективности основных четырех возможных типов схемотехнических решений создания БЗУ: SS, PP, SP и PS. Для решения задачи комплексной оценки в качестве критериальных показателей эффективности БЗУ рассматривался не только традиционно используемый показатель – КПД (η) – как отношение активной мощности, подаваемой на нагрузку, к активной мощности, поставляемой от источника напряжения, но и коэффициент мощности (k) – отношение активной мощности к полной мощности, который, как правило, не учитывается при оценке БЗУ. Такой подход позволил осуществить более детальный анализ и более точную оценку схемотехнических решений.

В результате моделирования выявлены новые закономерности влияния основных конструктивных факторов, таких как: изменение значений первичных и вторичных компенсационных емкостей, изменения расстояния между «транслятором» и «приемником», параметры асимметрии первичной и вторичной обмоток (в соотношениях их габаритных размеров, количестве витков), на показатели эффективности при выборе той или иной конструктивной схемы, получены новые данные о численных значениях для каждого рассматриваемого параметра, часть из которых представлены в настоящей статье. Полученные результаты имеют не только теоретическое, но и прямое практическое значение и должны учитываться разработчиками БЗУ в зависимости от их назначения и конкретно предъявляемых к ним требований.

Так, например, анализ данных численного компьютерного моделирования позволил установить, что в случае необходимости создания БЗУ для TC с большим клиренсом (электробусы, грузовой электротранспорт и т.д.) целесообразно использовать последовательную схему компенсации со стороны «транслятора» (SS или SP), а для TC, у которых клиренс не превышает 200 мм – 250 мм (электромобили, электрокары и т.д.), – схему с параллельной компенсацией (PP или PS). При этом необходимо учитывать, что БЗУ, строящиеся по SS или SP схемам будут менее чувствительны к отклонениям значений компенсационных емкостей от резонансных значений, чем БЗУ, строящиеся по PP или PS схемам. Анализ опубликованных технических описаний БЗУ для TC, предлагаемых на сегодня в формирующемся новом сегменте рынка зарубежными компаниями, свидетельствует о том, что разработчики при создании конструкций БЗУ не учитывают данных закономерностей и используют, как правило, при создании БЗУ для любых видов TC схему компенсации типа SP.

Полученные новые данные численного моделирования также показали, что в случае использования разработчиком «Tesla-pack» в качестве инструмента повышения уровня мощности БЗУ традиционного принципа асимметрии, ему необходимо решать задачу двухпараметрической оптимизации соотношений его геометрических параметров и соотношений количества витков во избежание эффекта рассогласования проводников первичной и вторичной обмоток индуктивности. При этом, результаты выполненного численного моделирования позволили выявить новую весьма интересный факт о том, что путем выбора определенного соотношения количества витков первичной и вторичной обмоток и обеспечении высокого уровня индуктивности обмотки «транслятора» можно достичь требуемого уровня взаимной индукции не прибегая к необходимости увеличения числа витков, габаритов и собственной индуктивности обмотки «приемника», что также немаловажно при создании БЗУ для TC, когда конструктивно «приемник» необходимо располагать непосредственно на самом TC.

Кроме этого, если ранее общепризнанно считалось, что увеличение частотного диапазона является неоспоримым инструментом повышения эффективности БЗУ и его ограничения связаны только с требованиями безопасности, что нашло свое отражение и в недавно разработанном стандарте SAE TIR J2954, то результаты исследований с использованием численного многофакторного компьютерного моделирования показали, что увеличение частоты одновременно вызывает резкое увеличение сопротивления. Увеличение сопротивления, в свою очередь, приводит к снижению эффективности. Для компенсации нарастающего сопротивления и поддержания эффективности БЗУ на требуемом уровне необходима реализация дополнительных конструктивно-технических решений, что усложняет конструкцию БЗУ. Численные данные, полученные в результате моделирования, свидетельствуют о том, что частотный диапазон от 20 кГц до 55 кГц (что значительно ниже установленного допустимого максимума – 85 кГц – 90 кГц) является вполне достаточным для БЗУ для ТС.

Таким образом, результаты проведенных исследований по анализу всех основных схемотехнических решений построения БЗУ путем моделирования с использованием современного программного обеспечения «MATLAB toolbox Simulink», включая библиотеку «SimPowerSystems», позволило значительно расширить уровень знаний в области бесконтактной трансляции электроэнергии. Использованные в процессе исследований модели могут быть использованы в качестве исходных прототипов при разработке БЗУ ТС с конкретными требованиями, сократить трудоемкость разработки и испытаний опытных образцов.

Кроме этого, полученные результаты исследований позволили определить дополнительный ряд существующих проблемных вопросов, спланировать направления дальнейших исследований, например, по необходимости решения задачи моделирования конфигурации конструкционной формы самого «Teslapack» с учетом выбранного варианта схемотехнического решения, в том числе моделирования кластерных матричных «Tesla-pack» а также позволили наметить пути решения проблемы создания комплекса системы автоматического управления БЗУ, в том числе в обеспечение его универсальности как относительно видов TC, так и относительно видов АБ.

В целом, результаты исследований позволили приблизить решение основной стратегической задачи, стоящей перед российскими разработчиками БЗУ, – задачи импортозамещения в части обеспечения создаваемой отечественной зарядной инфраструктуры электроприводных TC универсальными безопасными высокоэффективными БЗУ.

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.

Кроме этого результаты исследований, представленные в настоящей статье, могут быть использованы для создания БЗУ и для других видов техники, применяемой в различных отраслях промышленности: в робототехнике различного назначения, в медицине, станкостроении и других отраслях.

Литература

1. Лепетаев А. Н., Клыпин Д. Н. Моделирование электромагнитных полей в системе черезкожной бесконтактной передачи энергии // Ползуновский вестник. 2010. № 2. С. 21-26.

2. Горский О. В. Исследование базовой модели индуктивно связанных бесконтактного зарядного устройства контуров имплантируемых систем // Информационно-управляющие системы. 2013. № 6. С. 48-57.

Красковский М.В., 3. Герасимов В.Г., Филоженко А.Ю. Повышение эффективности системы бесконтактного заряда аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2017. № 1(186). С. 108-120.

4. Герасимов В.Г., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 3(140). С. 47-55.

Копылов В. В., 5. Герасимов В. А., Кувшинов Г. Е., Наумов Л. А., Себто Ю. Г., Филоженко А. Ю., Чепурин П. И. Математическая модель устройства для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 2. С. 28-33.

on-line 6. Куркова О. П., Ефимов В. В. Система 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 01.06.2019).

7. Karalis A., Joannopoulos J., Soljacic M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer // Annals of Physics. 2008. Vol. 323. No. 1. P. 34-48.

8. Kurs A., Moffatt R., Soljacic M. Simultaneous Mid-range Power Transfer to Multiple Devices // Applied Physics Letters. 2010. No. 96.4. C. 044102. - URL: https://dspace.mit.edu>openaccess-disseminate/1721.1/76681 (дата обращения 02.07.2018).

9. 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-transportationpower-electronics/presentations/is112-wireless-power-transfer-developers-guide.pdf (дата обращения 18.06.2019).

11. 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. P. 147-162.

12. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. – 288 с.

References

1. Lepetaev A. N., Klypyn D. N. Simulation of electromagnetic fields in the system through the skin contactless transmission of energy. *Polzunovsky vestnik*, 2010, vol. 2, pp. 21-26 (in Russian).

2. Gorsky O. V. Study of the basic model of inductively coupled circuits of contactless charger of implantable systems. *Information-control systems*, 2013, vol. 6, pp. 48-57 (in Russian).

3. Gerasimov V. G., Kraskovsky M. V., Filatenko A. Yu. Improving the effectiveness of the system of contactless charge batteries of Autonomous underwater vehicle. *News of Southern federal University. Technical science*, 2017, vol. 1(186), pp. 108-120 (in Russian).

4. Gerasimov V. G., Filatenko A. Yu., Chepurin P. I. Structure of the power supply system of Autonomous underwater vehicle. *News of Southern federal University. Technical science*, 2013, vol. 3(140), pp. 47-55 (in Russian).

5. Gerasimov V. A., Kopylov V. V., Kuvshinov G. E., Naumov L. A., Sebto Y. G., Filatenko A. Yu., Chepurin P. I. A Mathematical model for contactless power transmission for underwater object. *Underwater researches and robotics*, 2012, vol. 2, pp. 28-33 (in Russian).

6. 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, vol. 3, pp. 31-53. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/03-Kurkova.pdf (accessed 01 June 2019) (in Russian).

7. Karalis A., Joannopoulos J., Soljacic M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics*, 2008, vol. 323, no. 1, pp. 34-48.

8. Kurs A., Moffatt R., Soljacic M. Simultaneous Mid-range Power Transfer to Multiple Devices. *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 4, no. 96, pp. 044102. Available at: https://dspace.mit.edu>openaccess-disseminate/1721.1/76681 (accessed 02 July 2018).

9. Miller J., Daga A., Long B., Schrafel P. Wireless Power Transfer: A Developers Guide. Presentation of the report. *IEEE. Conference on applied power electronics. Industry Session,* 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 June 2019).

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. 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.

12. Chernykh I. V. Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink. Moscow, DMK Press., St. Petersburg, Piter. Publ., 2008, 288 p. (in Russian).

Статья поступила 29 июля 2019 г.

Информация об авторах

Куркова Ольга Петровна – доктор технических наук. Профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов: моделирование сложных технических систем и процессов, исследование физики процессов дистанционной передачи электрической мощности без проводов. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Ефимов Владимир Васильевич – доктор технических наук, профессор. Директор по научной работе ОАО «Авангард». Область научных интересов: разработка систем автоматического управления ракетно-космической и других видов техники. E-mail: v.v_efimov@mail.ru

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

Computational Modeling and Circuit Solutions Optimization of the Contactless Chargers of the Electric Vehicles

O. P. Kurkova, V. V. Efimov

Problem statement and specific task. The creation of new models and the expansion of the use of battery electric transport is the most progressive direction of the development of public, corporate and personal transport infrastructure. Electric transport has undeniable advantages in relation to hydrocarbon energy vehicles (EV). However, the consumer appeal of electric vehicles is still limited because of undeveloped infrastructure of charging stations (CS). Building the CS infrastructure is one of the strategic objectives of the Russian transport development. The most promising technology of electric vehicle charging is the wireless contactless charging technology. The main advantages of this technology are: safety, comfort, energy efficiency and vehicles versatility, concerning different types and brands of these vehicles. However, it is necessary to create high-power chargers with working capacity from several tens to several hundred kW, to provide the fast contactless charging technology. High power contactless chargers (CC) can be created through the use of the energy transfer principles which are based on the magnetic resonance induction. However, the development of such CC is associated with a number of scientific and technical issues. But, nowadays, the theoretical basis for solutions of these issues has not been sufficiently studied and defined vet. The aims of the work are computational modeling and effectiveness evaluation of different circuit solutions for CC creating. Identification of the patterns of various factors which influence the CC effectiveness and providing possibility of the choice of the most optimal solution for the creation of high-power CC are the aims of the work too. The methods and technologies used. To solve computational modeling and circuit analysis problems toolbox «Simulink» with the library «SimPowerSystems» of the MatLab application package is used. This library includes another library with components for modeling and simulation of electric power systems and tools for analysis. Novelty of result. The elements of novelty are: 1. The results of modeling, analysis and effectiveness evaluation of four possible circuit solutions. 2. The identified patterns of influence on the efficiency of the CC, with different circuit models design bases, such factors as: level of the

frequency range, capacitance, distance between the primary and secondary windings of inductance, asymmetry of geometry and mutual arrangement of windings. 3. The development of the integrated calculation method of approximate values of output parameters for each variant of circuit solutions. **Practical significance:** The models which were being used during the research process can be used as initial prototypes for the development of various-purpose CC with specific requirements and also these models can reduce the complexity of the prototypes development and testing. **Practical significance:** The models used in the research process can be used as initial prototypes in the development of various-purpose CC with specific requirements, to reduce the complexity of the development and testing of prototypes.

Key words: electric vehicle, charging infrastructure, contactless charger, magnetic-resonance induction, selfinduction, mutual induction, coupling coefficient, voltage, current, frequency, power, efficiency, efficiency, power factor, simulation, circuit design solution.

Information about Authors

Olga Petrovna Kurkova – Dr. habil. of 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: modeling of complex technical systems and processes; study of physics of remote transmission of electric power without wires. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Vladimir Vasilievich Efimov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Director for scientific work JSC «Avangard». Field of research: development of automatic control system for rocket and space and other types of equipment. E-mail: v.v_efimov@mail.ru

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