

УДК 621.31

## Сетевая информационная модель коммуникационных связей между электромобилем и бесконтактным магнитно-резонансным зарядным устройством

Куркова О. П.

**Постановка проблемы и частной задачи:** создание системы быстрой и надежной коммуникационной взаимосвязи между автономными электроприводными транспортными средствами (ТС) и стационарными магнитно-резонансными зарядными станциями (БЗС) является залогом успешного внедрения технологии беспроводной зарядки, позволяющим в полной мере реализовать ее основные преимущества: возможность автоматизации процесса, комфортность, безопасность, энергоэффективность. Однако ее создание связано с целым рядом проблем, так как архитектура связи и алгоритм ее функционирования должны одновременно учитывать и уже стандартизированные общие требования, определяющие интерфейс связи «электромобиль-сеть», в рамках которых создаются системы электропитания электромобилей, и особенности физики процесса беспроводной передачи энергии, и принципы функционирования БЗС. **Целью исследований являлась** разработка типовой модели информационных коммуникационных связей между электромобилем и БЗС. **Используемые методы и технологии:** для решения поставленной задачи использовался метод построения сетевых моделей в виде графов связей, когда вершины графа – состояния объектов, дуги графа – процессы переходов объектов из одного состояния в другое, с последующим описанием всех переходов в виде алгоритмов соответствующих действий. **Новизна результата:** элементами новизны результатов исследований являются разработанные: операционная технологическая структура сессии зарядки электромобиля по бесконтактной технологии, начинающейся с успешной настройки связи при заезде ТС на зарядную площадку и заканчивающейся прекращением связи при покидании ТС зарядной станции; сетевая информационная модель коммуникационных связей «ТС-БЗС», комплекс алгоритмов действий, необходимых для реализации поэтапных переходов ТС и БЗС из одного состояния в другое в процессе сессии зарядки. **Практическая значимость:** разработанная модель является основой для непосредственного построения архитектуры сети коммуникационной связи «БЗС-ТС», выбора составляющих радиоэлектронных компонентов и разработки соответствующего программного обеспечения. Построение сети на базе разработанной модели позволит обеспечить практически полную автоматизацию процесса зарядки, организовав сервис по «безлюдной технологии», что позволит фактически реализовать основные преимущества технологии бесконтактной зарядки электромобилей по отношению к массово используемой в настоящее время технологии «plug-in» – это комфортность и безопасность при любых погодных условиях.

**Ключевые слова:** электромобиль, бесконтактная магнитно-резонансная зарядная станция, коммуникационная связь, сессия зарядки, сетевая модель, информационная модель, граф связей, состояние объекта, алгоритм действий, беспроводная локальная сеть, контроллер связи, сетевая архитектура «клиент-сервер», двухсторонний обмен сообщениями, сигнал «точка-точка».

### Введение

На сегодня электромобили рассматриваются как альтернативные традиционным, работающим на углеводородных топливах, транспортные средства.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Куркова О. П. Сетевая информационная модель коммуникационных связей между электромобилем и бесконтактным магнитно-резонансным зарядным устройством // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 286-313. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-286-313

#### Reference for citation:

Kurkova O. P. Network information model communication links between an electric vehicle and a contactless magnetic-resonance charger. Systems of Control, Communication and Security, 2022, no. 3, pp. 286-313 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-286-313

Их внедрение ставит своими целями смягчение экологических проблем, таких как выбросы углекислого газа, и снижение расхода дорогостоящего углеводородного топлива в условиях энергетического кризиса. Внедрение эффективных систем зарядки электромобилей имеет важное значение для стимулирования массового внедрения электромобилей. Одной из перспективных технологий зарядки электротранспорта на сегодня признана бесконтактная магнитно-резонансная зарядка. Главными преимуществами использования данной технологии являются безопасность, в том числе во всепогодных условиях эксплуатации, комфортность, в том числе для лиц с ограниченными физическими возможностями, возможность автоматизации и обеспечение процесса зарядки по безлюдной технологии, что, в свою очередь, создает возможность их использования при внедрении беспилотных транспортных средств. Однако, аналогично, как и при кабельной технологии зарядки, на сегодня пока нашедшей более широкое применение для создания зарядных инфраструктур, при использовании технологии бесконтактной зарядки необходимо обеспечение быстрой и надежной (также беспроводной) коммуникационной взаимосвязью между стационарными зарядными площадками (БЗП) и транспортным средством (ТС), эффективного управления процессом зарядки. При этом коммуникационная связь между высококомобильными ТС и БЗП должна обеспечивать сбор данных и двухсторонний обмен информацией о динамике изменений параметров состояний бортовой системы электропитания ТС, включая состояние аккумуляторных батарей (АБ), параметров состояний БЗП, включая определенные аспекты, относящиеся к процессу зарядки, взаимосвязи БЗП и сети электроснабжения, параметров координации взаимного расположения ТС и БЗП при парковке, что позволит обеспечить эффективное управление непосредственно самим процессом и технологическими режимами зарядки, балансировку нагрузки между ТС и БЗП. Кроме этого, система коммуникационной взаимосвязи должна обеспечить обмен такой информацией как: местоположение, идентификация и текущее эксплуатационное состояние БЗП, входящих в зарядную инфраструктуру, для выбора водителем оптимальных маршрута, тарификационного плана оплаты и так далее, что позволит повысить уровень сервиса в целом. Таким образом система коммуникационных связей должна обеспечить взаимосвязь ТС и БЗП как во время процесса зарядки, так и во время движения ТС с синхронизацией по единой шкале времени. При этом станции БЗП должны иметь возможность устанавливать и поддерживать связь с одним или одновременно несколькими ТС. При создании системы коммуникационных связей ТС и БЗП, необходимо учитывать не только принципы построения архитектур локальных коммуникационных сетей типа «клиент-сервер», когда в данном случае ТС будет представлять собой «клиента», а БЗП – «сервер», но и все особенности физики процесса бесконтактной магнитно-резонансной передачи энергии, конструктивных принципов построения устройств бесконтактной зарядки и требования их совместимости с электроприводными ТС и их АБ. Решение задачи создания полноценной системы коммуникационных связей ТС и БЗП является жизненно необходимым и актуальным, так как на сегодня исследователями-разработчиками в области создания непосредственно устройств бесконтактной магнитно-

резонансной зарядки ТС уже достигнуты весьма высокие положительные результаты. Практически все основные мировые автопроизводители, освоившие выпуск электромобилей, такие как: Tesla, Volvo, Volkswagen, BMW, Toyota, Nissan, Hyundai, Honda, Mitsubishi и другие, провели испытания, по достоинству оценили преимущества бесконтактной зарядки и готовы оснащать приемниками бесконтактных зарядных устройств выпускаемые ими электромобили [1, 2, 3]. Однако отставание в области разработки интеллектуальных систем коммуникационных взаимосвязей между ТС и БЗП тормозят процесс создания полноценных зарядных инфраструктур на базе бесконтактных магнитно-резонансных зарядных станций. В связи с этим любые исследования в этой области являются весьма актуальными.

### **Анализ состояния вопроса**

В 2018 г. в Российской Федерации разработаны на базе международного стандарта ISO 15118, состоящего из 5 частей, и введены в действие стандарты ГОСТ Р 58122 и ГОСТ Р 58123 «Транспорт дорожный. Интерфейс связи автомобиль – электрическая сеть», определяющие общие требования к связи между электромобилями, включая гибридные, и оборудованием электроснабжения, устанавливающие требования к протоколам сетевого и прикладного уровней, к физическому уровню и уровню передачи данных, требования к тестированию соответствия протоколов и т.д. [4, 5, 6] Так как основными частями этой системы связи являются встроенные в ТС контроллер связи электромобиля и контроллер связи оборудования электроснабжения, то в данных стандартах в основном описываются требования к взаимодействию между этими компонентами. При этом в стандартах не рассматривается внутренняя связь между АБ ТС и бортовым зарядным устройством непосредственно в самом ТС, а также взаимодействие контроллера связи оборудования электроснабжения с оборудованием сети поставщика электроэнергии, за исключением только некоторых сообщений, относящихся непосредственно к процессу подзарядки ТС. Понятие коммуникации в контексте данных стандартов разделено на две взаимосвязанных концепции: «передача базовых сигналов», куда входят такие понятия, как состояние ТС, обслуживание системы управления для обеспечения безопасности и включения процесса зарядки, а также связь по протоколу высокого уровня (High Level Communication), используемая для обеспечения таких операций, как идентификация, осуществление платежей, выравнивание нагрузки сети и оказание дополнительных услуг.

В стандарте ГОСТ Р 58122 описаны основные функциональные группы, составляющие типовой сценарий процесса зарядки электромобиля – сочетания различных алгоритмов для выполнения определенных режимов зарядки ТС, включая:

- начало процесса зарядки (инициирование процесса после подключения ТС к силовой розетке);
- установление связи между контроллерами связи электромобиля и оборудования электроснабжения;

- обработка сертификатов – электронных документов, использующих цифровую сигнатуру с целью идентификации ключа, включая сертификаты производителя ТС;
- идентификация и авторизация;
- целевая установка и составление графика зарядки;
- контроль и повторное планирование зарядки (этапов процесса зарядки);
- дополнительные услуги, не участвующие непосредственно в процессе зарядки;
- процесс окончания зарядки.

В стандарте представлены различные варианты сценариев зарядки и определены условия их запуска, а также варианты системных архитектур линий связи инфраструктуры зарядки и их сетевые характеристики в вариантах, когда коммуникационная связь между контроллерами связи оборудования электропитания и электромобиля осуществляется либо по «локальной», либо по «удаленной» схеме.

Стандарт ГОСТ Р 58123 более детально определяет требования к набору команд для поддержки передачи энергии к электромобилю при реализации процесса зарядки, описывает сообщения, модель данных, формат представления данных и т.д. Стандарт базируется на понятиях открытых сервисов OSI (Open Systems Interconnection – взаимосвязь открытых систем) применительно к различным отдельным уровням взаимодействия ТС и электросети (физическому, каналному, сетевому, транспортному, сеансовому, представительскому, прикладному), определяет архитектурные уровни OSI. В стандарте также представлены типовые варианты соответствующих схем и диаграмм в формате XML (eXtensible Markup Language), дается обзор коммуникационных состояний и концепции безопасности. При этом в стандарте рассматривается возможность осуществления взаимосвязей как в онлайн-овом, так и в полу онлайн-овом режимах.

В дополнение к стандартам Международной организации по стандартизации (International Organization for Standardization – ISO) Международным обществом автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers International – SAE), занимающимся стандартизацией в области автомобильной промышленности, разработаны ряд нормативных документов, определяющих требования и рекомендации по созданию коммуникационных связей электроприводных ТС, такие серии документов как: SAE J 2847 «Communication for Smart Charging of Plug-in Electric Vehicles Using Smart Energy Profile 2.0» («Коммуникация для интеллектуальной зарядки подключаемых электромобилей с использованием Smart Energy Profile 2.0»), SAE J 2931 «Digital Communications for Plug-in Electric Vehicles» («Цифровая связь для подключаемых электромобилей»), SAE J 2836 «Instructions for Using Plug-In Electric Vehicle (PEV) Communications, Interoperability and Security Documents» («Инструкции по использованию подключаемых электромобилей. Документы по взаимодействию, совместимости и безопасности») и ряд других, определяющих варианты ис-



пользования и требования к связи между электромобилями, зарядными станциями и энергосистемой [7, 8, 9].

Таким образом на сегодня на международном уровне стандартизованы и унифицированы основные требования к системам коммуникационных связей в обеспечение зарядки электромобилей, которые соблюдаются как автопроизводителям, так и разработчикам зарядных станций. Однако все перечисленные выше нормативные документы ориентированы на использование при зарядке электромобилей контактной технологии зарядки – технологии «plug-in» и зарядных станций кабельной зарядки, требования к которым определены ГОСТ РМЭК 61851 «Система токопроводящей зарядки электромобилей» [10]. На данный стандарт во есть ссылки во всех разделах ГОСТ Р 58122 и ГОСТ Р 58123. Как показали результаты анализа реализации проектов зарядных инфраструктур на базе этих нормативных документов [11, 12, 13, 14], их рекомендации нельзя в полной мере применить к построению систем коммуникационных связей при создании зарядных инфраструктур на базе устройств бесконтактной магнитно-резонансной зарядки, т.к. они не учитывают особенностей принципов функционирования, конструкции и управления этих зарядных устройств, состоящих из двух частей: стационарного «транслятора» на зарядной площадке и бортового «приемника», расположенного на ТС, а также параметрических взаимосвязей процесса бесконтактной передачи энергии [15, 16, 17, 18]. Отдельные исследования, ставящие своей целью изучение определенных проблем системы коммуникационных связей и интеллектуального управления для технологии бесконтактной зарядки электромобилей, начали проводиться с момента получения первых положительных результатов по созданию зарядных устройств данного типа и продолжаются по сей день. Результаты этих исследований периодически появляются в научных докладах на международных конференциях, публикуемых, как правило, издательством всемирно известного Института инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE), например: отчетные доклады А. Эссера из Центра корпоративных исследований GE Global Research (США), Н. El Fadil и S. Njili из научных лабораторий университетов Султана Мулая Слимана и Ибн Тофейла (Марокко), Заид Эль-Шаира, Эллы Райман и других исследователей из Мичиганского университета – Дирборн (США), профессора Махмуда Х. Исмаила и других специалистов факультетов электротехники Американского университета Шарджи и Каирского университета (Египет), Б. Дж. Квака из Научно-исследовательского института электроники и телекоммуникаций (Южная Корея) и ряда других [19, 20, 21, 22]. Наибольший интерес из них представляют результаты исследований Надима Эль Сайеда – специалиста Технического университета Берлина (Германия), представленные в 2019 году в докладе на Международной конференции по электрическим и электронным технологиям для автомобилестроения [23], как раз посвященная рассмотрению проблем адаптации стандарта ISO 15118 к технологии бесконтактной зарядки электромобилей. Автором представлена типовая концептуальная схема коммуникационных связей в соответствии со стандартом ISO 15118, показаны компоненты, которые применимы для бесконтактной технологии зарядки и ко-

торые необходимо заменить при реализации технологии беспроводной передачи энергии. В своем докладе автор также акцентировал внимание на том, что при создании системы коммуникационных связей необходимо особое внимание уделять вопросам необходимости точного позиционирования электромобиля (бортового «приемника») относительно зарядной площадки («транслятора»), блокировки точки зарядки зарядной площадки при отсутствии электромобиля для обеспечения безопасности и защиты от вандализма, обеспечению интероперабельности (функциональной совместимости). Однако конкретного технического решения в виде схемы, модели и алгоритма коммуникационных связей между электромобилем и зарядной станцией для реализации технологии беспроводной зарядки автор не представил. В 2019 году компанией Hyundai Motor Group был создан и представлен на выставке в Лас-Вегасе «International Consumer Electronics Show 2019» виртуальный концепт беспроводной зарядки электромобилей и парковочного автопилота с возможностью управления со смартфона, осуществление которого планировалось компанией не ранее 2025 – 2030 гг. [24].

Для реализации подобного проекта прежде всего необходимо иметь модель коммуникационных связей между электромобилем и бесконтактным магнитно-резонансным зарядным устройством, учитывающую все возможные состояния комплексной технической системы, отражающую ее переходы из одного состояния в другое в процессе всей сессии зарядки, начинающейся с успешной настройки связи и заканчивающейся прекращением связи. Поэтому любые исследования в этом направлении являются весьма актуальными. Разнообразие схемотехнических решений, предлагаемых разработчиками магнитно-резонансных зарядных устройств, и отсутствие единого мнения, определяющего алгоритм параметрических взаимосвязей и управления процессом зарядки, позволяющий достичь максимальной эффективности, затрудняет создание унифицированной типовой модели коммуникационных связей между электромобилем и зарядным устройством.

### **Цель исследования и постановка задач**

Целью исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, являлось создание типовой модели информационных коммуникационных связей между электромобилем и бесконтактным магнитно-резонансным зарядным устройством.

Разрабатываемая модель, как и сама система, не должна противоречить основным ранее стандартизированным требованиям стандарта ISO 15118, включая требования, определяющие порядок испытаний. При этом система коммуникационной связи между зарядной станцией и электромобилем должна обеспечивать:

- процесс передачи энергии без какого-либо взаимодействия с водителем в ручном режиме;
- интероперабельность зарядной станции и электромобиля как с точки зрения механизма передачи энергии, так и с точки зрения коммуникационного взаимодействия;

- временную синхронизацию выполнения операций в соответствии с графиком сессии зарядки;
- возможность устанавливать и поддерживать коммуникационную связь с одним или несколькими электромобилями одновременно;
- безопасность процесса бесконтактной передачи энергии и беспроводной локальной сети.

В процессе исследований рассматривались исключительно только коммуникационные связи между транспортным средством и зарядной станцией. Рассмотрение внутриобъектовых связей между компонентами системы электропитания электромобиля, между компонентами зарядной станции не являлось предметом исследований.

### **Методы исследований и технологии проектирования**

В процессе исследований было принято, что модель коммуникационных связей между электромобилем и бесконтактным магнитно-резонансным зарядным устройством должна представлять собой информационную модель, максимально отражающую совокупность информации, характеризующей свойства и состояния взаимодействующих объектов – электромобиля и зарядной станции, а также самого процесса бесконтактной зарядки. Учитывая многооперационность сессии зарядки, наличие переходных состояний и процессов, многофакторность зависимостей самого процесса бесконтактной передачи энергии через воздушный зазор, по форме модель наиболее целесообразно строить в виде сетевой модели – в виде графа связей, с последующим алгоритмическим описанием всех переходов. Вершины графа – состояния объектов, дуги графа – процессы переходов из одного состояния в другое. Построение сетевой модели дает возможность отразить уровни иерархии состояний. При этом сетевая модель может быть ориентирована по временной шкале, что дает возможность отразить требования по синхронизации процессов. Такая сетевая информационная модель коммуникационных связей в комплексе с алгоритмами, описывающими переходы должна послужить основой для построения архитектуры сети связи.

### **Результаты исследований**

В результате проведенных исследований были разработаны:

- операционная технологическая структура сессии зарядки электромобиля на БЗС;
- сетевые модели изменения состояний двух взаимосвязанных подсистем: БЗУ и части устройств системы электропитания электромобиля, относящейся непосредственно к процессу бесконтактной зарядки, при реализации сессии зарядки;
- алгоритмы действий, описывающие переходы подсистем из одного состояния в другое;
- выявлены особые условия обмена сообщениями, которые должны выполняться для перехода из одного состояния в другое в обеспечение реализации сессии зарядки.

В процессе исследований была принята структура компонентов системы связи электротранспортного средства с бесконтактной зарядной станцией, схематично показанная на рис. 1.

Как видно из рис. 1, связь между зарядной станцией и электромобилем осуществляется посредством системы локальной беспроводной связи, информационный коммуникационный обмен – двухсторонний по принципу «точка-точка». При этом функции контроллеры питания и контроллеры системы связи могут быть реализованы одними аппаратными компонентами как со стороны зарядной станции, так и со стороны электромобиля.

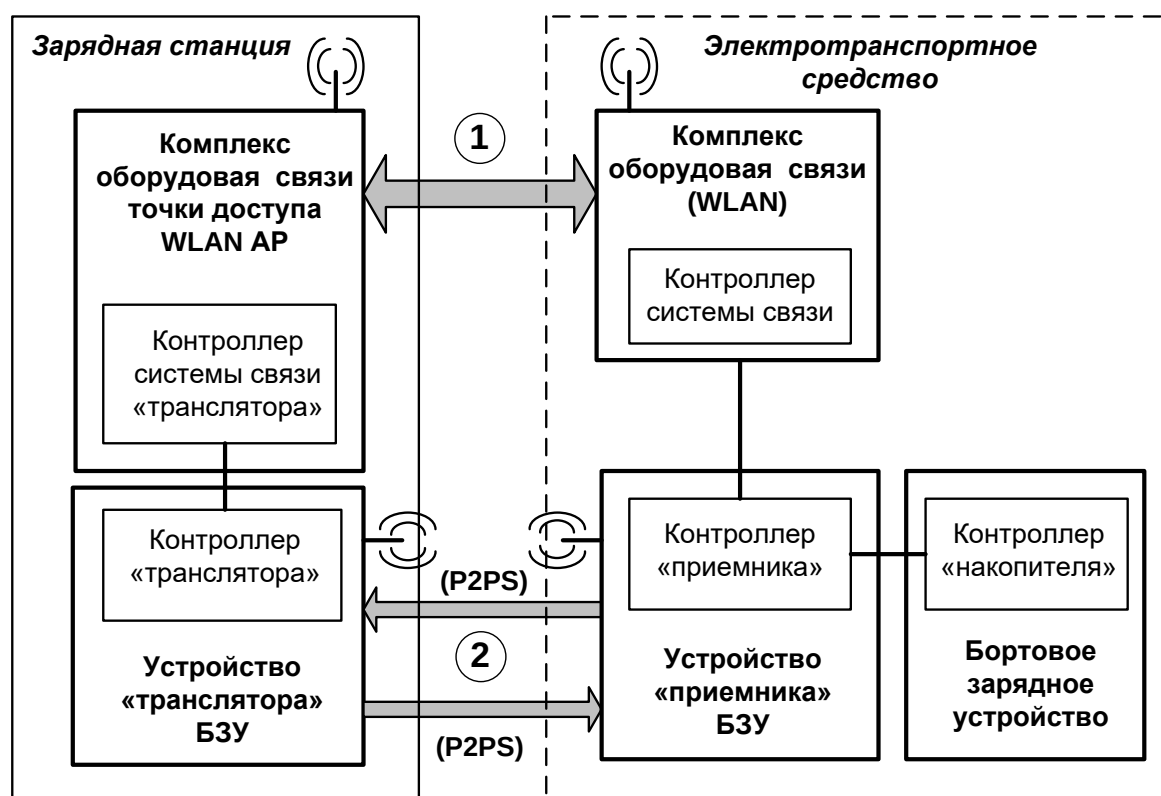


Рис. 1. Структура компонентов системы связи электротранспортного средства с бесконтактной зарядной станцией (обозначения на рис.: 1 – коммуникационная связь от оборудования питания; 2 – коммуникационная связь от транспортного средства; WLAN – беспроводная локальная сеть; P2PS – сигнал «точка – точка»)

На рис. 2 представлена разработанная в процессе проведенных исследований операционная технологическая структура сессии зарядки электромобиля на БЗС, отражающая основные этапы сессии от момента въезда электромобиля на зарядную станцию и настройки связи с зарядной станцией (БЗС) до момента прерывания связи и убытия электромобиля со станции. Схема сессии зарядки, представленная на рис. 2, учитывает физические особенности и закономерности процесса бесконтактной передачи энергии, исследованиям которых были посвящены опубликованные ранее работы [17, 18]. На данной схеме сессия заряд-



ки представлена в расширенном общем виде и предусматривает возможность нахождения на зарядной площадке нескольких БЗС.

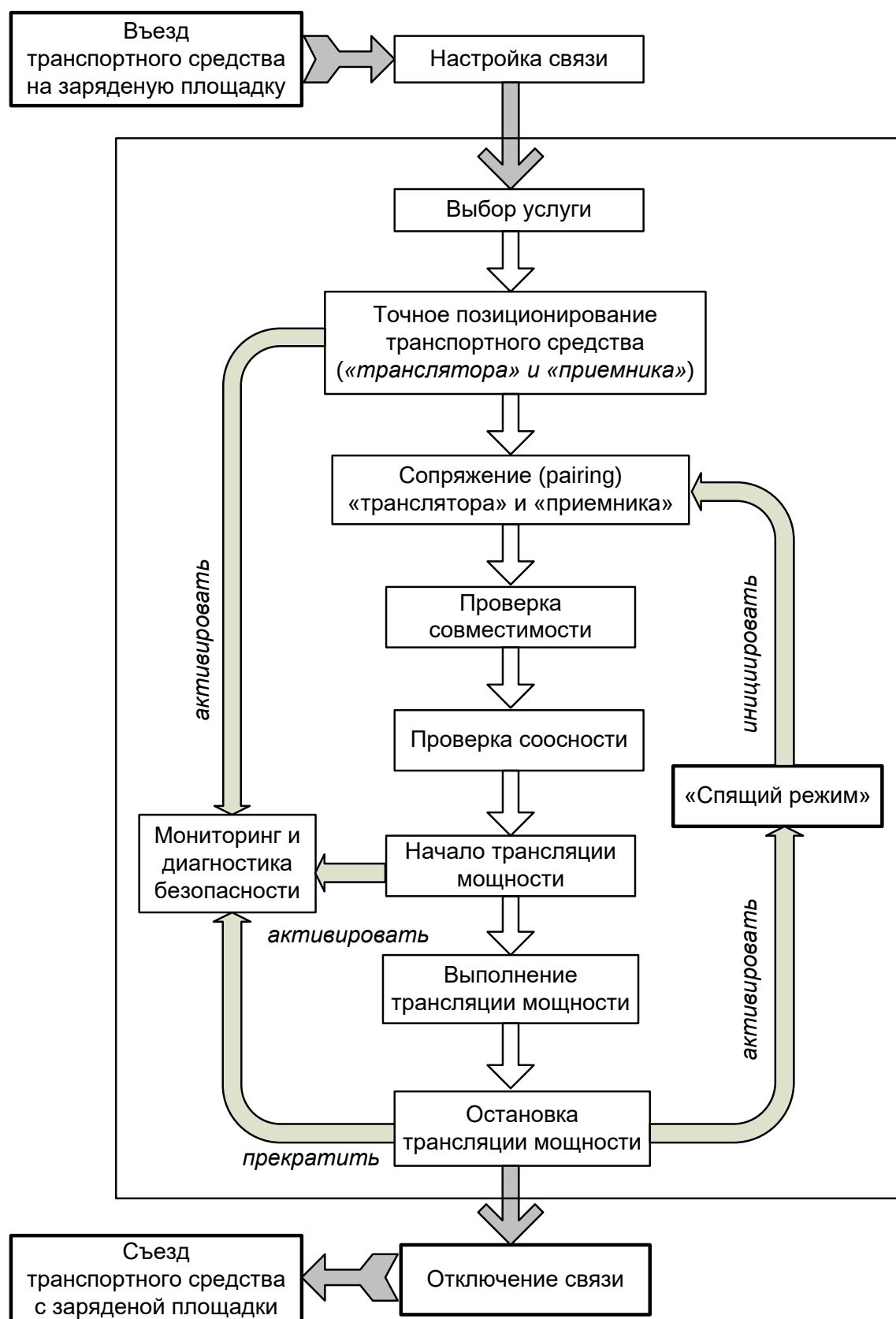


Рис. 2. Операционная технологическая структура сессии зарядки электромобиля на бесконтактной зарядной станции

При заезде ТС на территорию зарядной площадки настройка связи должна инициироваться контроллером связи ТС. При этом контроллер связи ТС и контроллер связи БЗС должны иметь возможность проверки правильности установки связи.

Далее контроллер связи ТС и контроллер связи БЗС обеспечивают информационный обмен параметрами обслуживания ТС системой БЗС, включая доступные условия совместимости, позиционирования и сопряжения стационарного «транслятора» и бортового «приемника». Результатами этого обмена должны явиться: либо выбор БЗС и параметров услуги зарядки, либо отклонение сессии зарядки и прекращение взаимодействия между ТС и БЗС.

В случае выбора услуги зарядки необходимо обеспечить позиционирование ТС и БЗС. Операция «позиционирование» может выполняться как с поддержкой коммуникации между БЗС и ТС, так и в режиме некоммуникабельной поддержки. По сигналу «отрегулировать положение» водитель обеспечивает парковку ТС на БЗС, после чего система должна выдать сигнал «регулировка положения закончена» и сформировать команду для начала «сопряжения» электромобиля и БЗС.

«Сопряжение» должно позволить контроллеру связи ТС и контроллеру связи БЗС однозначно идентифицировать зарядное устройство, на котором расположено ТС. Идентификация должна осуществляться путем запрограммированного распознавания в режиме двухстороннего обмена в следующей последовательности: анализ зарядным устройством сигнала от распознанного ТС, анализ электромобилем сигнала, распознанного БЗС. При этом операция «сопряжение» может осуществляться в процессе выполнения операции «точное позиционирование». В результате выполнения операции «сопряжение» контроллеры связи ТС и БЗС должны выдать подтверждение о успешном сопряжении и сформировать команду для осуществления окончательной проверки совместимости ТС и БЗС.

После «сопряжения» ТС и БЗС, контроллер связи ТС для окончательной «проверки совместимости» должен путем соответствующих запросов обеспечить информацию о проверке и подтверждении совместимости с остальными компонентами бортовой системы электропитания. Результаты этой проверки должны быть согласованы с параметрами режима зарядки посредством информационного обмена контроллера связи ТС и контроллера связи БЗС. Данная процедура является компонентой подготовки к передаче мощности.

Как отмечалось в работе [17] для достижения максимальной эффективности процесса бесконтактной передачи мощности необходимо обеспечить максимально точное совмещение первичной обмотки индуктивности «транслятора» БЗС и вторичной обмотки индуктивности бортового «приемника». Предельно допустимые отклонения по горизонтали и вертикали определены стандартом ISO 19363 [25]. Поэтому еще одной процедурой при подготовке к передаче мощности является проверка и обеспечение требуемого положения соосности катушек индуктивности «транслятора» и «приемника». В выполнении данной процедуры задействованы датчики положения БЗС, интегрированные с контроллером связи БЗС, передающим соответствующую информацию на кон-

троллер связи ТС. На основании информации о наличии недопустимых отклонений положения «приемника» от «транслятора» водитель осуществляет корректировку парковки ТС, после чего контроллеры связи ТС и БЗС должны выдать подтверждение о успешном выполнении выравнивания и сформировать команды на активацию систем питания ТС и БЗС и начало операции передачи мощности, установив время зарядки. Инициирование начала передачи мощности должно осуществляться со стороны ТС.

По истечению заданного времени трансляция мощности со стороны БЗС прекращается. После отключения передачи мощности контроллер связи ТС может прервать связь с БЗС, ТС получает возможность покинуть зарядную площадку, а контроллер связи БЗС сформировать информацию о том, что «место вакантно». Отключение связи должно осуществляться путем обмена сообщениями между контроллером связи ТС («запрос») и контроллером связи БЗС (подтверждающий «ответ»).

При необходимости БЗС может быть переведена в состояние «спящий режим». Возможность перехода БЗС в «спящий режим» должна быть предусмотрена как после полного завершения сессии зарядки ТС, так и в случае необходимости временного прерывания трансляции мощности с последующим продолжением сессии зарядки. В случае перевода БЗУ в «спящий режим» после полного завершения сессии зарядки и отбытия ТС с зарядной площадки инициатором перехода является контроллер связи БЗУ. В случае прерывания трансляции мощности до завершения сессии зарядки инициатором перехода в «спящий режим» и выхода из него (запуска триггера «пробуждение») является контроллер ТС. При этом контроллеры связи ТС и БЗС должны обеспечить согласование времени «сна» и перевод своих компонентов в режим минимального энергопотребления. Выход из «спящего режима» должен осуществляться после взаимного подтверждения контроллерами связи ТС и БЗС готовности систем электропитания с той и другой стороны к возобновлению сессии зарядки. В противном случае цикл «сна» должен быть продлен (повторен). При возобновлении сессии зарядки при выходе из «спящего режима» весь цикл операций сессии начиная с операции «сопряжение» в обязательном порядке должен быть повторен.

Такой детальный подход к обеспечению системой коммуникационных связей взаимной согласованности действий ТС и БЗС вызван не только необходимостью достижения максимальной эффективности процесса передачи мощности, но и необходимостью обеспечения безопасности. Как известно, процесс бесконтактной передачи электроэнергии сопровождается тепловыми эффектами, электромагнитным излучением, генерируемыми в окружающую среду магнитно-резонансными устройствами бесконтактной передачи энергии. Магнитное поле может оказывать отрицательное воздействие как на живые организмы, в том числе человека, так и вызывать помехи в работе других электрических и электронных устройств. Результаты подробных исследований возможного влияния БЗС электромобилей на человека, находящегося в зоне зарядной площадки, были проведены и опубликованы в Международном журнале экологических исследований и общественного здравоохранения еще в 2017 году специалиста-

ми Школы электротехники Юго-Восточного Университета (КНР) [26]. На основании результатов этих исследований и исследований других авторов определено, что создаваемые БЗС должны соответствовать требованиям, установленным нормами Международной комиссией по защите от неионизирующего излучения (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ICNIRP RL 2010 [27]: напряженность электрического поля не должна превышать значения  $8,3 \cdot 10^{-2}$  кВ/м; значение напряженности магнитного поля не должно быть более 21,0 А/м; плотность магнитного потока – не более  $2,7 \cdot 10^{-5}$  Т. В обеспечение этих требований при создании БЗУ их разработчиками создаются различные варианты конструктивных решений по экранированию обмоток индуктивности, устанавливаются допустимые значения диапазонов рабочих частот (от 81.38 кГц до 90 кГц) и т.д. Указанные выше требования учитываются в том числе и при разработке рекомендаций по допустимым значениям воздушных зазоров и несоосности между «транслятором» и «приемником». На протяжении всей сессии зарядки должен осуществляться контроль состояния защищенности от электромагнитных полей водителя, пассажиров, бортовой электронной аппаратуры ТС, живых организмов, находящихся в прилегающей к БЗУ области, посредством специальных датчиков в составе подсистемы телеметрии БЗС, интегрированных с контроллером связи БЗС.

Таким образом в процессе осуществления сессии зарядки должен быть предусмотрен непрерывный мониторинг безопасности процесса, а система коммуникационных связей должна при этом поддерживать следующие меры безопасности:

- мониторинг линии связи;
- непрерывную проверку взаимного положения «транслятора» и «приемника»;
- непрерывную проверку уровня электромагнитного излучения;
- формировать отчет об отказах,
- осуществляя обмен информацией между контроллером связи ТС и контроллером связи БЗС.

Линия связи должна контролироваться контроллером БЗС. Для реализации мониторинга система должна обладать способностью распознавать является ли связь активной, а также способностью измерения временных интервалов «запрос-ответ». Признаком сбоя в линии связи может являться увеличение временного периода «запрос-ответ» свыше 2 с. В этом случае БЗС должно не только распознать потерю связи, но и уменьшить значение тока первичной катушки.

Таким образом, разработанная и рассмотренная выше технологическая схема хотя и является специализированной для сессии зарядки электромобиля по бесконтактной технологии, но не противоречит основным положениям ISO 15118.

Далее на основании операционной технологической структуры сессии зарядки в процессе проведенных исследований были разработаны сетевые (в виде графов связей) модели соответствующих изменениям состояний БЗУ и части устройств системы электропитания электромобиля, относящейся к процессу бесконтактной зарядки, и их описания. На рис. 3 представлена модель измене-

ния состояний БЗС, на рис. 4 – модель изменения состояний части устройств системы электропитания электромобиля. При разработке моделей были приняты следующие условные обозначения, соответствующие обозначениям, используемым в международных нормативных и рекомендательных документах ISO и SAE: подсистема «V» – транспортное средство (англ. *vehicle*); подсистема «S» – БЗС – точка питания (англ. *supply spot*).

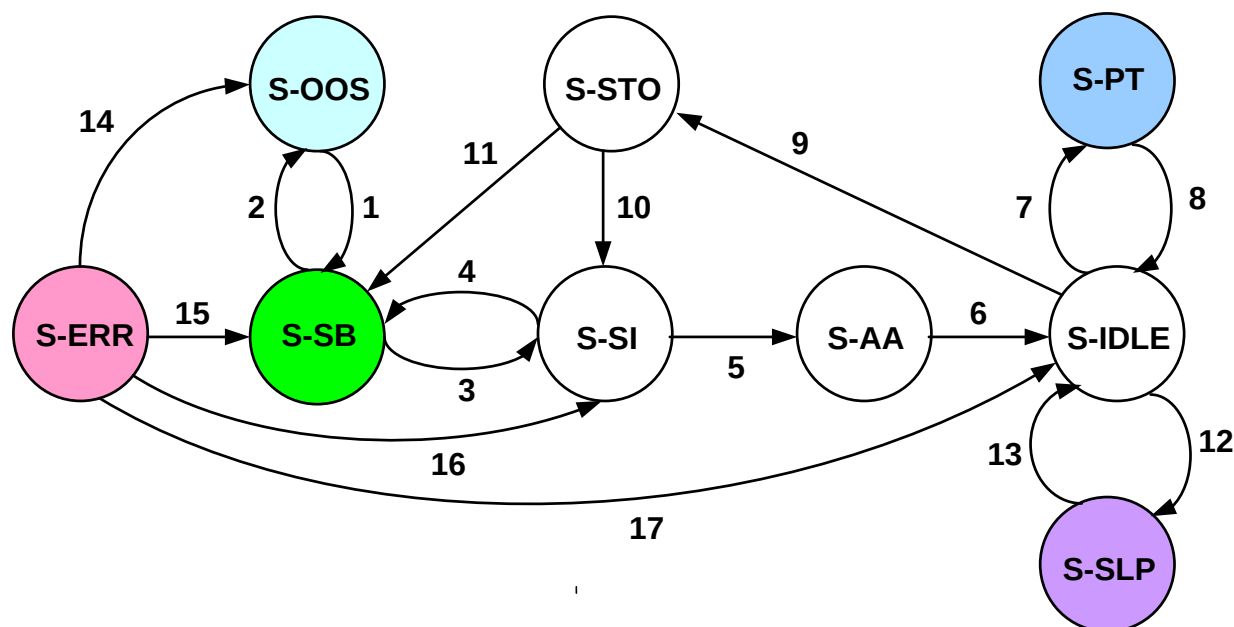


Рис. 3. Сетевая модель изменения состояний БЗУ при реализации сессии зарядки электромобиля

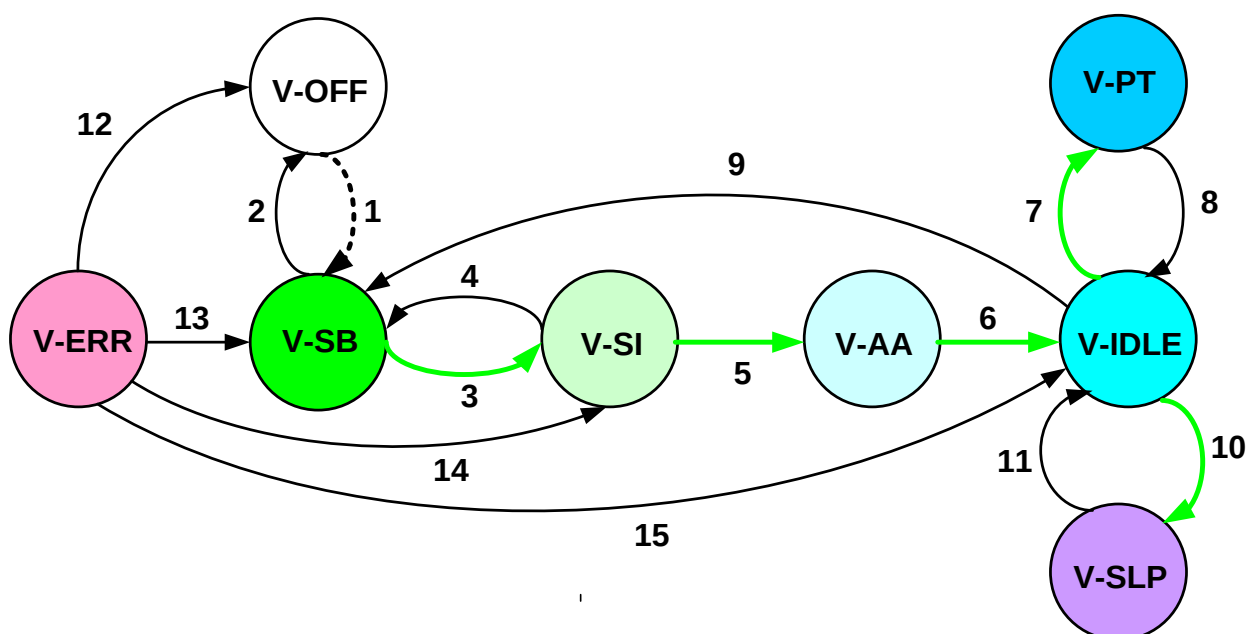


Рис. 4. Сетевая модель изменения состояний части устройств системы электропитания электромобиля, относящейся к процессу бесконтактной зарядки

Как указывалось ранее, вершины графа соответствуют состоянию соответствующей подсистемы. При моделировании рассматривались следующие



состояния подсистем «V» и «S» в соответствии с технологической последовательностью выполнения процедур сессии зарядки:

- ERR (англ. *error*) – подсистема не активирована (состояние восстанавливаемого или невозстанавливаемого «отказа» в выполнении сессии);
- SB (англ. *session beginning*) – начало реализации сеанса сессии зарядки (подсистема готова к началу сессии, но связь между подсистемами не установлена);
- SI (англ. *service initiated*) – состояние, когда сессия зарядки инициирована (подсистема активирована, готова к началу сессии, связь установлена, от ТС отправлен первичный запрос о состоянии совместимости);
- AA (англ. *access authorization*) – состояние «ожидания» совместимости подсистем, когда осуществляется мониторинг параметров взаимного позиционирования ТС относительно БЗС до подтверждения совместимости в результате регулировки положения ТС;
- IDLE (англ. *idle*) – состояние, когда совместимость взаимного положения подтверждена, функции безопасности и диагностики активированы, готовность к передаче/приему мощности подтверждена (состояние «холостой ход»);
- PT (англ. *power transmission*) – состояние передачи/приема мощности;
- STO (англ. *service terminated occupied*) – состояние, когда процедура передачи мощности прекращена;
- SLP (англ. *service location is positioned*) – состояние «спящего режима» (коммуникативные функции снижены, система безопасности и диагностики отключена);
- OOS (англ. *out of service*) – состояние, когда передача мощности отключена, но связь БЗС с ТС установлена в одностороннем направлении;
- OFF (англ. *offline*) – состояние, когда прием мощности отключен, связь ТС с БЗС отсутствует.

Переходы из одного состояния в другое состояние (дуги графа) осуществляются при определенных условиях, подтверждаемых соответствующими сигналами прямой и обратной связи, обозначенных на рис. 3 и рис. 4 цифрами.

На модели, представленной на рис. 3:

- 1 – сигнал подтверждения, что подсистема «S» активирована (включена);
- 2 – сигнал «подсистема «S» не активирована» (выключена);
- 3 – сигнал, подтверждающий «связь установлена»;
- 4 – сигнал «сессия зарядки отклонена»;
- 5 – сигнал, подтверждающий, что начато выравнивание соосности катушек индуктивности «транслятора» и «приемника»;
- 6 – сигнал, подтверждающий выполнения выравнивания соосности;
- 7 – сигнал, подтверждающий активацию подготовки к передаче мощности (включение системы мониторинга безопасности и диагностики);
- 8 – сигнал команды «остановить передачу мощности»;
- 9 – сигнал «связь прервана»;
- 10 – сигнал «связь восстановлена»;

- 11 – сигнал «ТС покинуло БЗС»;
- 12 – сигнал, подтверждающий, что подсистема «S» находится в «спящем режиме»;
- 13 – сигнал, подтверждающий «пробуждение» подсистемы «S» (выход из «спящего режима»);
- с 14 по 17 – сигналы выявления неисправностей или ошибок и сброса соответствующих команд на выполнение процедур.

На модели, представленной на рис. 4:

- 1 – сигнал активации подсистемы «V»;
- 2 – сигнал «подсистема «V» не активирована» (выключена);
- 3 – сигнал команды «установить связь»;
- 4 – сигнал «сессия зарядки отклонена»;
- 5 – сигнал, подтверждающий, что начато выравнивание соосности катушек индуктивности «транслятора» и «приемника»;
- 6 – сигнал «выравнивание соосности подтверждено»;
- 7 – сигнал, подтверждающий, что контроль безопасности и диагностики активирован;
- 8 – сигнал «остановить (отключить) передачу мощности»;
- 9 – сигнал «связь прервана»;
- 10 – сигнал команды перехода в «спящий режим»;
- 11 – сигнал команды «пробуждение» (выхода из «спящего режима»);
- с 12 по 15 – сигналы выявления неисправностей или ошибок и сброса соответствующих команд на выполнение процедур.

Ошибки могут проявляться, например, если складывается ситуация, когда подсистемы «V» и «S» не могут установить связь или происходит потеря связи в период сессии, ТС и БЗУ не совместимы, не удастся осуществить выравнивание соосности «транслятора» и «приемника», системой телеметрии обнаружено ненормативное тепловое состояние, между «транслятором» и «приемником» обнаружено живое существо или посторонний предмет и т.д. После того, как устройство подсистемы «S» столкнулось с сигналом неисправности или ошибки, оно переходит в состояние ERR. В этом состоянии устройство не может работать должным образом и безопасность процесса не может быть обеспечена. Хотя при этом связь между подсистемами «V» и «S» может быть установлена. Если работоспособность подсистемы «S» не может быть восстановлена, то устройство переходит в состояние OOS. Если имеется возможность восстановления (очищения ошибки), то сессия может быть продолжена с этапа восстановления. В случае обнаружения неисправностей или ошибок подсистемой «V», действия осуществляются аналогичным образом.

Каждый переход из одного состояния в другое, представленный на сетевых моделях, описывается в виде алгоритма соответствующих действий. На рис. 5–8 показаны алгоритмы действий основных переходов.

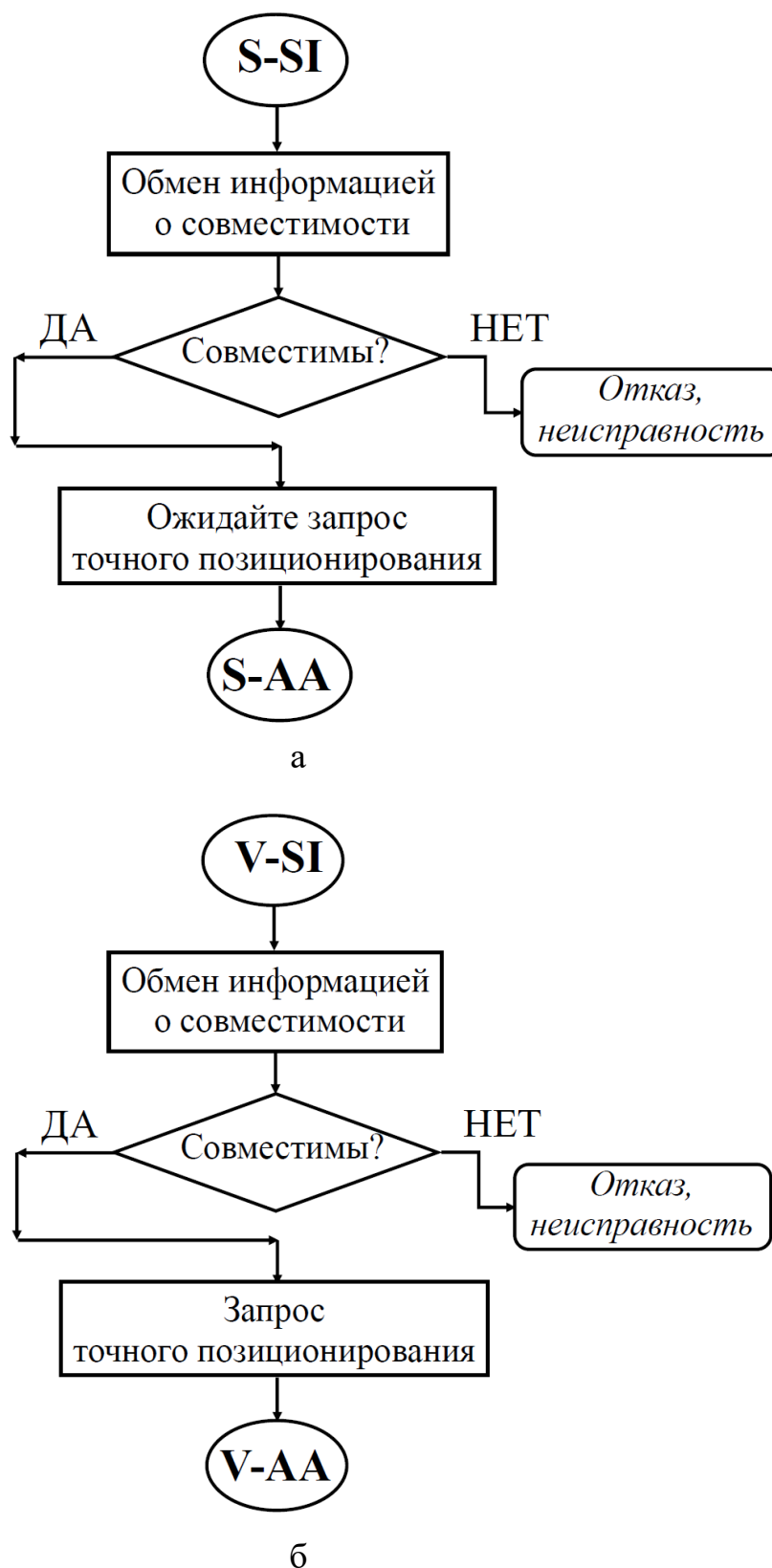
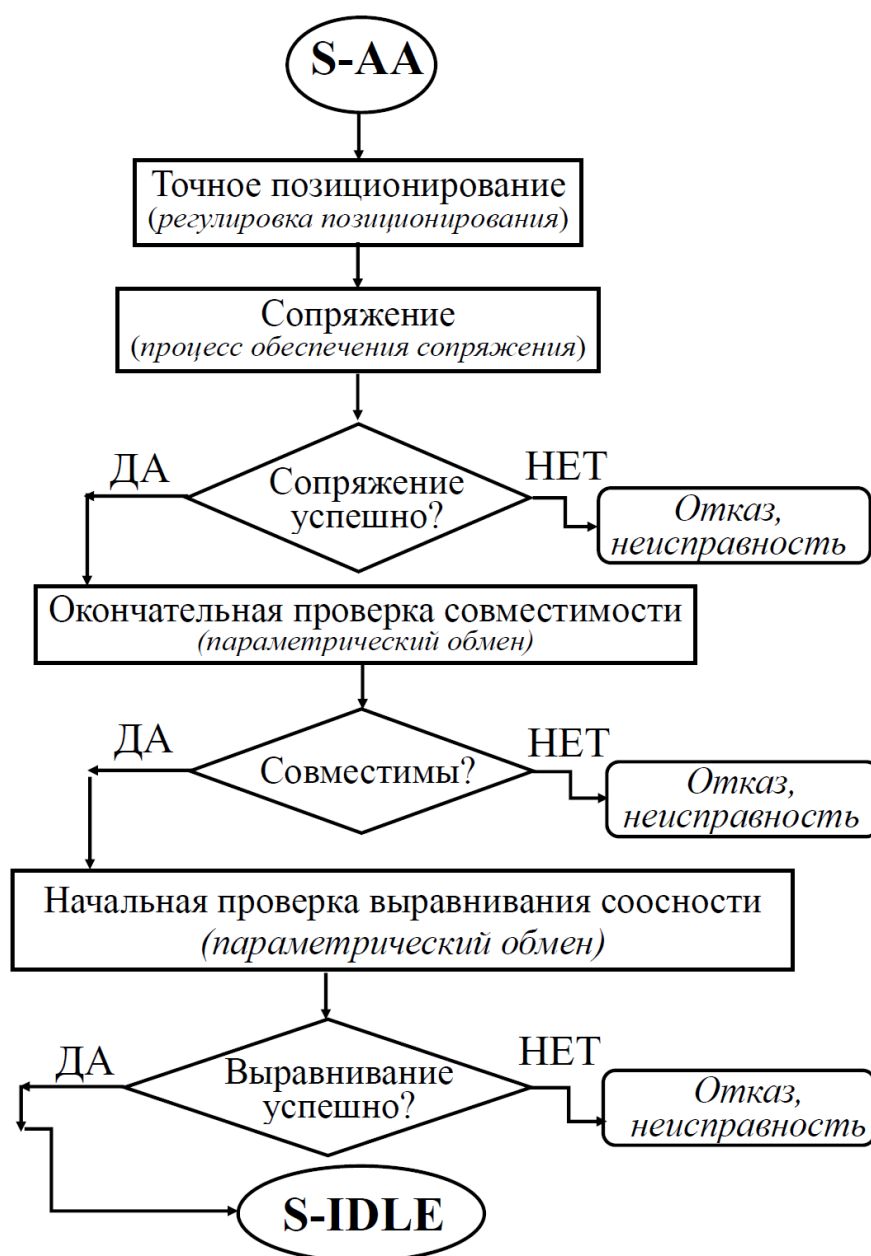
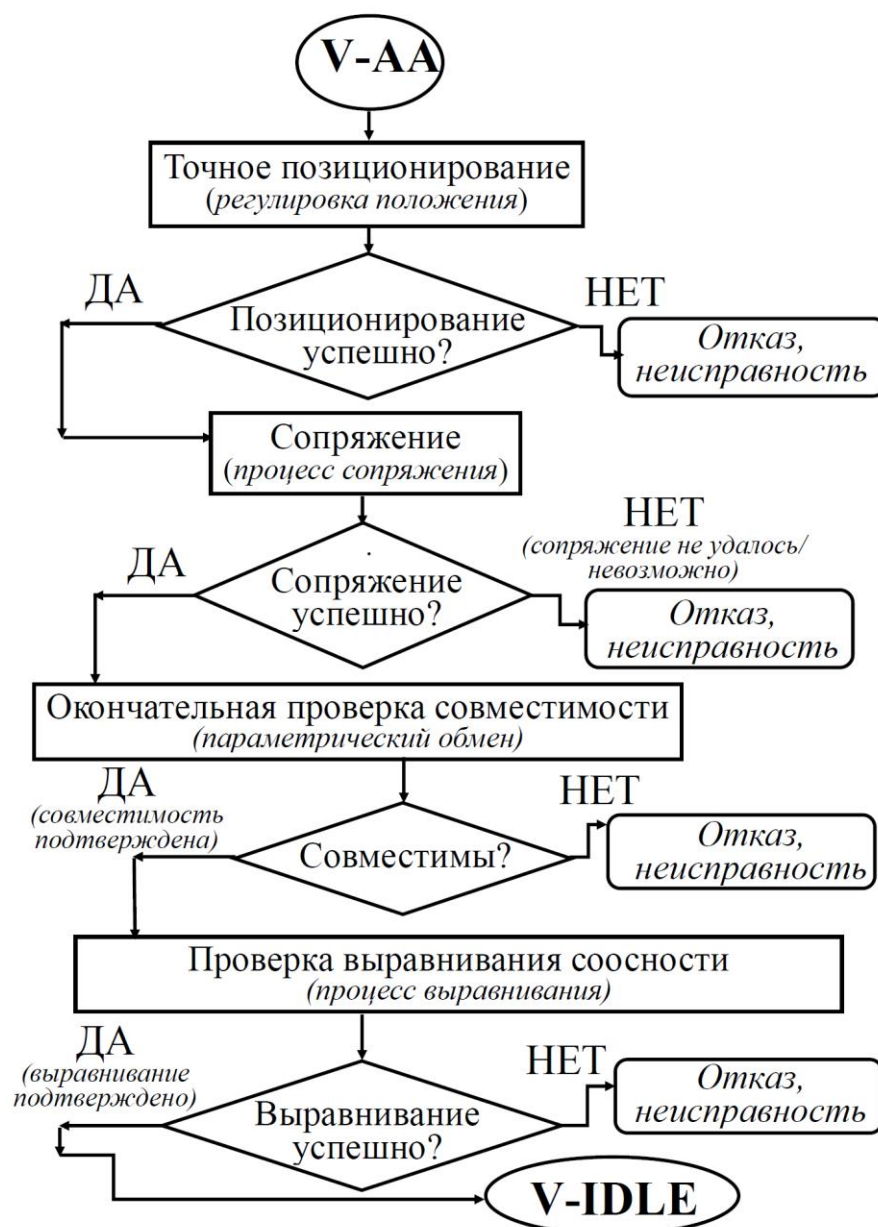


Рис. 5. Алгоритм инициации сервиса сессии зарядки:  
а – переход из состояния SI в состояние AA подсистемы S;  
б – переход из состояния SI в состояние AA подсистемы V



а

Рис. 6 (начало). Алгоритм процесса позиционирования и выравнивания соосности: а – переход из состояния АА в состояние IDLE подсистемы S;  
б – переход из состояния АА в состояние IDLE подсистемы V



б

Рис. 6 (окончание). Алгоритм процесса позиционирования и выравнивания соосности: а – переход из состояния AA в состояние IDLE подсистемы S;  
б – переход из состояния AA в состояние IDLE подсистемы V



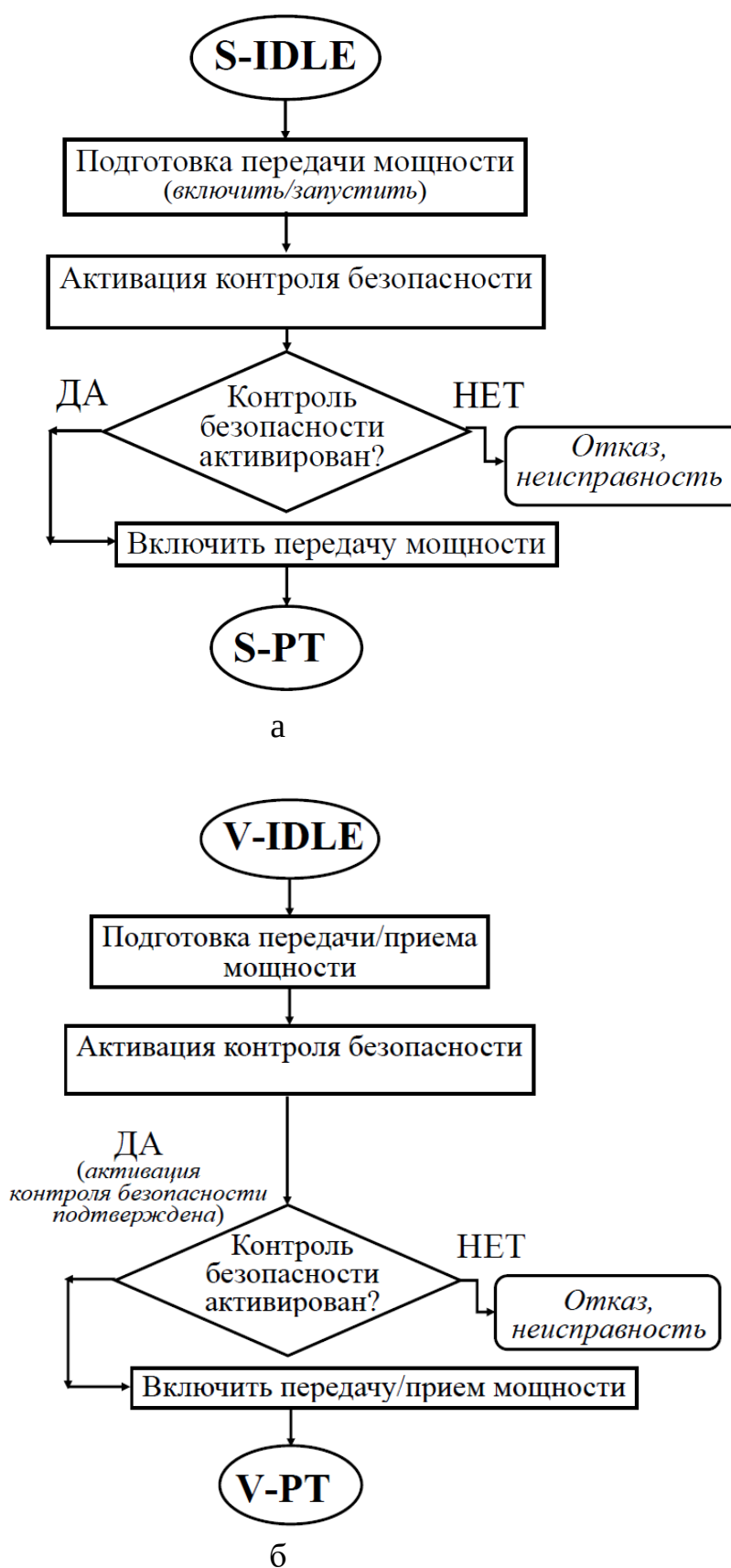


Рис. 7. Алгоритм процесса подготовки к передаче мощности:  
а – переход из состояния IDLE в состояние PT подсистемы S;  
б – переход из состояния IDLE в состояние PT подсистемы V

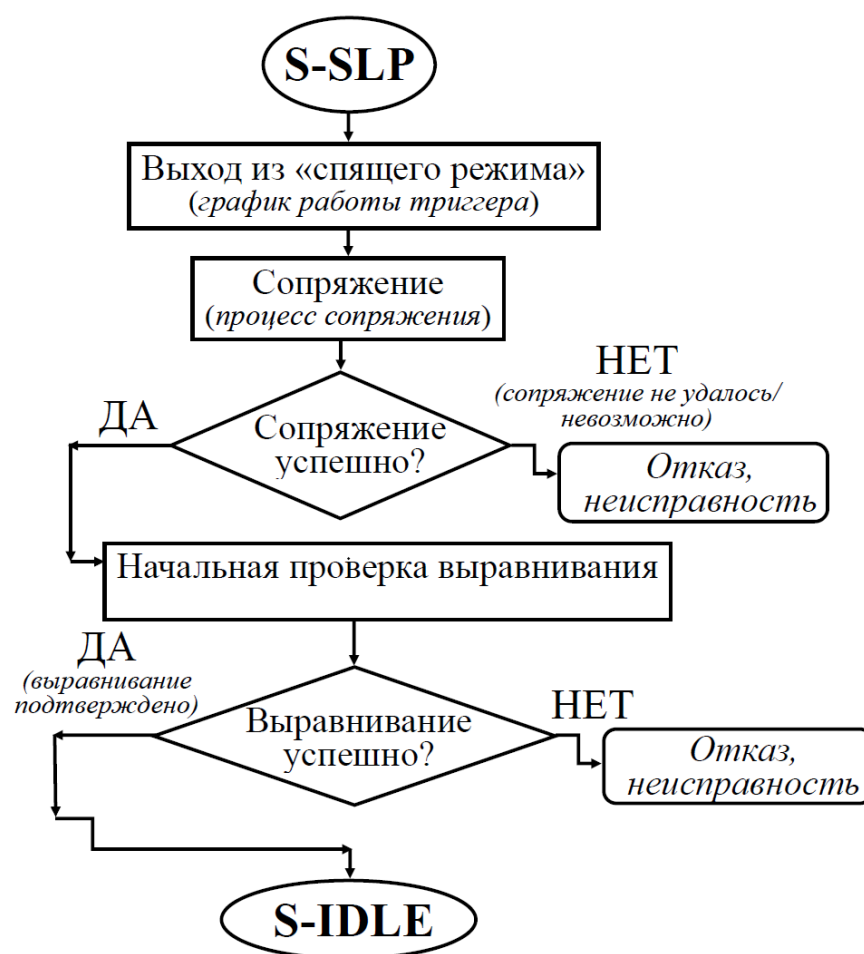


Рис. 8. Алгоритм процесса выхода («пробуждения») БЗС из «спящего режима»

Связь между БЗС и ТС, должна осуществляться по протоколу, определенному ISO 15118 (часть 2). Архитектурный уровень связи для открытых систем (OSI), физический уровень беспроводной сети должен также соответствовать ISO 15118 (часть 8).

При настройке связи ТС должно находиться в зоне действия WLAN контроллера связи БЗС и подключаться к WLAN через точку доступа в соответствии с ISO 15118 (часть 2). Дополнительно необходимо отметить, что для осуществления подключения к WLAN ТС должно быть оборудовано антенной малой дальностью действия, предназначенной для приема сигналов только одной БЗС.

Для настройки связи между контроллерами связи БЗС и ТС должен осуществляться обмен сообщениями настройки: поддержка протокола приложения Req/Res («запрос/ответ»); настройка сеанса Req/Res. Только после успешного обмена настройками сеанса Req/Res устройство ТС переходит в состояние «V-SI», а устройство БЗС в состояние «S-SI».

Для перехода из состояния «SI» в состояние «AA» контроллеры связи БЗС и ТС должны осуществить обмен сообщением Req/Res, подтверждающим обнаружение сервиса, а также сообщениями, определяющими детализацию па-

раметров сервиса зарядки и оплаты услуги зарядки. Только после этого информационного обмена подсистема «V» может перейти в состояние «V-AA», а подсистема «S» – в состояние «S-AA».

При окончательной проверке совместимости БЗУ и ТС между контроллерами связи БЗС и ТС должен осуществляться обмен информационными сообщениями Req/Res о параметрах заряда АБ ТС, что даст возможность определить потребность ТС в передаваемой мощности и полностью подтвердить переход подсистем в состояние «IDLE».

В процессе передачи мощности (состояние «РТ») между контроллерами связи БЗС и ТС должен осуществляться непрерывный обмен сообщениями о потребляемом электропитании, что обеспечит возможность контролировать передачу энергии и проверять надежность связи. При этом питающее устройство может в любое время изменить передаваемый предел мощности, а контроллер связи ТС может запросить различные уровни мощности в любое время. Кроме этого, такой непрерывный контроль позволит косвенным образом дополнительно осуществлять и непрерывный мониторинг стабильности положения катушек индуктивности «транслятора» и «приемника». При нарушении стабильности передачи мощности процесс может быть остановлен, что позволит обеспечить не только требования безопасности, но и энергосбережения.

### Заключение

Таким образом в результате проведенных исследований была создана модель информационных коммуникационных связей между электромобилем и магнитно-резонансной зарядной станцией. Данная модель построена на основании предварительно разработанной в рамках исследований операционной технологической структуры сессии зарядки электромобиля по бесконтактной технологии, а также ранее полученных (в том числе автором настоящей статьи) результатов исследований физики процессов бесконтактной передачи энергии через воздушный зазор и разработок по созданию бесконтактных магнитно-резонансных зарядных устройств, систематизированных относительно поставленной задачи. Модель является принципиально новым научным результатом в области создания зарядных инфраструктур на базе бесконтактных магнитно-резонансных зарядных устройств.

Созданная модель коммуникационных связей между ТС и БЗС представляет собой сетевую информационную модель в виде графа связей. Особенностью и новизной модели является то, что она одновременно учитывает физические закономерности процессов бесконтактной передачи энергии и особенности функционирования магнитно-резонансных зарядных устройств, а также требования и рекомендации международных и национальных стандартов, предъявляемые к интерфейсам связи «автомобиль – электрическая сеть». Модель отражает все возможные состояния комплексной технической системы «БЗС–ТС» при реализации сессии зарядки, начиная от настройки связи при заезде ТС на станцию зарядки и заканчивая прекращением связи при убытии заряженного ТС со станции зарядки. Описание и условия переходов из одного состояния в другое представлены комплексами алгоритмов соответствующих

действий и подтверждающих их сигналов прямой и обратной связи. В процессе построения модели были выявлены и определены особые условия обмена сообщениями, которые должны выполняться для перехода из одного состояния в другое в обеспечение реализации сессии зарядки, а также безопасности и энергоэффективности процесса.

Проведенные исследования носили целенаправленно прикладной характер. Практическая значимость их результатов состоит в том, что созданная модель является основой для непосредственного построения архитектуры сети коммуникационной связи «БЗС-ТС», выбора составляющих радиоэлектронных компонентов и разработки соответствующего программного обеспечения, что и планируется автором выполнить в дальнейшем.

Построение сети на базе разработанной модели позволит обеспечить практически полную автоматизацию процесса зарядки, организовав сервис по «безлюдной технологии», что позволит фактически реализовать одно из преимуществ технологии бесконтактной зарядки электромобилей по отношению к массово используемой в настоящее время технологии «plug-in» – это комфортность и безопасность при любых погодных условиях.

### Литература

1. Официальный сайт ООО «Тесла клуб» [Электронный ресурс]. – URL: <https://moscowteslaclub.ru> (дата обращения 15.07.2022).
2. Официальный сайт ООО «Драйв» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.drive.ru> (дата обращения 08.07.2022).
3. Официальный сайт компании «Volvo Car Corporation» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.volvocars.com> (дата обращения 18.07.2022).
4. ISO 15118. Road vehicles - Vehicle to grid communication interface. Edition 2.0 2019-04. Geneva: ISO, 2020. 24 p.
5. SAE J 2836. Instructions for Using Plug-In Electric Vehicle (PEV) Communications, Interoperability and Security Documents. Edition 1.0 2019-07. Warrendale, Pannsylvania: Society of Automotive Engineers International, 2019. 38 p.
6. SAE J 2847. Communication between Plug-In Vehicles and Off-Board DC Chargers. Edition 1.0 2015-04. Warrendale, Pannsylvania: Society of Automotive Engineers International, 2015. 177 p.
7. SAE J 2931. Digital Communications for Plug-in Electric Vehicles. Edition 1.0 2014-12. Warrendale, Pannsylvania: Society of Automotive Engineers International, 2019. 64 p.
8. ГОСТ Р 58122 - 2018. Транспорт дорожный. Интерфейс связи автомобиль – электрическая сеть. Часть 1. Общая информация и определение случаев использования. – М.: Стандартинформ, 2018. – 62 с.
9. ГОСТ Р 58123 - 2018. Транспорт дорожный. Интерфейс связи автомобиль – электрическая сеть. Часть 2. Требования к протоколу сетевого и прикладного уровней. – М.: Стандартинформ, 2018. – 336 с.

10. ГОСТ Р МЭК 61851 - 2013. Система токопроводящей зарядки электромобилей. Часть 1. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 47 с.
11. BESCOM Electric Vehicle Report №110021: Study of electric vehicle charging Infrastructure planning and rollout for Bengaluru Citi Karnataka // India Smart Grid Forum Central Board of Irrigation and Power (CBIP). New Delhi, 2021. – URL: <https://indiasmartgrid.org> (дата обращения 24.06.2022).
12. Eiman E., Hassan M., Osman A., Ahmed I. Review of Communication Technologies for Electric Vehicle Charging Management and Coordination // World Electric Vehicle Journal. 2021. Vol 12 (92). 22 p. DOI: 10.3390/120092 – URL: <https://www.mdpi.com> (дата обращения 17.04.2022).
13. Mültin M. ISO 15118 as the Enabler of Vehicle-to-Grid Applications // International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive. Germany, August 2018. Published in IEEE Xplore, 2018. 6 p. DOI: 10.23919/EETA.2018.8493213. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8493213/> (дата обращения 15.06.2022).
14. Song N., Kwak B. International Standard Trend of Vehicle to Grid (V2G) Communication Interface for Wireless Communication and RPT // Transportation Electrification Conference and Expo Asia-Pacific. Korea, 2019. Published in IEEE Xplore, 2019. 5 p. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2019.8903797. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8903797> (дата обращения 29.06.2022).
15. 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. – URL: <https://www.psm.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-transportation-power-electronics/presentations/is112-wireless-power-transfer-developers-guide.pdf> (дата обращения 18.07.2022).
16. 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
17. 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
18. Куркова О. П. МРРТ-алгоритм управления частотными характеристиками как инструмент повышения энергоэффективности процесса бесконтактной магнитно-резонансной зарядки электротранспорта // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 99–124. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-99-124
19. Esser A. Contactless charging and communication system for electric vehicles // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference 28 International Standards (IAS) Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada, October 1993. Published in IEEE. 2002. Vol. 2. P. 1021–1028. DOI:



10.1109/IAS.1993.299024. – URL:<https://ieeexplore.ieee.org/document/299024> (дата обращения 15.06.2022).

20. El Shair Z., Reimann E., Rawashdeh S., Ayachit A., Abdul-Hak M. Review and Evaluation of Communication Systems for Control of Stationary Electric-Vehicle Inductive Charging Systems // Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). Chicago, IL, USA, June 2020. Published in IEEE Xplore. 2020. DOI: 10.1109/ITEC48692.2020.9161625. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9161625> (дата обращения 14.04.2022).

21. Gong L., Xiao C., Cao B., Zhou Y. Adaptive Smart Control Method for Electric Vehicle Wireless Charging System // Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). 2018. Vol. 11 (10). No 2685. P. 1-13. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2685/pdf> (дата обращения 03.06.2022).

22. El Fadil H., Njili S., Zytoune O., Bajit A. Experimental Implementation of a Wireless Communication System for Electric Vehicle WPT Charger // 10<sup>th</sup> International Conference on Innovation, Modern Applied Science & Environmental Studies (ICIES'2022). Istanbul, Turkey, May, 2022. Published in Journal «E3S Web of Conferences». 2022. Vol. 351 (01006). 8 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202235101006. – URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2022/18/e3sconf\\_icies2022\\_01006/e3sconf\\_icies2022\\_01006.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2022/18/e3sconf_icies2022_01006/e3sconf_icies2022_01006.html) (дата обращения 03.07.2022).

23. El Sayed N. A prototypical implementation of an ISO-15118-based wireless vehicle to grid communication for authentication over decoupled technologies // International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive. Turin, Italy, July 2019. Published in IEEE Xplore, August 2020. 6 p. DOI: 10.23919/EETA.2019.8804545. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8804545> (дата обращения 17.07.2022).

24. Официальный сайт компании «Hyundai Motor Group» // Hyundai Motor Group has created the concept of wireless charging of electric vehicles and parking autopilot (according to the information materials of the International Consumer Electronics Show. Las Vegas, USA, 2019). – URL: <https://www.hyundai.com/news/> (дата обращения 11.05.2022).

25. 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.

26. Wen F., Huang X. Human Exposure to Electromagnetic Fields from Parallel Wireless Power Transfer Systems // International Journal of Environmental Research and Public Health, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2017. Vol. 14 (2). No 157. 15 p. DOI: 10.3390/ijerph14020157. – URL: [www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph) (дата обращения 04.07.2022).

27. ICNIRP Guidelines: Forlimiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz) // Health Phys, 2010. No 99(6). P. 818–836. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86. – URL:<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21068601/> (дата обращения 07.04.2022).

## References

1. Official website company LLC "Tesla Club". Available at: <https://moscowteslaclub.ru/> (accessed 15 July 2022).
2. Official website company LLC "Drive". Available at: <https://www.drive.ru/> (accessed 08 July 2022).
3. Official website company «Volvo Car Corporation». Available at: <https://www.volvocars.com/> (accessed 18 July 2022).
4. ISO 15118. Road vehicles - Vehicle to grid communication interface. Edition 2.0 2019-04. Geneva, ISO, 2020. 24 p.
5. SAE J 2836. Instructions for Using Plug-In Electric Vehicle (PEV) Communications, Interoperability and Security Documents. Edition 1.0 2019-07. Warrendale, Pannsylvania, Society of Automotive Engineers International, 2019. 38 p.
6. SAE J 2847. Communication Between Plug-In Vehicles and Off-Board DC Chargers. Edition 1.0 2015-04. Warrendale, Pannsylvania, Society of Automotive Engineers International, 2015. 177 p.
7. SAE J 2931. Digital Communications for Plug-in Electric Vehicles. Edition 1.0 2014-12. Warrendale, Pannsylvania: Society of Automotive Engineers International, 2019. 64 p.
8. State Standard R 58122 - 2018. Road transport. Car – electric network communication interface. Part 1. General information and definition of use cases. Moscow, Standartinform, 2018. 62 p. (in Russian).
9. State Standard R 58123 - 2018. Road transport. Car – electric network communication interface. Part 2. Requirements for the protocol of the network and application layers. Moscow, Standartinform, 2018. 336 p. (in Russian).
10. State Standard R IEC 61851 - 2013. The system of conductive charging of electric vehicles. Part 1. General requirements. Moscow, Standartinform, 2014. 47 p. (in Russian).
11. BESCOM Electric Vehicle Report no. 110021: Study of electric vehicle charging Infrastructure planning and rollout for Bengaluru Citi Karnataka. *India Smart Grid Forum Central Board of Irrigation fnd Power (CBIP)*. New Delhi, September 2021. Available at: <https://indiasmartgrid.org/> (accessed 24 June 2022).
12. Eiman E., Hassan M., Osman A., Ahmed I. Review of Communication Technologies for Electric Vehicle Charging Management and Coordination. *World Electric Vehicle Journal*, 2021, vol. 12(92), 22 p. doi: 10.3390/120092. Available at: <https://www.mdpi.com/> (accessed 17 April 2022).
13. Mültin M. ISO 15118 as the Enabler of Vehicle-to-Grid Applications. *International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*. Germany, August 2018. *Published in IEEE Xplore*, 2018, 6 p. doi: 10.23919/EETA.2018.8493213. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8493213/> (accessed 15 June 2022).
14. Song N., Kwak B. International Standard Trend of Vehicle to Grid (V2G) Communication Interface for Wireless Communication and RPT. *Transportation Electrification Conference and Expo Asia-Pacific*. Korea, May 2019. *Published in IEEE Xplore*, 2019, 5 p. doi: 10.1109/ITEC-AP.2019.8903797. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8903797> (accessed 29 June 2022).

15. 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 July 2022).

16. Kurkova O.P., Efimov V.V. Computational Modeling and Circuit Solutions Optimization of the Contactless Chargers of the Electric Vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 64–88. doi: 10.24411/2410-9916-2019-10305. Available at: <https://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/05-Kurkova.pdf> (accessed 10 August 2022) (in Russian).

17. Kurkova O. P. Methodology for assessing the compatibility of contactless chargers supplied by various manufacturers to create a public charging infrastructure for autonomous electric vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 1, pp. 104–125. doi: 10.24411/2410-9916-2021-10105. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2021-01/05-Kurkova.pdf> (accessed 09 August 2022). (in Russian).

18. Kurkova O. P. MPPT algorithm frequency control as a tool for improving the energy efficiency of the process of contactless magnetic resonance charging of electric vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 4, pp. 99–124. doi: 10.24412/2410-9916-2021-4-99-124. Available at: <https://sccs.intelgr.com/archive/2021-04/06-Kurkova.pdf> (accessed 10 August 2022).

19. Esser A. Contactless charging and communication system for electric vehicles. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference 28 International Standards (IAS) Annual Meeting*. Toronto, Ontario, Canada, October 1993. Published in *IEEE*, 2002. vol. 2, pp. 1021–1028. doi: 10.1109/IAS.1993.299024. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/299024> (accessed 15 June 2022).

20. El Shair Z., Reimann E., Rawashdeh S., Ayachit A., Abdul-Hak M. Review and Evaluation of Communication Systems for Control of Stationary Electric-Vehicle Inductive Charging Systems. *Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. Chicago, IL, USA, June 2020. Published in *IEEE Xplore*, 2020. doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161625. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9161625> (accessed 14 April 2022).

21. Gong L., Xiao C., Cao B., Zhou Y. Adaptive Smart Control Method for Electric Vehicle Wireless Charging System. *Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2018, vol. 11 (10), no. 2685, pp. 1–13. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2685/pdf> (accessed 03 June 2022).

22. El Fadil H., Njili S., Zytoune O., Bajit A. Experimental Implementation of a Wireless Communication System for Electric Vehicle WPT Charger. *10<sup>th</sup> International Conference on Innovation, Modern Applied Science & Environmental Studies (ICIES'2022)*. Istanbul, Turkey, May, 2022. Published in *Journal «E3S Web of Conferences»*, 2022, vol. 351 (01006), 8 p. doi: 10.1051/e3sconf/202235101006. Available at: <https://www.e3s->

conferences.org/articles/e3sconf/abs/2022/18/e3sconf\_icies2022\_01006/e3sconf\_icies2022\_01006.html (accessed 03 July 2022).

23. El Sayed N. A prototypical implementation of an ISO-15118-based wireless vehicle to grid communication for authentication over decoupled technologies. *International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*. Turin, Italy, July 2019. Published in *IEEE Xplore*, August 2020, 6 p. doi: 10.23919/EETA.2019.8804545. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8804545> (accessed 17 July 2022).

24. Official website company «Hyundai Motor Group». Hyundai Motor Group has created the concept of wireless charging of electric vehicles and parking autopilot (according to the information materials of the International Consumer Electronics Show. Las Vegas, USA, 2019). Available at: <https://www.hyundai.com/news/> (accessed 11 May 2022).

25. 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.

26. Wen F., Huang X. Human Exposure to Electromagnetic Fields from Parallel Wireless Power Transfer Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2017, vol. 14 (2), no. 157, 15 p. doi: 10.3390/ijerph14020157. Available at: [www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph) (accessed 04 July 2022).

27. ICNIRP Guidelines: For limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Phys*, 2010, no. 99 (6), pp. 818–836. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21068601/> (accessed 07 April 2022).

Статья поступила 10 сентября 2022 г.

### Информация об авторе

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

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

### Network information model communication links between an electric vehicle and a contactless magnetic-resonance charger

O. P. Kurkova

**Problem statement and specific task:** the creation of a system of fast and reliable communication interconnection between autonomous electric-driven vehicles and stationary magnetic-resonance charging stations is the key to the successful implementation of wireless charging technology, which allows to fully realize its main advantages: the possibility of automating the process, comfort, safety, energy efficiency. However, its creation is associated with a number of problems, since the communication architecture and



the algorithm of its functioning must simultaneously take into account the already standardized general requirements defining the «electric vehicle-network» communication interface, within which electric vehicle power supply systems are created, and the features of the physics of the wireless power transmission process, and the principles of the functioning of the magnetic-resonance charging stations. **The aim of the research was** to develop a standard model of information and communication links between an electric vehicle and a magnetic-resonance charging stations. **Methods and technologies used:** to solve the problem, the method of constructing network models in the form of connection graphs was used, when the vertices of the graph are the states of objects, the arcs of the graph are the processes of transitions of objects from one state to another, followed by a description of all transitions in the form of algorithms of corresponding actions. **Novelty of the result:** the elements of the novelty of the research results are developed: the operational technological structure of the electric vehicle charging session using contactless technology, which begins with the successful setup of communication when the vehicle arrives at the charging pad and ends with the termination of communication when the vehicle leaves the charging station; the network information model of communication communications «electric vehicle – magnetic-resonance charging stations», a set of algorithms of actions necessary for the implementation of step-by-step vehicle and magnetic resonance charging stations transitions from one state to another during the charging session. **Practical significance:** the developed model is the basis for the direct construction of the architecture of the communication network «electric vehicle – magnetic-resonance charging stations», the selection of components of electronic components and the development of appropriate software. Building a network based on the developed model will allow for almost complete automation of the charging process by organizing a service using "deserted technology", which will realize the main advantages of contactless charging technology for electric vehicles in relation to the currently massively used «plug-in» technology – comfort and safety in all weather conditions.

**Keywords:** electric vehicle, contactless magnetic-resonance charging station, communication, charging session, network model, information model, communication graph, object state, algorithm of actions, wireless local area network, communication controller, «client-server» network architecture, two-way messaging, «point-to-point» signal

### Information about Author

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

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