



Комплекс технических решений для повышения эффективности развития зарядной инфраструктуры электротранспорта РФ в условиях импортозамещения

Докладчики:

- Воронин Вячеслав Андреевич, к.т.н., старший научный сотрудник НИЛ ЦТПМСК ФГБОУ ВО «КузГТУ»
- Дубков Евгений Александрович, ст. преп. кафедры «Электроэнергетические системы атомных станций», ФГАОУ ВО «СевГУ», научный сотрудник НИЛ ЦТПМСК ФГБОУ ВО "КузГТУ"

Москва, 2024



Актуальность

Прогноз развития рынка ЭТ

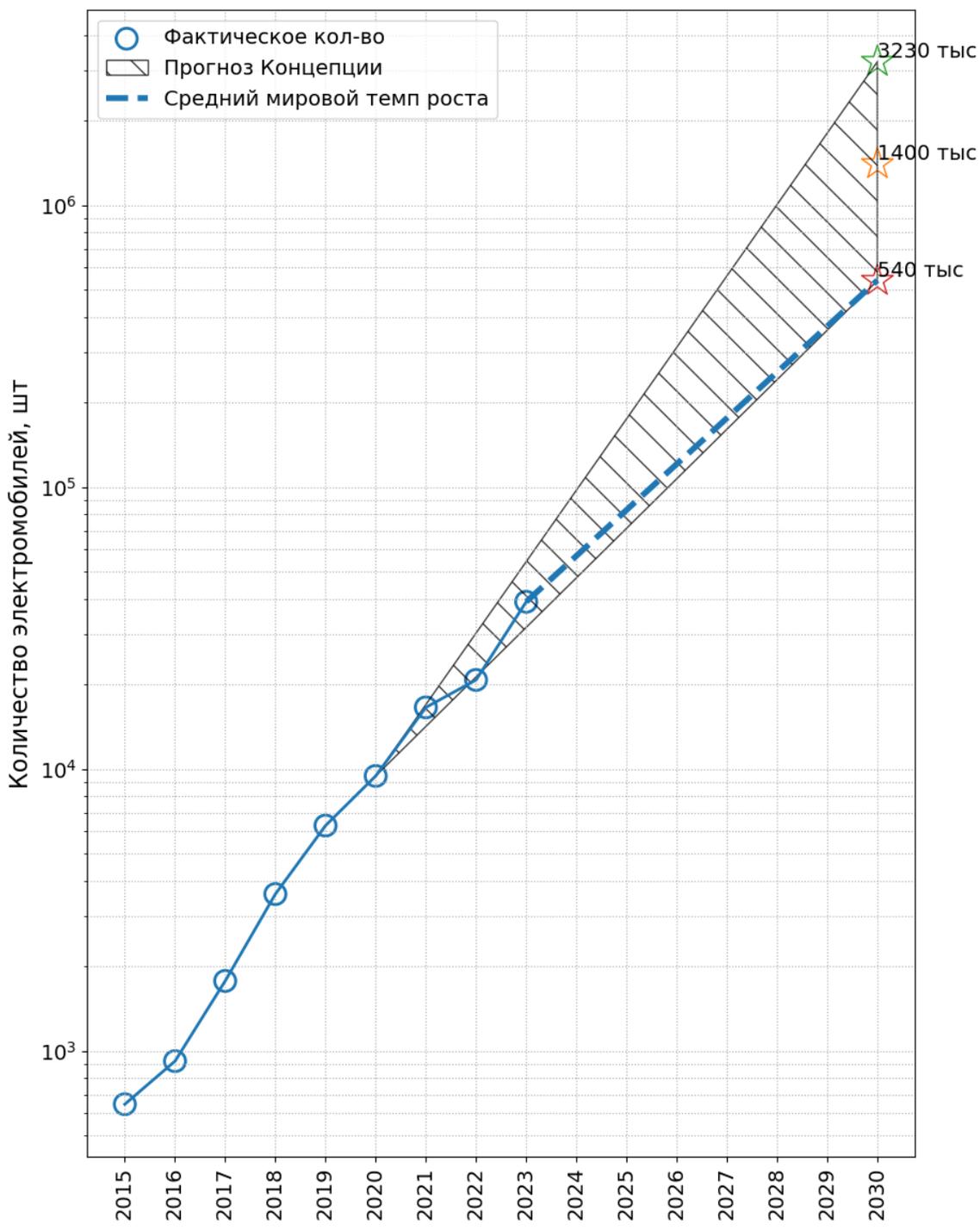
Сценарии развития рынка легкового электротранспорта Российской Федерации до 2030 года согласно Концепции*:

- **Ускоренного развития** – средний годовой темп роста 179,22 %.
- **Сбалансированный** – средний годовой темп роста 164,85 %
- **Инерционного развития** – средний годовой темп роста 149,87 %.

Средний мировой годовой темп роста **145,51 %** (2010-2022 гг.)

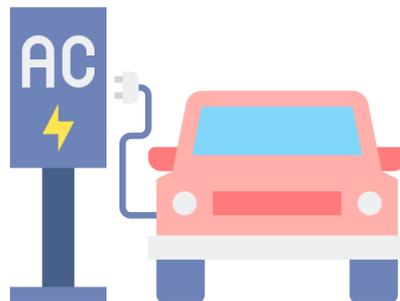
* Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года

ЭТ – легковой электротранспорт (электромобили)



Объекты электрoзарядной инфраструктуры

Медленные ЭЗС



Быстрые ЭЗС



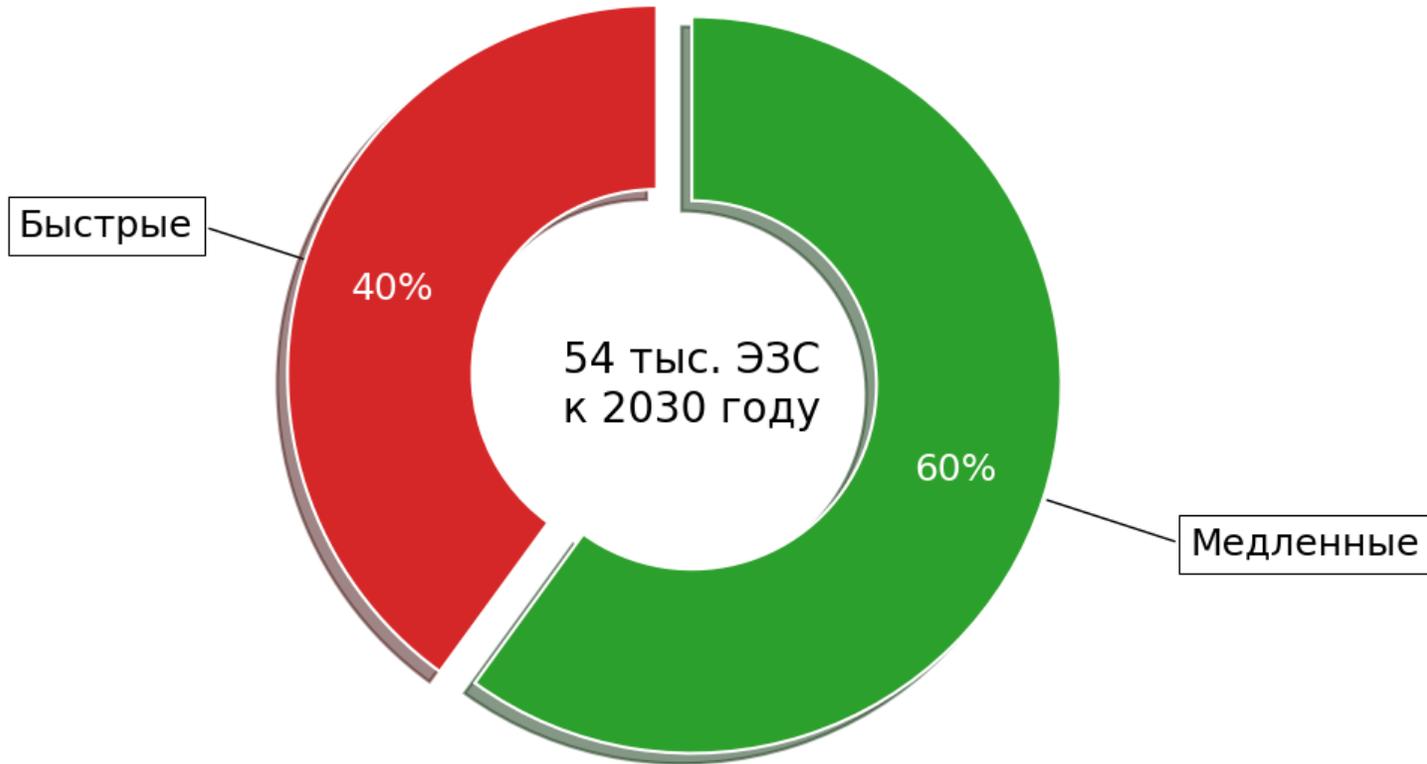
Род тока	переменный	постоянный
Мощность ЭЗС	от 2.3 до 22 кВт	более 44 кВт
Максимальная мощность заряда ЭТ	от 3.6 до 22 кВт	40 кВт и выше
Время заряда*	Nissan Leaf – 12 ч. 45 мин. Tesla Model 3 – 6 ч. 16 мин. Porsche Taycan – 7 ч. 15 мин. Volkswagen ID.4 – 5 ч. 45 мин.	Nissan Leaf – 43 мин. Tesla Model 3 – 33 мин. Porsche Taycan – 22 мин. Volkswagen ID.4 – 33 мин.

* 0-100% - медленных ЭЗС; 20-80% - быстрые ЭЗС

ЭЗС – электрoзарядная станция

Прогноз развития рынка ЭТ

Прогноз развития электрочарядной инфраструктуры



Принятые допущения: количество ЭТ – 540 тыс.; норматив – 10 автомобилей на 1 порт ЭЭС; среднегодовой пробег – 18 тыс. км; средняя емкость батареи – 44,6 кВт·ч; средний расход заряда батареи – 138 Вт·ч/км; номинальная мощность портов ЭЭС: медленный – 22 кВт, быстрый – 50 кВт.

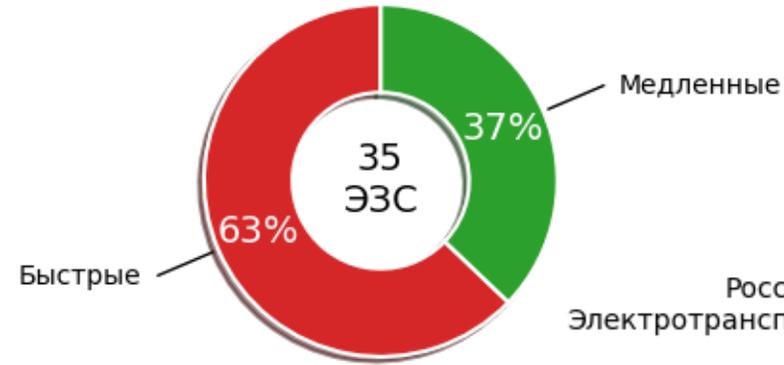
- **1,34 млрд. кВт·ч** – оценка годового потребления электроэнергии на заряд ЭТ в 2030 году (**0,12%** потребления ЕЭС в 2023 г.)

- **2000 (402) МВт** – суммарная установленная мощность (пиковое потребление) ЭЭС РФ в 2030 году (**0,25%** пиковой мощности ЕЭС в 2023 г.)

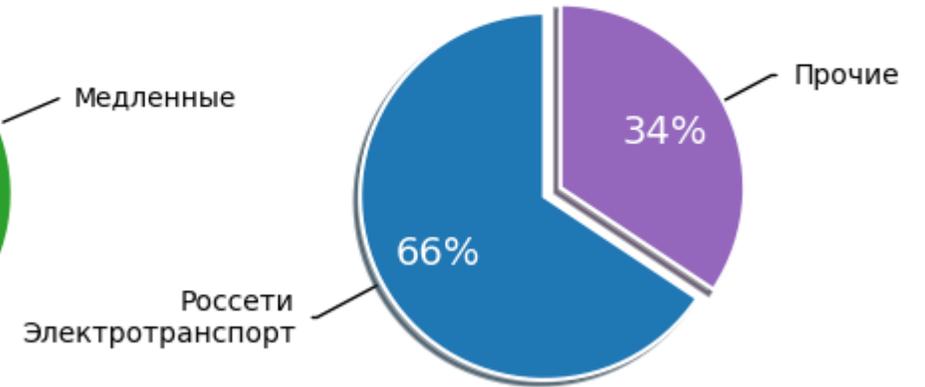
Развитие электрoзарядной инфраструктуры Кузбасса



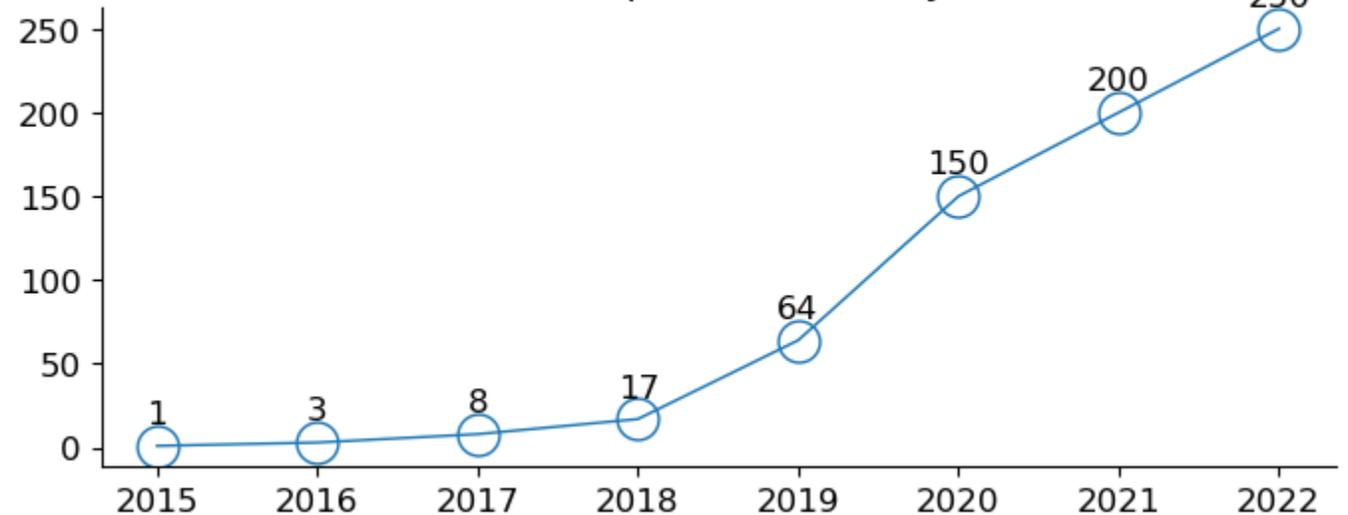
Парк ЭЭС Кузбасса
деление по типу



Парк ЭЭС Кузбасса
деление по брендам



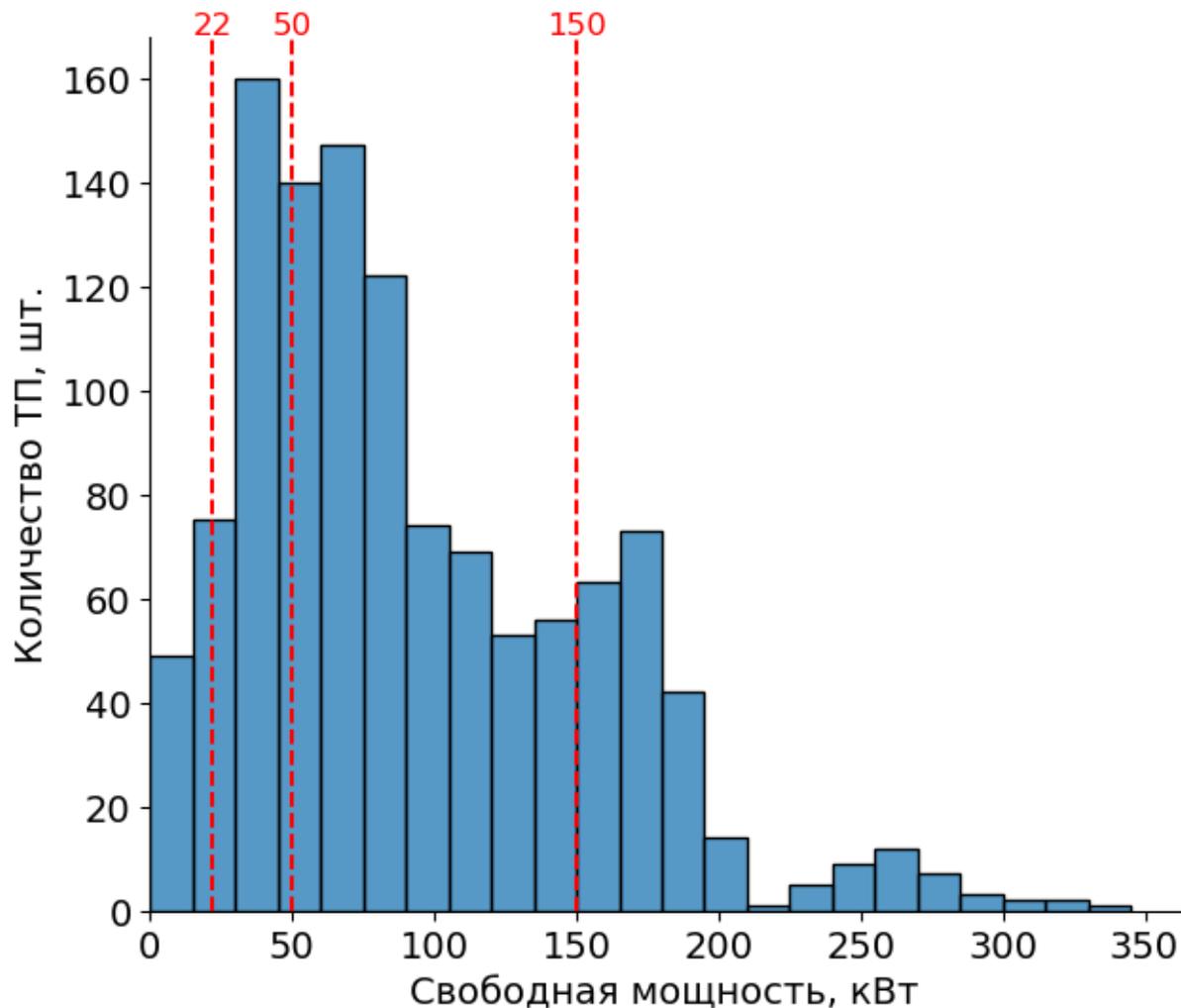
Количество электромобилей в Кузбассе, шт.



Ориентировочная оценка по данным из открытых источников

Анализ резервов мощности

Гистограмма свободной мощности для тех. прис. в Кемеровской городской сети



Свободная для технологического присоединения трансформаторная мощность по ТП 6(10) кВ:

- 7% ТП менее 22 кВт;
- 28% ТП менее 50 кВт;
- 80% ТП менее 150 кВт.

Примерная стоимость тех. прис. ЭЗС 150 кВт*:

- 680 тыс. - при наличии свободной мощности;
- 2751 тыс. - при новом строительстве.

* расчет на примере Кемеровской области

Выводы

- К 2030 году парк ЭТ России прогнозируется рост парка электротранспорта в 13,7 раз по сравнению с 2023 годом (до 540 тыс. электромобилей).
- Электроразрядная инфраструктура может насчитывать порядка 54 тыс. портов зарядных станций в 2030 году.
- Недостаточный резерв свободной трансформаторной мощности ТП 6(10) кВ может существенно увеличить стоимость технологического присоединения, при этом став причиной замедления развития зарядной инфраструктуры



Моделирование зарядной инфраструктуры

Обзор методов планирования развития зарядной инфраструктуры

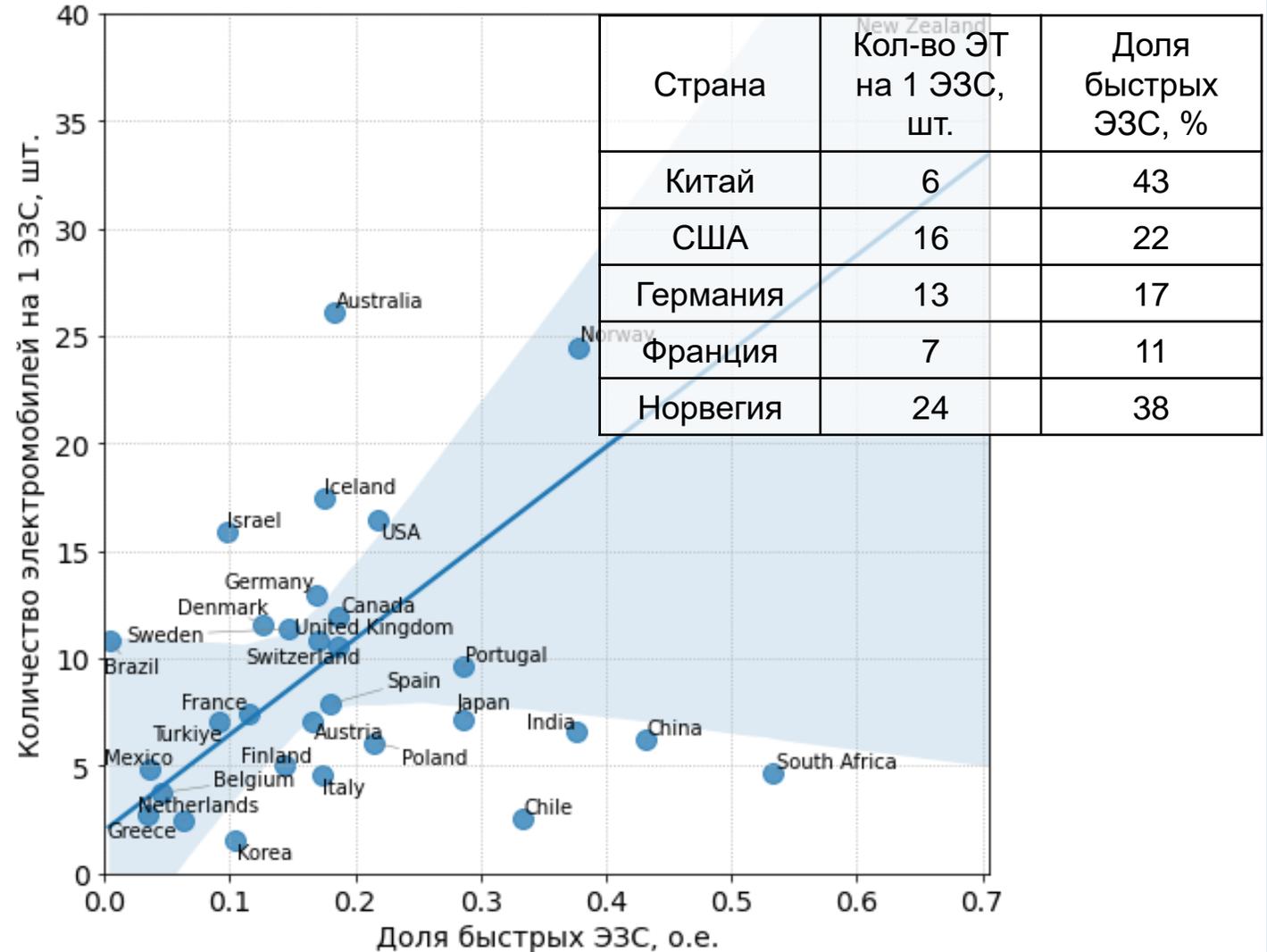
1) Нормативные модели

- 1 ЭЗС на 10 электромобилей;
- 1 ЭЗС на 100 км трассы.
- 1 ЭЗС на 0,15 парковочных мест.
- 1 ЭЗС на 4 км².
- соотношение быстрые / медленные ЭЗС – 40 / 60 %.

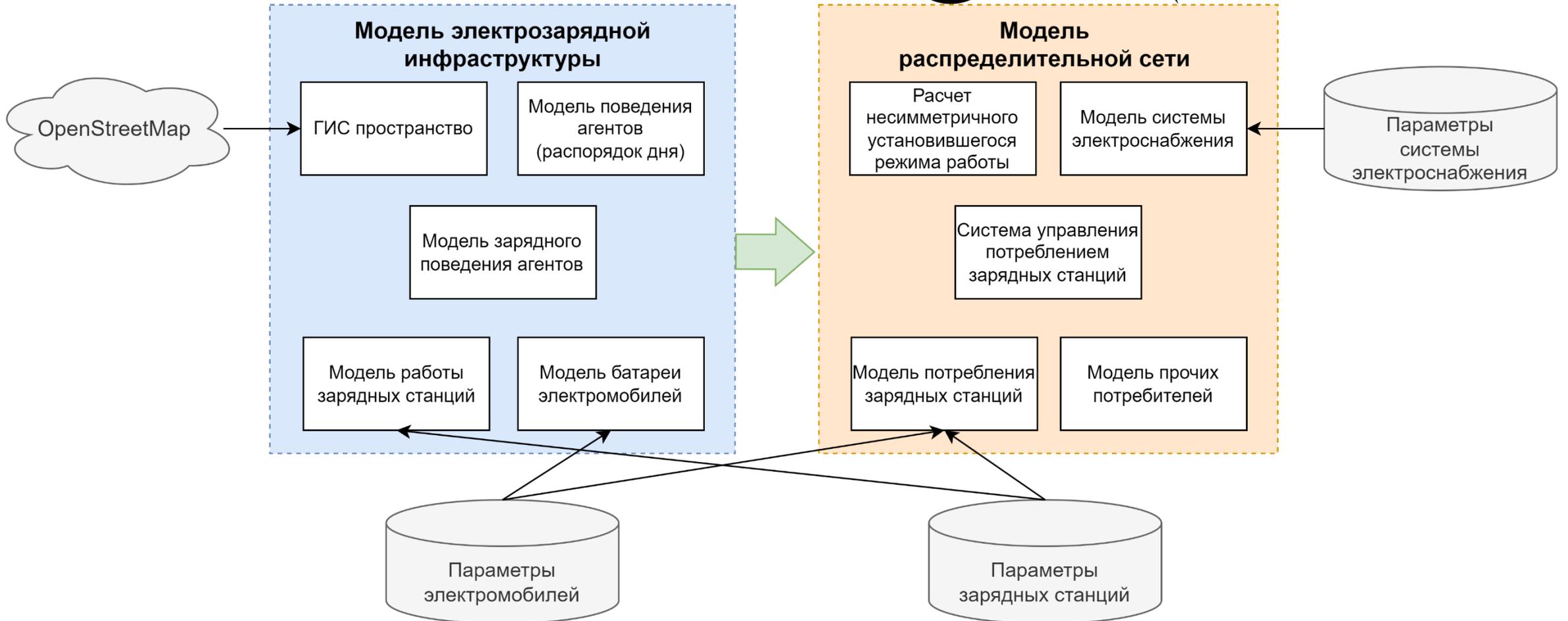
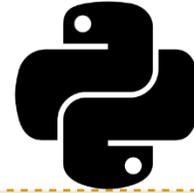
2) Модель энергобаланса

кол-во ЭЗС = (суммарная потребность в заряде парка ЭТ, кВт·ч) / [(мощность ЭЗС, кВт) x 24 x (коэф. загрузки)]

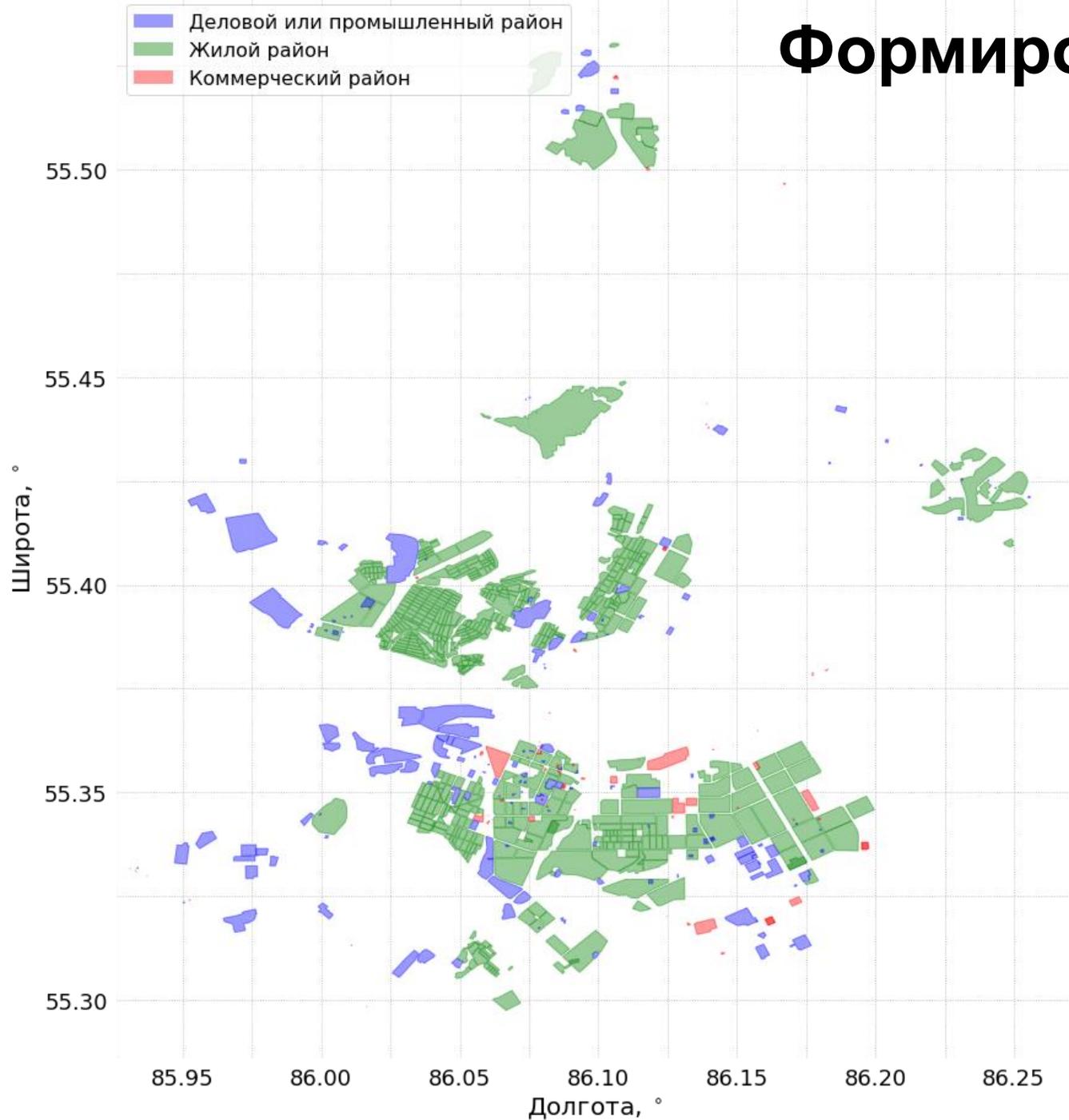
3) Анализ мирового опыта



Комплексная имитационная модель электрзарядной инфраструктуры



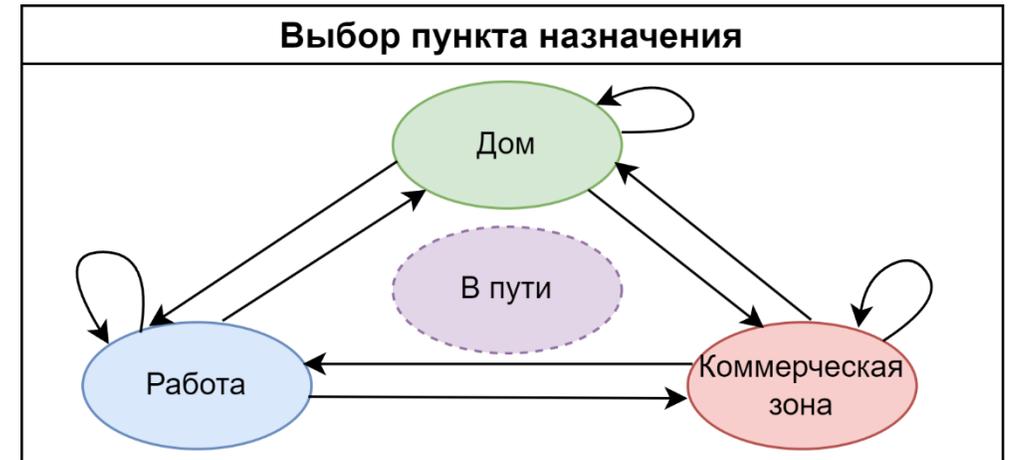
Формирование ГИС пространства



ГИС пространство включает в себя дорожную сеть города и районы трех типов:

- **Деловой район** – длительная стоянка в дневное время (офисы, бизнес-центры, учебные заведения и пр.);
- **Коммерческий район** – кратковременная стоянка в дневные и вечерние часы (торговые центры, фитнес-клубы, кафе/рестораны и пр.);
- **Жилой район** – длительная стоянка в вечерние и ночные часы (жилые дома).

Моделирование поведения владельцев электромобилей

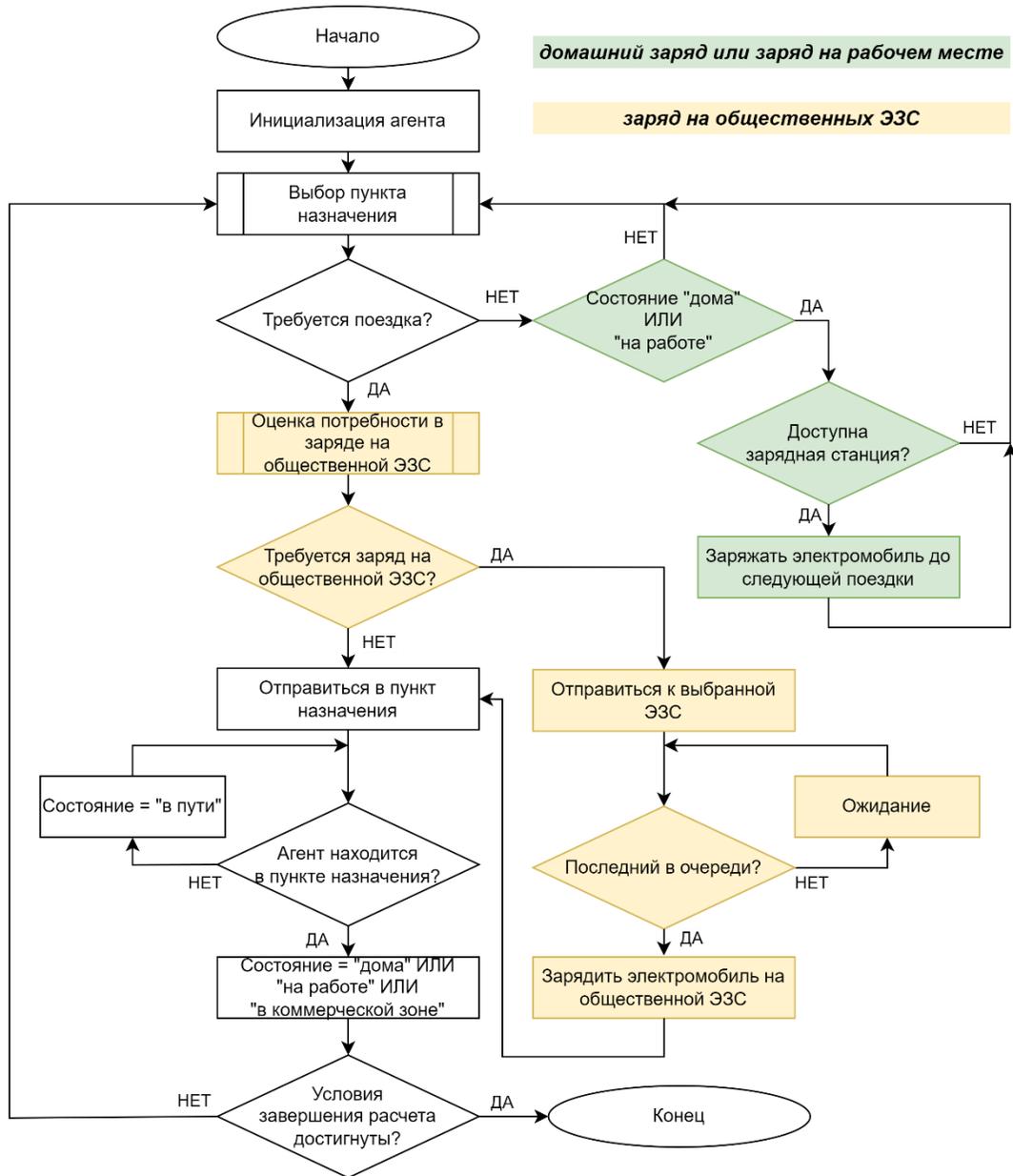


Интенсивности переходов агентов-электромобилей между состояниями зависят от времени суток.

Полученная диаграмма соответствует результатам опубликованных исследований¹.

¹ Li, B., Chen, M., Kammen, D.M., Kang, W., Qian, X., Zhang, L., 2022. Energy Reports, 2021 The 8th International Conference on Power and Energy Systems Engineering 8, 26–35.

Моделирование зарядного поведения

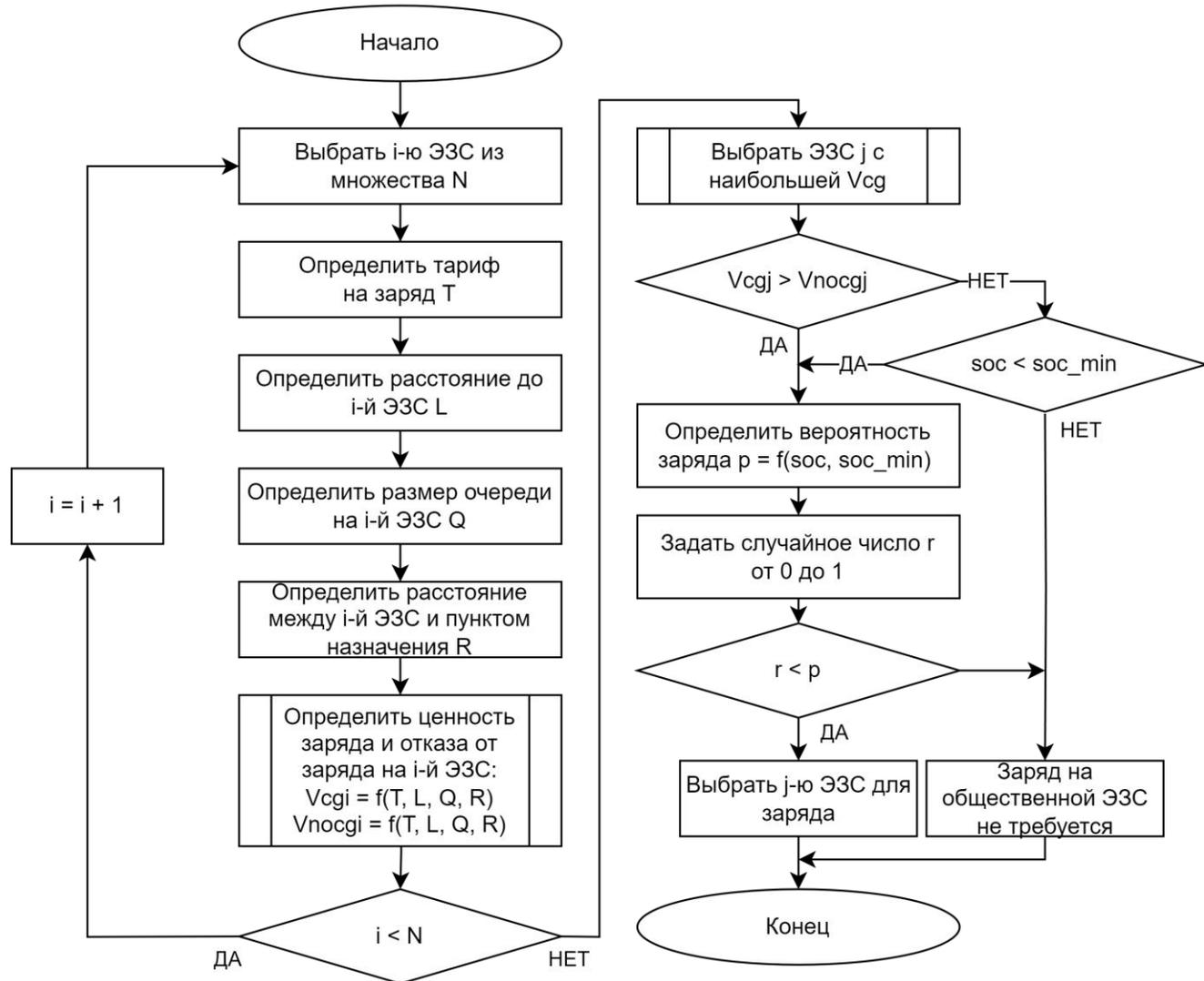


В зависимости от доступа к ЭЗС агенты могут иметь разные варианты зарядного поведения:

- тип 1 – не имеет доступа к ЭЗС дома и на работе;
- тип 2 – имеет домашнюю зарядную станцию;
- тип 3 – имеет доступ к ЭЗС на рабочем месте;
- тип 4 – имеет доступ к ЭЗС дома и на работе.

Моделирование зарядного поведения

Оценка потребности в заряде на общественной ЭЗС



soc - уровень заряда батареи электромобиля

soc_min - граничный комфортный уровень заряда батареи

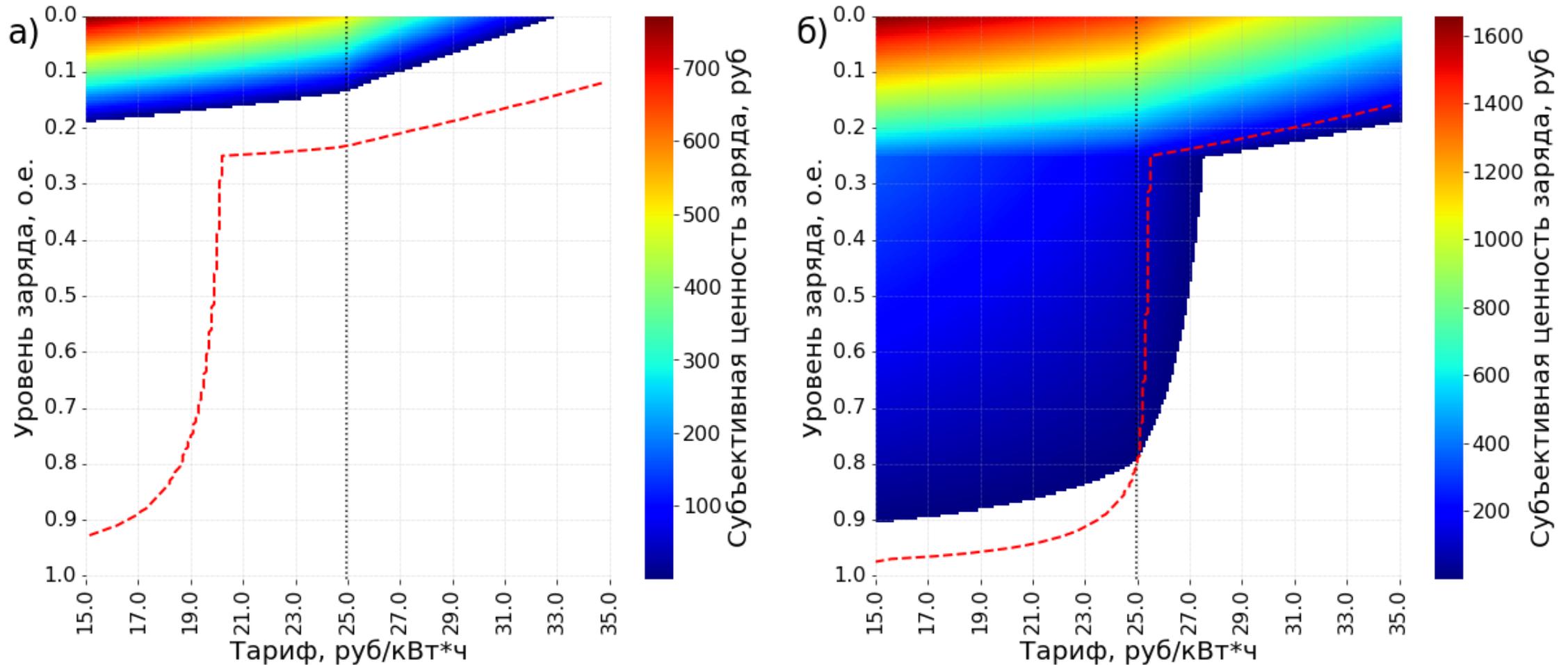
Vcg, Vnocg - субъективная ценность заряда и отказа от заряда, соответственно

Для принятия решений о заряде на общественных ЭЗС используется Теория перспектив.

Субъективная ценность заряда определяется:

- тарифом на заряд;
- наличием ЭЗС вблизи пункта назначения агента;
- расстоянием до ЭЗС;
- длительностью заряда (мощность ЭЗС и емкость батареи ЭТ);
- размером очереди.

Моделирование зарядного поведения

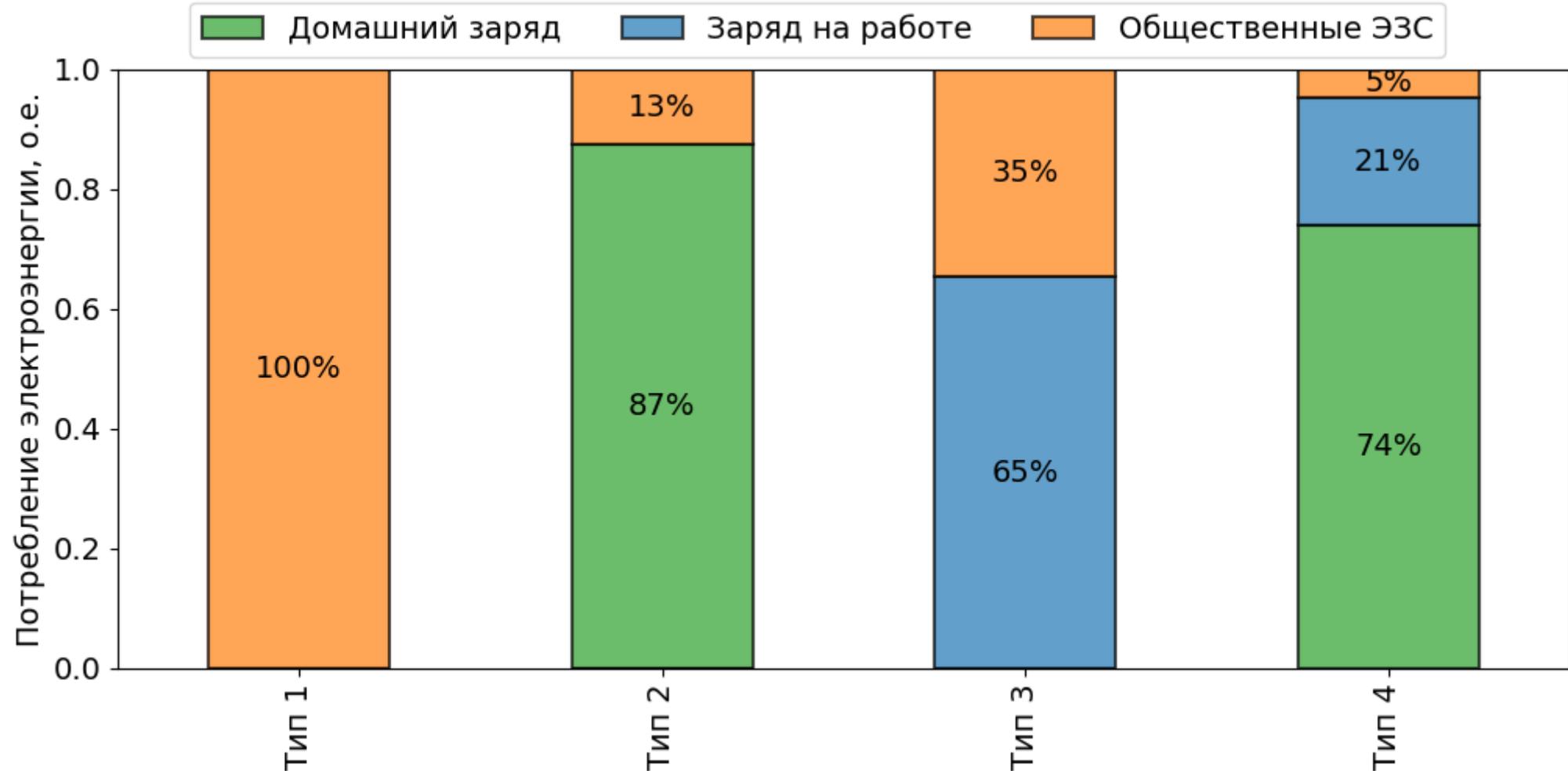


Тепловая карта субъективной ценности заряда на общественных ЭЗС для рабочих поездок (пунктирная линия – граница тепловой карты для личных поездок):

- а) ЭЗС не «по пути» (владелец ЭТ ждет окончания заряда);
- б) ЭЗС «по пути» (владелец ЭТ совмещает заряд с другими делами)

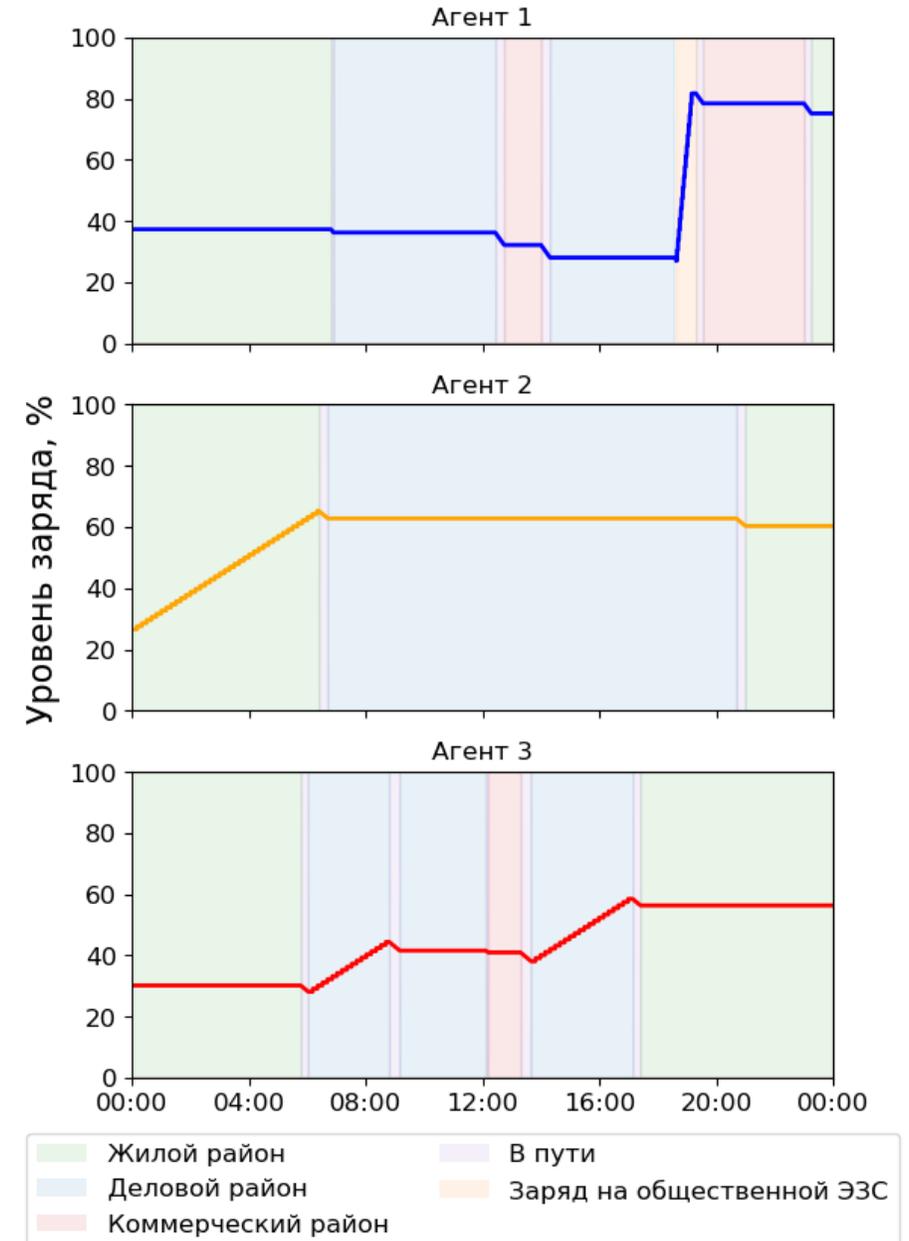
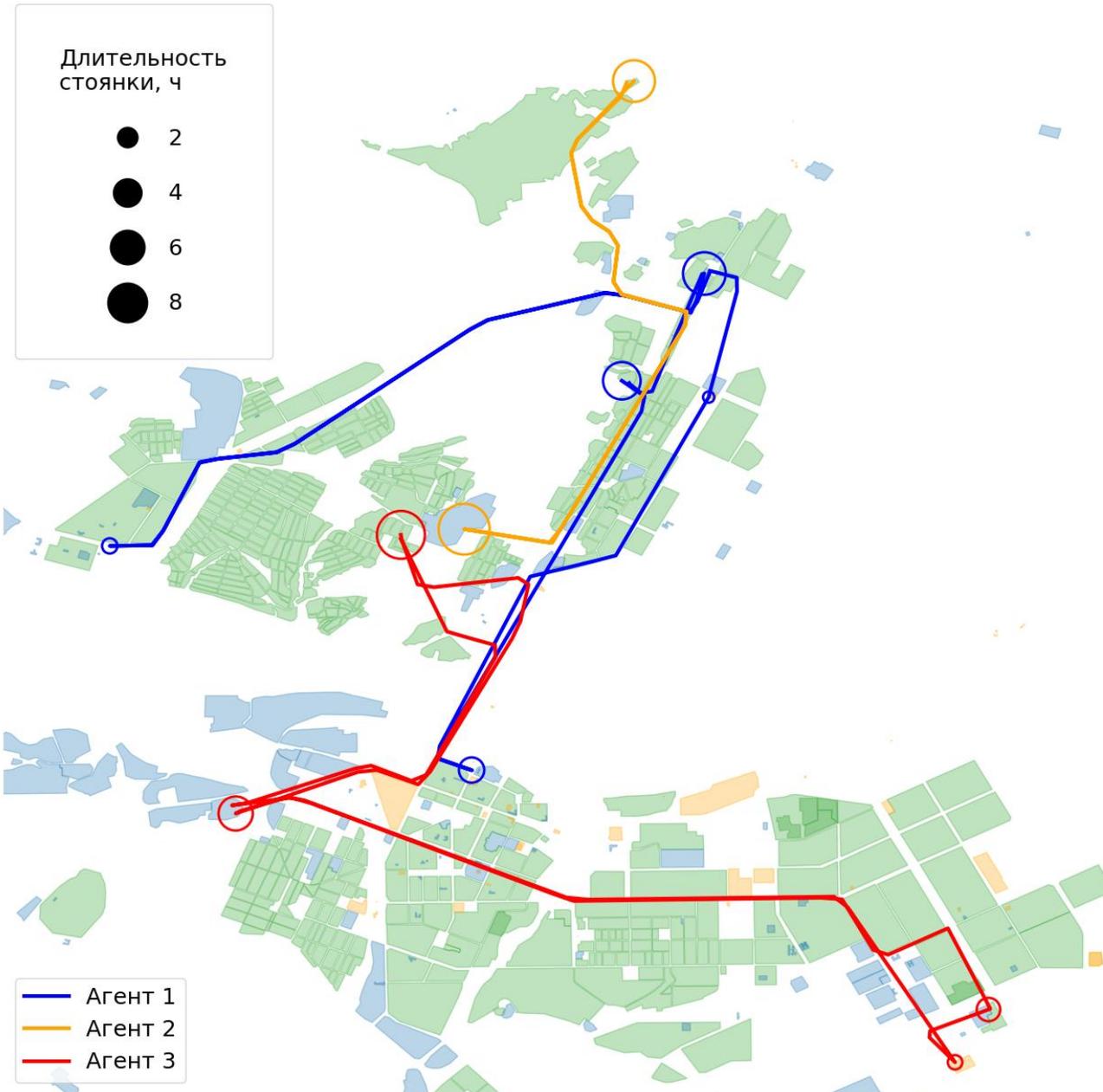
Моделирование зарядного поведения

Типы агентов по зарядному поведению

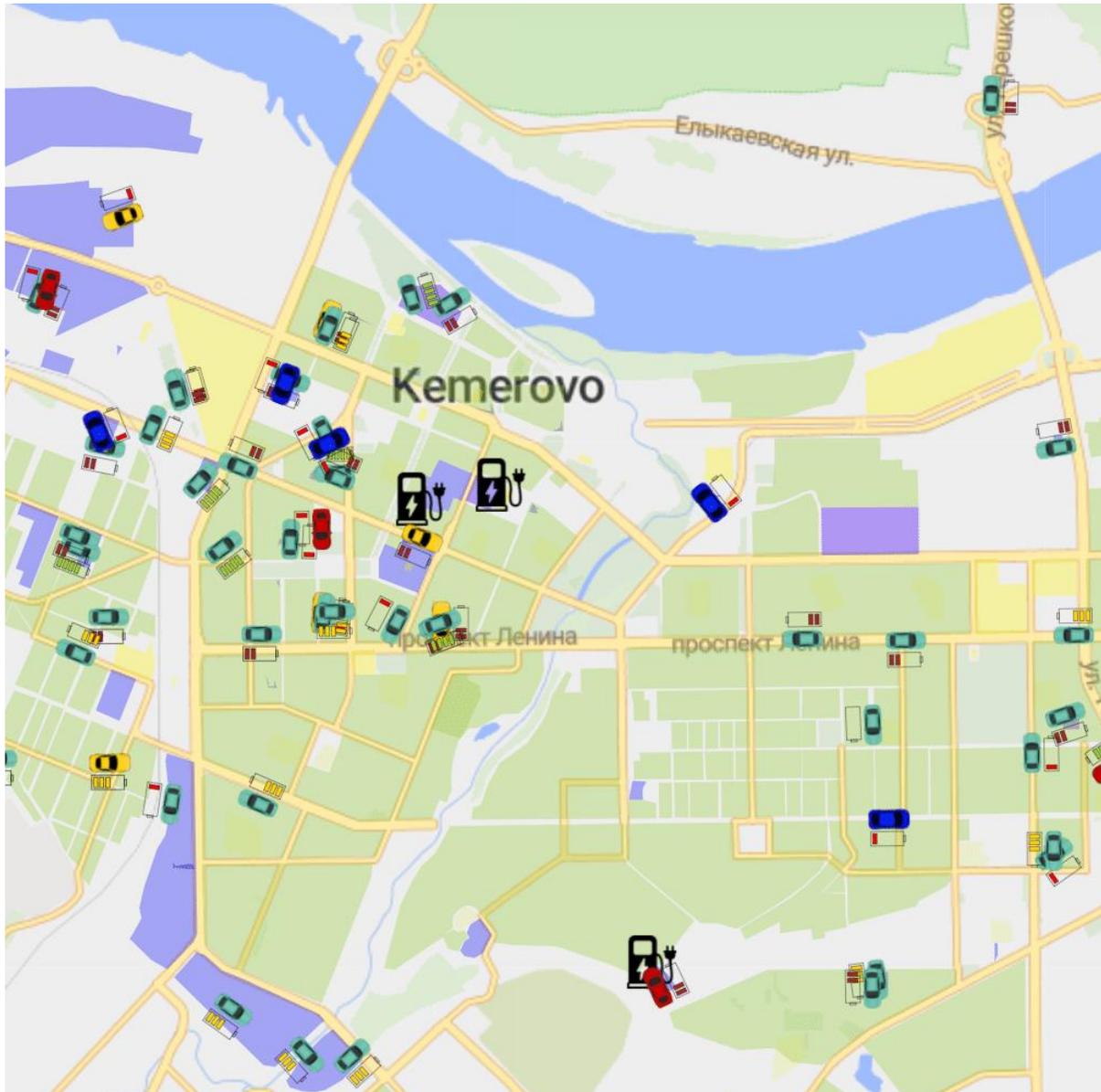


Данные получены по результатам моделирования для города Кемерово (10 ЭТ на 1 общественную ЭЗС)

Моделирование зарядного поведения



Пример имитационной модели для г. Кемерово



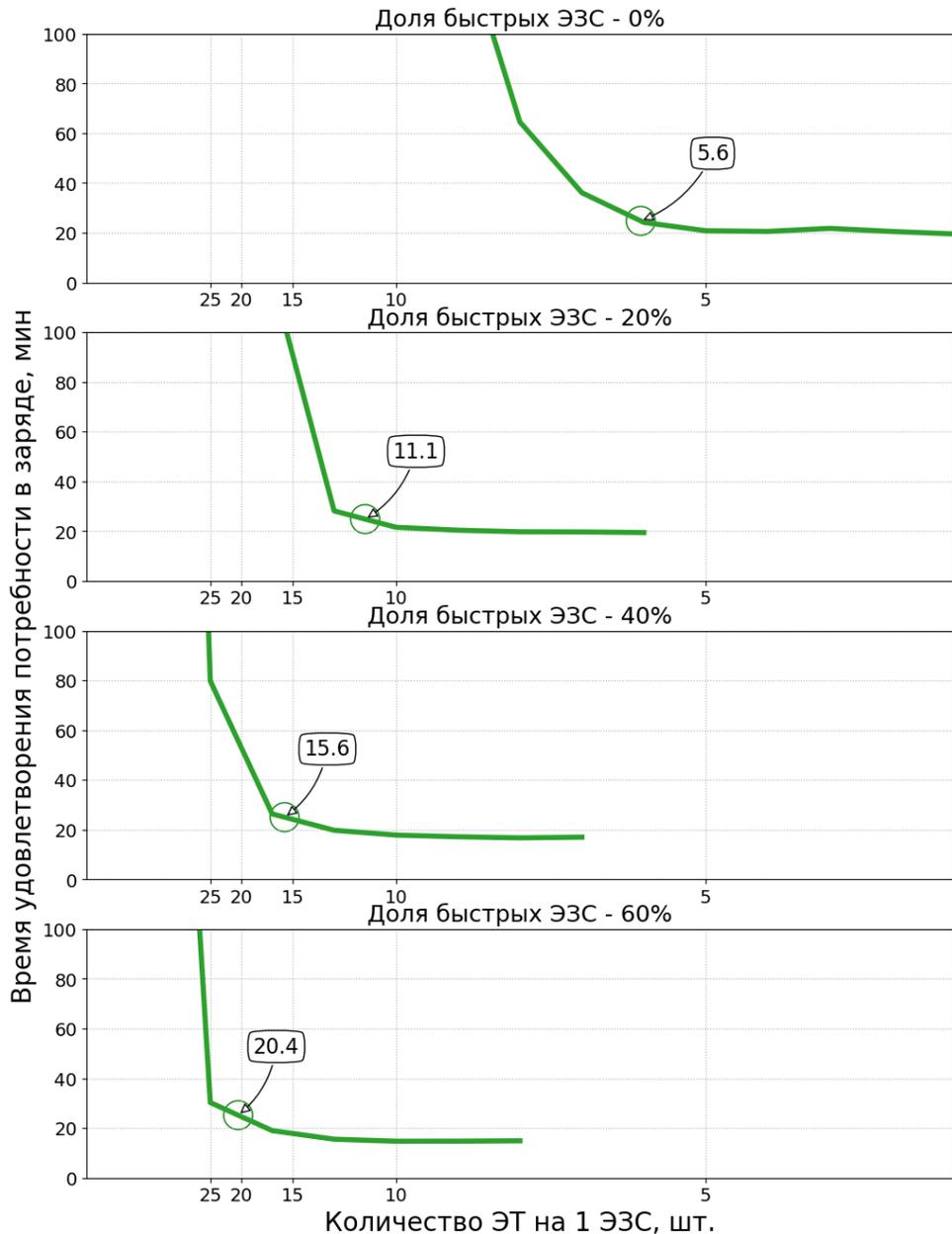
Демонстрационная
имитационной
электрoзарядной
инфраструктуры
Кемерово:

версия
модели
города



<https://cloud.anylogic.com/model/8ccf2060-0016-4718-ac57-ef1d344f2024?mode=SETTINGS>

Пример определения квот для г. Кемерово



Время удовлетворения потребности в заряде ($T_{уд.зар.}$) – это промежуток времени между возникновением потребности в заряде и подключением ЭТ к ЭЭС.

- Чем больше число ЭЭС, тем меньше $T_{уд.зар.}$
- Минимальный уровень $T_{уд.зар.}$ соответствует среднему времени перемещения агента до ближайшей ЭЭС.
- Переход характеристики к минимальному уровню $T_{уд.зар.}$ соответствует точке насыщения парка ЭЭС в городе.

Выводы

- Разработана имитационная модель электрочарядной инфраструктуры, позволяющая моделировать суточные профили загрузки зарядных станций города с учетом параметров и поведения ЭТ, параметров ЭЗС, тарифов на заряд и плана города.
- Представлен пример использования имитационной модели для уточнения норматива «Кол-во ЭТ на 1 ЭЗС» с целью планирования развития электрочарядной инфраструктуры на примере города Кемерово.



Разработка системы управления электрoзарядной инфраструктурой электротранспорта

Классификация систем управления зарядом

по воздействию на заряд электромобиля

прямое управление

тарифное регулирование

одностороннее

двустороннее

- Ограничение мощности заряда (V1G).
- Компенсация реактивной мощности.
- Симметрирование нагрузки.

- Выдача мощности в сеть (V2G).
- Выдача мощности для покрытия потребления дома (V2H) или офиса (V2B).

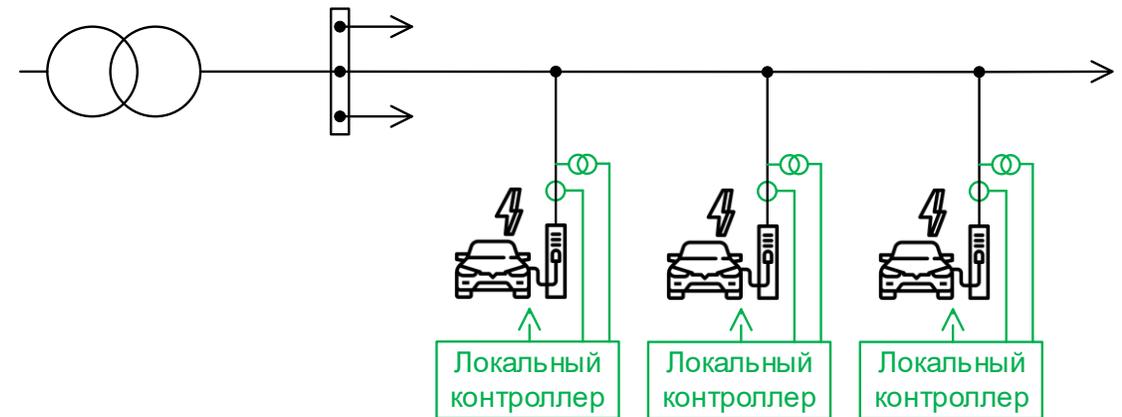
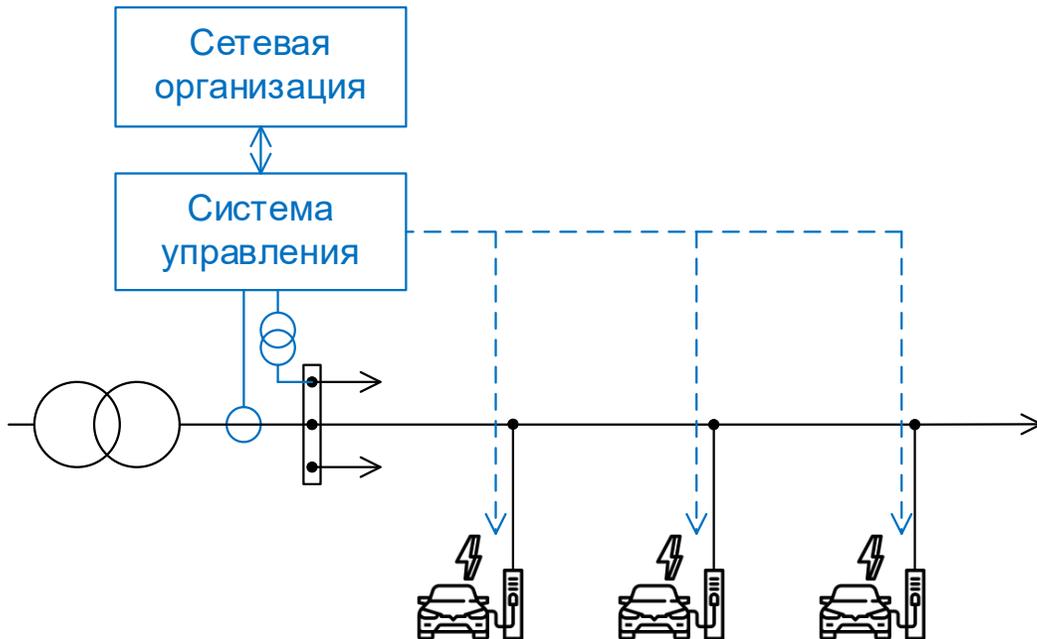
- «Плоский» тариф.
- Равномаржинальное формирование тарифа на заряд по 2-3 ЦК тарифа на розничном рынке.
- Дифференцированный по времени суток тариф на заряд по загрузке ЭЗС и центра питания.
- Динамическое тарифообразование в реальном времени в зависимости от загрузки ЭЗС и центра питания.

Классификация систем управления зарядом

по типу системы управления

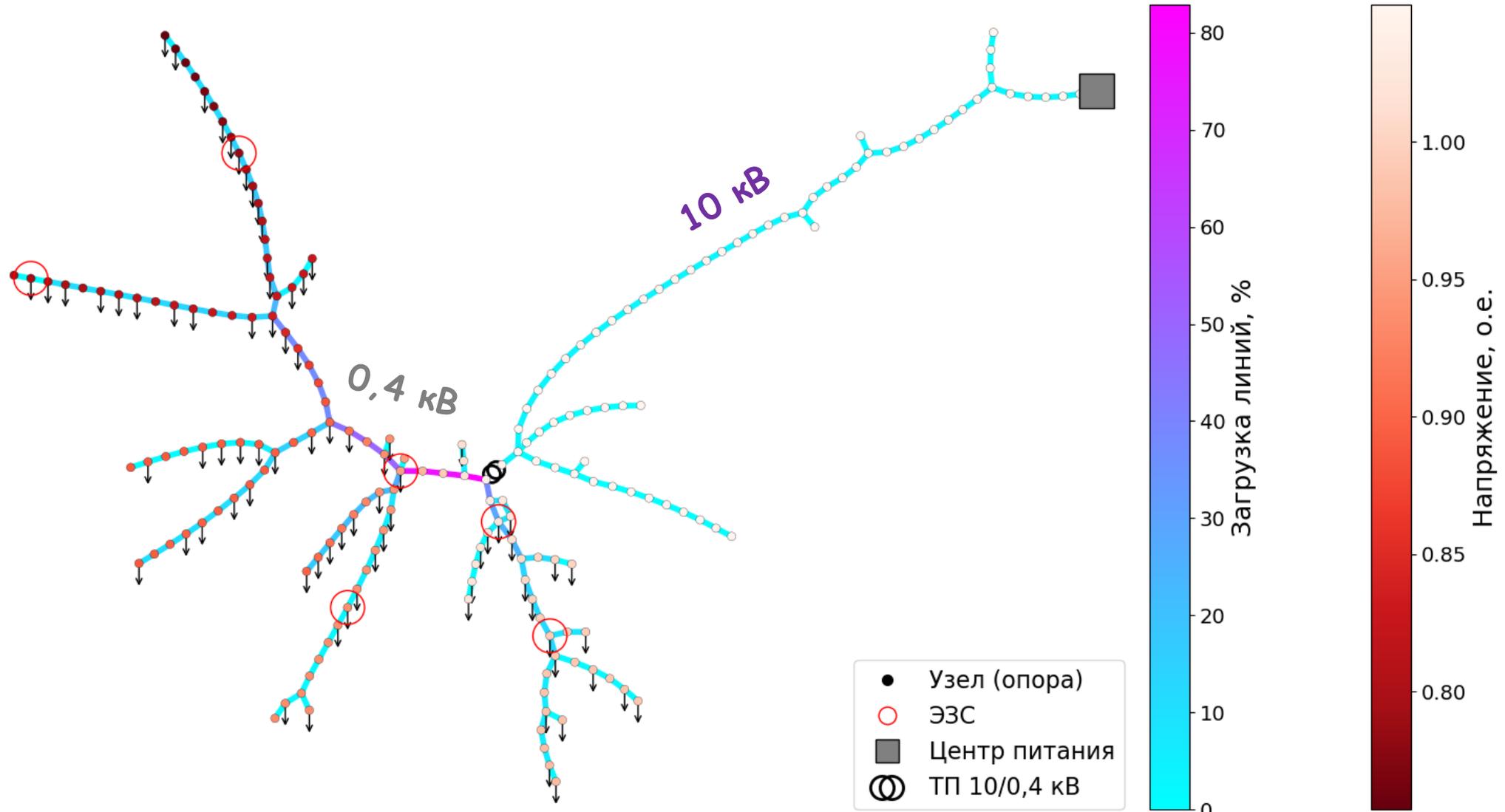
централизованная

локальная



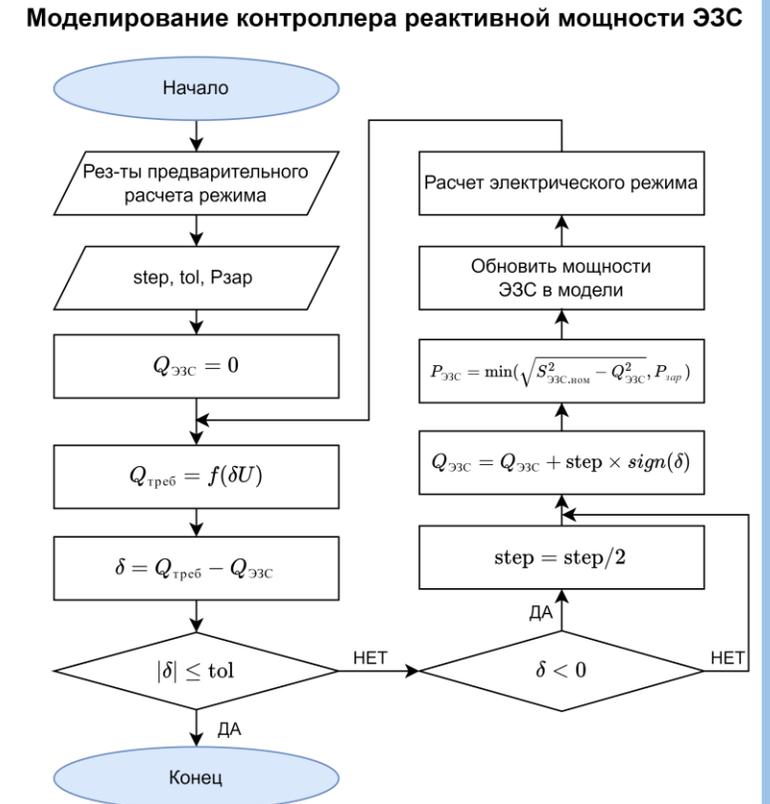
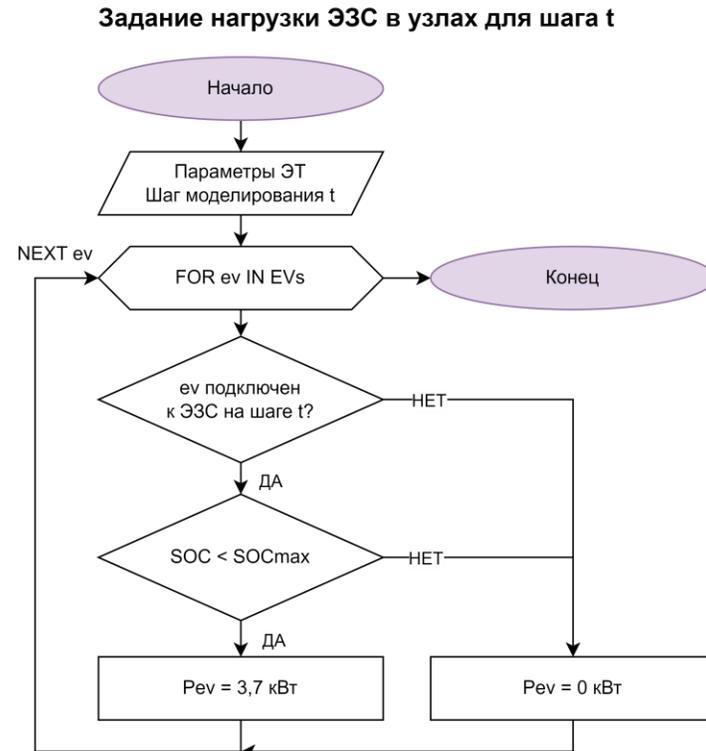
Кейс 1: Домашние зарядные станции в пригородной сети

Пример результатов расчета электрического режима в распределительной сети 0,4-10 кВ пригорода при наличии домашних ЭЗС



Кейс 1: Домашние зарядные станции в пригородной сети

Расчет выполнен в виде квази-динамического моделирования несимметричного режима с использованием метода Монте-Карло



N – количество прогонов модели ($N=20$); t – шаг времени; EVs – список всех электромобилей в модели; SOC – уровень заряда батареи ЭТ; step – шаг изменения реактивной мощности ЭЗС; tol – точность расчета реактивной мощности ЭЗС; $f(\delta U)$ – Вольт-Вар характеристика.

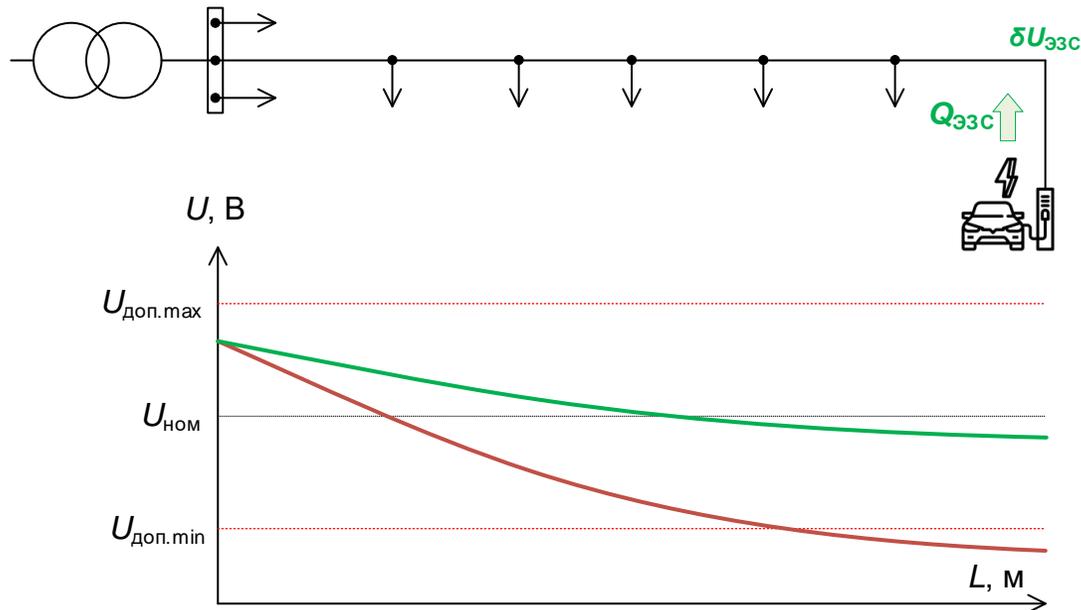
Кейс 1: Домашние зарядные станции в пригородной сети

Проблемы

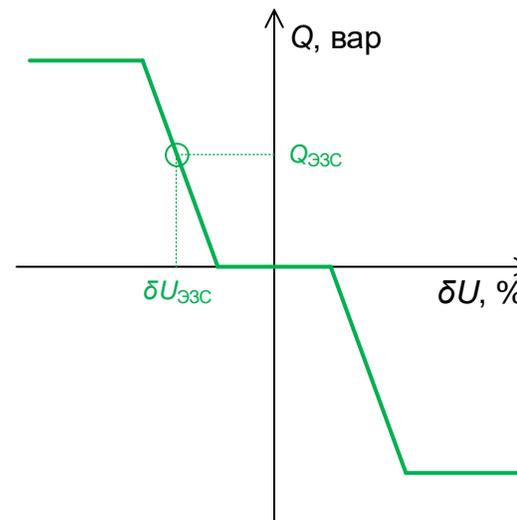
- Перегрузка сети в часы максимума нагрузки.
- Недопустимые отклонения напряжения.
- Зарядные станции в разных точках электрической сети и находятся в частной собственности.

Решение

- Смещение заряда на ночные часы («Отложенный заряд»).
- Локальное управление зарядом ЭЗС («Вольт-Вар регулирование»).

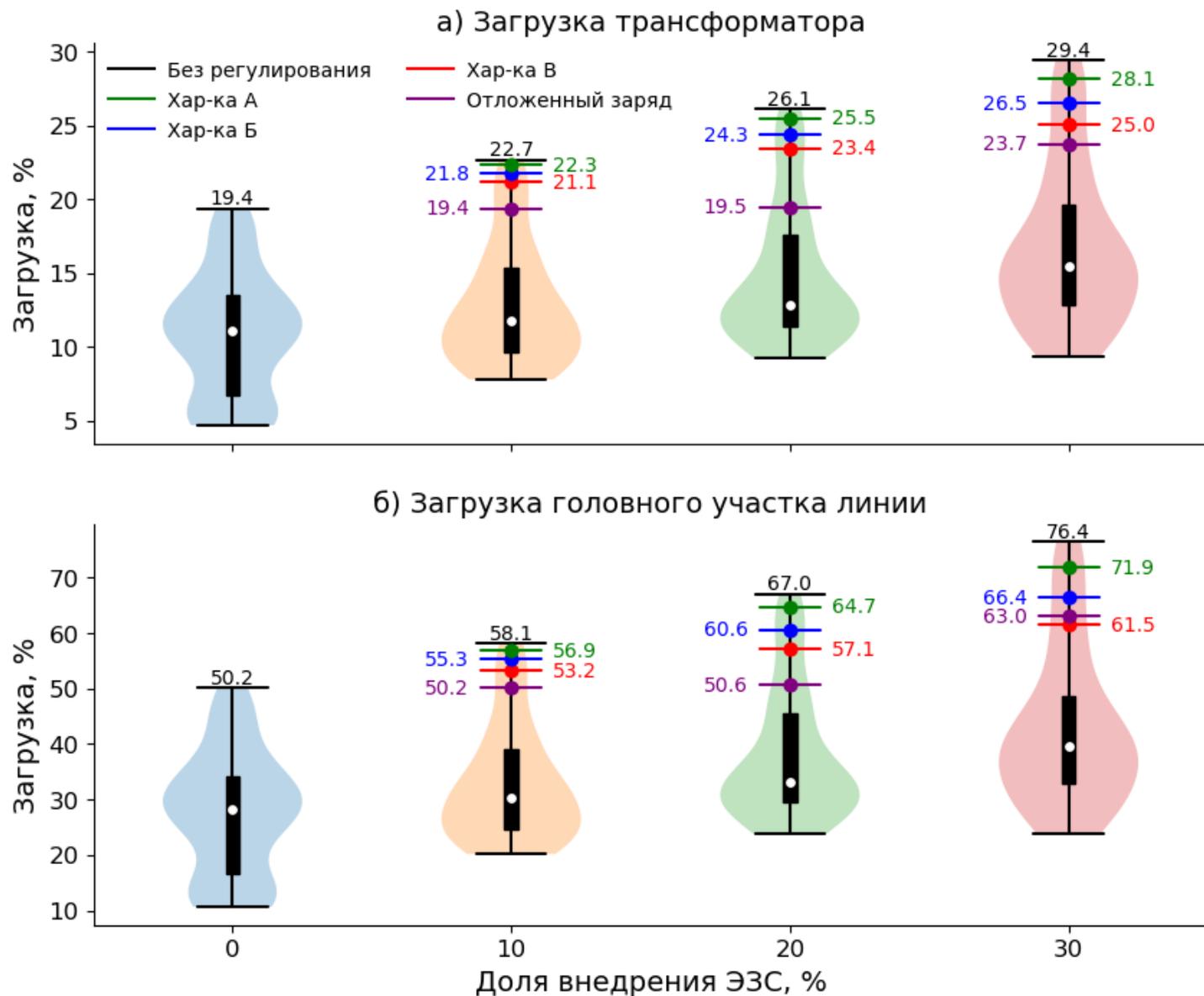


Вольт-Вар характеристика инвертора электромобиля

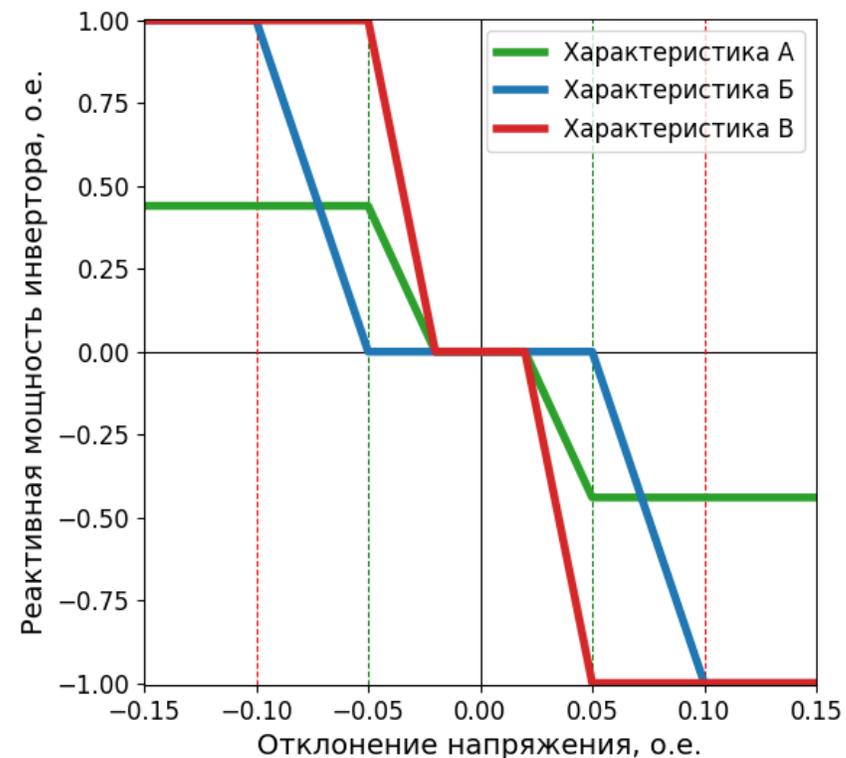


Согласно **IEEE 1547-2018** интеллектуальные инверторы распределенных энергетических ресурсов должны иметь возможность участвовать в регулировании напряжения.

Кейс 1: Домашние зарядные станции в пригородной сети



Варианты Вольт-Вар характеристик



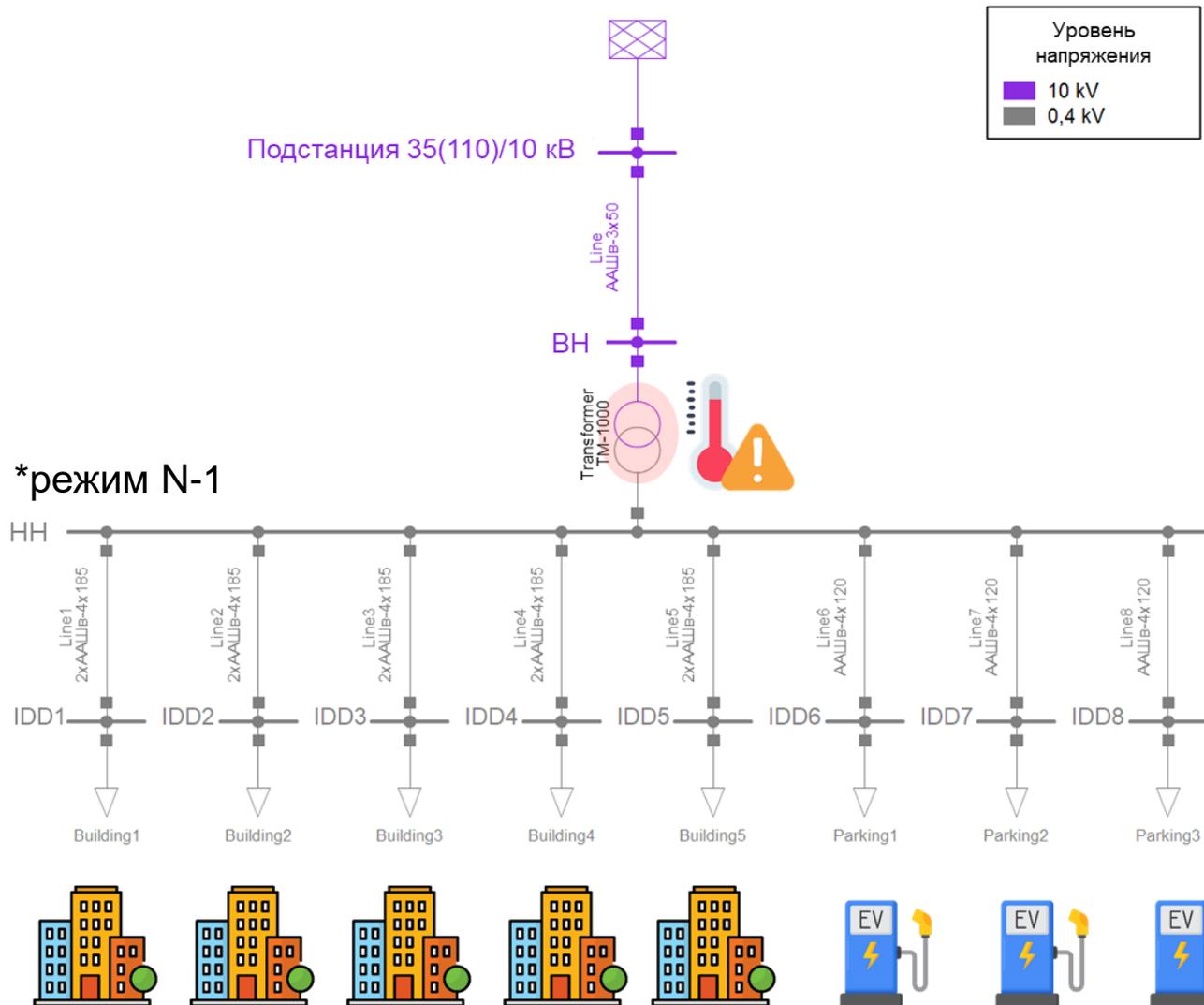
Кейс 1: Домашние зарядные станции в пригородной сети



- Отложенный заряд недостаточно эффективно решает проблему отклонений напряжения.
- Вольт-Вар регулирование напряжения (характеристика В) существенно снижает длительность отклонений напряжения ниже -5% у наиболее удаленного потребителя.
- Средний недозаряд батарей электромобилей при использовании Вольт-Вар регулирования – 1,29%, при отложенном заряде – 8%.

Кейс 2: Зарядные станции в подземном паркинге

Расчетная схема системы электроснабжения жилого комплекса

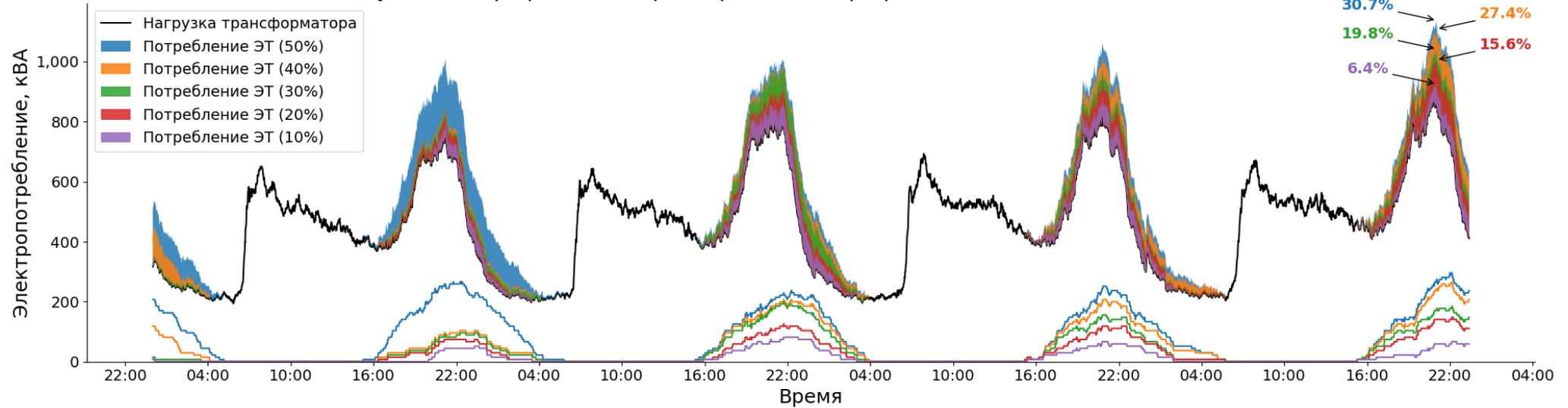


- Электрическая сеть*:
 - трансформатор – 1000 кВА;
 - кабель 10 кВ – 8 км;
 - кабель 0.4 кВ – 810 м.

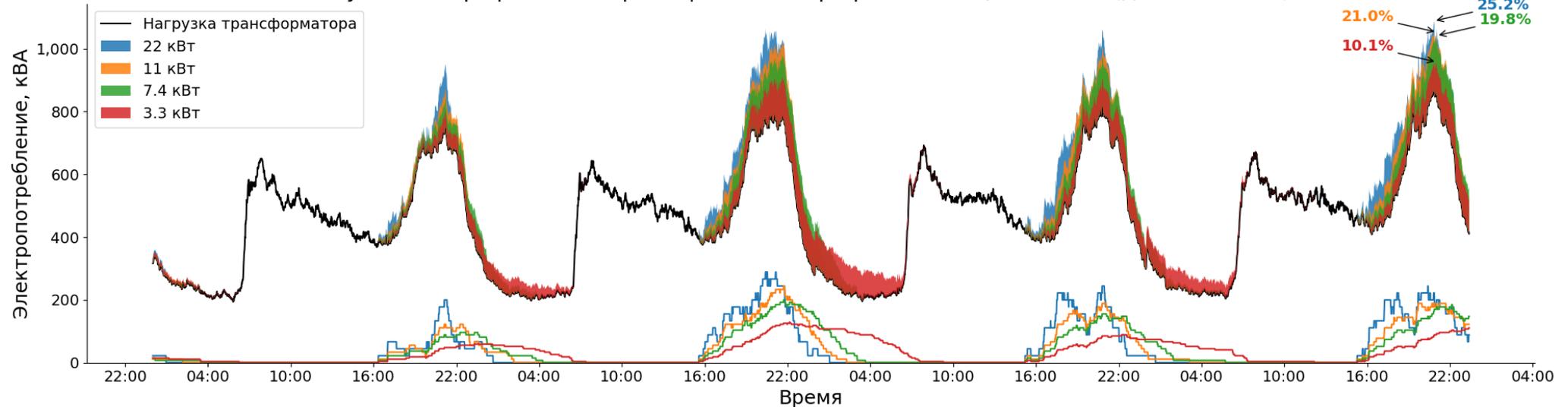
- Рассмотрены варианты оснащения подземного паркинга ЭЗС:
 - 3.7 кВт (1 ф.);
 - 7.4 кВт (1 ф.);
 - 11 кВт (3 ф.);
 - 22 кВт (3 ф.).

Кейс 2: Зарядные станции в подземном паркинге

Суточные профили электропотребления при разном количестве ЭЗС (7,4 кВт)

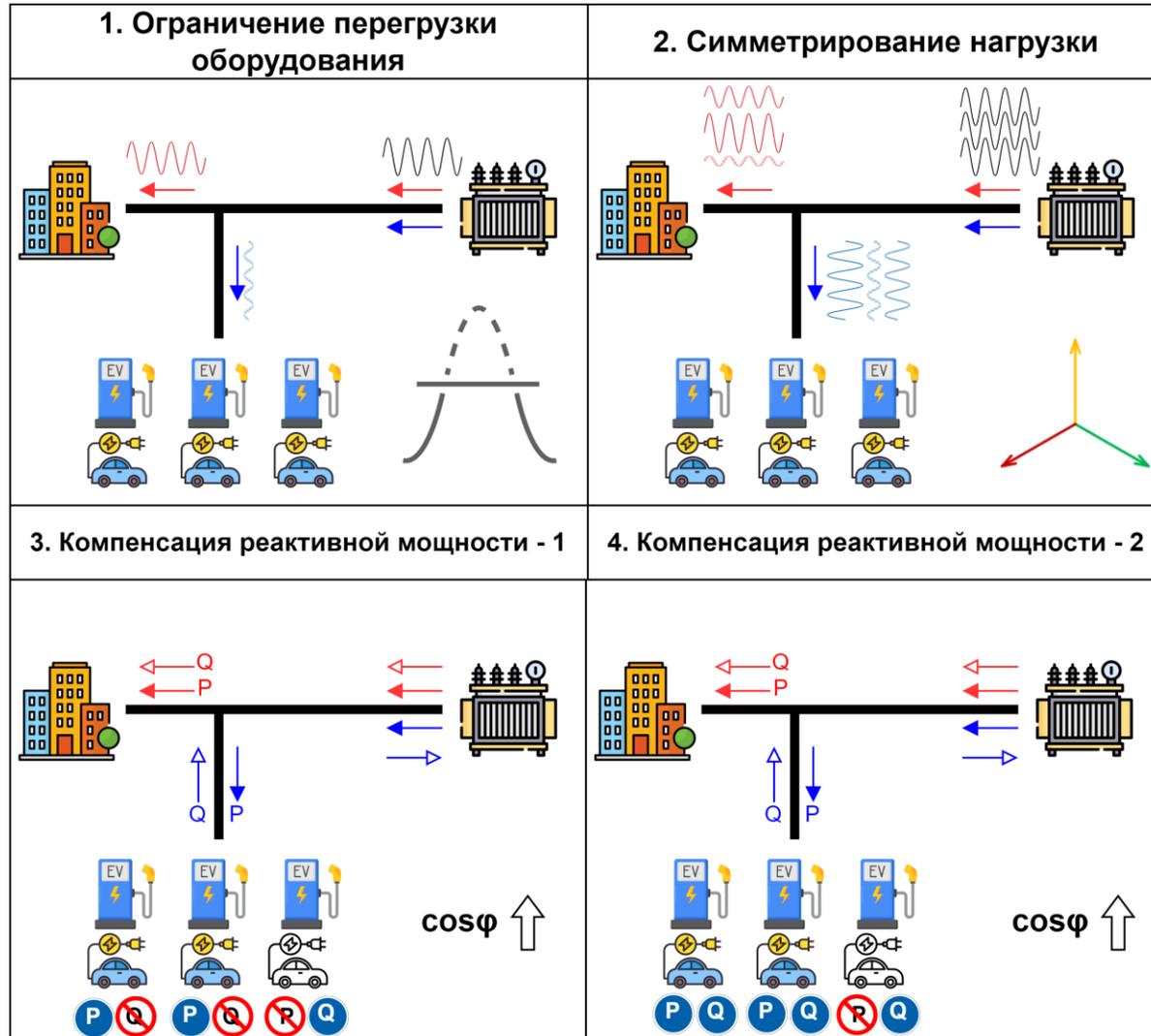


Суточные профили электропотребления при разной мощности ЭЗС (доля ЭЗС 30%)



Кейс 2: Зарядные станции в подземном паркинге

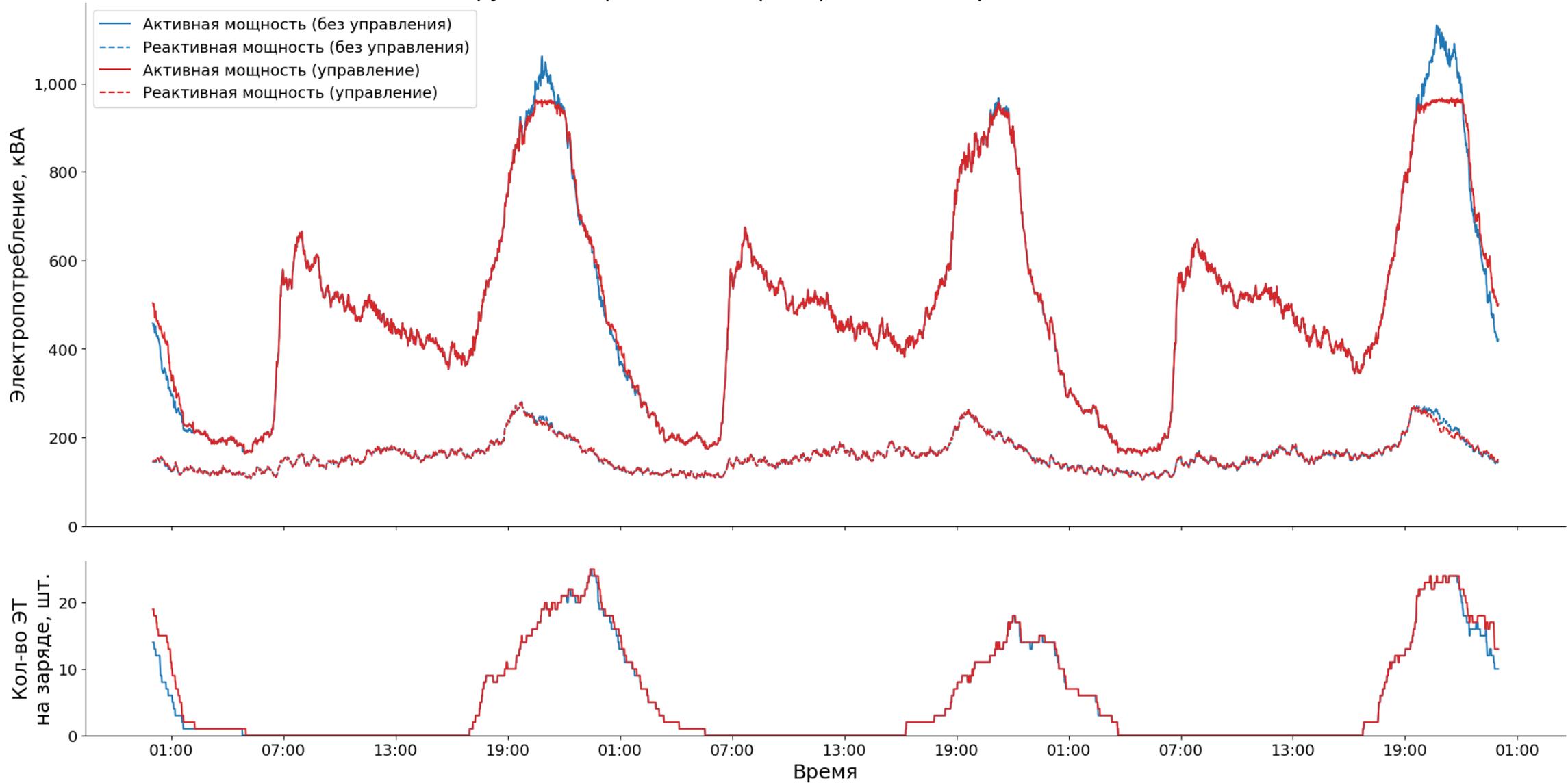
Рассмотренные варианты централизованного управления парком ЭЭС



1. Ограничение мощности заряда ЭТ при загрузке ТП выше допустимой.
2. Пофазное управление мощностью заряда ЭТ для симметрирования токовой нагрузки на ввода ТП.
3. Выдача реактивной мощности в сеть от подключенных ЭТ, завершивших заряд.
4. Выдача реактивной мощности в сеть от всех подключенных ЭТ.

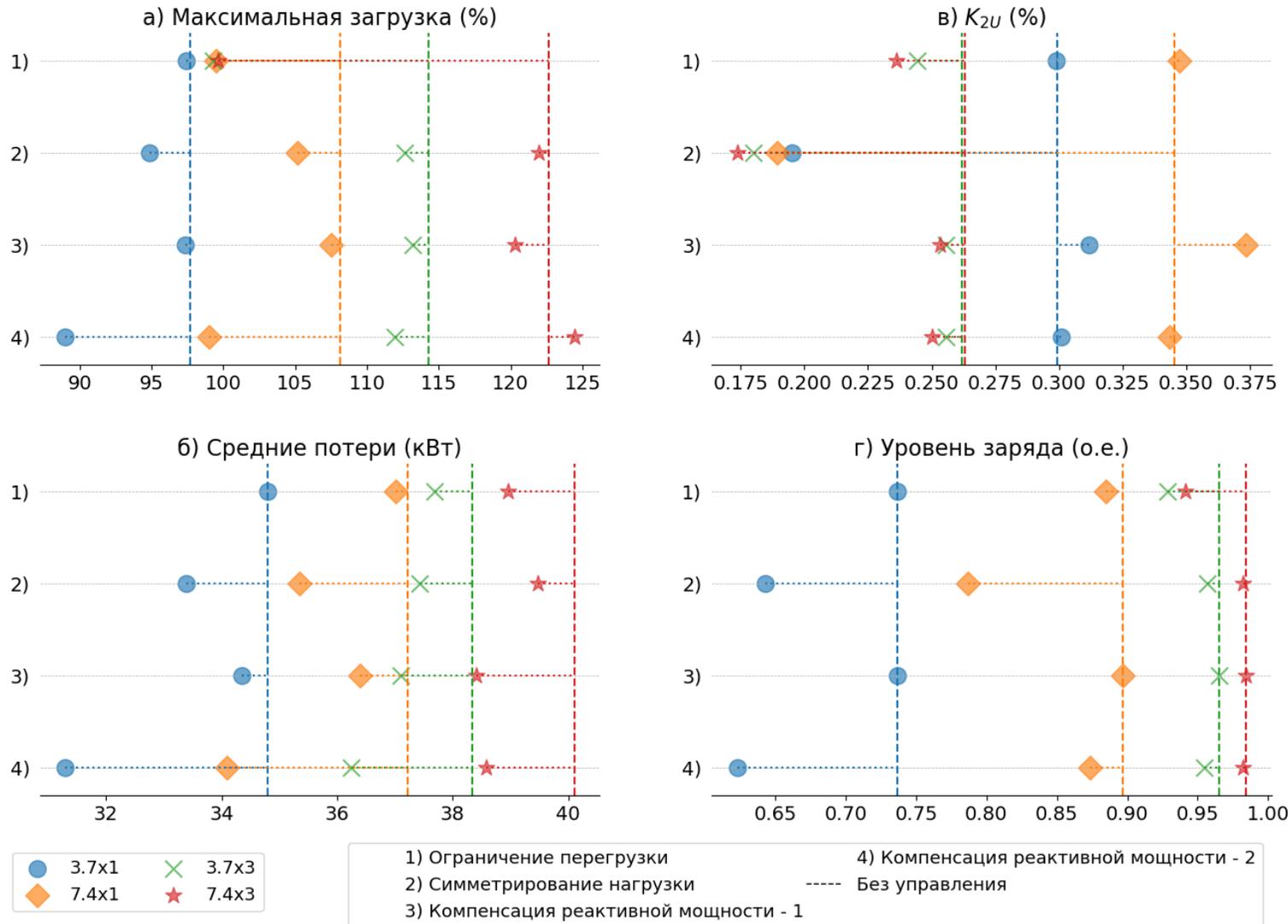
Кейс 2: Зарядные станции в подземном паркинге

Нагрузка центра питания при ограничении заряда ЭЭС в часы пик



Кейс 2: Зарядные станции в подземном паркинге

Результаты моделирования электрического режима при различных методах управления зарядом



- Ограничение недопустимой перегрузки (1) вызывает недозаряд (г) до 4.4%.
- КРМ (4) позволяет снизить потери (б) до 10%, но вызывает недозаряд (г) до 15%.
- Чем больше мощность ЭЭС, тем ниже недозаряд (г) при управлении зарядом.

Кейс 3: Оптимизация тарифа на заряд электромобилей

Анализ влияния тарифа на заряд городской сети быстрых зарядных станций на профиль нагрузки и доход ЭЭС

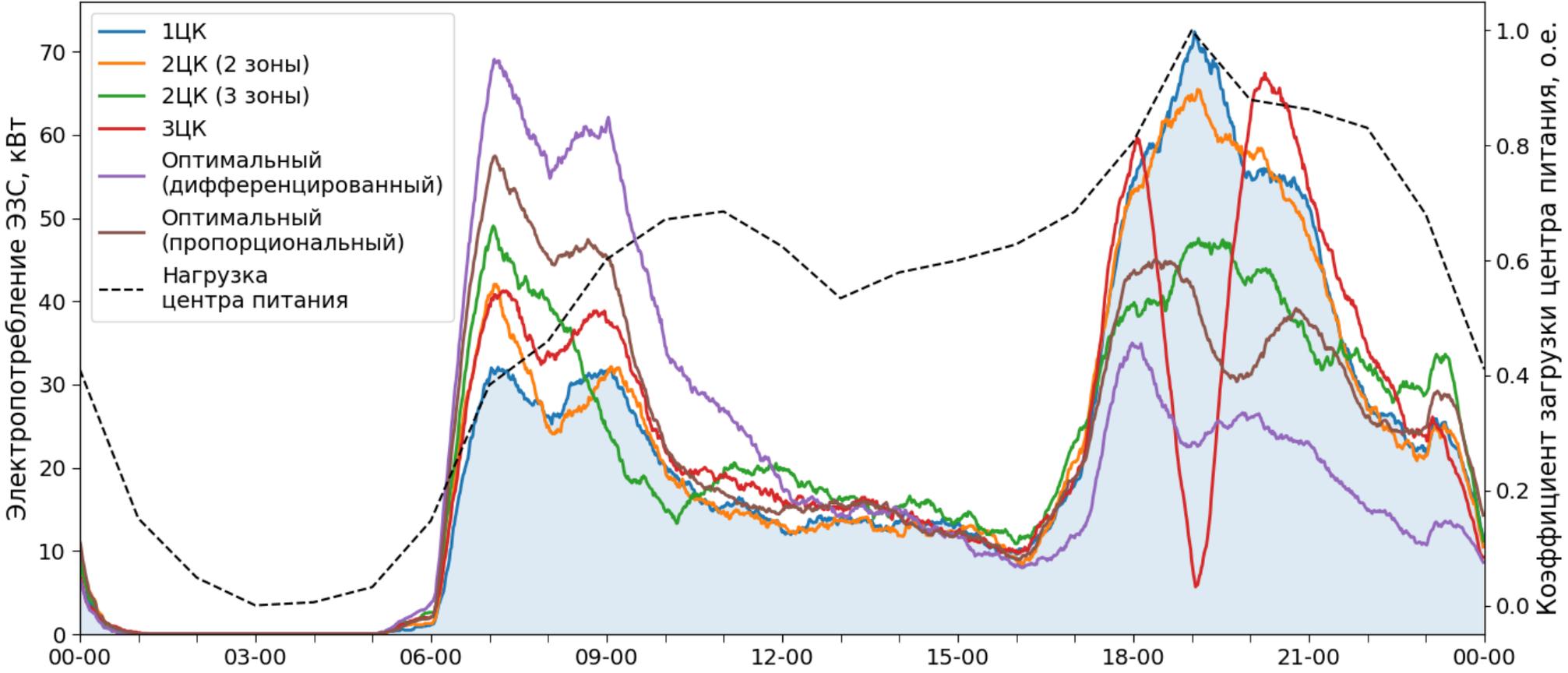
Рассмотрены варианты тарифов на заряд:

1. Плоский	2. Равномаржинальный
$T_{\text{заряд},h} = 20 \text{ руб/кВт}\times\text{ч}$	$T_{\text{заряд},h} = T_{\text{ЭЭС},h} + \Delta T_{\text{маржа}}, \text{ руб/кВт}\times\text{ч}$
3. Оптимальный (пропорциональный)	4. Оптимальный (дифференцированный)
$T_{\text{заряд}} = \begin{cases} LF^a \cdot b, & \text{при } T_{\text{заряд}} \geq T_{\min}; \\ T_{\min}, & \text{при } T_{\text{заряд}} < T_{\min}, \end{cases}$ $\min F(a,b) \text{ при } \begin{cases} a_{\min} \leq a \leq a_{\max}; \\ b_{\min} \leq b \leq b_{\max}, \end{cases}$	$F = K_{\max} w_1 + \Delta CF_{\text{ЭЭС}} w_2$ $\min F(T_{\text{заряд}}, t) \text{ при } \begin{cases} T_{\min} \leq T_{\text{заряд}} \leq T_{\max}; \\ t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \end{cases}$

LF – коэффициент загрузки центра питания; K_{\max} – относительное увеличение максимума нагрузки центра питания при наличии ЭЭС; $\Delta CF_{\text{ЭЭС}}$ – модуль отклонения удельного дохода ЭЭС от базисного уровня; w_1, w_2 – весовые коэффициенты; t – границы тарифных зон суток.

Кейс 3: Оптимизация тарифа на заряд электромобилей

Результаты моделирования

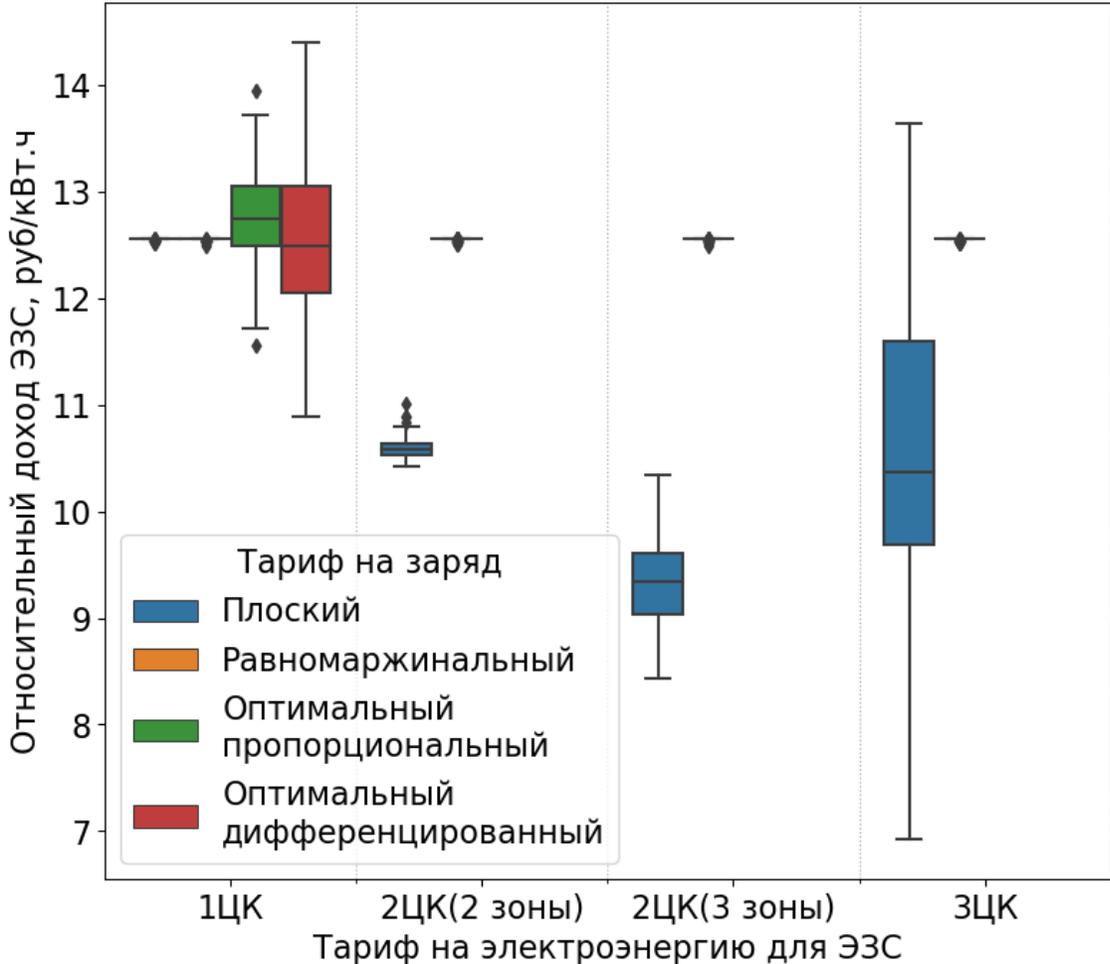
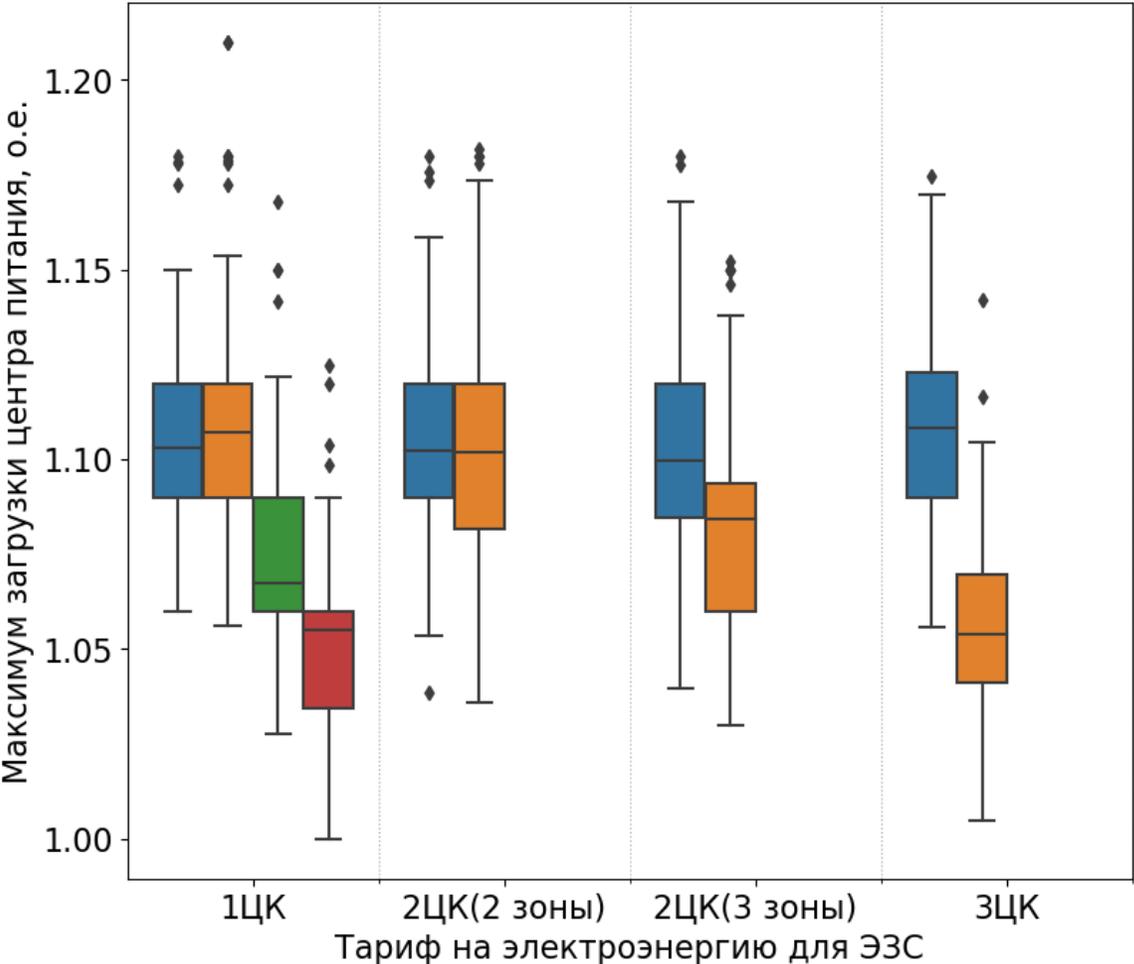


Тариф на заряд, руб/кВт.ч

1ЦК	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	
2ЦК (2 зоны)	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	18.6
2ЦК (3 зоны)	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	19.9	26.2	26.2	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	26.2	26.2	26.2	26.2	19.9	19.9	18.6
3ЦК	16.3	16.3	16.2	16.3	16.4	16.5	16.5	16.6	16.5	16.6	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.6	16.6	16.6	61.7	16.5	16.4	16.4	16.5	16.4
Оптим.пропорциональный	15.3	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	16.2	18.8	20.2	20.4	19.3	17.6	18.4	18.8	19.3	20.4	22.8	26.6	24.2	23.9	23.2	20.3
Оптим.дифференцированный	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	27.9	27.9	27.9	27.9	27.9	27.9	27.9

Кейс 3: Оптимизация тарифа на заряд электромобилей

Результаты моделирования



Выводы

- Широкое внедрение медленных ЭЗС в городских и пригородных сетях может привести к перегрузкам распределительных сетей 0,4-10 кВ. Среднее увеличение максимума нагрузки на 1% квартир/домов с зарядной станцией – 0,33...0,85 % при мощности ЭЗС от 3,7 до 22 кВт.
- Локальное управление ЭЗС с помощью Вольт-Вар характеристик позволяет существенно снизить длительность отклонений напряжения ниже -5% при минимальном влиянии на заряд ЭТ.
- Централизованное управление группой ЭЗС позволяет недопустить перегрузки электросетевого оборудования и снизить потери в распределительной сети.
- Применение дифференцированных тарифов позволяет снизить максимум нагрузки ЭЗС в 1,25 раз, а при оптимизации тарифа в 2 раза.

Направления дальнейших исследований

- Использование геопространственного анализа для определения приоритетных районов города для размещения ЭЗС.
- Анализ свободных мощностей в центрах питания ниже 35 кВ с учетом рекомендуемых точек размещения ЭЗС.
- Разработка механизмов рыночного регулирования цен на заряд электротранспорта для разгрузки центров питания и повышения КИУМ ЭЗС.
- Разработка типовых решений по технологическому присоединению ЭЗС с учетом имеющихся ограничений по загрузке центров питания, в том числе с применением систем накопления электрической энергии и возобновляемых источников энергии.
- Разработка системы интеллектуального управления зарядной инфраструктурой для электротранспортных средств.



Разработка системы беспроводного заряда для электромобилей

Система беспроводного заряда для электромобилей



- Не требуется участие человека в процессе заряда:
 - комфорт и безопасность для водителя;
 - перспектива для беспилотного транспорта.
- Показатели сопоставимы с проводными системами:
 - КПД от сети до аккумулятора 90-93 %;
 - мощность от 3,6 до 22 кВт.
- Более высокая надежность.

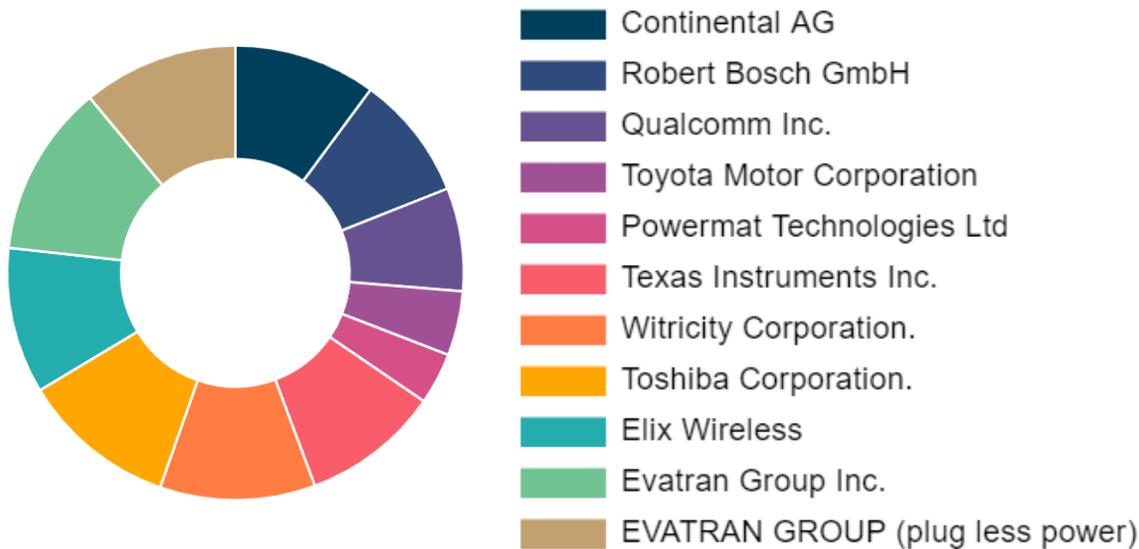


- Очень низкая распространенность на потребительском рынке.
- Высокая цена.

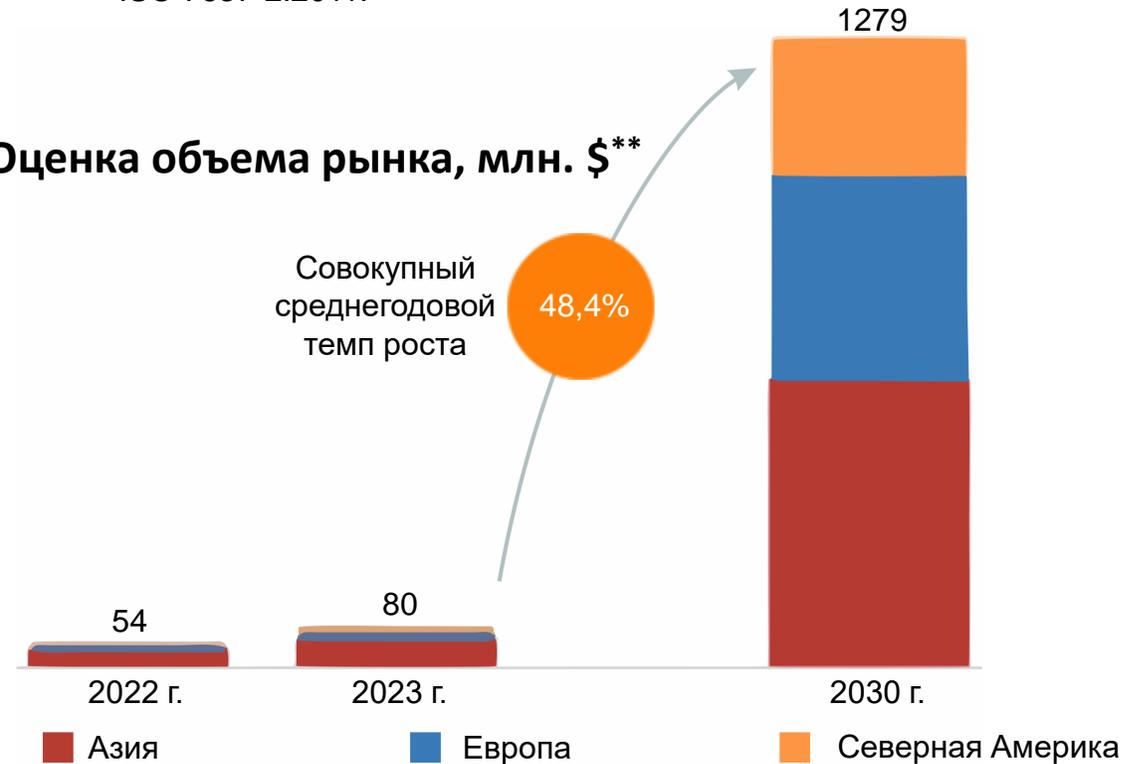


Разработаны системы стандартов для внедрения технологии:
 семейство SAE J2954; семейство IEC 61980; ISO 19363:2020;
 ISO 7637-2:2011.

Лидеры рынка по инвестициям на 2022 г. *



Оценка объема рынка, млн. \$**



* Wireless Electric Vehicle Charging Market: Information by Power Source (3-<11 kW, 11-50 kW), Charging Methods (Capacitive Wireless Power Transfer (CWPT)), and Region - Forecast till 2030, Straits Research, Sept. 2022, Report Code: SRAT2642DR.

**Wireless Charging Market for Electric Vehicles by Propulsion (BEVs, PHEVs), Application (Home & Commercial), Charging Type (Stationary & Dynamic), Component, Power Supply Range, Charging System, Vehicle Type & Region - Global Forecast to 2030, MarketsandMarkets, Oct. 2023, 238 p.

Система беспроводного заряда для электромобилей

Серийные электромобили, оснащенные СБЗ

- [Volvo XC40](#), до 40 кВт
- [Genesis GV60](#), от 7.2 до 11 кВт
- [Hongqi E-HS9](#), 11 kW
- [BMW 530e](#), 3.2 kW

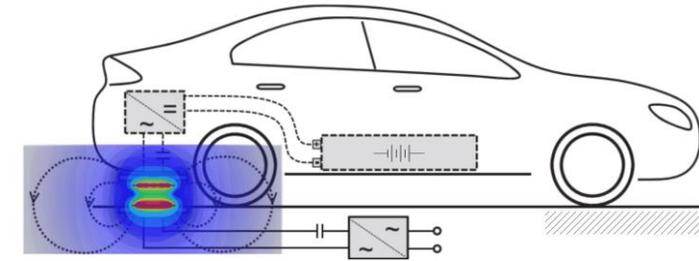
Зарядные станции со статической СБЗ

- [WiTricity](#), до 22 кВт
- [Mojo Mobility](#), до 20 кВт
- [Continental](#), до 11 кВт
- [Daihen D-Broad](#), до 11 кВт
- [HEVO Rezonant E8](#), 8 кВт
- [Qualcomm Halo](#), от 3,3 до 7 кВт кВт
- [InductEV](#), от 75 до 450 кВт, для грузовых электромобилей и электробусов
- [WAVE](#), до 250 кВт, для электробусов
- [Electreon](#), для электробусов Electra Afikim

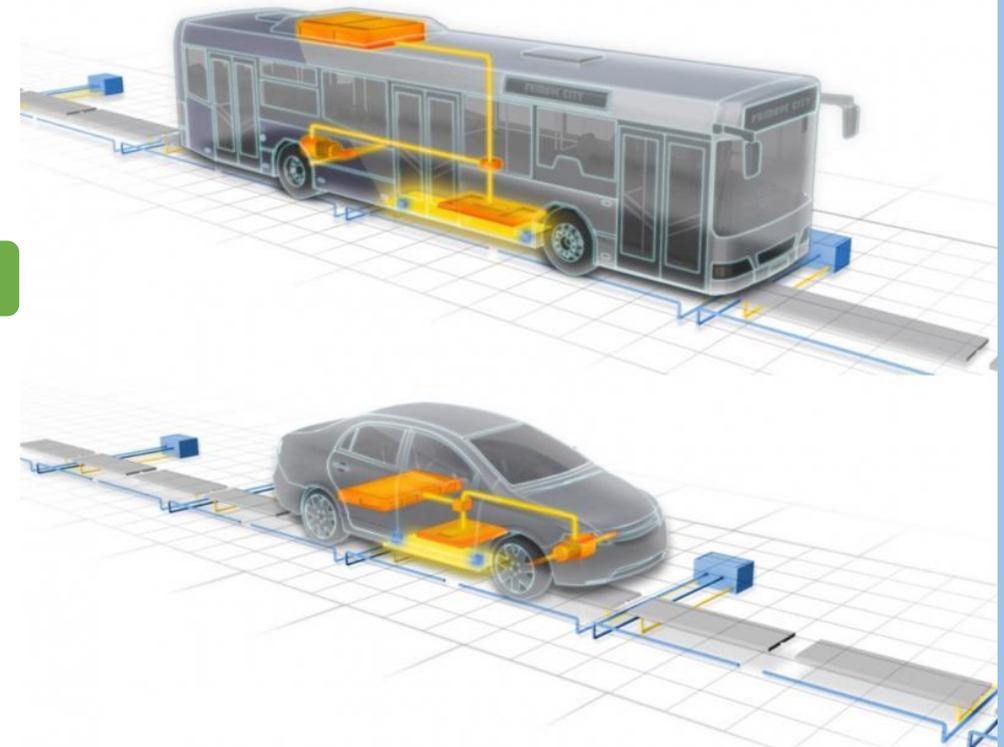
Динамические СБЗ

- [Smartroad Gotland](#), Швеция: демонстрационная трасса длиной 1,65 км, предназначена для грузовых электромобилей и электробусов весом до 40 т со скоростью до 80 км/ч, средняя мощность 100 кВт, функционирует с 2021 г.
- [Arena del Futuro](#), Италия: тестовый участок платной междугородней трассы длиной 1,07 км, предназначена для электробусов и легковых электромобилей. Для электробусов повышает уровень заряда аккумулятора на величину до 25 процентных пунктов, функционирует с 2021 г.
- [Tel Aviv Urban Bus Case Study](#), Израиль: часть кольцевого маршрута общественного транспорта. Длина маршрута 5 км, длина динамической СБЗ 700 м, дополнительно использованы стационарные СБЗ на остановках. Проект позволил использовать на маршруте электробусы с суперконденсаторами мощностью 42 кВт·ч вместо аккумуляторов на 400 кВт·ч. Проект функционирует с 2021 г.

Статические СБЗ



Динамические СБЗ



Исследования в области СБЗ в России

Национальный исследовательский университет ИТМО

- Устройство беспроводной передачи энергии на основе метаматериалов, способное заряжать одно или несколько мобильных устройств одновременно
- Система беспроводного заряда для электромобиля, 11 кВт, SAE J2954

Севастопольский государственный университет

- Система беспроводного заряда для электротележки, 3,6 кВт, Система беспроводного заряда для гольф-кара, 1,5 кВт, Система беспроводного заряда для автономного необитаемого подводного аппарата, 2 кВт
- Методы оптимизации параметров резонансного контура
- Методы оценки риска воспламенения из-за индукционного нагрева
- Система беспроводной передачи энергии, Qi Specification
- Системы беспроводной связи в морской среде

Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники"

- Системы беспроводного питания для имплантируемых медицинских приборов
- Методы оптимизации параметров приемной и передающей катушек
- Методы оценки тепловой безопасности низкочастотных индуктивных систем передачи энергии для имплантируемых устройств
- Методы управления выходными характеристиками систем индуктивного питания имплантатов

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН

- Маломощные системы передачи энергии для робототехники
- Маломощные системы беспроводного заряда для автономных необитаемых подводных аппаратов

Казанский государственный энергетический университет

- Концепция и модель мобильной установки заряда электротранспорта, 3,5 кВт

Московский технический университет связи и информатики

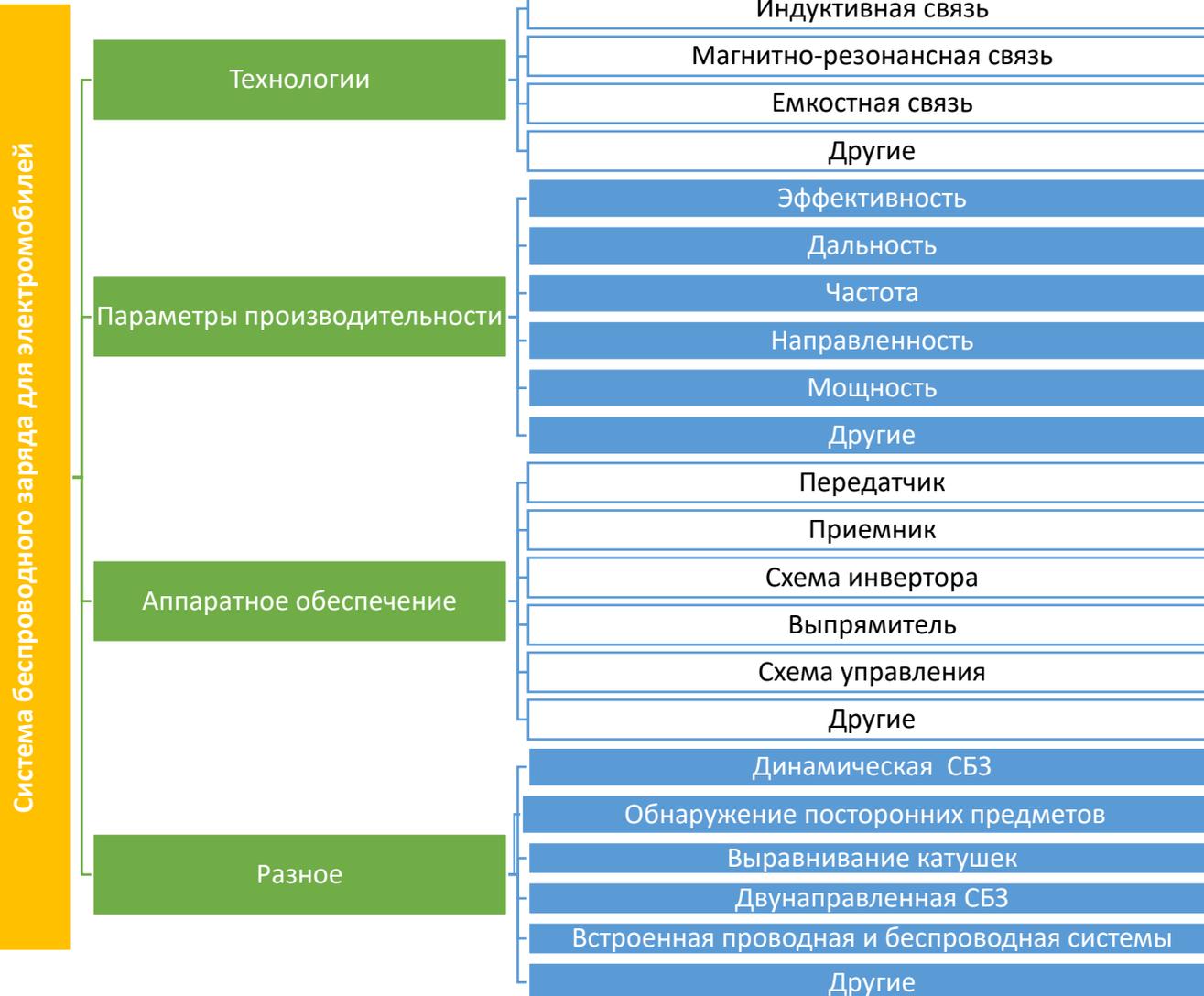
- Беспроводная передача энергии в системах ограниченной мощности

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

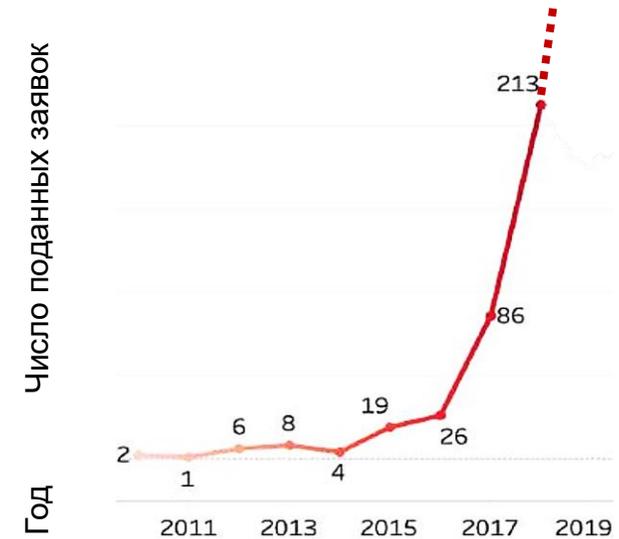
- Система беспроводного заряда для мобильных устройств пассажиров междугородних автобусов

Система беспроводного заряда для электромобилей

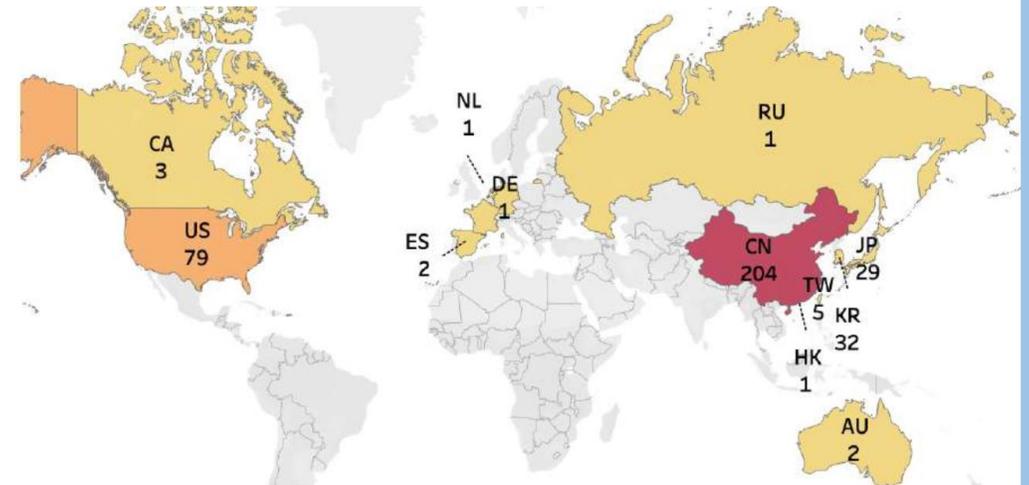
Таксономия для группирования патентных документов



Динамика изобретательской активности



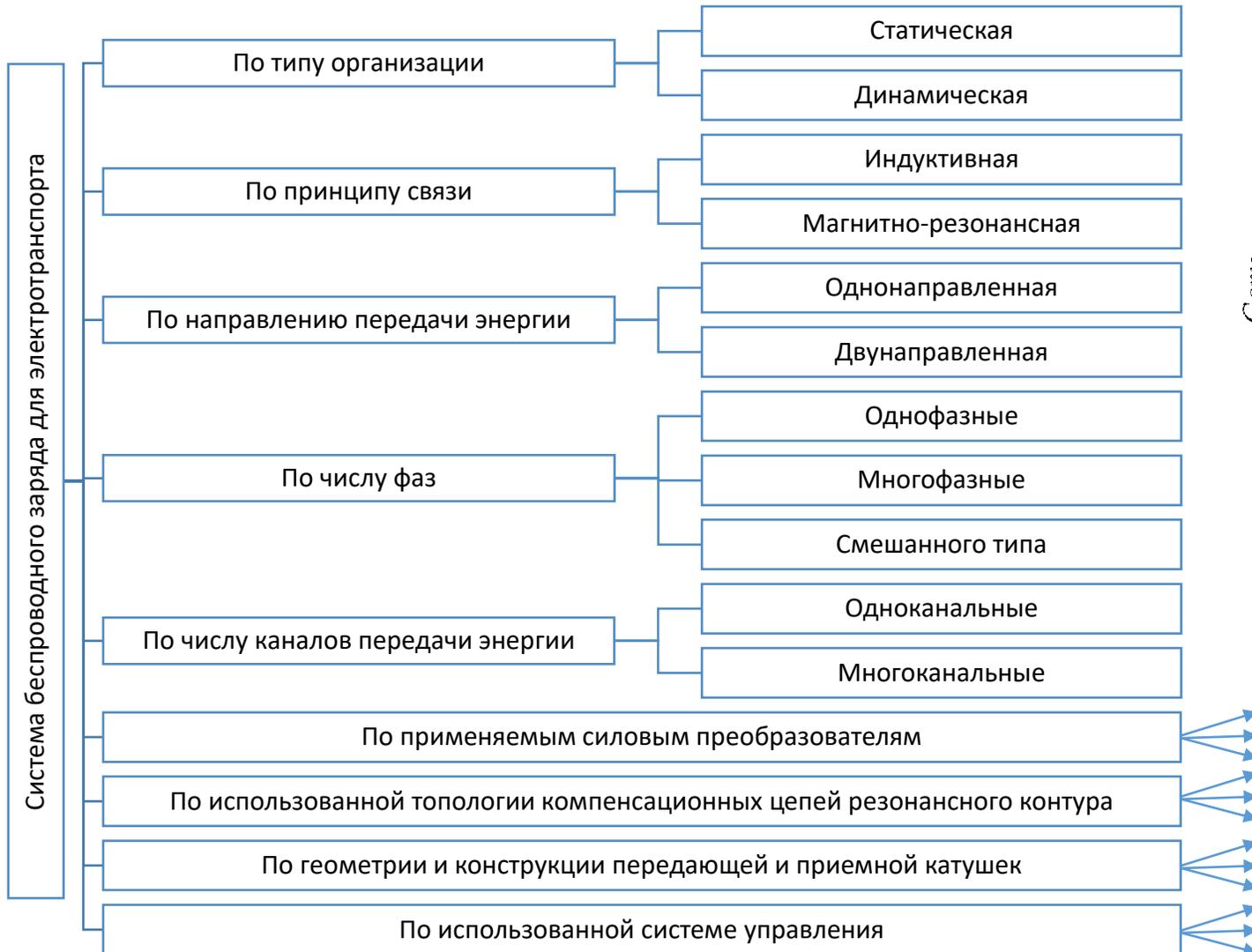
География патентов, выданных в 2020 г.



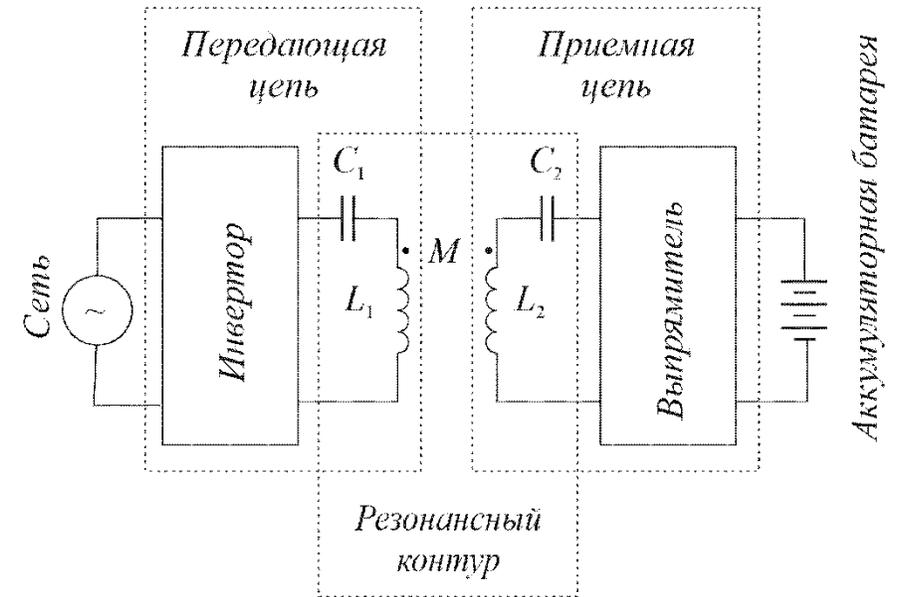
* Все данные на слайде из источника Wireless electric vehicle charging. Sample landscape study. IIPRD, 2020, 43 p.

Примеры систем беспроводного заряда

Классификация СБЗ для электротранспорта

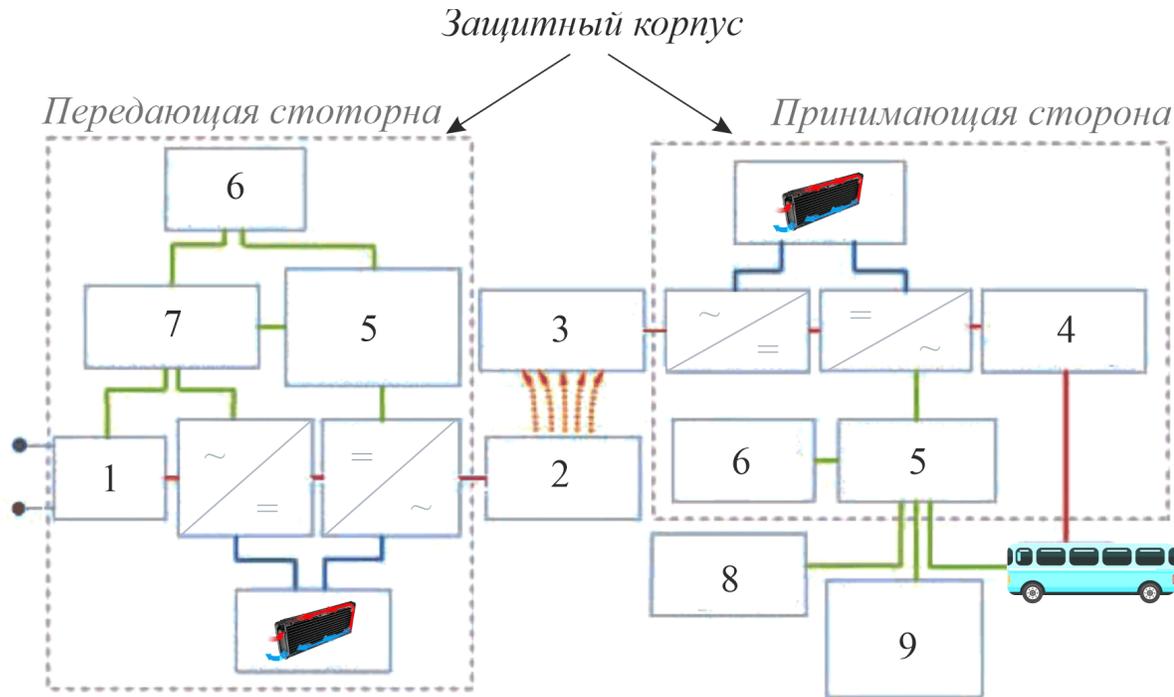


Общая структура статической СБЗ



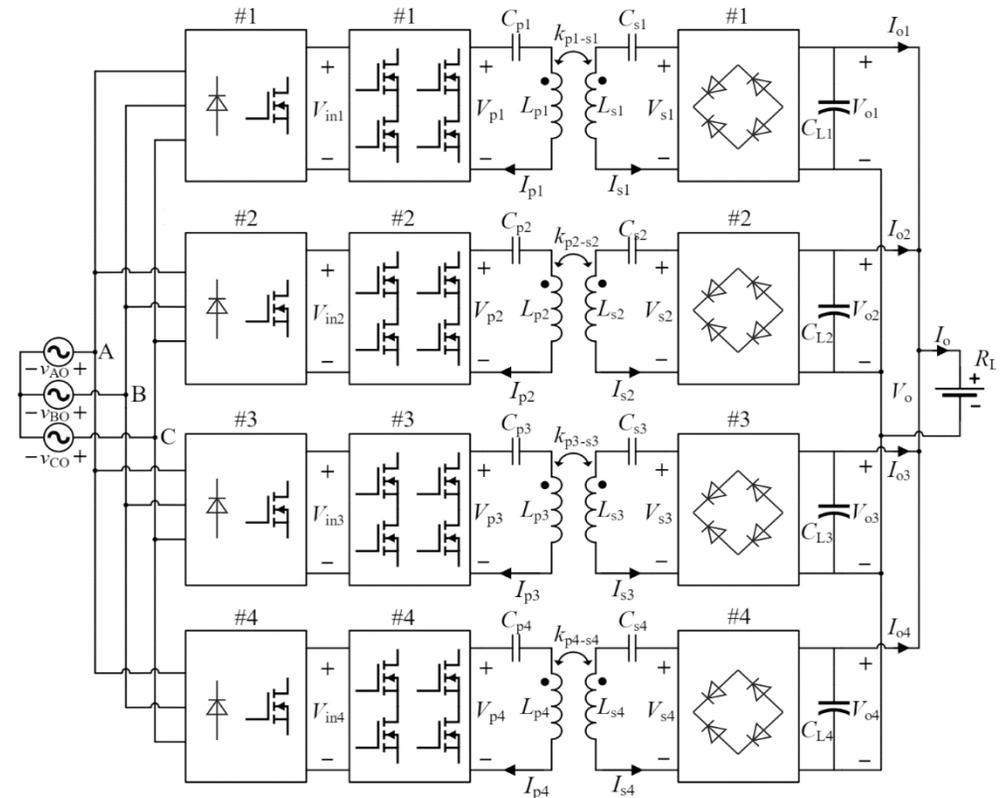
Примеры систем беспроводного заряда

Архитектура системы*



- 1 – панель подключения к сети; 2 – передающая катушка; 3 – приемная катушка; 4 – фильтр электромагнитного излучения и предварительный заряд; 5 – управление силовой электроникой; 6 – беспроводная связь; 7 – контроллер верхнего уровня; 8 – управление позиционированием; 9 – обнаружение посторонних объектов

Функциональная схема силовых цепей**



* Wu H. H. An overview of a 50kW inductive charging system for electric buses / Wu H. H., Masquelier M. P. // 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – IEEE, 2015. – P. 1-4.

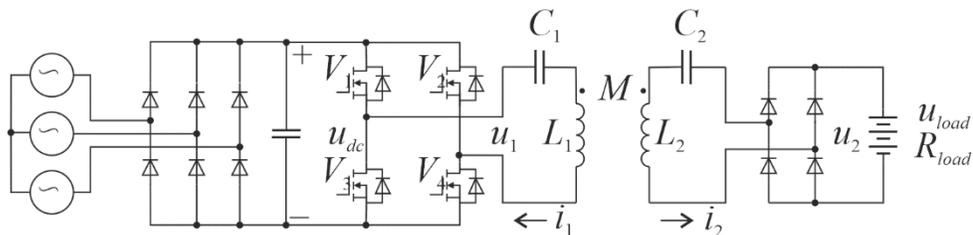
** Chen H. Modular four-channel 50 kW WPT system with decoupled coil design for fast EV charging / Chen H., Qian Z., Zhang R., Zhang Z. [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 136083-136093.

Вызовы и перспективные направления СБЗ

Проблема	Детализация	Направления исследований
Проектирование	Выбор проектного решения	Выбор схем и компонентов Выбор материалов
	Специфическое оборудование	Для автономного электротранспорта Для подводных условий Для подземных условий
Оптимизация	Оптимизация параметров компонентов	Оптимизация геометрии и конструкции приёмной и предающей катушек Оптимизация параметров резонансного контура
	Оптимизация режимов работы	Влияние со стороны питающей сети Смещение электромобиля относительно зарядной площадки (координаты x,y, высота зазора, угол)
	Оптимальное управление	Управление коммутацией ключей Управление беспроводной передачей энергии Управление на уровне электромобиля
Безопасность	Электромагнитная совместимость (оборудование и здоровье)	Методы измерения и контроля радиочастотного электромагнитного излучения Снижение влияния на здоровье Снижение влияния на сеть
	Опасность воспламенения из-за индукционного нагрева	Методы обнаружения посторонних предметов Оценка риска воспламенения
Интеграция	Интеграция оборудования	G2V и V2G
	Интеграция телеметрии и каналов связи	Коммерческий учет потребляемой мощности на высоких частотах с учетом гармонических искажений и перенапряжений Совершенствование каналов беспроводной связи
	Информационная безопасность	Защита от вмешательства в процесс заряда Защита системы взимания платы Защита данных телеметрии

Оптимизация резонансного контура

Электрическая схема рассматриваемой СБЗ



Математическая модель СБЗ в частотной области

$$\begin{cases} U_{in} = U_{C1} + I_1 R_1 + s I_1 L_1 + s I_2 M \\ 0 = U_{C2} + s I_2 L_2 + s M I_1 + I_2 R_{2\Sigma} \\ I_1 = s U_{C1} C_1 \\ I_2 = s U_{C2} C_2 \end{cases}$$

Критерии оптимизации

$$\xi_1(\theta, \omega) = \eta = \frac{P_{load}}{P_{in}} = \frac{A_{i_2}^2 R_{load}}{\operatorname{Re}(W_{i_1})} \rightarrow \max$$

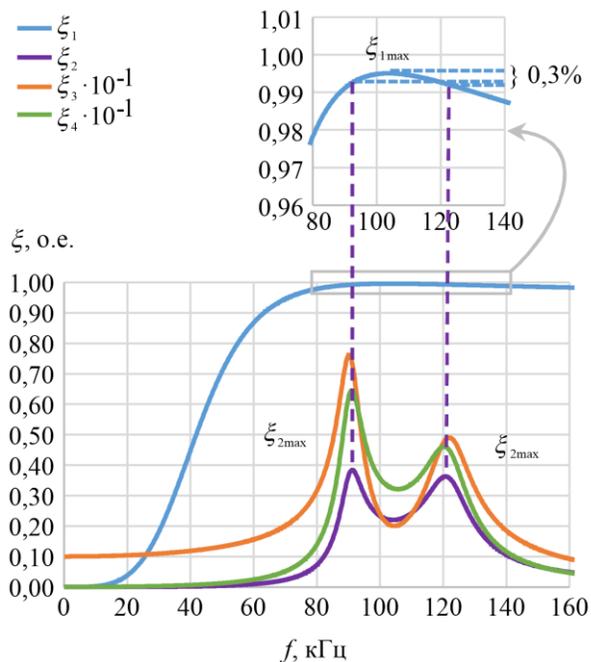
$$\xi_2(\theta, \omega) = A_{i_2} \geq \frac{I_{2n}}{U_{in \max}}$$

$$\xi_3(\theta, \omega) = \frac{|U_{C1}|}{|U_{in}|} = A_{U_{C1}} \leq \frac{U_{C1 \max}}{U_{in \max}}$$

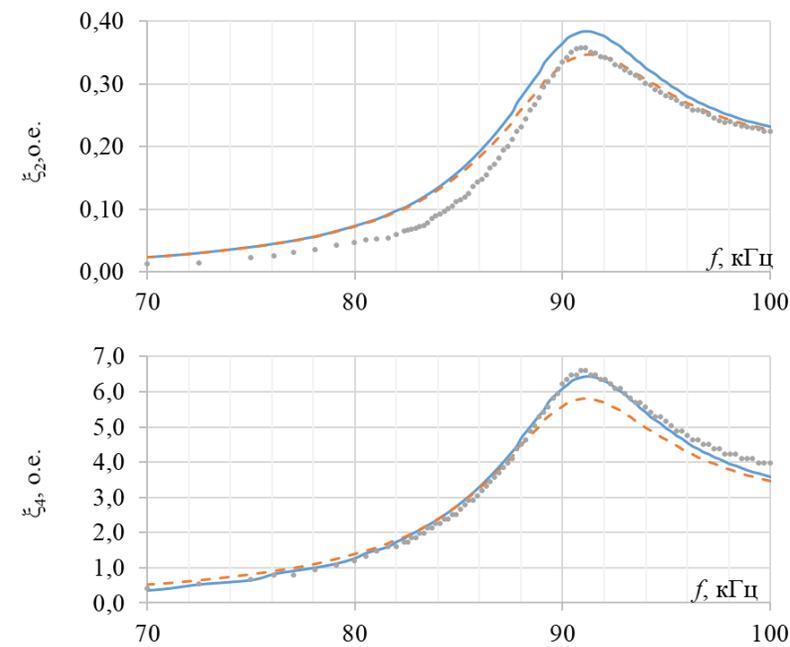
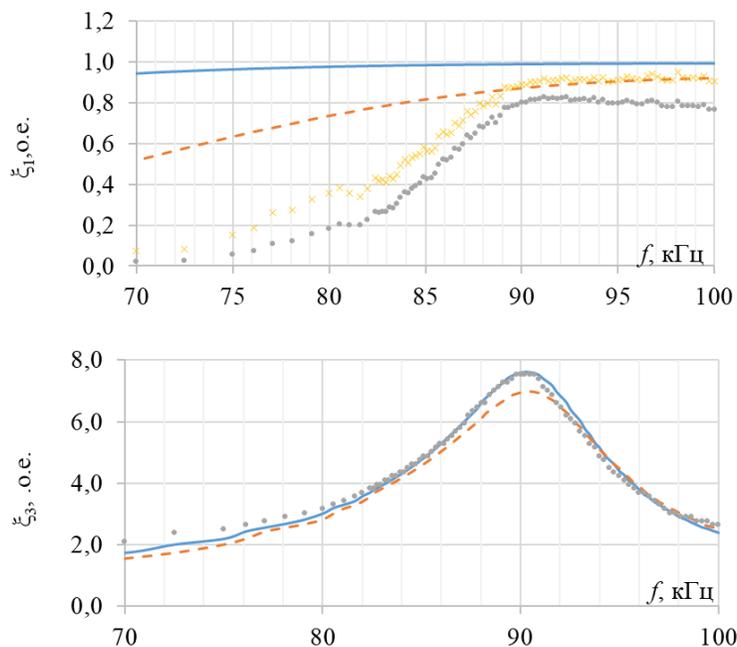
$$\xi_4(\theta, \omega) = \frac{|U_{C2}|}{|U_{in}|} = A_{U_{C2}} \leq \frac{U_{C2 \max}}{U_{in \max}}$$

Функций $\xi_1 - \xi_4$

в зависимости от частоты

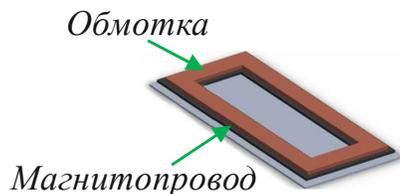


Проверка адекватности матмодели

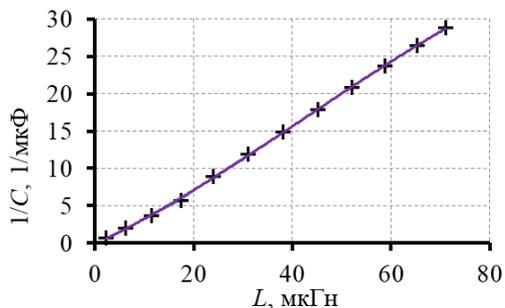
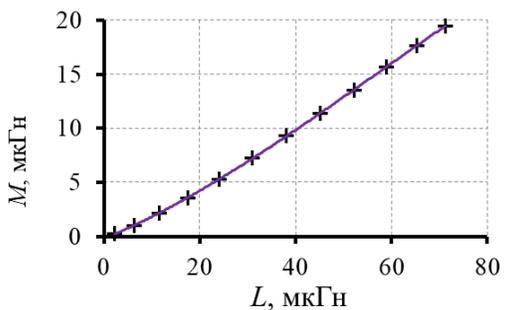
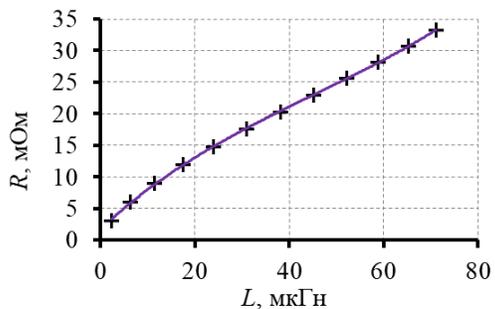


Оптимизация резонансного контура

Конструкция катушек



Зависимости $M=f(L)$, $R=f(L)$ и $1/C=f(L)$



Параметры резонансного контура

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

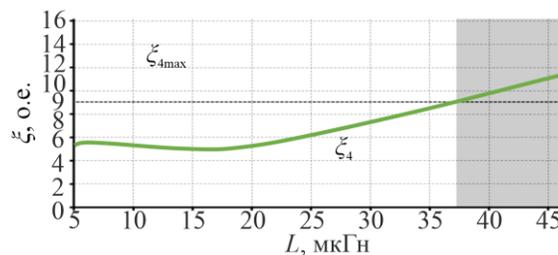
$$M = w^2 \frac{\mu_0}{\pi} \left[c \ln \left(\frac{c + \sqrt{c^2 + x^2}}{c + \sqrt{c^2 + b^2 + x^2}} \frac{\sqrt{b^2 + x^2}}{x} \right) + b \ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 + x^2}}{b + \sqrt{c^2 + b^2 + x^2}} \frac{\sqrt{c^2 + x^2}}{x} \right) + 2 \left(\sqrt{c^2 + b^2 + x^2} - (\sqrt{c^2 + x^2} - \sqrt{b^2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

$C = f(L, R, M, f_r)$ – определяется численно с помощью специальной компьютерной программы с использованием метода последовательных приближений

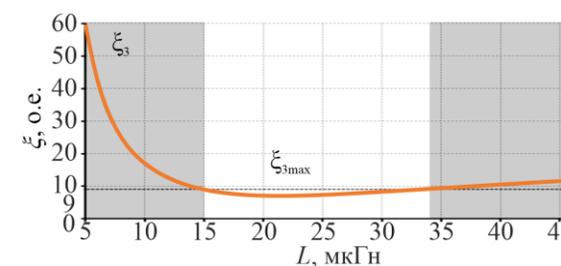
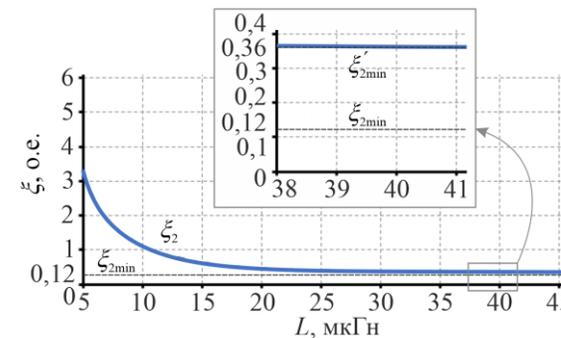
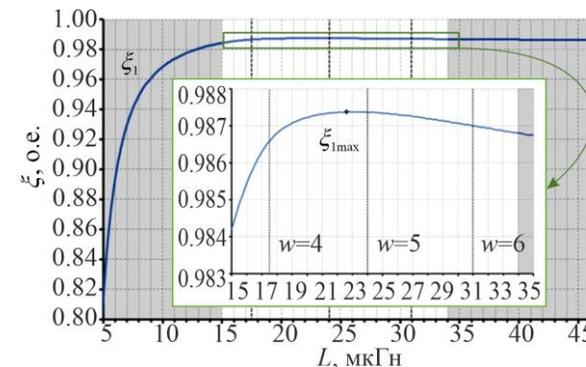
Результаты аппроксимации

$$R = d_{r0}L^3 + d_{r1}L^2 + d_{r2}L + d_{r3} \quad M = d_{m0}L^3 + d_{m1}L^2 + d_{m2}L + d_{m3}$$

$$1/C = d_{c0}L^3 + d_{c1}L^2 + d_{c2}L + d_{c3}$$

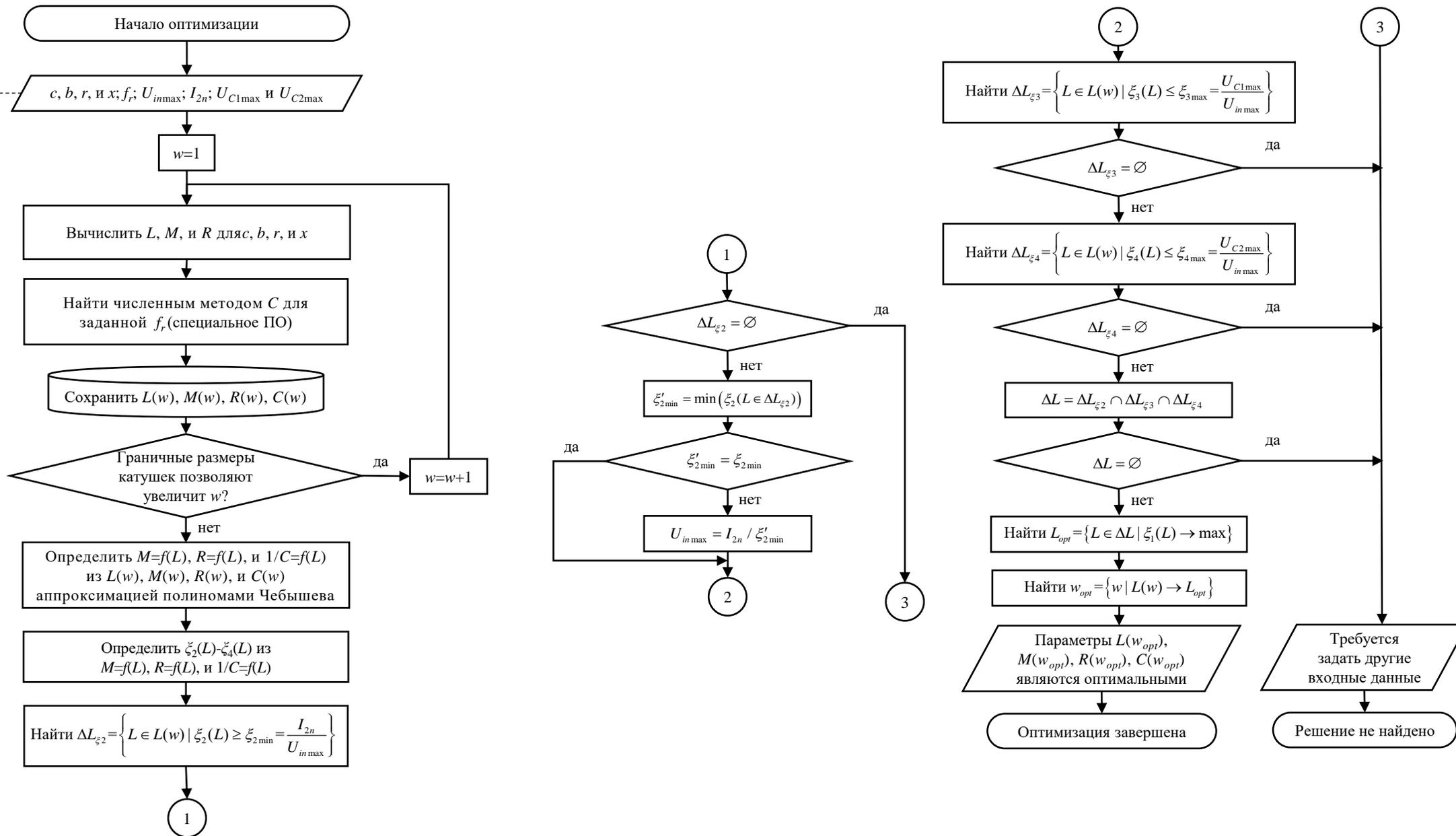


Функции $\xi_1 - \xi_4$ в зависимости от L



Оптимизация резонансного контура

Ввод следующих входных данных: граничные размеры катушек; требуемая резонансная частота; максимальное напряжение питания; номинальный ток нагрузки; максимально допустимые напряжения резонансного контура



Оценка опасности воспламенения

Массовый пожар, вызванный возгоранием тополиного пуха*



Мощность,
выделяемая в виде тепла

$$P_m = \left(\int_v \frac{B_{\max}^2}{\mu_0} dv \right) \omega \sin(2\omega t) = P_\tau = \alpha \tau$$

$$\alpha = A_1 \sqrt[8]{\frac{\tau}{l^5}} \text{ при } PrGr \leq 500$$

$$\alpha = A_2 \sqrt[4]{\frac{\tau}{l}} \text{ при } 500 < PrGr < 2 \cdot 10^7$$

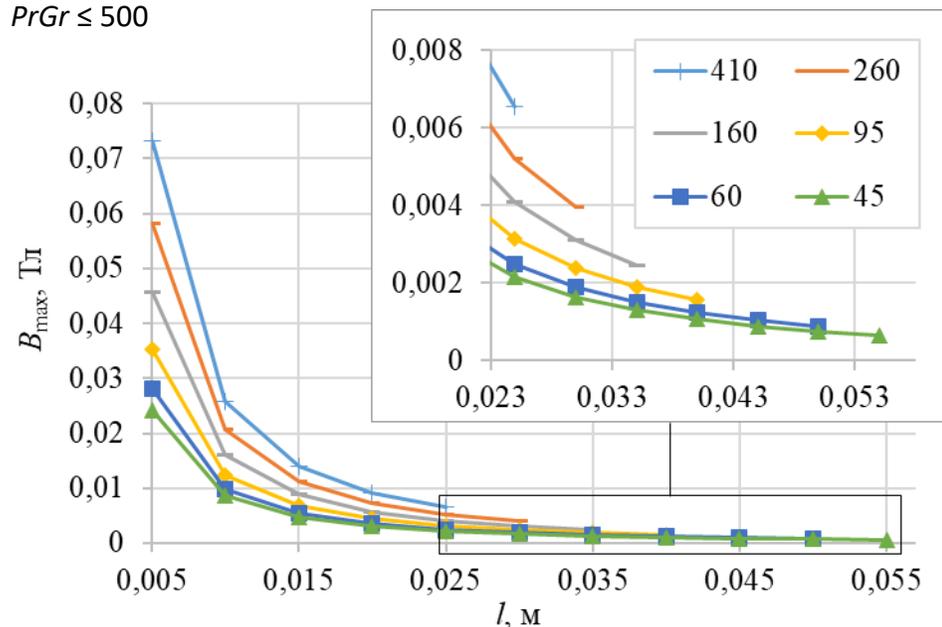
$$\alpha = A_3 \sqrt[3]{\tau} \text{ при } PrGr \geq 2 \cdot 10^7$$

Предельное значение магнитной индукции
для различных превышения температуры (°C)

Уравнения для расчета
предельной амплитуды магнитной индукции

Граничные значения	Форма тела, подвергающегося индукционному нагреву	
	Шар	Куб
$PrGr \leq 500$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{6\mu_0\tau}{\omega\pi l^3} A_1 \sqrt[8]{\frac{\tau}{l^5}}}$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0\tau}{\omega l^3} A_1 \sqrt[8]{\frac{\tau}{l^5}}}$
$500 < PrGr < 2 \cdot 10^7$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{6\mu_0\tau}{\omega\pi l^3} A_2 \sqrt[4]{\frac{\tau}{l}}}$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0\tau}{\omega l^3} A_2 \sqrt[4]{\frac{\tau}{l}}}$
$PrGr \geq 2 \cdot 10^7$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{6\mu_0\tau}{\omega\pi l^3} A_3 \sqrt[3]{\tau}}$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0\tau}{\omega l^3} A_3 \sqrt[3]{\tau}}$

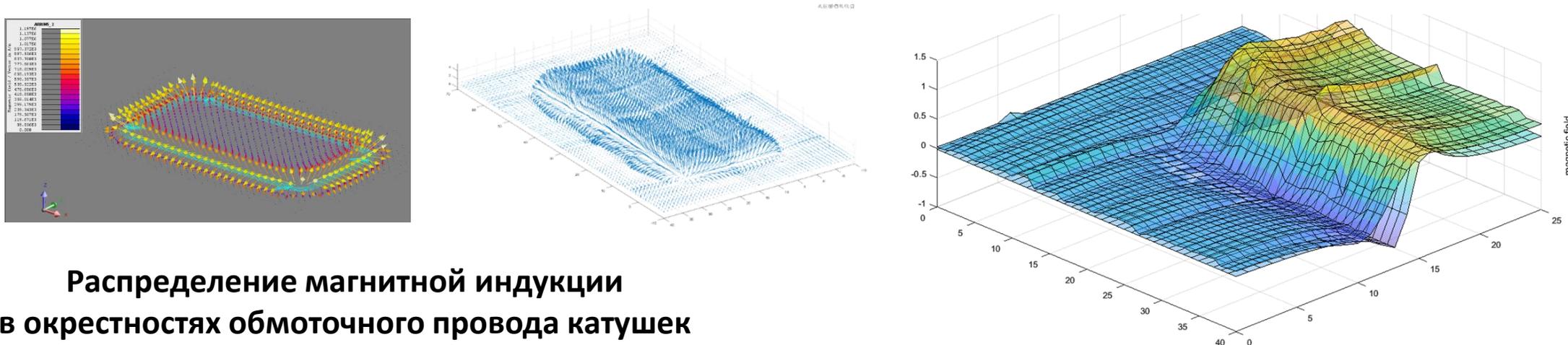
$PrGr \leq 500$



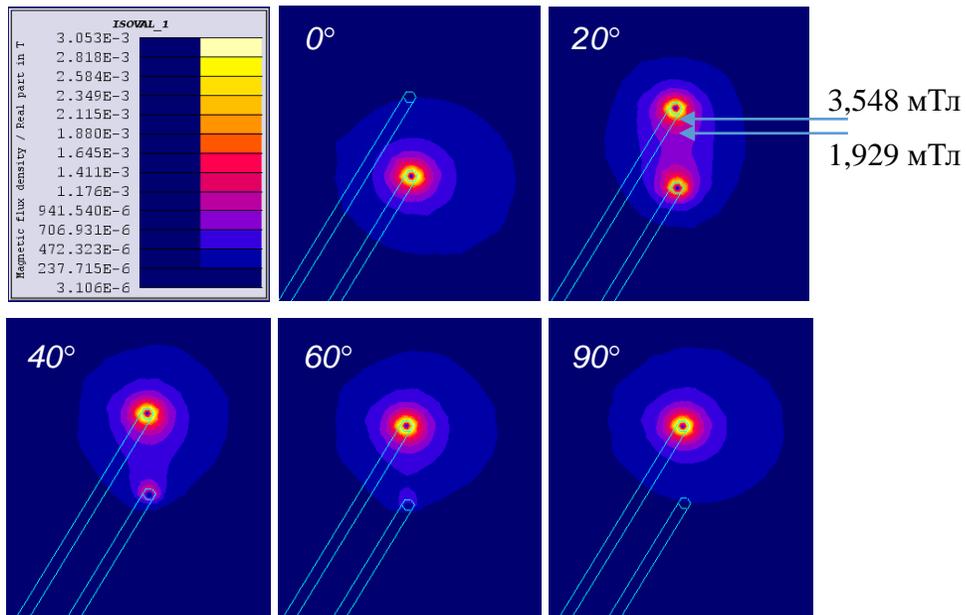
* Songyan Niu. Power loss analysis and thermal assessment on wireless electric vehicle charging technology: The over-temperature risk of ground assembly needs attention / Songyan Niu, Hang Yu, Shuangxia Niu, Linni Jian // Applied Energy. – 2020. – Vol. 275. – P. 115344.

Оценка опасности воспламенения

3D модель распределения магнитного поля в среде моделирования Altair Flux и проверка ее адекватности



Распределение магнитной индукции в окрестностях обмоточного провода катушек



Эксперимент по размещению между катушками постороннего металлического предмета кубической формы



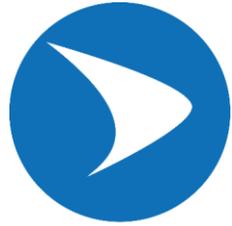
СБЗ для электромобилей, созданные в СевГУ



	Электротележка	Гольф-кар
Параметры питающей сети	220 В, 50 Гц	220 В, 50 Гц
Номинальная передаваемая мощность	3,6 кВт	1,5 кВт
Рабочая частота	90 кГц	90 кГц
Номинальный зарядный ток	36 А	25 А
Номинальное напряжение заряда	100 В	48 В

Направление дальнейших исследований

- Разработка алгоритмов управления для оптимизации СБЗ на этапе функционирования системы.
- Разработка алгоритмов оптимизации резонансного контура СБЗ на этапе проектирования для различных вариантов топологии компенсационных цепей и конструкции приемной и передающей катушек.
- Усовершенствование методики оценки риска воспламенения с учетом сложной произвольной формы постороннего предмета, с учетом скин-эффекта, а также с учетом возможных слоевых горючих отложений (пыль, масло и т.п.).
- Распространение полученных результатов на другие виды специального и технологического транспорта.



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



 **RTSoft**
Смарт Грид

Спасибо за внимание!

- Воронин Вячеслав Андреевич, к.т.н., старший научный сотрудник, КузГТУ
- Дубков Евгений Александрович, старший преподаватель, СевГУ

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