

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Техническое и информационное обеспечение интеллектуальных систем электроснабжения

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка системы управления комплексом зарядных станций для
электрических автомобилей

Обучающийся

Р.И. Ихсанов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

к.т.н., доцент С.В. Шаповалов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Содержание

Введение	4
1. Электрические сети и стратегии зарядки электромобиля.....	8
1.1 Транспортная инфраструктура мегаполиса	8
1.2 Концепция Smart Grid	10
1.3 Электромобили и электро-зарядные станции.....	12
1.4 Концепция V2G	16
1.4.1 Автомобиль-дом(V2H)	17
1.4.2 Автомобиль-распределительная сеть (V2G)	18
1.4.3 Автомобиль-электрическая сеть (V2X)	19
2 Модель V2G в условиях города.....	21
2.1 Стратегия управления	21
2.2 Моделирование.....	22
2.2.1 Ключевые показатели эффективности.....	22
2.2.2 Цель модели	22
2.2.3 Требования к модели	23
2.3 Концепция модели	23
2.3.1 Формализация концепции	23
2.3.2 Формализация модели	26
2.3.3 Спецификация модели.....	27
2.3.4 Схема зарядки	28
2.3.5 Момент оптимизации заряда.....	28
2.3.6 Оптимизация скорости зарядки	31
2.3.7 Двухнаправленная зарядка	32
2.3.8 Электрическая нагрузка.....	33
2.3.9 Нагрузка на домашнее хозяйство.....	34
2.3.10 Нагрузка теплового насоса	35
2.3.11 Фотоэлектрическая нагрузка (PV)	36

2.4 Эксперимент	38
2.4.1 Экспериментальная установка	38
2.4.2 Переменная настройка	39
2.4.3 Анализ чувствительности	39
3 Анализ результатов	41
3.1 Интеллектуальная зарядка	41
3.2 Зарядка транспортного средства от сети	52
3.3 Анализ чувствительности	59
Заключение	66
Список используемых источников.....	68

Введение

Каждый год электромобили медленно, но, верно, набирают популярность. Электромобильность – важный элемент экологической политики. Развитие высокоинновационных продуктов – значимая часть политики и экономики развитых стран. С момента появления двигателя внутреннего сгорания автопром переживает самую серьезную трансформацию. Многие топовые автопроизводители заявили о планах перехода на электродвигатели. Цены на электромобили падают, что приводит к увеличению их распространённости. Общий объем продаж вырос за 11 месяцев 2020 года на 198 % по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года [21]. На электромобили пришлось 10 % всех продаж новых автомобилей в Европе. По прогнозам продажи будут расти в среднем на 24 % в год до 2030 года. Об этом сообщает ТАСС со ссылкой на Bloomberg (рисунок 1).



Рисунок 1 – Динамика продаж классических и электромобилей 2015–2018 г.

В России пока что количество электромобилей крайне мало: зарегистрированных сегодня примерно 6,3 тысяч. Все планируемые стимулы для электромобилей изложены в проекте «Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года», подготовленном Минпромторгом России, там же описаны и сценарии развития электромобилей и электрозарядных станций в России. В данном документе представлены сценарии, предполагающие отставание России от всеобщих темпов роста доли электромобилей от 4 до 7 лет, при этом даже при пессимистичном сценарии объемы продаж предположительно будут 85 000–100 000 электромобилей в год (~5 % от рынка) к 2025 году. Также в России активно развивается сеть общественного транспорта на экологичном топливе: в феврале 2019 года мэр Москвы С.С. Собянин на своей пресс-конференции заявил, что в Москве с 2021 года будут закупать только электробусы. На данный момент столица является лидером в Европе по количеству электробусов на городских маршрутах – 281 электробус. В 2021 году это количество будет от 600 до 800 единиц в год. В России, как и во всем мире, неизбежен рост доли электромобилей. Увеличение продаж электромобилей приведёт к увеличению потребности в электрозарядных станциях (СР).

Сеть электрозарядных станций увеличит потребление электроэнергии наших городов. В Москве и в Московской области в настоящий момент генерируется порядка 18 ГВт в год, среднее потребление по году при этом составляет 12–13 ГВт. Из этого следует, что есть резерв мощности, который позволяет заряжать тысячи электромобилей. Но ситуация может в корне измениться через 5–10 лет. Если не учитывать данные прогнозы, то есть вероятность быть не готовыми к увеличенным нагрузкам. Среднесуточное потребление равно примерно 70 % от максимально возможной выработки энергии. В течение дня и ночи появляются пики потребления: максимум вечернего времени длится приблизительно с 19 до 22 часов, а утром пик

потребления приходится на период с 7 до 10 часов. В эти временные отрезки сети загружены примерно на 90 %. После пиков потребления возникают спады в ночное и дневное время. В периоды спада спрос на энергию сокращается до 35 % от установленной мощности. Если рассмотреть этот график энергопотребления с точки зрения энергосистемы, то можно увидеть, что его неравномерность требует больших затрат [1]. Если попытаться выровнять энергосистему, то есть возможность достичь снижения себестоимости электроэнергии и увеличения надежности сетей. В данной диссертации будет рассматриваться сеть электрозарядных станций как элементом Smart Grid (SG), которая позволит перераспределять нагрузку с пиковых часов на ночные и дневные провалы.

Электромобили могут разряжаться в общественную сеть в «пиковые» периоды и заряжаться во время «падения». Тем самым достигается цель сглаживания пиков и заполнения провалов. Когда электромобилям требуется энергоснабжение, они подключаются к общественной сети в качестве зарядных нагрузок; когда электромобили простаивают, т. е. энергия электромобильных батарей может подаваться в общественную сеть. Таким образом, электромобили имеют функцию мобильного аккумулятора. Если разработать разумные стратегии планирования, то получится улучшить кривую нагрузки общественной сети. У этого способа подключения транспортного средства к сети есть название VEHICLE-TO-GRID (V2G).

V2G – концепция двухстороннего использования электромобилей и гибридов, подразумевающая подключение машины в общую электрическую сеть для подзарядки автомобиля с возможностью выдачи электроэнергии обратно в сеть для участия в управлении спросом на электроэнергию (рисунок 2) [26].

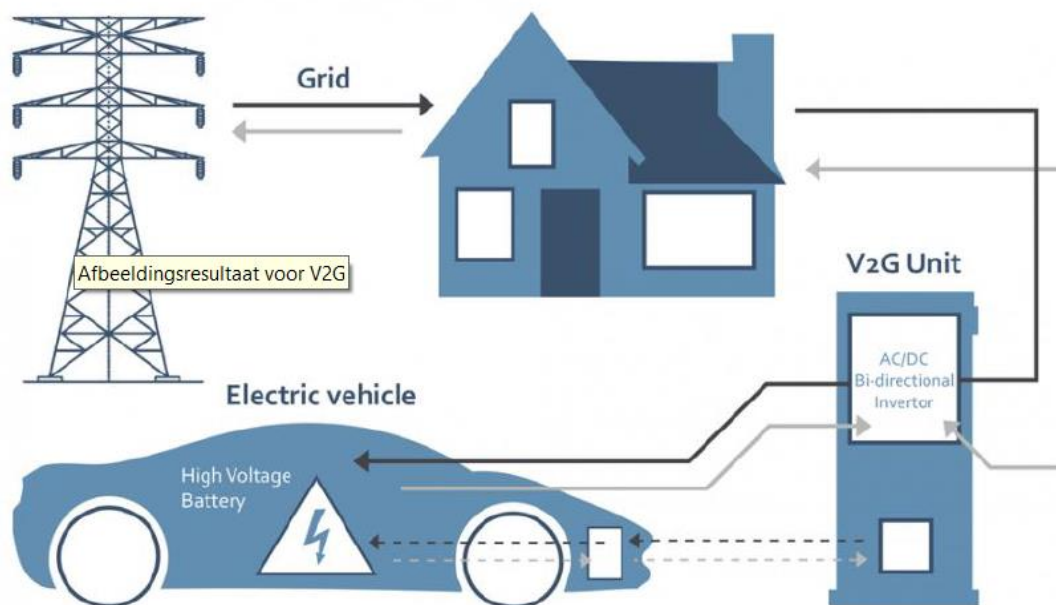


Рисунок 2 – Концепция V2G

Цель диссертации:

Улучшение кривой нагрузки района города с помощью концепции двухстороннего использования электромобилей (V2G).

Задачи:

- изучить концепцию V2G,
- смоделировать V2G в условиях теоретического района города,
- оценить влияния V2G на кривую нагрузки общественной сети города.

1. Электрические сети и стратегии зарядки электромобилей

1.1 Транспортная инфраструктура мегаполиса

Транспортная инфраструктура мегаполиса (ТИМ) – это объединение всех видов транспорта и структур транспортов, действия которых направлены на создание подходящих условий функционирования отраслей экономики. Другими словами, под ТИМ следует понимать совокупность организационных и материально-технических условий, служащих для быстрой и беспрепятственной перевозки в условиях мегаполиса [13].

ТИМ должна поддерживать текущие хозяйственные связи и иметь резерв для обеспечения мобильности экономики. Особенность ТИМ в том, что ее рост происходит медленнее, чем расширение хозяйственных связей.

ТИМ образуют линии, сооружения и устройства городского, пригородного, внешнего транспорта.

Виды транспортной инфраструктуры мегаполиса.

Улично-дорожная сеть города осуществляет сообщение между жилыми, производственными и туристскими градостроительными образованиями.

Магистральные улицы и дороги отвечают за соединение и распределение. Они осуществляют пропуск основных транспортных потоков, внешние связи и связи между районами города. В них входят линии движения пассажирского транспорта (трамвай, троллейбус, автобус и др.).

Главные улицы города выполняют репрезентативную функцию. Вдоль них размещаются театры, формируются городские площади и другие уникальные культурные, обслуживающие и торговые объекты.

Автомобильные улицы и дороги непрерывного движения обеспечивают скоростные сообщения между удаленными районами мегаполиса и прилегающим к ним территориям (аэропортам, базам отдыха,

пригородным поселениям и др.), а также обеспечивают транспортные выходы на магистральные автомобильные дороги.

Железные дороги используются в основном в системе связей «город-пригород».

Транспортно-коммуникационные (транспортно-пересадочные) узлы. Пересечение и примыкание путей одного или разных видов транспорта, служащие для распределения транспортных потоков по направлениям.

Транспортно-обслуживающие предприятия и объекты. К таковым относятся железнодорожные вокзалы и станции, автозаправочные станции, аэропорты, морские порты, станции технического обслуживания и т. д.

Автостоянки и места парковки автомобилей являются наиболее распространенным транспортно-обслуживающим объектом. Преимущества наземного размещения парковок – удобство для пользователей, низкие строительные затраты. Недостатки – потребность в больших площадях территории. В современной градостроительной практике в связи с ростом автомобилизации отдают предпочтение наземным и подземным многоуровневым паркингам.

Прочие сооружения (велодорожки, велотрассы и т. д.).

На сегодня можно однозначно определить, что приоритетным является расширение и развитие существующих крупных городов. По мере развития увеличится в основном парк личных автомобилей, что будет сказываться на экологической составляющей в мегаполисе. Вместе с этим мы можем увидеть, что на многих крупных заводах в качестве внутривозовского транспорта уже используют экологически чистый транспорт. Кроме того, сами заводы стараются строить так, чтобы в непосредственной близости были пути железнодорожного транспорта или их можно было бы подвести.

Всемирная автомобилизация привела к тому, что автомобильный транспорт стал одним из основных источников загрязнения среды современных мегаполисов. Территории вдоль дорог и улиц с интенсивным

движением имеют повышенные загрязненность воздуха, почв, уровень шума. Данные факторы вызывают потребность перехода к разработке и осуществлению мероприятий, снижающих негативное воздействие автотранспорта на экологию мегаполиса. К наиболее распространенным минимально загрязняющим городскую среду относятся трамваи, троллейбусы, метрополитен, монорельсовый, железнодорожный электротранспорт.

Альтернативой загрязняющему городскую среду автомобилю является электромобиль. Внедрению электротранспорта должно предшествовать создание энергетической инфраструктуры. Необходимо достаточное количество ЭЭС.

1.2 Концепция Smart Grid

Интеграция электромобилей основывается на модернизации существующих электроэнергетических систем в сторону интеллектуальных сетей – Smart Grid. Современные энергетические системы можно рассматривать почти полностью как механическую систему, в которой использование датчиков, устройств связи и электронного управления очень ограничено. SG предполагает использование датчиков, средств связи, вычислительных возможностей и управления таким образом, чтобы повысить общую функциональность энергосистемы. Это дает возможность выполнять несколько функций, которые позволяют оптимизировать использование генерирующих активов, систем хранения, распределенных энергетических ресурсов и конечных потребителей в целях обеспечения надежности, смягчения воздействия на окружающую среду и более эффективного использования доступной энергии. Таким образом, интеграция проектирования энергосистем и информационно-коммуникационных

технологий необходима для создания более интеллектуальной сети, и, в свою очередь, эта интеграция может обеспечить повышение надежности.

Переход к SG требует добавления новых функциональных возможностей и возможностей к существующей электросети. Распределенная генерация является общей характеристикой SG и кроме того, природа этих генераторов различна, поскольку они могут быть возобновляемыми, такими как ветряные турбины или фотоэлектрические панели, или иными, такими как комбинированная теплоэнергетика, топливные элементы, микротурбины или дизельные электростанции. Устройства, способные накапливать энергию, такие как электрические стационарные батареи, могут помочь системе сгладить неустойчивое поведение возобновляемых источников, что облегчает интеграцию. Следующее поколение электросетей также будет способствовать электрификации транспортных систем. SG включает в себя различные организации, которые могут взаимодействовать друг с другом в двух направлениях, позволяя устанавливать коммерческие отношения для обслуживания и запроса электроэнергии или для решения технических проблемы, которые могут возникнуть, тем самым расширяя возможности потребителя. Эти организации в рамках SG могут реагировать на изменения цен на энергоносители, что позволяет им минимизировать стоимость энергии, которую они должны покупать, или максимизировать доход от энергии, которую они могут продавать.

Среди других интересных характеристик SG - концепция управления спросом (DSM). DSM может быть использована, чтобы избежать нежелательных пиков на кривой спроса, которые происходят в течение некоторых периодов времени в течение дня, обеспечивая более выгодную перестройку. Благодаря использованию DSM предполагается несколько преимуществ, такие как повышение эффективности инвестиций в инфраструктуру системы, безопасность поставок или снижение требований к гибкости для генераторов. DSM также может быть применен к

электромобилям, по этой причине на них также может повлиять цена сигналов, при необходимости изменяя их местоположение или схему потребления. Таким образом, оптимальное распределение платы может быть полезным как для пользователей электромобилей (EV), так и для системных операторов.

В этом контексте микросети (MG) – это электрические сети, которые имеют некоторые общие свойства с SG. Микросети могут быть определены как интегрированные энергетические системы, включающие распределенные энергетические ресурсы и множество электрических нагрузок, работающих либо параллельно, либо «изолированно» от основной электросети. В наиболее распространенной конфигурации несколько MG соединяются с точкой общего соединения, а затем подключаются к более крупной сетке. Они рассматриваются как активные энергетические сети, поскольку предполагается, что они облегчают интеграцию распределенной генерации с двунаправленной транспортировкой электроэнергии и позволяют применять методы DSM.

1.3 Электромобили и электро-зарядные станции

Электромобиль состоит из тягового электродвигателя, тяговой аккумуляторной батареи (АКБ), двигателя с силовым генератором, специального бортового зарядного устройства, электронной системы управления и т. д. (рисунок 3) [12]. Рассмотрим некоторые из них более подробно и узнаем их основные характеристики.

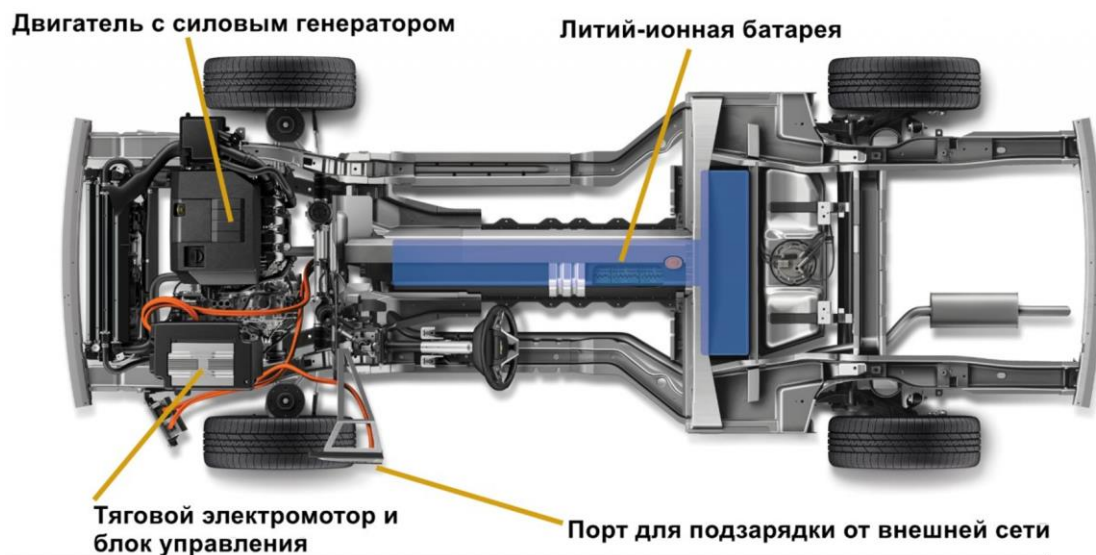


Рисунок 3 – Устройство электромобиля

Тяговый электродвигатель (рисунок 4) – устройство, занимающееся преобразованием электроэнергии в механическую энергию, с мощностью от 15 кВт (максимальная мощность может быть более 200 кВт) [8]. Он работает по принципу электромагнитной индукции. Электродвигатель включает в себя статор и ротор [3]. Статор является неподвижной частью двигателя, в котором возникает вращающееся магнитное поле. Магнитное поле действует на ротор и приводит его в движение. Различают электродвигатели, работающие от постоянного тока, переменного тока и решения универсального образца (функционируют как от постоянного, так и от переменного тока). Электродвигатели переменного тока можно разделить на две группы: синхронные (скорость вращения ротора и магнитного поля статора совпадают) и асинхронные (скорость вращения ротора ниже скорости вращения магнитного поля статора). Также их можно классифицировать по количеству используемых фаз: одно-, двух-, трехфазные [5].

Преимущества электродвигателя:

- высокий КПД – до 95 %, против 25 % у ДВС,
- малый вес и габариты,

- экологичность,
- простота использования,
- на любой отметке скорости создается максимальный крутящий момент,
- нет необходимости в коробке передач,
- долгий срок службы [15].

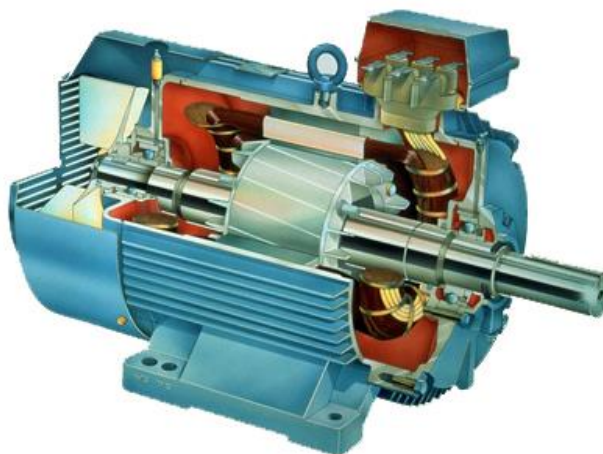


Рисунок 4 – Электродвигатель

В электромобилях чаще всего используются литий-ионные и литий-полимерные батареи (рисунок 3) [17]. Обусловлено это тем, что максимально отдаваемая емкость батареи в процессе эксплуатации при неполном разряде не снижается, и допустимый заряд увеличивается, что позволяет довести время ускоренного заряда до 10–20 минут. Тяговая батарея учитывает мощностные характеристики для совместимости с электродвигателем, а также высокую стоимость, показатели долговечности и габаритные размеры батареи [4].

Прежде чем рассматривать совершенствование инфраструктуры мегаполиса для расположения зарядных станций, узнаем, что собой представляют сами зарядные станции. Сразу стоит отметить, что технология зарядки электромобилей находится в самом начале своего развития. На данный момент существуют всего два типа зарядных станций для

электромобилей: проводной (как обычное подключение к розетке), беспроводной (электромобиль заезжает на специальную платформу, на которой заряжается без помощи проводов) [2]. Последний тип имеет некоторые нюансы, такие как довольно дорогостоящая система, при увеличении расстояния от источника происходят потери мощности, увеличивается время до полной зарядки, сложность конструкции.

Для того чтобы расположить беспроводную зарядку, необходимо учитывать несколько факторов: есть ли на самом автомобиле модуль для приема заряда, на открытом воздухе могут возникать помехи из-за излучения электромагнитных волн. Просторный гараж, в котором можно оборудовать площадку для беспроводной зарядки, является идеальным вариантом, но рентабельность под вопросом [6]. Это того стоит, если преимущества данного типа зарядок, такие как: нет износа проводов и коннекторов, вы не имеете дело с проводами – безопасность, вам не придется подбирать тип коннектора зарядки для вашего автомобиля; перевешивают стоимость установки такой зарядки [7].

Что касается проводных зарядных станций, их можно разделить на четыре типа.

Тип-1. Максимальное напряжение 220В в европейских странах, 110В в США. Подключается к обычной бытовой розетке и не требует наличия специального оборудования. Данный способ является устаревшим и самым слабым [10].

Тип-2. Также максимальное напряжение 220В в европейских странах, 110В в США. Также подключается к обычной бытовой розетке, но посредством специальных зарядных устройств. В данном типе зарядки используется схема переменного тока. Является стандартом для большинства зарядных станций [14].

Тип-3. Однофазная или трехфазная цепь переменного тока с максимальным напряжением 380В. Является самой мощной схемой для станций с переменным током.

Тип-4. Зарядные станции постоянного тока с максимальным напряжением до 500В. Нужно понимать, что не все модели электромобилей поддерживают технологию быстрой зарядки, но модели, поддерживающие эту технологию способны заряжаться до 80 % за 30 минут [9].

С точки зрения индивидуального средства передвижения по городу электромобиль не совсем идеален, но он может стать хорошей заменой традиционному автомобилю [16]. Если довести до хорошего состояния систему «Smart Grid», развить необходимую для удобного перемещения в черте города инфраструктуру для электромобилей, принять единый тип коннектора для зарядки электромобиля, то электромобиль может стать таким же массовым как авто с ДВС [11].

1.4 Концепция V2G

V2G позволяет автомобилям обеспечивать питание для балансировки нагрузки за счет «заполнения провалов» (зарядка в ночное время, когда спрос низкий) и «сглаживания пиковых нагрузок» (отправка энергии обратно в сеть, когда спрос высок, см. кривую утки). Выравнивание пиковой нагрузки может предоставить коммунальным предприятиям новые способы предоставления услуг по регулированию (сохранение стабильного напряжения и частоты) и резервного питания (удовлетворение внезапных потребностей в мощности). Эти услуги в сочетании с «умными счетчиками» позволят автомобилям V2G возвращать энергию в сеть и взамен получать денежные выгоды в зависимости от того, сколько энергии возвращается в сеть. Такое использование электромобилей могло буферизовать возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра, например,

путем накопления избыточной энергии, произведенной в ветреные периоды, и возврата ее в сеть в периоды высокой нагрузки, таким образом, эффективно стабилизируя непостоянство ветровой энергии. Некоторые рассматривают это применение технологии «автомобиль-сеть» как подход, который поможет возобновляемым источникам энергии стать базовой технологией электроснабжения.

Современные электромобили обычно могут накапливать в своих батареях больше, чем дневная потребность в энергии среднего дома. Даже без возможности газогенератора такое транспортное средство может использоваться в качестве аварийного источника питания в течение нескольких дней (например, для освещения, бытовой техники и т. д.). Это может быть примером передачи от автомобиля к дому (V2H). Виды взаимодействия автомобиля показаны на рисунке 5.

1.4.1 Автомобиль-дом (V2H)

Автомобиль (V2H) или транспортное средство-здание (V2B) относится к оптимизации зарядки (разрядки) на основе использования электроэнергии в небольшом количестве домов или зданий. Умная зарядка в этом контексте обозначается как (V1H или V1B). Можно выделить три разные цели для электромобилей и V2H/V2B. Во-первых, интеллектуальная зарядка и V2H позволяют лучше интегрировать децентрализованные возобновляемые источники энергии. Оптимизация, выполненная в этом исследовании, показывает увеличение собственного потребления возобновляемой энергии до 38 % вместе с сокращением пиков спроса с 27 до 67 %. Используя эту информацию, V2G и интеллектуальную зарядку можно использовать для снижения потребления электроэнергии из сети и снижения затрат на электроэнергию. Моделирование, выполненное Tuttle et al. (2013) показывает, что один электромобиль может обеспечить резервное питание в случае отключения от девятнадцати до шестисот часов [25]. В этом документе также показана способность электромобиля обеспечивать набор

услуг, упомянутых в этом разделе. Ни один из этих исследователей не уделяет особого внимания влиянию оптимизации V2H на распределительную сеть, кроме снижения пикового спроса домохозяйства.

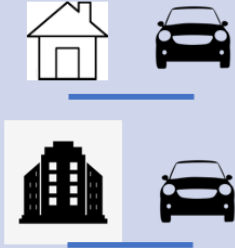
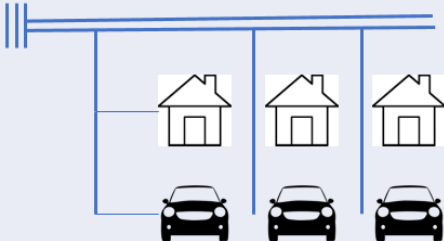
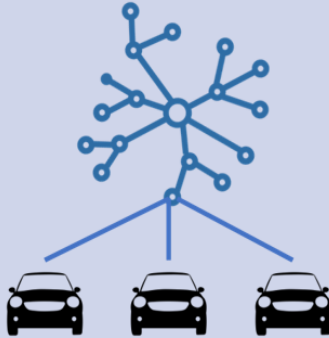
Категория		Схема
V2X	V2H / V2B	
	V2G, Локальная сеть	
	V2G, Национальная сеть	

Рисунок 5 – Виды взаимодействия автомобилей с электросетями

1.4.2 Автомобиль - распределительная сеть (V2G)

Оптимизация интеллектуальной зарядки для местной распределительной сети проводилась в ограниченном количестве различных исследований. В одном из этих исследований представлен алгоритм

интеллектуальной зарядки и V2G на основе нагрузки трансформаторов среднего/низкого напряжения [22]. В этой статье управление перегрузкой успешно выполняется на основе этой нагрузки трансформатора и показывает снижение пиковой нагрузки. Chukwu & Mahajan (2014) сосредотачиваются на потерях энергии в системе и предлагают систему, для которой потери энергии в распределительных фидерах [18]. Вывод этого документа состоит в том, что 95 % потерь энергии можно избежать, развернув V2G. Отсутствие исследований, касающихся интеллектуальной зарядки для управления перегрузками и влияния на электросеть, объясняется функциями и задачами операторов распределительных систем (DSO). Текущая деятельность DSO не включает активное управление нагрузками в распределительной сети (Haque et al., 2014; Verzijlbergh, 2013). Таким образом, преимущество V2G, смоделированное для этого случая, носит чисто концептуальный характер. Чтобы разблокировать эту ценность, созданную с помощью стратегий интеллектуальной зарядки, DSO должны иметь возможность активно управлять нагрузками в своей сети.

1.4.3 Автомобиль–электрическая сеть (V2X)

Было проведено множество исследований, чтобы оценить влияние электромобилей с использованием интеллектуальных схем управления зарядкой на основе параметров уровня национальной сети. Влияние этих схем зарядки на местную электросеть было изучено наиболее тщательно из трех уровней оптимизации V2X. В Lund & Kempton (2008) анализируется влияние электромобилей и зарядки V2G на национальном уровне. В этом документе делается вывод о том, что использование технологий V2G и интеллектуальной зарядки позволит создать более эффективную энергетическую систему. Система, которая позволяет лучше интегрировать энергию ветра, а также снизить выбросы CO₂. Verzijlbergh (2013) приходит к выводу, что ослабление корреляции между оптовыми ценами и спросом на электроэнергию, вызванное внедрением интеграции возобновляемых

источников энергии и последующей интеллектуальной платой за минимизирующие затраты электромобили, может вызвать проблемы в местной распределительной сети [27].

Вывод по разделу

Из этого раздела можно сделать вывод, что было проведено значительное количество исследований, чтобы изучить ценность V2G на различных рынках. Реальная ценность для владельца электромобиля, готового использовать V2G, будет связана с объединением вышеупомянутых услуг. Также можно сделать вывод, что максимальная ценность для DSO создается, когда оптимизация происходит на уровне локальной сети, а не на уровне V2H или на уровне национальной сети. Чтобы изучить ценность V2G для локальной распределительной сети, на этом уровне будет реализован подход, основанный на управлении перегрузками. В следующем разделе подробно рассматриваются различные стратегии V2G для управления перегрузками в распределительной сети.

2. Модель V2G в условиях города

2.1 Стратегия управления

Умную зарядку и V2G можно разделить не только с точки зрения цели оптимизации. В рамках стратегии контроля можно выделить два разных типа: стратегии прямого и косвенного контроля [19]. Механизмы косвенного контроля работают на основе стимулов. Эти стимулы в основном денежные и позволяют создать рынок, на котором владельцы электромобилей могут решить, стоит ли компенсация гибкости, предоставляемой сети. С другой стороны, механизмы прямого управления позволяют стороне, отвечающей за оптимизацию, напрямую контролировать процесс зарядки электромобиля. Преимущество этого заключается в том, что не нужно применять сложную структуру стимулов. Например, тарифы на время использования (TOU) могут создавать дополнительную пиковую нагрузку, как только будет действовать более дешевый тариф (Divshali & Choi, 2016). К таким же выводам приводит исследование Verzijlbergh (2014). Это исследование показывает, что фиксированные тарифы не решают проблемы перегрузок в распределительной сети [28].

Из-за этого можно утверждать, что схемы взимания платы с прямым управлением более эффективны в обеспечении управления перегрузками, чем схемы косвенного управления. Это в сочетании с уровнем оптимизации в локальной сети, вероятно, будет наиболее эффективным инструментом для смягчения проблем, связанных с перегрузкой в распределительной сети. В данной работе будут изучены стратегия интеллектуальной зарядки с прямым контролем и управление транспортными средствами в сети.

2.2 Моделирование

2.2.1 Ключевые показатели эффективности

Модель будет адаптирована, чтобы ответить на вопрос о влиянии интеллектуальной зарядки и зарядки V2G на низковольтную сеть в районе гипотетического города. Необходимо отслеживать несколько ключевых показателей эффективности (KPI), чтобы получить представление о поведении в районе и, как следствие, о влиянии зарядки электромобилей на сеть низкого напряжения (рисунок 6).

Ключевые Показатели Эффективности
Электрическая нагрузка за 15 минут на трансформаторе
Перегрузка за 15 минут на трансформаторе
Состояние зарядки EV
Суммарная зарядка кВт ч
Суммарная разрядка кВт ч

Рисунок 6 – Ключевые показатели эффективности

2.2.2 Цель модели

Цель состоит в том, чтобы лучше понять влияние стратегий интеллектуальной зарядки и зарядки V2G на общее потребление электроэнергии в гипотетическом районе гипотетического города (приближенного к реальности). Будем называть район Т.

Чтобы лучше понять влияние различных стратегий зарядки на электрическую нагрузку в районе, сначала следует смоделировать район. Во-

вторых, необходимо смоделировать потребление электроэнергии и, в-третьих, следует разработать потребности в зарядке и стратегии зарядки. Ожидается, что стратегии интеллектуальной зарядки вызовут более низкие пики электрической нагрузки в районе, а также ожидается, что схемы зарядки V2G приведут к снижению пиков, возникающих в периоды, когда спрос выше, чем пропускная способность текущей локальной сети [30]. Чтобы проверить эти гипотезы, важно варьировать входные параметры и задавать несколько условий, чтобы сделать вывод о надежности результатов. Следуя этой цели и гипотезам, можно вывести некоторые требования.

2.2.3 Требования к модели

Требования определяются как необходимые условия для достижения поставленной цели. Следуя цели моделирования, можно вывести следующие требования:

- модель должна предоставить информацию о KPI,
- модель района T должна быть приближена к реальности,
- модель разъяснит влияние различных стратегий зарядки на электрическую нагрузку в соответствующих компонентах распределительной сети,
- модель должна быть способна смоделировать различные сценарии, чтобы исследовать надежность результатов.

Понимание ключевых показателей эффективности, цели и требований к модели позволяет расширить модель и детали, содержащиеся в модели.

2.3 Концепция Модели

2.3.1 Формализация концепции

Этап формализации концепции начинается с представления различных агентов и их окружения. Агенты, представленные в модели, будут основой модели. Эта база будет расширена за счет добавления различных действий и

взаимодействий между этими же агентами. В таблице ниже (рисунок 7) показаны агенты, присутствующие в модели, которые имеют отношение к цели моделирования в рамках данного тезиса. Поскольку модель района Т является многоцелевой, не все агенты, присутствующие в модели, считаются важными для цели моделирования в этом тезисе. Следовательно, эти агенты и их действия будут выходить за рамки данного тезиса.

Агенты
Дом
Люди
Электромобиль (EV)
Электрозарядная станция (CP)
Трансформатор низкого напряжения (LV)
Агрегатор смарт-зарядки
Агрегатор V2G

Рисунок 7 – Обзор важных агентов

Первыми агентами, которые будут включены, являются дома, люди, электромобили, электрозарядные станции и трансформаторы низкого напряжения. Эти агенты физически присутствуют в окрестностях и, таким образом, являются ключевой характеристикой предоставленной территории.

Дома – это места, где люди проводят свой день, когда они не заняты чем-то вне дома. Кроме того, подключены не только люди и дома, дома также подключены к определенным активам распределительной сети с помощью электрических кабелей, трансформаторов низкого напряжения. Из-за подхода к тематическому исследованию важно смоделировать потребление электроэнергии на дом, максимально приближенное к

реальному миру. Таким образом, становится важным привязывать потребление электроэнергии к домохозяйству, а не к людям по соседству, поскольку это приводит к тому, что потребление электроэнергии в доме остается постоянным.

У людей по соседству будет одна общая характеристика – их действия во время моделирования. Как их структура потребления электроэнергии, так и их использование электромобилей будут зависеть от этой переменной.

Электромобили являются следующими агентами, присутствующими в модели, электромобили будут назначены людям, чтобы они могли добраться до желаемых пунктов назначения [29]. Транспортные средства, работающие на обычном топливе, выходят за рамки данного исследования, поскольку они не влияют на электрическую нагрузку в распределительной сети. Они также будут иметь минимальные помехи для электромобилей в течение периода моделирования.

Логически следующим агентом, который должен быть реализован, является зарядная станция. Чтобы отследить влияние зарядки электромобилей на распределительную сеть, важно исследовать точки зарядки в окрестностях. В рамках модели «района Т» СР всегда будут доступны для зарядки.

Сеть состоит из двух основных компонентов: кабелей и трансформаторов низкого напряжения. Из этих двух компонентов мощность трансформатора низкого напряжения является ограничивающим фактором. Поэтому можно предположить, что важно изучить мощность трансформаторов низкого напряжения, чтобы решить потенциальные проблемы с перегрузкой активов в этой части сети. Вместе с этим трансформаторы являются логичными местами, которые можно сделать «умными» и отслеживать потребления электроэнергии. Скорее всего, это будет выполняться не на уровне кабеля, а на уровне трансформатора. Поскольку информация о трансформаторе будет использоваться в качестве

входных данных для получения информации об электрической нагрузке, важно отслеживать изменения электрических нагрузок при различных стратегиях зарядки в этих местах, а не в самих кабелях.

Для выполнения различных стратегий взимания платы вводятся разные агрегаторы. Эти агрегаторы будут иметь информацию о текущих нагрузках трансформаторов и прогнозы относительно будущих нагрузок. Это будет использоваться в качестве входных данных для оптимизации минимального потребления электроэнергии в единицу времени для подключенного трансформатора СР. Два отдельных агрегатора созданы для разделения логики принятия решений между различными стратегиями взимания платы. Это также может быть выполнено в рамках одного и того же агрегатора, но для удобства моделирования выбрано разделение.

2.3.2 Формализация модели

Первым шагом в формализации модели является создание небольшого описания модели. После этого создается более подробная диаграмма унифицированного языка моделирования (UML).

Типовой нарратив модели таков.

Агент просыпается утром и начинает готовиться к выходу на работу. Когда агент будет готов приступить к работе, он возьмет либо электромобиль, либо транспортное средство с двигателем внутреннего сгорания. Агент едет на работу и начинает работать, тем временем установленная дома солнечная фотоэлектрическая установка будет вырабатывать электроэнергию. В конце рабочего дня агент заберет свой автомобиль и поедет обратно домой. Оказавшись дома, владелец электромобиля подключит свой электромобиль и решит, в какое время он возьмет машину завтра. Когда автомобиль подключен к точке зарядки, агрегатор планирует фактическую зарядку электромобиля на основе содержимого аккумулятора электромобиля и ожидаемой электрической нагрузки на трансформатор, к которому подключен СР. Владелец

электромобилиа начнет готовиться к обеду и будет использовать большее количество электроэнергии в своем доме. После этого агент снизит потребление электроэнергии и, возможно, покинет дом для вечерней поездки. Позже вечером агент ляжет спать и проснется на работу на следующее утро.

2.3.3 Спецификация модели

В этом разделе представлена спецификация модели основных поведений в рамках модели. Выбрана и разработана стратегия взимания платы для реализации в рамках модели «Района Т». Эта формализация необходима для реализации и, следовательно, для возможности ответить на второй дополнительный вопрос. Эта спецификация структурирована вокруг основных компонентов, присутствующих во множестве, касающихся воздействия электромобилей на сеть (рисунок 8).

Элементы
Доля EV
Схема вождения
Схема зарядки
Топология сетки и нагрузка

Рисунок 8 – Элементы модели воздействия зарядки электромобилей

Модель «Района Т» используется для определения количества электромобилей в регионе. За основу возьмем схему прямого управления для интеллектуальной зарядки и V2G для расчета воздействия электромобилей в различных сценариях. После этого будут уточнены предположения относительно ожидаемой электрической нагрузки на сеть.

2.3.4 Схема зарядки

Интеллектуальная зарядка включает в себя два процесса, которые позволяют оптимизировать зарядку электромобилей в зависимости от нагрузки в локальной сети: момент зарядки и скорость зарядки. Эти два принципа лежат в основе алгоритма, реализованного в рамках модели «Район Т». Во-первых, подробно рассматривается момент оптимизации заряда. Во-вторых, в алгоритм добавлена возможность изменять скорость зарядки. Кроме того, в качестве функции в алгоритм добавлена возможность двунаправленной зарядки.

2.3.5 Момент оптимизации заряда

Интеллектуальная зарядка, способная вовремя переключать электрическую нагрузку. Это смещение позволяет отложить зарядку аккумулятора электромобиля до более благоприятного момента. Момент переключения зарядной нагрузки зависит от целей и задач алгоритма интеллектуальной зарядки. Поскольку цель этой модели – избежать потенциальных пиков электрических нагрузок в пределах района, наиболее подходящее время для зарядки – это время с наименьшей электрической нагрузкой в активах, которые, как ожидается, быстрее всего достигнут максимальной мощности. После анализа, возможно, в сети низкого напряжения и особенно в трансформаторах и у потребителей возникнут потенциальные проблемы с нагрузкой. Таким образом, эти ресурсы будут использоваться при выполнении первой последовательности алгоритма.

Этот уровень оптимизации также поддерживается рисунками с 9 по 11. На рисунке 9 представлена электрическая нагрузка одного домохозяйства. Рассматривая один электромобиль с возможностью зарядки с зарядной мощностью 10 кВт и запросом на зарядку 30 кВт, но без интеллектуальной зарядки, создается рисунок 10. Тем самым создается пиковая нагрузка на уровне домохозяйств.

На рисунке 11 показан электромобиль, способный к интеллектуальной зарядке. Пики сместились на другой час в зависимости от самой низкой электрической нагрузки в течение доступных часов зарядки. Однако можно сделать вывод, что никакого снижения пиковой мощности не наблюдается из-за высокой электрической нагрузки зарядного устройства по сравнению со стандартной бытовой нагрузкой. Из сравнения этих цифр можно сделать вывод, что оптимизация на уровне одного домохозяйства, вероятно, не будет эффективной для снижения пиковой нагрузки в районе. Наиболее вероятно, что новая пиковая нагрузка будет создана за счет зарядки электромобилей, но она просто переносится на другое время. Также можно сделать вывод, что интеллектуального алгоритма зарядки с единственной целью переключения нагрузок будет недостаточно для снижения пиковых нагрузок при оптимизации на низком уровне системы.

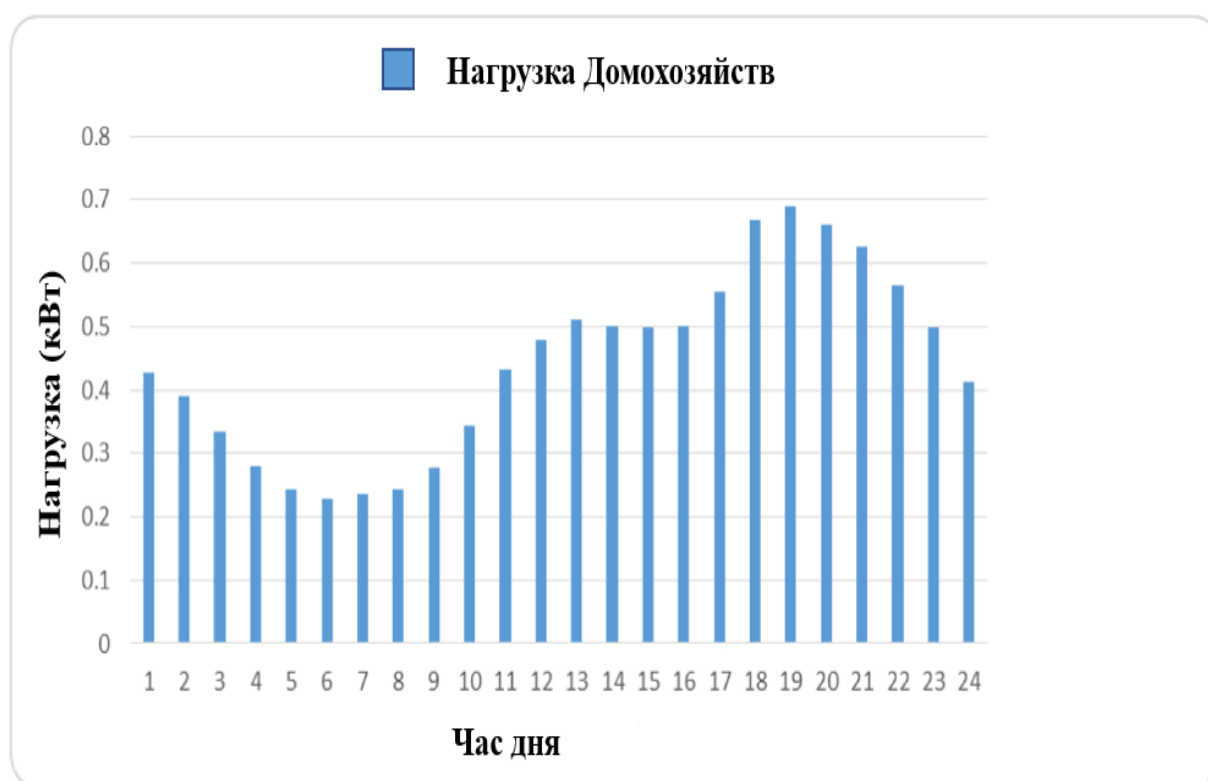


Рисунок 9 – Данные о средней нагрузке домохозяйства (стандартный профиль)

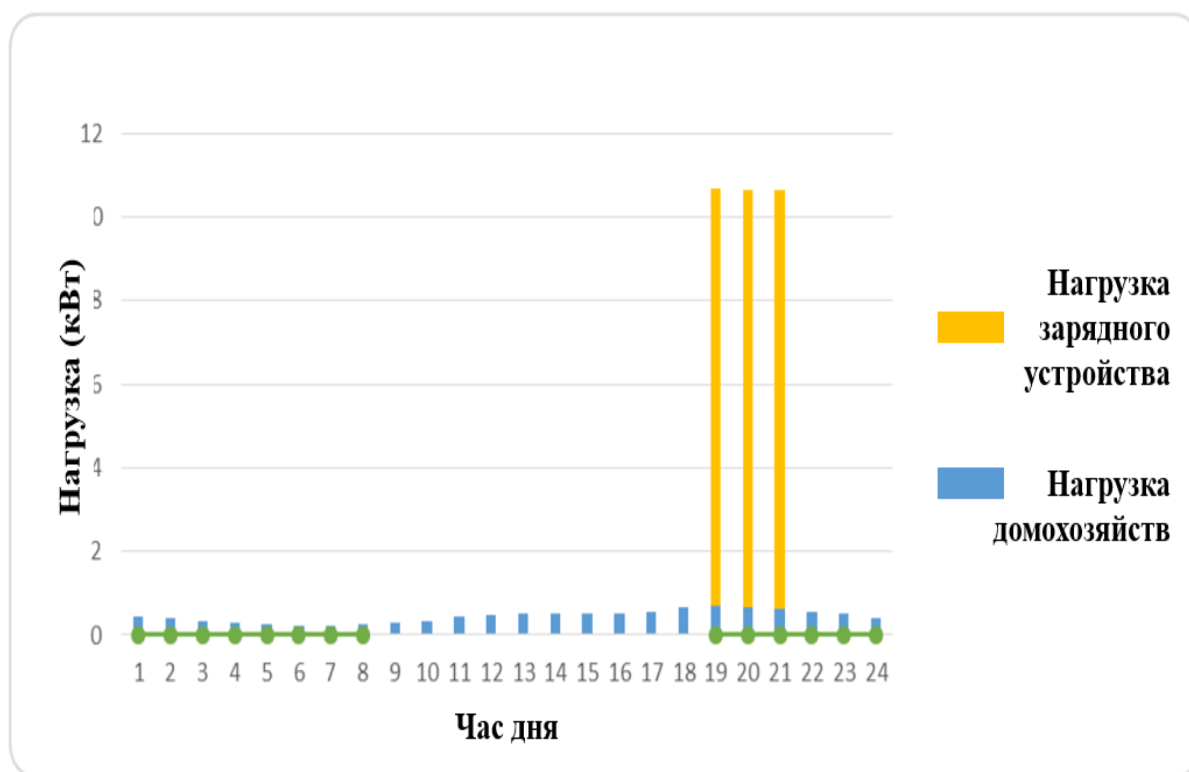


Рисунок 10 – Базовая нагрузка домохозяйства, включая зарядку электромобилей мощностью 10 кВт

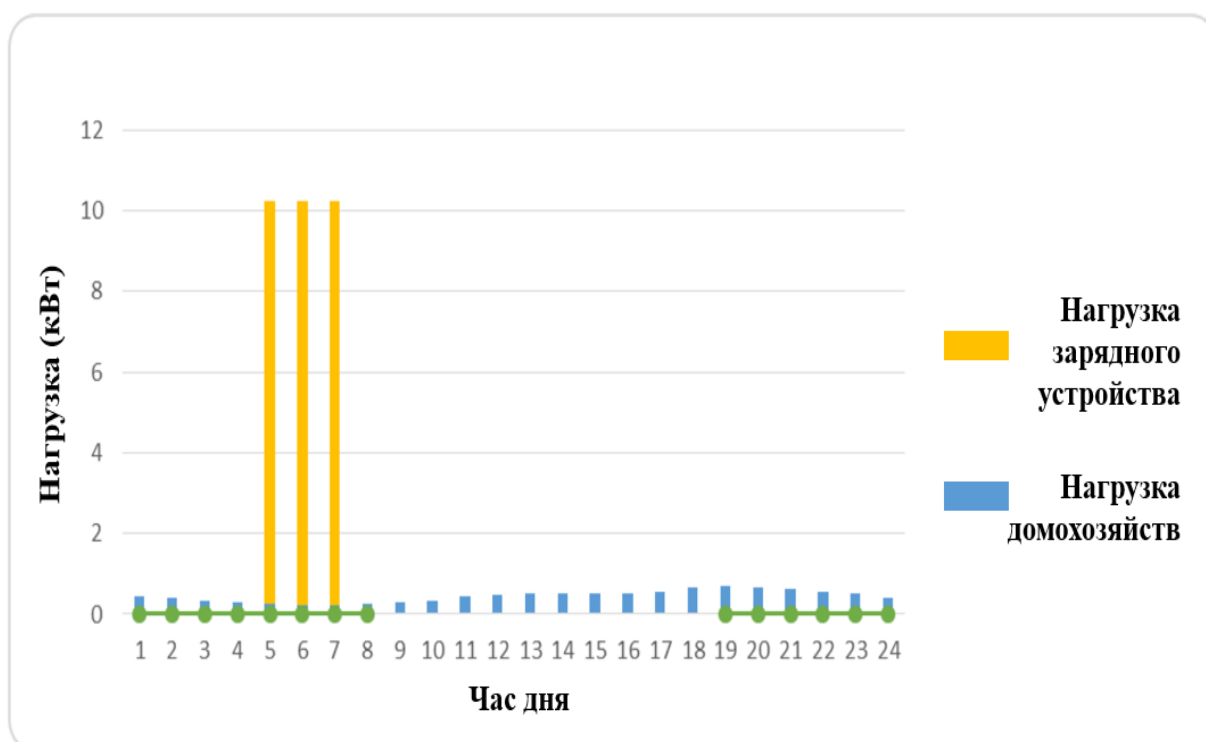


Рисунок 11 – Базовая нагрузка домохозяйства, включая интеллектуальную зарядку с переключением нагрузки на 10 кВт

Вывод из этого двоякий. Во-первых, уровень анализа должен быть не на уровне домохозяйства, а на различных активах в пределах района. Во-вторых, если цель состоит в том, чтобы уменьшить пиковую электрическую нагрузку, алгоритм интеллектуальной зарядки также должен быть способен сократить количество энергии, подаваемой в течение заданного времени.

2.3.6 Оптимизация скорости зарядки

После переноса нагрузки на более выгодный час алгоритм также должен стать более динамичным, чтобы обеспечить лучшую интеграцию электромобилей в электросеть. Эта гибкость достигается за счет способности зарядных устройств не только находиться в состоянии зарядки или не заряжаться, но и позволять зарядным устройствам различаться по скорости зарядки с течением времени. На рисунке 11 показан алгоритм интеллектуальной зарядки без оптимизации скорости зарядки, а на следующем рисунке 12 показано влияние различных выходных мощностей зарядного устройства на электрическую нагрузку.

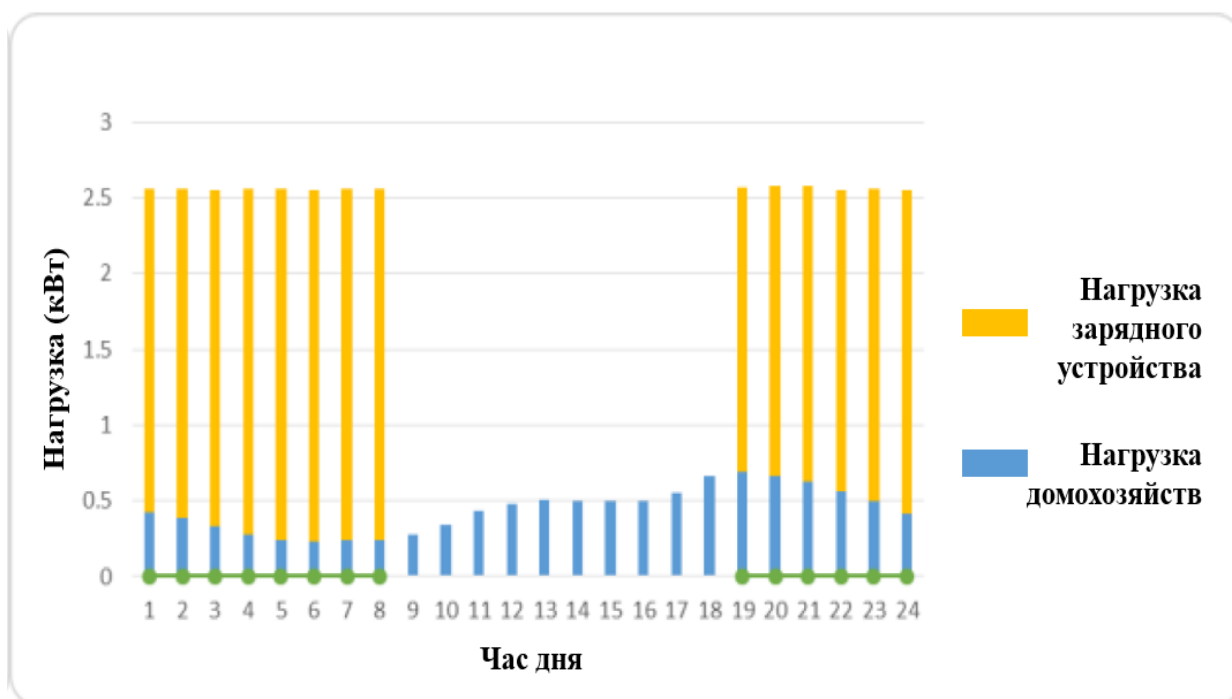


Рисунок 12 – Интеллектуальная зарядка EV

Выходная мощность на приведенном выше рисунке основана на процентах от максимальной выходной мощности зарядного устройства. Можно сделать вывод, что значительно меньшая нагрузка достигается за счет деления оптимизации зарядки на 1 % от выходной мощности зарядного устройства мощностью 10 кВт. Разделение на более мелкие шаги не показывает значительного улучшения и, следовательно, не будет использоваться для этого алгоритма. Из-за этого понимания важности сокращения потребления энергии для снижения пиковых нагрузок в небольших системах эта функция добавлена в алгоритм интеллектуальной зарядки.

2.3.7 Двухнаправленная зарядка

Двухнаправленный компонент алгоритма основан на двух предыдущих компонентах smart charging, но добавлена возможность сбрасывать энергию из автомобиля в сеть. Основное предположение для этого алгоритма заключается в том, что двухнаправленная зарядка не должна оказывать никакого влияния на способность владельца использовать электромобиль и, таким образом, будет иметь то же предположение, что и интеллектуальная зарядка и обычная зарядка. В конце сеанса зарядки электромобиль должен быть полностью заряжен. Если это ограничение не позволяет разряжать энергию из аккумулятора электромобиля, электромобиль не будет участвовать в зарядке V2G и будет выполнять только алгоритм интеллектуальной зарядки.

V2G может быть реализован различными способами и применим к различным рынкам. У всех этих рынков есть свои собственные цели и способы заработать деньги. Кроме того, разрядка электромобилей может использоваться для различных целей, а триггер для разрядки может быть изменен между двумя типами пикового бритья. Первой целью может быть уменьшение всех пиков, возникающих в системе, и смещение нагрузки этого пика на более благоприятный момент. Вторая цель может заключаться в том,

чтобы инициировать разрядку внутри электромобилей только тогда, когда система прогнозирует потенциальную перегрузку внутри системы. Первый случай был бы предпочтительным на общем рынке электроэнергии, на котором можно было бы получать прибыль во время высоких цен на электроэнергию за счет разрядки, и эта энергия могла бы впоследствии взиматься в то время, когда цена на электроэнергию ниже. С другой стороны, рынок FCR и рынок DSO сосредоточены на конкретных моментах, когда спрос и предложение энергии недостаточно сбалансированы. Следовательно, алгоритм двунаправленной зарядки на рынке DSO будет срабатывать только тогда, когда ожидается перегрузка определенного актива в системе. Преимущество этого типа зарядки V2G заключается в том, что опасения по поводу разряда батареи уменьшаются, поскольку количество раз, когда V2G потребуется в течение года, меньше (Bishop et al., 2013).

2.3.8 Электрическая нагрузка

Типичные нагрузки в домашнем хозяйстве находятся на грани изменения из-за электрификации различных устройств в домашнем хозяйстве.

Существует три основных фактора, которые необходимо будет учесть в сценарии 2030 года:

- рост спроса на обычное потребление электроэнергии,
- использование новых технологий для отопления (например, тепловой насос и электромобили),
- выработка электроэнергии с помощью фотоэлектрических панелей.

В следующих разделах они будут рассмотрены подробнее. Также мы проанализируем ежедневное потребление и выработку электроэнергии в течение зимней недели с целью разработки нового профиля ежедневной нагрузки для домашних хозяйств на 2030 год. На рисунке 13 показана структура будущего потребления электроэнергии и построена генерация.



Рисунок 13 – Блок-схема спроса на электроэнергию

2.3.9 Нагрузка на домашнее хозяйство

Электрическая нагрузка в пределах района состоит из потребления электроэнергии базовой нагрузки без учета потребностей в дополнительных электроприборах. В другом исследовании нагрузка на домохозяйство представлена стандартизированным профилем нагрузки на домохозяйство. В рамках многочисленных исследований, касающихся ожидаемого потребления электроэнергии в районе, используется фактор для учета увеличения потребления электроэнергии с годами. Этот фактор роста часто составляет 1 % (Klein Entink, 2017) и (Kleiwegt, 2011). Однако в рамках выбранного подхода можно смоделировать неоднородность потребления электроэнергии по соседству. Таким образом, все агенты будут иметь свое собственное потребление электроэнергии в течение дня. Реализованная модель отныне называется моделью потребления электроэнергии (рисунок 14). Кроме того, вечернее потребление электроэнергии связано со временем

прибытия домой владельца электромобиля. Количество киловатт, потребляемое в разные периоды, таково: сон – 0,2, утро – 1,25, день – 0,4, вечер – 2,2, ночь – 0,3. Эти значения выбраны для того, чтобы отразить типичную структуру потребления в жилых помещениях.

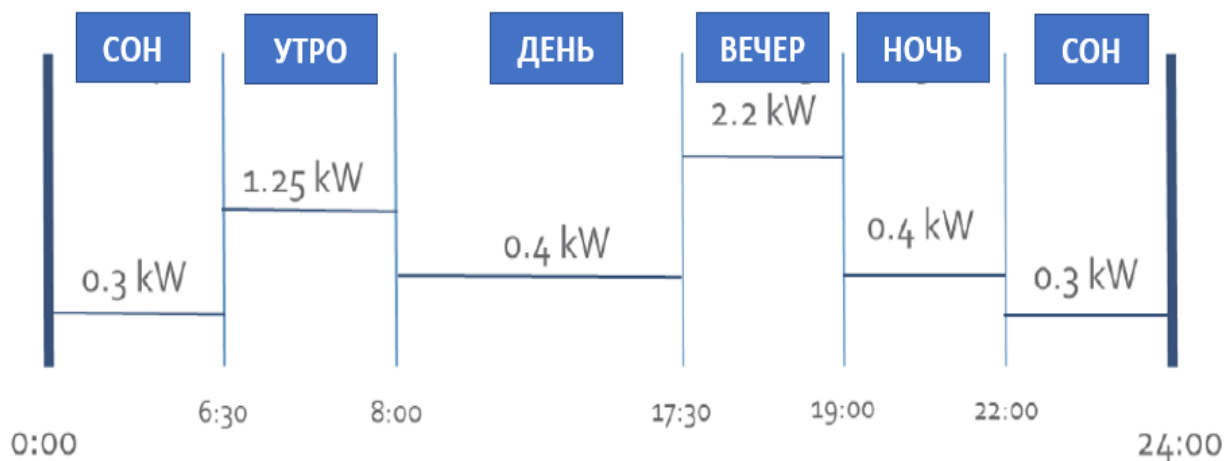


Рисунок 14 – Представление структуры потребления электроэнергии на домохозяйство

2.3.10 Нагрузка теплового насоса

Для здания будущего должны использоваться другие источники для удовлетворения потребностей в отоплении в этом районе. Одним из решений является использование тепловых насосов. Тепловые насосы могут быть гибридными или полностью электрическими, но в этой модели используется только полностью электрическая версия. Тепловые насосы будут иметь дополнительную потребность в электроэнергии в дополнение к текущей модели нагрузки на домохозяйства. Типичные нагрузки для тепловых насосов в зимний период представлены на рисунке 15. Эти цифры отражают нагрузку тепловых насосов за зимнюю неделю в Великобритании, но также будут использоваться в качестве исходных данных для нашего района. Тепловые насосы также являются источником гибкости и могут обеспечить удовлетворение спроса на том же рынке, что и V2G. Однако в этой модели

электрическая нагрузка тепловых насосов используется во входных данных, а не в качестве переменной. На рисунке 15 показаны входные данные для потребления электроэнергии тепловым насосом в зимнюю неделю. Эти данные получены из работы Love et al. (2017). Исследование, проведенное Love et al. (2017), является самым обширным исследованием агрегированных данных о нагрузке тепловых насосов на сегодняшний день [24]. Дополнительным преимуществом является то, что в этой статье были исследованы эмпирические данные об электрической нагрузке теплового насоса, а не расчет потребности на основе потребности в отоплении.

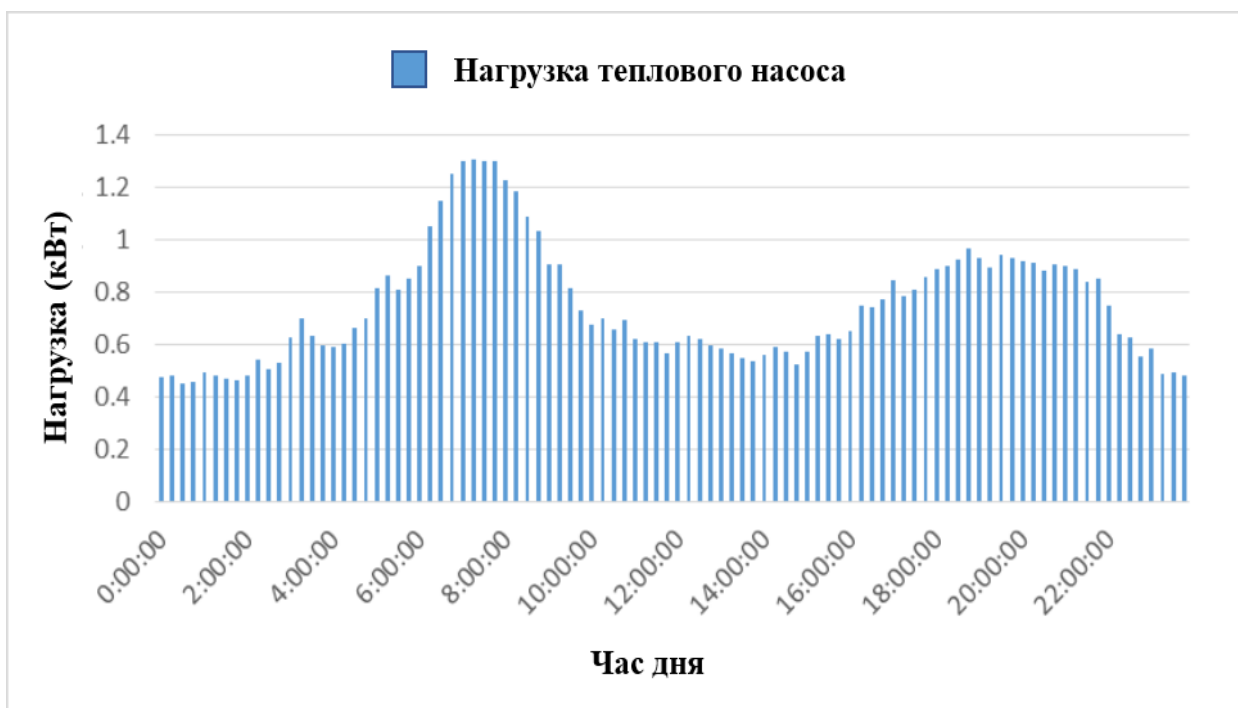


Рисунок 15 – Профиль суточной нагрузки теплового насоса на зимнюю неделю (Love et al., 2017)

2.3.11 Фотоэлектрическая нагрузка (PV)

Последним технологическим достижением, которое окажет значительное влияние на распределительную сеть, являются фотоэлектрические солнечные панели. Воздействие солнечных фотоэлектрических систем, безусловно, будет ощущаться в летнее время,

когда вырабатываемая электроэнергия больше. Распространение солнечной фотоэлектрической технологии окажет наибольшее влияние на электросеть [20]. Из-за сроков выработки электроэнергии, в основном в летние дни, собственное потребление солнечной фотоэлектрической энергии довольно низкое. Стандартное отклонение спроса на электроэнергию увеличится в три раза при высоком проникновении солнечных фотоэлектрических систем по соседству. Таким образом, эта электроэнергия должна будет транспортироваться DSO, что создает новые проблемы для DSO. Из-за влияния децентрализованной генерации на распределительную сеть представляет интерес для этого исследования включить поведение солнечной фотоэлектрической генерации. На рисунке 16 представлен профиль генерации в зимний день для бытовой солнечной фотоэлектрической системы. Нагрузка солнечной фотоэлектрической установки представлена отрицательной нагрузкой, поскольку эта нагрузка подается в сеть.

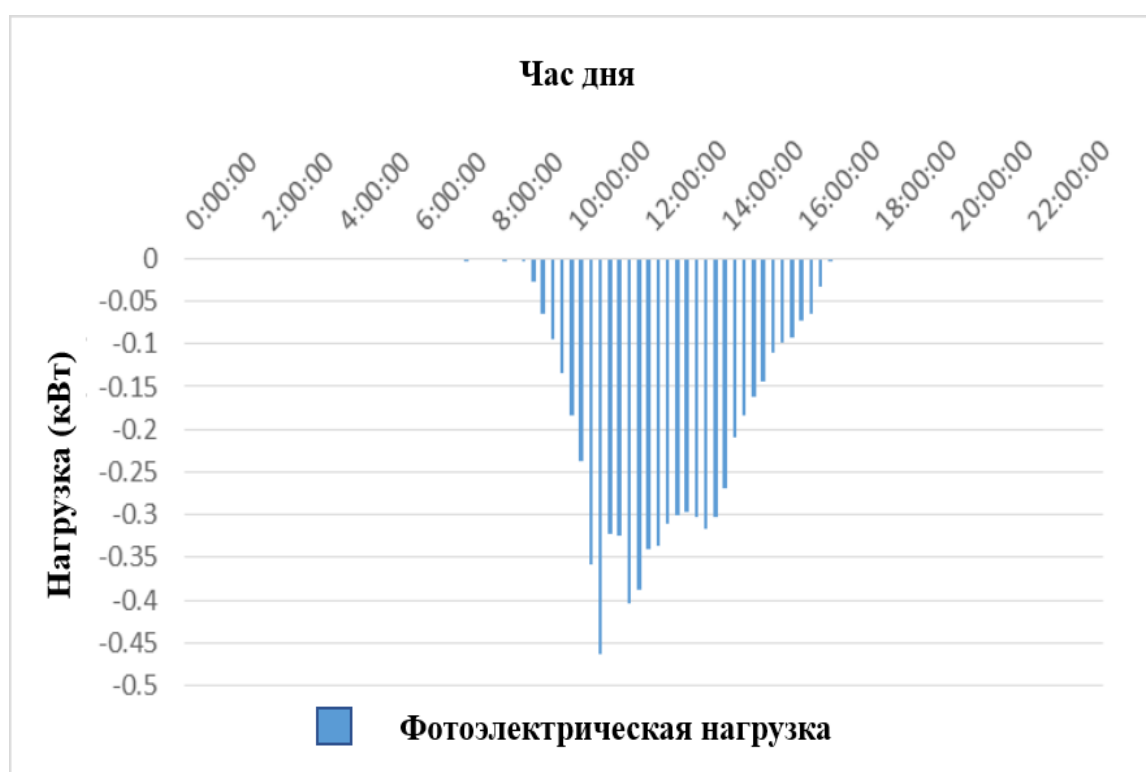


Рисунок 16 – Электрическая нагрузка солнечной фотоэлектрической системы

2.4 Эксперименты

2.4.1 Экспериментальная установка

Чтобы проанализировать влияние зарядки V2G на электросеть, определены два эксперимента: эксперимент 1 – интеллектуальная зарядка (SC) и эксперимент 2 – зарядка сети от транспортного средства (V2G). Один из экспериментов состоит из базового варианта, исключая зарядку от транспортного средства к сети, а другой эксперимент включает в себя способность электромобилей заряжаться двунаправленно. В эксперименте буду настройки, показанные в таблице 1.

Таблица 1 – Доли стратегий взимания платы в общей численности электромобилей

Параметр	SC	V2G
Доля EV	30 %	30 %
Доля смарт-зарядок	100 %	100 %
Возможность V2G	0 %	100 %

Чтобы сравнить оба эксперимента друг с другом, важно использовать одни и те же показатели в обоих случаях. Эти показатели являются ключевыми показателями эффективности. Пять ключевых показателей эффективности обеспечат всесторонний обзор влияния зарядки V2G на электросеть. Чтобы понять определенные поведенческие модели, можно было бы собрать дополнительную информацию с помощью других показателей, если это будет сочтено необходимым. Для того, чтобы справиться с различиями в значениях по разным прогонам, будут

представлены средние значения по прогонам. Будет использован доверительный интервал в 25 %, который будет называться «низкий» и доверительный интервал в 75 %, который будет называться «высокий».

2.4.2 Переменная настройка

В модель «Район Т» включено множество различных переменных, включая как прямые, так и промежуточные переменные. Однако не все переменные имеют значение для ответа на вопрос в этом исследовании. Основные переменные, которые будут влиять на результаты экспериментов, определены в таблице ниже (таблица 2).

Таблица 2 – Входные переменные и значения

Переменная	Ценность
Домохозяйства (#)	1342
Владение автомобилем (автомобиль/домохозяйство)	1
Доля электромобилей (%)	33
Доля тепловых насосов (%)	33
Доля солнечных фотоэлектрических батарей (%)	33
Мощность батареи (кВт*ч)	30, 40, 50, 60, 70
Время работы (ч)	8

2.4.3 Анализ чувствительности

Представленная модель может быть чувствительна к изменениям входных переменных, как описано в предыдущем разделе. Чтобы проверить

надежность результатов и, следовательно, ценность представленной модели, выполняется анализ чувствительности. В этом анализе чувствительности различные входные параметры модифицируются для проверки надежности результатов при различных наборах параметров. Список переменных, которые будут учитываться при анализе чувствительности, представлен на рисунке 17.

Анализ чувствительности
Доля EV
Емкость точки зарядки
Модель потребления электроэнергии

Рисунок 17 – Переменные для анализа чувствительности

Вывод по разделу

В данном разделе была разработана модель района города 2030г. – «район Т». На основании этой модели будут произведены два сравнительных эксперимента, которые покажут эффективность V2G для улучшения кривой нагрузки района. Результаты и их анализ представлены в следующем разделе.

3. Анализ результатов

В этом разделе будут представлены два сценария. Во-первых, эксперимент с умной зарядкой. Этот эксперимент также известен как альтернативный ноль и является эталоном для второго сценария. Вторым экспериментом состоит из зарядки транспортного средства от сети. После этого обсуждается нагрузка трансформаторов MV/LV (среднего напряжения / низкого напряжения) в обоих сценариях. Далее выполняется анализ чувствительности, чтобы оценить надежность представленных результатов.

На рисунке 18 показано среднее количество подключенных технологий. Эти технологии включают электромобили, тепловые насосы и солнечные фотоэлектрические установки. Также синими полосами показано количество домов, подключенных к трансформатору. На графике показано равномерное распределение технологий по трансформаторам. Стандартное отклонение количества подключенных технологий довольно низкое.

Ожидается, что разница в потреблении электроэнергии домохозяйствами между различными повторениями моделирования будет довольно низкой. Стандартное отклонение для количества подключенных домов во всех случаях равно нулю, поскольку расположение домов и трансформаторов фиксировано, и, таким образом, одно и то же соединение появляется во всех повторениях.

3.1 Интеллектуальная зарядка

Поскольку реализованная модель состоит из множества переменных со случайно распределенным значением, выполняется ряд повторений эксперимента. Для устранения эффектов рандомизации выполняется ряд повторов. Количество повторений сценария интеллектуальной зарядки установлено равным 12.

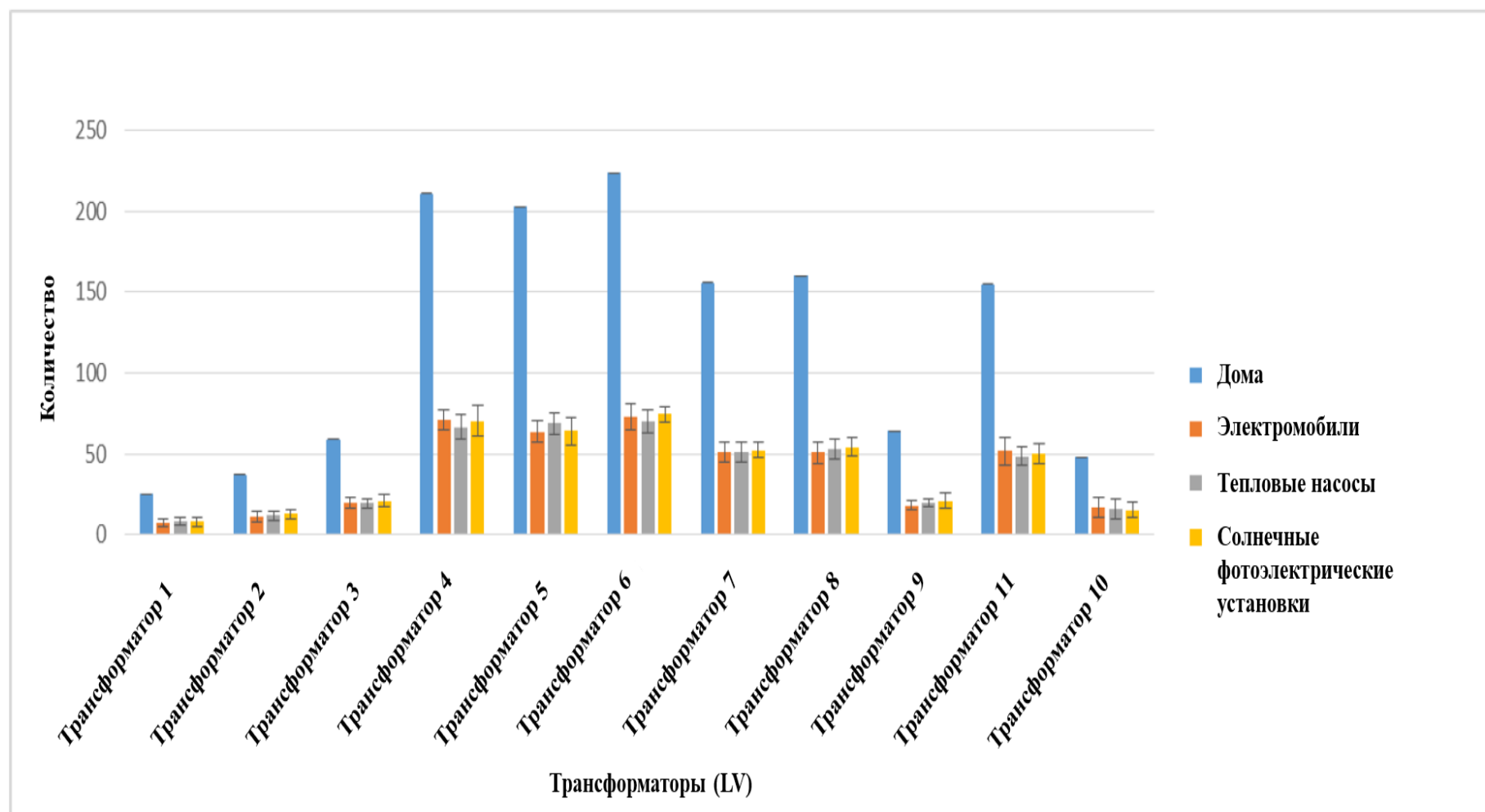


Рисунок 18 – Среднее количество подключенных технологий на один трансформатор

Вариабельность ключевых показателей эффективности относительно невелика при таком количестве повторений. Медианные значения ключевых показателей эффективности будут представлены вместе с интервалом 25 % и 75 %. Конечные значения через эти интервалы и медианное значение ключевых показателей эффективности будут использоваться в качестве входных данных для трех сценариев потребления электроэнергии, называемых: Низкий, Средний, Высокий. Эти сценарии будут кратко описаны в конце этого раздела.

Обзор перегруженных трансформаторов по соседству показан в таблице 3. В этой таблице показаны трансформаторы, представляющие интерес для «района Т». В таблице также представлена мощность трансформаторов, рассчитанная на основе количества домов, подключенных к трансформатору. На нем показаны три трансформатора мощностью 100 кВА, один мощностью 250 кВА и пять трансформаторов мощностью 400 кВА. Максимальная нагрузка наблюдалась во время различных симуляций первого эксперимента. Если максимальная потребность трансформатора в электроэнергии превышает его мощность, трансформатор будет перегружен. Последним параметром, показанным в таблице, является коэффициент загрузки. Коэффициент нагрузки рассчитывается путем деления максимальной нагрузки на среднюю нагрузку на трансформатор во время моделирования. Коэффициент нагрузки, близкий к 100 %, показывает, что существует очень небольшой пик спроса на электроэнергию, и пик близок к среднему значению. Коэффициент нагрузки, близкий к 0 %, показывает, что пик является высоким по сравнению со средним потреблением. Более низкий коэффициент нагрузки обеспечивает большую ценность, создаваемую гибкими решениями. Гибкие решения в основном рассматриваются в случае низкого коэффициента нагрузки из-за ожидаемого короткого времени перегрузки электроприбора. Средний коэффициент нагрузки трансформаторов в жилых кварталах обычно составляет около 50 %.

Коэффициент нагрузки перегруженных трансформаторов показывает потенциал поддержки этих трансформаторов за счет гибких ресурсов.

В таблице 3 показаны все трансформаторы, представляющие интерес в окрестностях. В этой таблице показаны шесть перегруженных трансформаторов. Однако в пределах интервала 25 % один из этих трансформаторов (трансформатор 11) не перегружен. Никакие дополнительные трансформаторы не перегружаются в интервале 75 %. Из-за небольшой разницы между сценариями и изменением состояния перегрузки трансформатор 11 представляет особый интерес для дальнейшего изучения результатов. В таблице также представлен коэффициент нагрузки трансформаторов. Этот коэффициент нагрузки постоянен в течение различных интервалов времени. Между конечными значениями интервалов можно отметить лишь небольшую разницу.

Следуя таблице, можно также отметить, что более высокая максимальная нагрузка не обязательно снижает коэффициент нагрузки (например, трансформатор 1). Из-за увеличения пиковой нагрузки можно было бы ожидать более низкого коэффициента нагрузки. Однако сценарий с высоким уровнем состоит из более высокого спроса в течение всего периода моделирования, и, следовательно, средний уровень потребления электроэнергии выше, что приводит к более высокому коэффициенту нагрузки. Коэффициенты нагрузки аналогичны коэффициентам нагрузки, представленным в Нумаун et al. (2015) [23]. Входные данные для таблицы 3 предоставляются через профили нагрузки всех трансформаторов, включенных в эксперимент с интеллектуальной зарядкой. Пример профиля нагрузки трансформатора представлен на рисунке 19.

Таблица 3 – Нагрузка трансформатора в эксперименте с интеллектуальной зарядкой

Трансформаторы	Мощность (кВА)	Низкий			Средний			Высокий		
		Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)	Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)	Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)
1	100	65	Нет	46	69	нет	49	74	Нет	50
2	100	128	Да	46	137	Да	47	151	Да	47
3	250	269	Да	43	276	Да	46	317	Да	44
4	400	526	Да	51	550	Да	52	585	Да	52
5	400	444	Да	51	457	Да	53	487	Да	53
6	400	413	Да	53	430	Да	54	456	Да	54
7	400	324	Нет	51	341	Нет	54	395	Нет	51
8	400	296	Нет	54	322	Нет	53	341	Нет	54
9	250	144	Нет	52	154	Нет	52	167	Нет	52
10	400	332	Нет	53	357	Нет	53	383	Нет	53
11	100	98	Нет	48	104	Да	50	110	Да	52

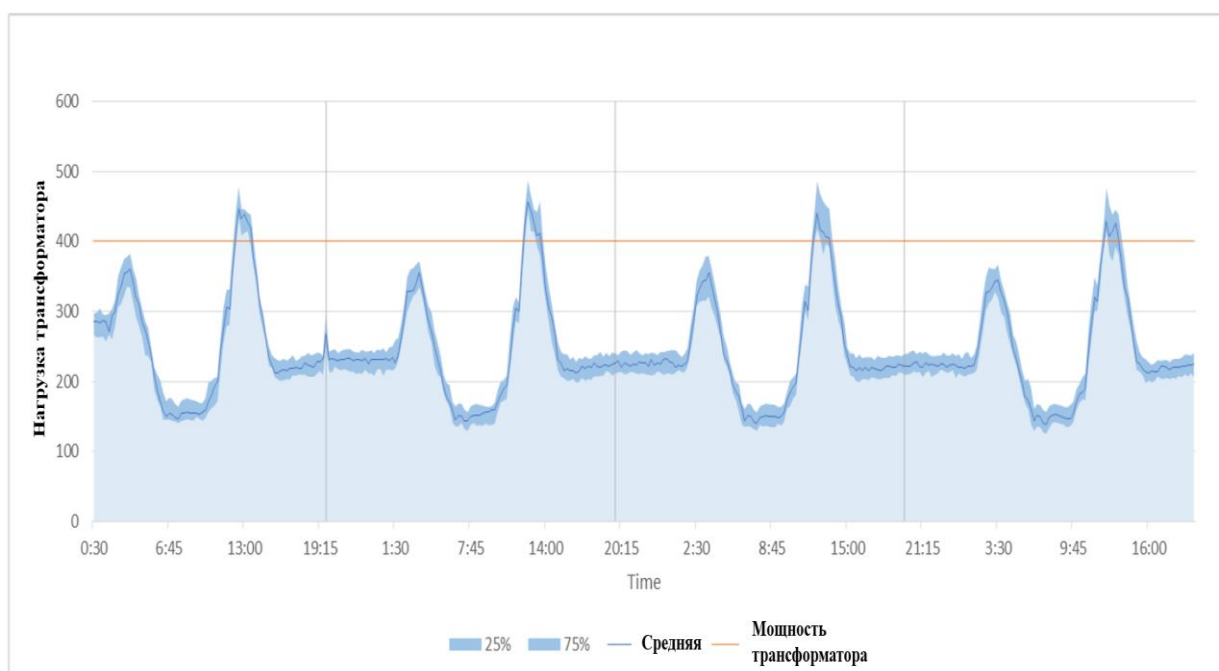


Рисунок 19 – Профиль нагрузки трансформатора 5 в эксперименте с интеллектуальной зарядкой в течение четырех дней

На рисунке 19 представлен профиль нагрузки трансформатора 5 в эксперименте с интеллектуальной зарядкой. Ось Y представляет нагрузку трансформатора в кВА, а ось X представляет время в течение моделируемой рабочей недели. Вертикальные серые полосы представляют разделение дней в рамках моделирования. Оранжевая линия 400 кВА представляет мощность трансформатора. Кроме того, синяя линия представляет средние значения двенадцати повторений эксперимента с умной зарядкой. Темно-синяя область поверхности представляет диапазон интервалов 25 % и 75 %. Между источниками нагрузки трансформатора не проводится никакого различия. Можно выделить десять пиков спроса на электроэнергию, равномерно распределенных в течение четырех рабочих дней. Во-первых, утренний пик можно определить около 07:00. Этот пик вызван увеличением потребления на домохозяйство в утренние часы, следуя модели потребления электроэнергии, а также пиком спроса на электроэнергию от тепловых насосов. Вечерний пик создается за счет прихода жильцов с работы. Можно

отметить, что вечерний пик выше, чем утренний пик, и вечерний пик вызывает перегрузку в течение всех моделируемых рабочих дней. Как следует из рисунка, спрос на электроэнергию в ночное время значительно выше, чем днем (без учета пиков). Этот дополнительный спрос в ночное время вызван интеллектуальной зарядкой электромобилей в ночное время. Потребность в зарядке электромобилей задерживается и оптимизируется для низкого потребления электроэнергии трансформатором (рисунок 20).

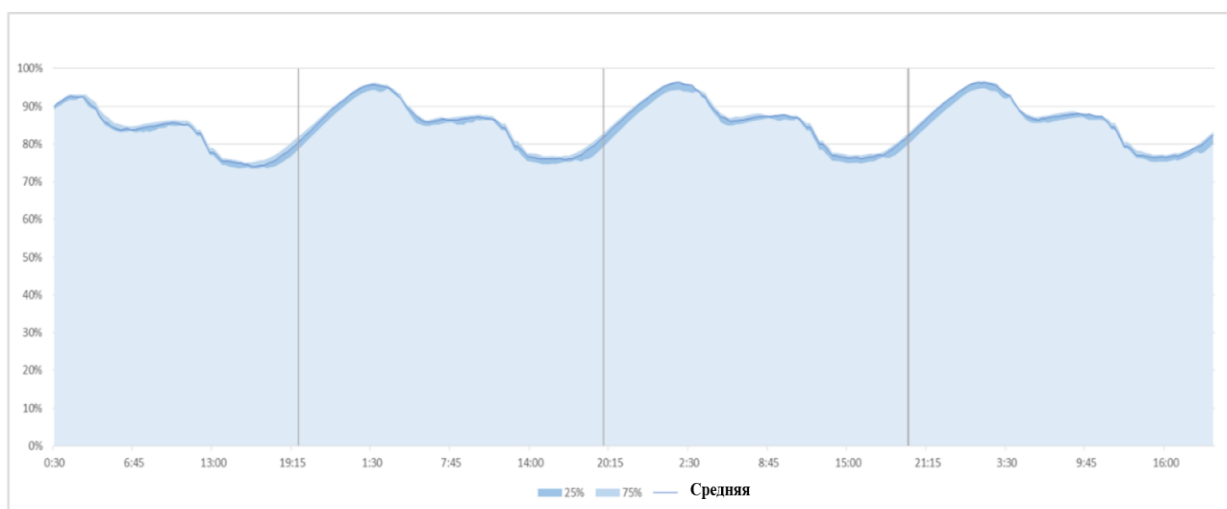


Рисунок 20– Среднее состояние заряда по соседству в эксперименте с умной зарядкой за четыре дня

На рисунке 20 представлено среднее состояние заряда всех электромобилей в окрестностях. Ось Y представляет состояние заряда, основанное на количестве киловатт-часов, имеющихся в батарее, и емкости батареи электромобиля. Ось X показывает время во время моделирования. Синяя линия представляет среднее значение всех повторений и представляет собой среднее значение состояния заряда (SOC). Темно-синяя область поверхности представляет интервал между 25 % и 75 %. Четыре рабочих дня могут быть определены отдельно, и аналогичная картина может быть выявлена в течение этих дней. Можно отметить, что пики SOC происходят вскоре после пиков на рисунке 19. Это можно объяснить кумулятивным

характером кВтч, присутствующего в аккумуляторе EV в течение периода зарядки. Чтобы выяснить, вызваны ли высокие нагрузки на трансформатор в ночное время потребностью в зарядке электромобилей, и для дальнейшего изучения влияния интеллектуальной зарядки на нагрузку трансформатора, на рисунке 21 изображена потребность в зарядке электромобилей.

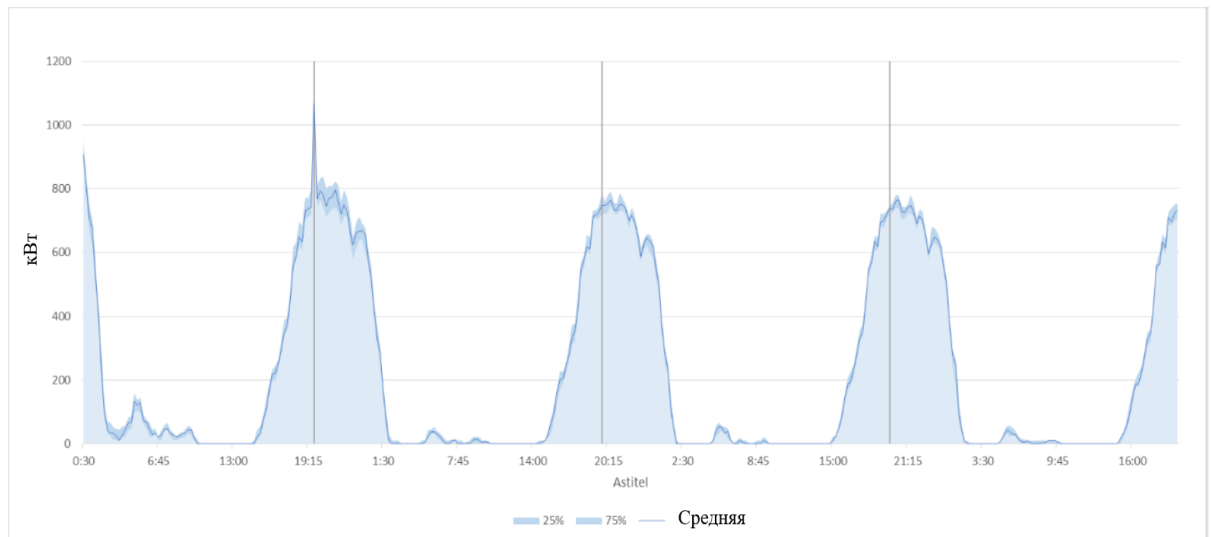


Рисунок 21 – кВт заряженный за 15 минут в эксперименте с интеллектуальной зарядкой в течение четырех дней

На рисунке 21 показано фактическое количество киловатт, заряжаемых каждые пятнадцать минут. Ось Y представляет совокупное количество киловатт, заряжаемых по соседству каждые 15 минут. Ось X представляет время во время симуляции. Следуя рисунку 21, можно выделить четыре пика используемой зарядной емкости. Три из этих пиков похожи ночью второго, третьего и четвертого дня. Пик пятого дня составляет лишь половину пиков по соседству. Полночь пятого дня — это конец периода моделирования, поэтому пик отображается только до этого момента. Кроме того, пик в ночь первого дня выше всех других пиков, не представленных на рисунке. Причина этого пика объясняется низким средним SOC в начале ночи на рисунке 20. Рисунок 21 свидетельствует о том, что увеличение спроса на электроэнергию в ночное время, как показано на рисунке 19, связано с

зарядкой электромобилей. Кроме того, можно заметить, что пиковая зарядка электромобиля в первую ночь вызывает дополнительную нагрузку трансформатора в первую ночь по сравнению с другими ночами. Разрядка невозможна в сценарии интеллектуальной зарядки и поэтому равна нулю.

Это исследование направлено на количественную оценку влияния зарядки V2G на электросеть низкого напряжения и, в частности, влияние зарядки на нагрузку трансформаторов среднего/низкого напряжения. Воздействие реализованной стратегии зарядки V2G будет сосредоточено на перегрузках, возникающих на уровне трансформатора в районе. Поэтому следующий раздел посвящен перегрузке трансформаторов.

На рисунке 22 представлена перегрузка одного из трансформаторов (трансформатор 5) за четыре рабочих дня. Ось Y представляет перегрузку в кВА за 15 минут. По оси X представлено время в течение моделируемого периода. На этом рисунке можно выделить пять пиков. Все эти пять пиков начинаются ближе к вечеру и длятся около часа. На рисунке не показана перегрузка в утренние часы, так как этого не происходит в этом трансформаторе. Однако перегрузка во время утреннего пика присутствует еще в двух трансформаторах. Время полной перегрузки в окрестности более подробно рассматривается на рисунке 18.

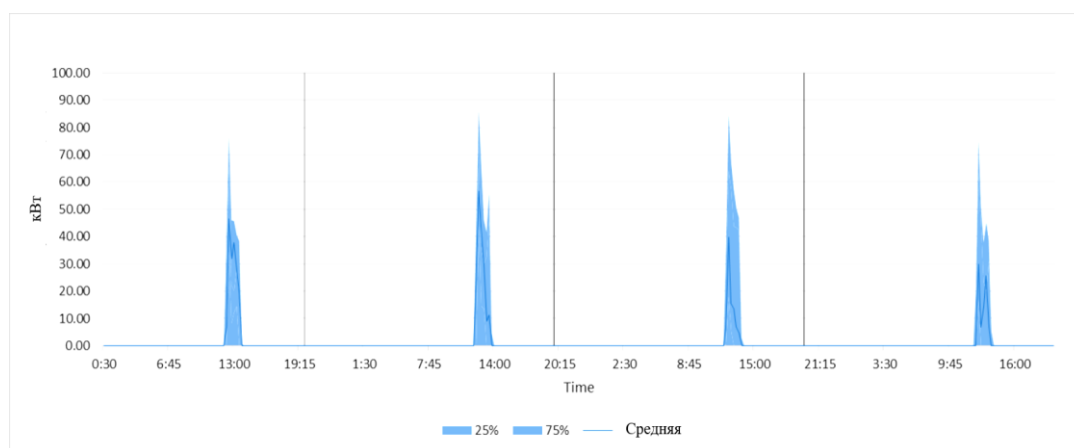


Рисунок 22 – Перегрузка трансформатора 5 в сценарии интеллектуальной зарядки в течение четырех дней

На рисунке 23 показано количество дней с перегрузкой в течение определенного периода времени. Из этого рисунка можно четко вывести два пиковых периода с перегрузкой. Каждый день по крайней мере один трансформатор перегружается в периоды с 06:45 до 08:15 часов и с 15:45 до 17:45 часов в течение всех дней моделирования. Отсюда можно сделать вывод, что вечерний пик длится дольше, чем утренний. В течение одного из моделируемых дней так называемый вечерний пик уже начинается в 14:45 часов. Вечерний пик, самое позднее, заканчивается уже в 19:00 часов.

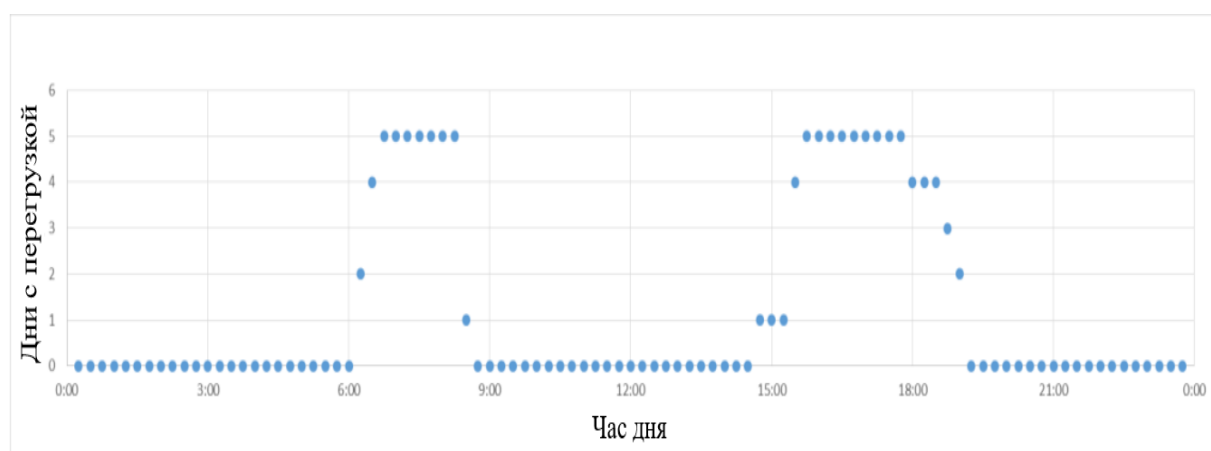


Рисунок 23 – Количество дней перегрузки по крайней мере для 1 трансформатора по соседству

Ранее уже был сделан вывод, что вечерний пик был выше утреннего пика. На рисунке 18 показаны только моменты возникновения перегрузки, величина перегрузки на этом рисунке не указана. На следующих рисунках представлена совокупная перегрузка по всему району (рисунок 24). На этом рисунке представлены как совокупные утренние, так и вечерние перегрузки в моделируемом районе. Ось Y представляет перегрузку в кВА. Ось X представляет время моделирования, для которого происходит перегрузка.

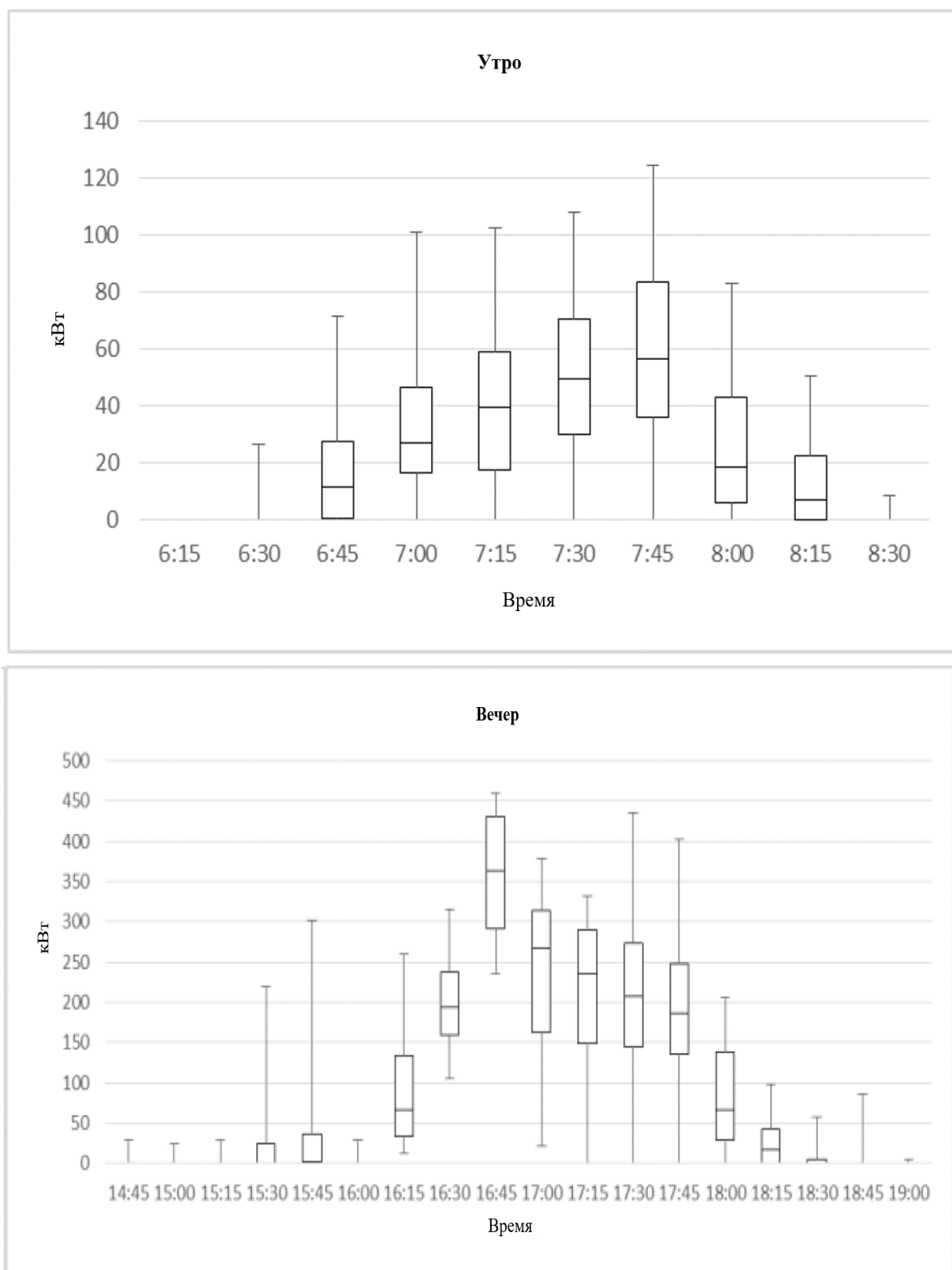


Рисунок 24 – Общая совокупная область перегрузки в эксперименте с интеллектуальной зарядкой

Рисунок 24 более подробно демонстрирует, что вечерний пик длится дольше и выше, чем пик спроса на электроэнергию утром. Это также показывает изменчивость величины перегрузки. Как показано на рисунке 6, максимальная перегрузка 400 кВА возможна в 17:45 часов, в то время как минимальная перегрузка также может быть равна нулю. Однако интервал от 25 % до 75 % относительно близок к среднему значению. Поскольку эти значения являются более репрезентативными, чем максимальное и минимальное значения, окончательные значения в пределах этого интервала будут использоваться в качестве входных данных.

3.2 Зарядка транспортного средства от сети

В этом разделе оценивается влияние зарядки V2G на сеть низкого напряжения, представлены результаты эксперимента V2G. Также проводится сравнение между сценарием smart charging и сценарием V2G. Сводная информация о нагрузках трансформатора представлена в таблице 4. В ней представлена нагрузка всех трансформаторов в моделируемом районе. Эта таблица показывает, что не все перегрузки в трансформаторах разрешимы с помощью V2G. Причины, по которым V2G не может решить эту перегрузку, рассматриваются далее. В рамках сценария низкого уровня не может быть решена только перегрузка в трансформаторе 4. Четыре других трансформатора освобождаются от перегрузки за счет зарядки электромобилей V2G. В рамках среднего сценария два трансформатора не освобождаются от перегрузки. Однако перегрузка в четырех других трансформаторах предотвращена. Для сценария с высокой нагрузкой перегрузка предотвращается в случае трех трансформаторов.

Таблица 4 – Нагрузка трансформатора в эксперименте «V2G»

Трансформаторы	Мощность (кВА)	Низкий			Средний			Высокий		
		Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)	Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)	Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)
1	100	65	Нет	48	70	Нет	50	77	Нет	51
2	100	100	Нет	56	103	Да	61	120	Да	58
3	250	250	Нет	50	250	Нет	54	262	Да	57
4	400	402	Да	64	415	Да	67	439	Да	68
5	400	400	Нет	56	400	Нет	60	400	Нет	65
6	400	400	Нет	54	400	Нет	58	400	Нет	62
7	400	331	Нет	51	356	Нет	51	390	Нет	51
8	400	300	Нет	53	322	Нет	54	357	Нет	52
9	250	144	Нет	51	153	Нет	52	177	Нет	48
10	400	319	Нет	51	343	Нет	54	376	Нет	52
11	100	95	Нет	50	100	Нет	55	100	Нет	61

Трансформаторы с перегрузкой в сценарии smart charging, но без перегрузки в сценарии V2G имеют максимальные нагрузки, равные мощности трансформатора. Благодаря реализованной стратегии V2G обеспечивается только минимальный объем разгрузки, чтобы предотвратить перегрузку. Таким образом, можно сделать вывод, что вся величина перегрузки создается одинаково. Однако трансформаторы не имеют такого жесткого ограничения при 100 % мощности. Трансформаторы способны нормально функционировать до 120 % в течение определенного периода времени. Однако это приведет к сокращению срока службы трансформатора. Кроме того, исходя из данных, приведенных в таблице 4 можно сделать вывод, что коэффициент нагрузки трансформатора, для которого предотвращается перегрузка, выше. Например, трансформатор 2 перегружен во время сценария интеллектуальной зарядки во всех трех сценариях и имеет коэффициент загрузки 46 %, 47 % и 47 %. В сценарии V2G коэффициент загрузки равен 56 %, 61 % и 58 %. Таким образом, можно сделать вывод, что V2G не только предотвращает перегрузку трансформатора, но и V2G также позволяет лучше использовать трансформатор тока. Это также показано на рисунке 25, на котором представлен профиль нагрузки трансформатора 5.



Рисунок 25 – Профиль нагрузки трансформатора 5 в эксперименте «Транспортное средство-сеть» в течение четырех дней

На рисунке 25 представлен профиль нагрузки трансформатора 5 в эксперименте V2G. Профиль нагрузки на рисунок 25 аналогичен профилю нагрузки того же трансформатора в сценарии интеллектуальной зарядки (рисунок 19). Нагрузка на трансформатор 5 в эксперименте V2G во время утреннего пика и в течение полудня равна нагрузкам трансформатора 5 во время эксперимента с интеллектуальной зарядкой. Однако вечерняя пиковая нагрузка отличается в двух экспериментах. В рамках сценария интеллектуальной зарядки достигается максимальная нагрузка более 470 кВА. В сценарии V2G максимальная нагрузка равна мощности трансформатора. Кроме того, нагрузка в течение ночи кардинально не изменилась. Поскольку необходимое количество разряда распределяется равномерно в течение ночи, нагрузка в течение ночи лишь незначительно возрастает, в то время как пиковая мощность трансформатора резко снижается. Поскольку электромобили должны разряжаться по прибытии домой вскоре после этого, ожидается, что SOC электромобилей по соседству будет отличаться по сравнению с экспериментом с интеллектуальной зарядкой (рисунок 26).

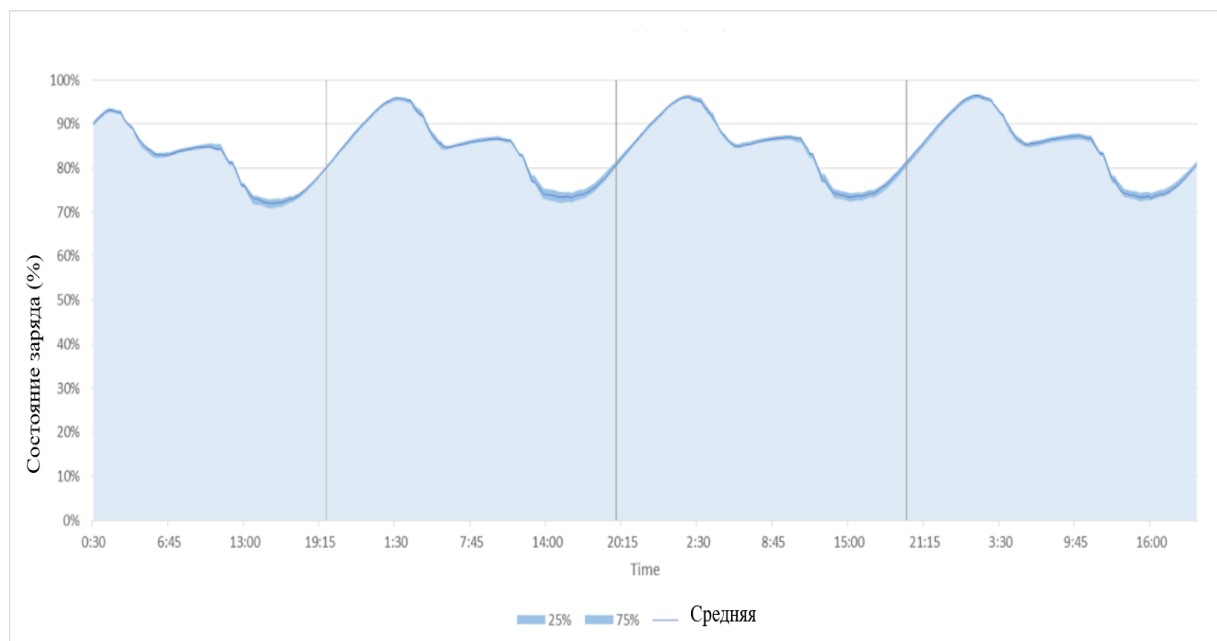


Рисунок 26 – Средний SOC всех электромобилей по соседству в эксперименте «V2G»

При изучении средней SOC в пределах района можно сделать вывод, чтобы предотвратить перегрузку трансформаторов MV /LV, не оказывает существенного влияния на среднюю SOC в пределах района. Представленный случай имеет только ограниченные моменты разрядки, и разрядка небольшого количества электромобилей не влияет на средний SOC в окрестностях. Кроме того, электромобили не должны разряжаться более чем на 30 % от своей емкости, а также должны быть полностью заряжены в конце сеанса зарядки. Таким образом, возникает аналогичная схема SOC, как и в эксперименте с умной зарядкой. Можно также сделать вывод, что V2G не обязательно должен снижать уровень заряда батареи электромобиля в конце сеанса зарядки. В пределах общей емкости CP, используемой в районе, ожидается значительное изменение по сравнению со сценарием «умной зарядки». На рисунке 27 представлено общее накопленное количество кВт (dis), заряженное во время эксперимента с подключением транспортного средства к электросети.

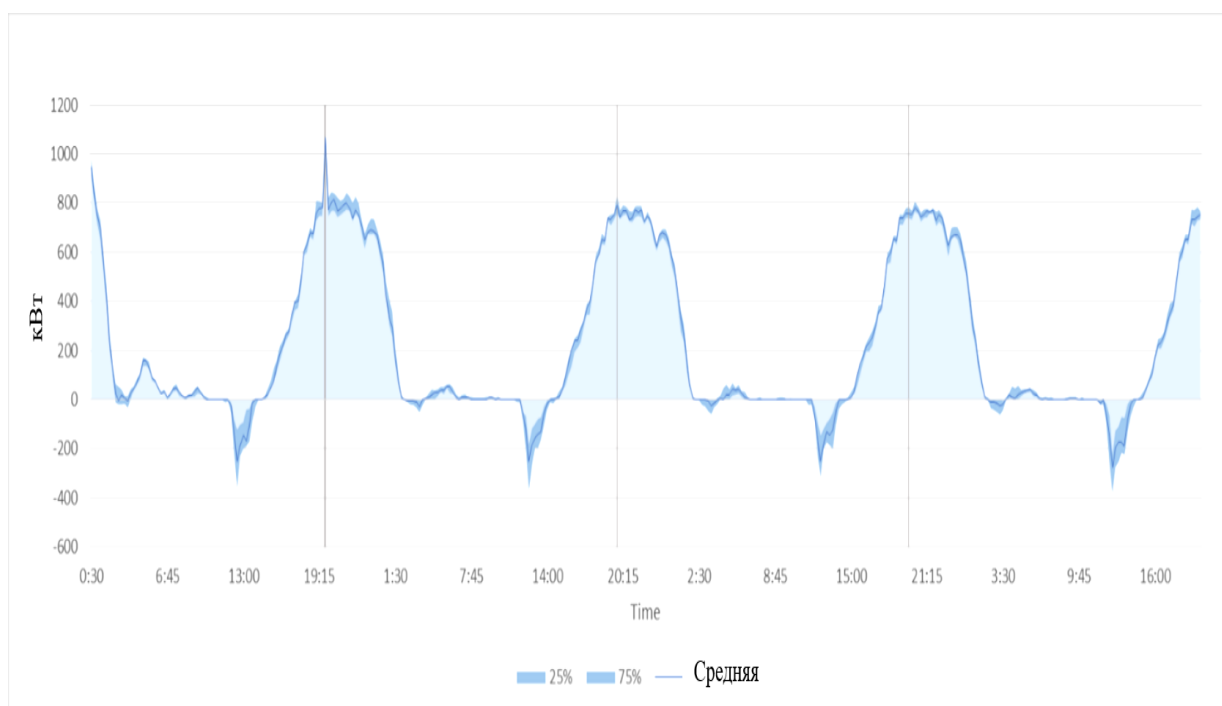


Рисунок 27 – Общее количество кВт (dis), потребляемых в окрестностях в эксперименте с подключением транспортного средства к сети

При сравнении рисунка 27 с рисунком 21 становится очевидным, что в рамках эксперимента V2G электромобили способны разряжаться и делают это регулярно. Каждый день во время вечернего пика нагрузки на определенные трансформаторы EV начинают разряжаться, чтобы обеспечить услуги по управлению перегрузками. Можно также отметить, что электромобили практически не разряжаются в часы пик в утренний пик. Причина этого двоякая. Во-первых, утренний пик спроса на электроэнергию ниже, чем вечерний пик, и, следовательно, во время утреннего пика по соседству существует меньшая перегрузка. Однако из рисунка 24 становится ясно, что утром перегрузка все еще существует. Однако выбранная стратегия V2G не способна справиться с перегрузкой в утреннее время. Это связано с ограничением, согласно которому электромобиль должен быть полностью заряжен в конце сеанса зарядки. Электромобиль не будет предоставлять услуги V2G, если он не сможет полностью восстановить заряд позже в течение сеанса зарядки. Если бы этого ограничения не было, в течение утра происходило бы больше выделений. Можно также отметить, что количество разряда относительно невелико по сравнению с количеством кВт, заряженных за ночь. Это вызвано относительно низкой степенью перегрузки в представленной системе. Перегрузка в пределах района не так высока, как потребность в зарядке электромобилей по соседству. Это позволяет предположить, что интеллектуальная зарядка электромобилей необходима для обеспечения высокого проникновения электромобилей в сеть. Если эти электромобили не смогут выполнять интеллектуальную зарядку, будет создана дополнительная перегрузка. Время перегрузки во время эксперимента с интеллектуальной зарядкой теперь более точно сравнивается с временем перегрузки, возникающим во время эксперимента с подключением транспортного средства к электросети. На рисунке 28 представлена совокупная перегрузка моделируемого района. Сначала отображается утренний пик, затем показывается вечерний пик.

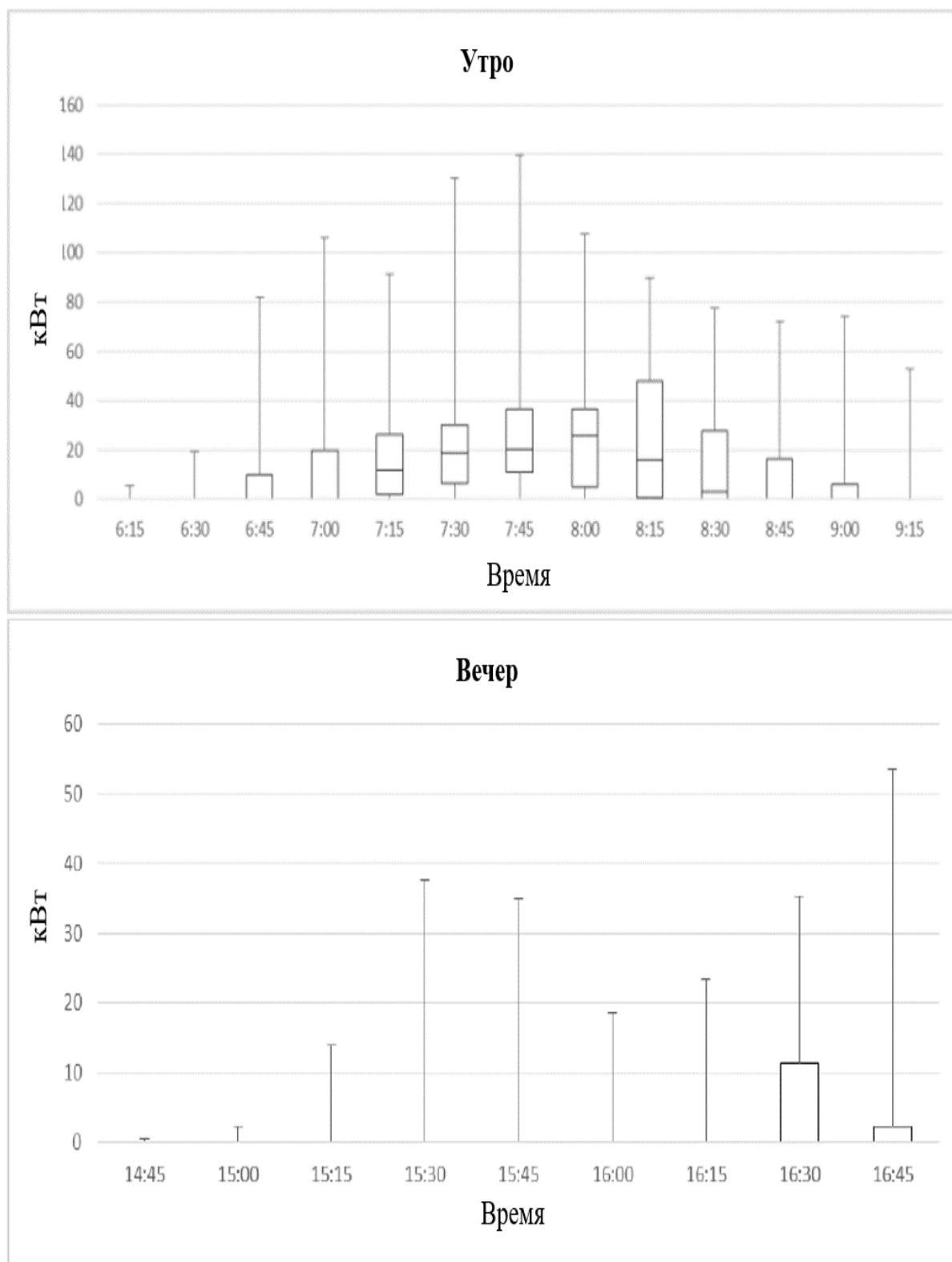


Рисунок 28 – Совокупная область перегрузки в эксперименте «Транспортное средство-сеть»

Из рисунка 28 можно сделать вывод, что V2G способен полностью предотвратить перегрузку имитируемых трансформаторов во время вечернего пика. Однако реализованная стратегия V2G не в состоянии справиться с перегрузкой трансформаторов во время утреннего пика потребления электроэнергии. В рамках модели все величины перегрузки обрабатываются одинаково. Однако в реальных трансформаторах предпочтительны меньшие перегрузки, поскольку трансформаторы способны выдерживать небольшую теоретическую перегрузку.

Надежность представленных результатов проверим с помощью анализа чувствительности. Этот анализ чувствительности включает все основные входные параметры, представленные в разделе 2.

3.3 Анализ чувствительности

Анализ чувствительности проводится для того, чтобы изучить влияние транспортного средства на сеть при различных обстоятельствах. Этими переменными являются: доля электромобилей, мощность зарядки в точке зарядки и модель потребления электроэнергии.

Во-первых, представлены результаты чередования значений доли EV. Доля электромобилей изменяется в рамках эксперимента smart charging и V2G и изменяется на 20 % и 50 % (рисунок 29). На приведенном выше рисунке показана общая нагрузка CP в пределах района в течение всего периода моделирования. Синяя поверхность и линия представляют общую нагрузку CP. Зеленая линия представляет среднюю нагрузку CP из пяти повторений с долей рынка EV 50 %, а оранжевая линия представляет долю рынка EV 20 %.

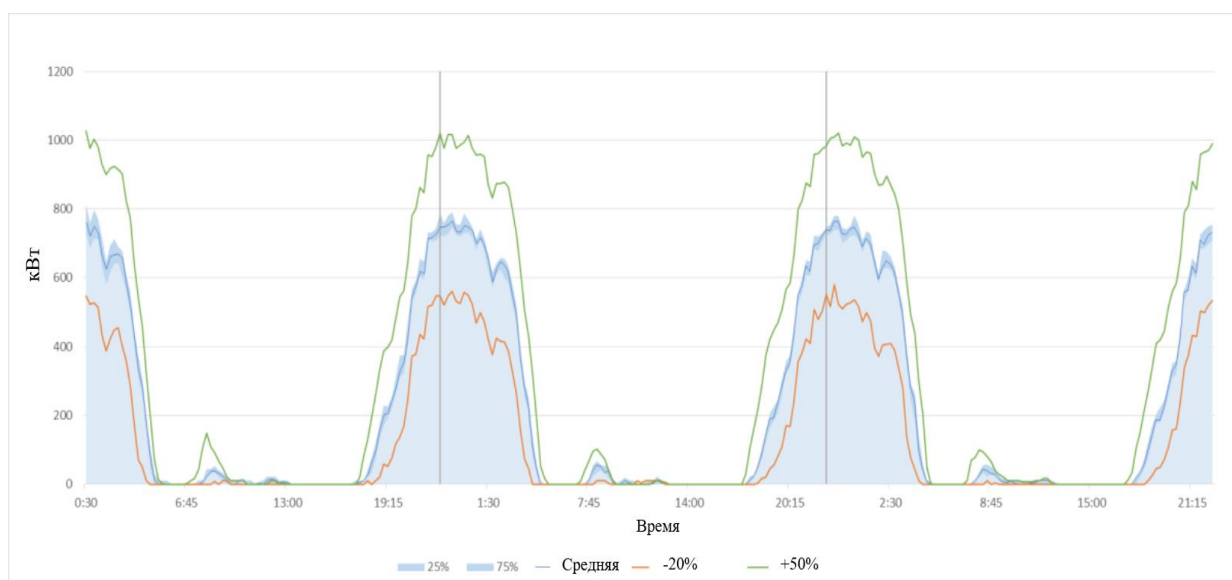


Рисунок 29 – Общая зарядка CP по соседству в эксперименте smart charging, включая анализ чувствительности

Можно отметить, что схемы зарядки в течение дня одинаковы во всех симуляциях. Это связано со стратегиями взимания платы, реализованными в рамках модели. Электромобили заряжаются в моменты, когда нагрузка в трансформаторе самая низкая, что основано на потреблении электроэнергии домохозяйствами. Величина зарядной нагрузки также хорошо распределена, доля 20 % EV имеет более низкие нагрузки CP, а нагрузка 50 % EV показывает более высокие нагрузки.

На рисунке 30 представлено количество киловатт, потребляемых по соседству для эксперимента V2G. Измененные значения доли рынка электромобилей следуют аналогичной схеме, и распределение аналогично распределению, представленному в рамках эксперимента smart charging. Однако разница в количестве кВт, разряжаемых при пиковых нагрузках, ниже, чем при зарядке электромобилей. Это вызвано ограниченной величиной перегрузки, присутствующей в системе, и, следовательно, электромобили не будут разряжаться линейно больше, когда присутствует больше электромобилей. Можно также отметить, что количество

потребляемых кВт в случае 20 % доли рынка аналогично количеству потребляемых кВт в базовом случае.

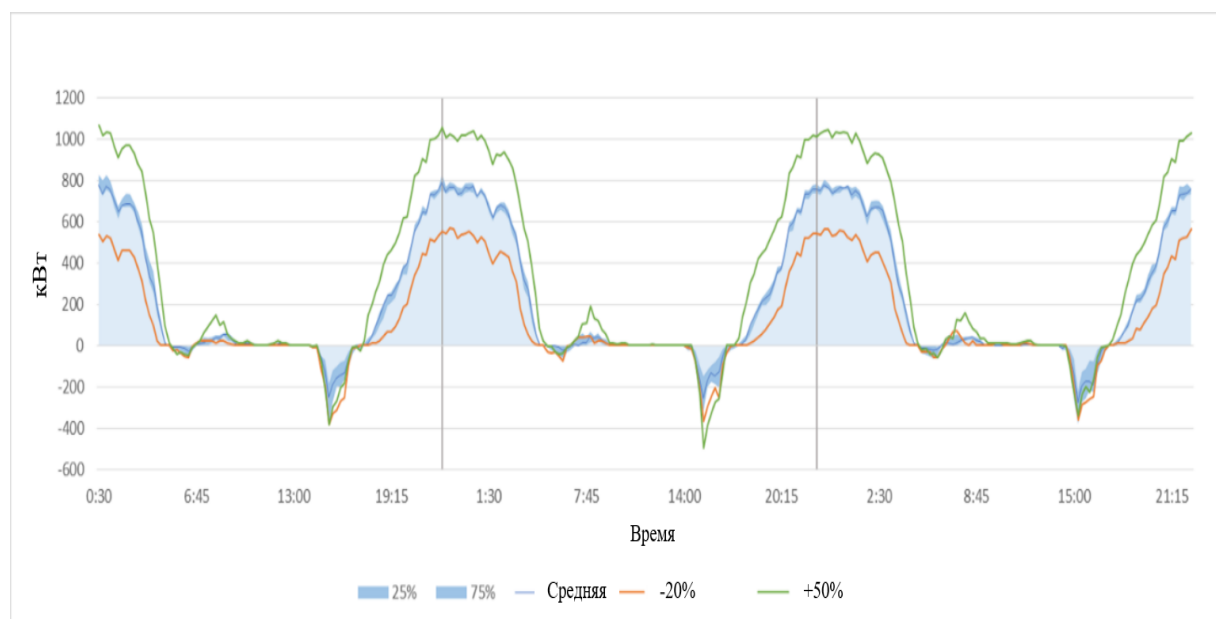


Рисунок 30 – Общая зарядка CP в окрестности в эксперименте V2G, включая анализ чувствительности

В таблице 5 представлены результаты анализа чувствительности, проведенного для значений в рамках модели потребления электроэнергии. Эта модель показывает, что уменьшение значений модели потребления электроэнергии не сильно изменяет состояние трансформаторов. Однако можно отметить, что коэффициент нагрузки выше, когда значения в модели потребления электроэнергии ниже. Когда модель потребления электроэнергии изменяется и значения увеличиваются на 10 %, становится очевидным, что два трансформатора достигают состояния перегрузки во время эксперимента с подключением транспортного средства к сети. Это означает, что электромобили, присутствующие на трансформаторах, не в состоянии справиться с дополнительной нагрузкой, создаваемой домашними хозяйствами. Изменение пиковой нагрузки базового потребления домашних хозяйств на 10 % показывает, что доля электромобилей в 33 % не способна

обеспечить разрядку в случае перегрузки в дополнительных двух трансформаторах по сравнению с базовым вариантом.

Последняя переменная, которая представлена в этом анализе чувствительности, – это мощность зарядки CPS в пределах района. В предыдущих разделах мощность зарядки CP установлена на 11,04. Однако за последние годы зарядная мощность зарядных устройств увеличилась. Чтобы продемонстрировать надежность результатов, представленных в этом разделе, мощность зарядки CP удваивается, и нагрузки трансформатора для этих двух случаев сравниваются для сценария V2G. В таблице 6 показаны нагрузки трансформатора в экспериментах с различными нагрузками CP. При зарядной мощности, определенной в разделе 3, по сравнению с зарядной мощностью в два раза большей, существенной разницы в результатах обнаружить невозможно. С введением зарядной мощности около 22 киловатт дополнительная перегрузка не устраняется.

Из таблицы 6 видно, что с введением более высоких зарядных мощностей для зарядных устройств V2G как для зарядки, так и для разрядки максимальная нагрузка внутри трансформаторов увеличивается. Кроме того, коэффициент нагрузки в этих трансформаторах также выше благодаря дополнительной зарядной емкости. Однако ни одно состояние перегрузки трансформатора не было изменено из-за изменения зарядной емкости. Таким образом, делается вывод о том, что результаты модели устойчивы к изменениям зарядной мощности.

Таблица 5 – Сводная информация о нагрузке трансформаторов «Эксперимент V2G с анализом чувствительности»

Трансформаторы	Мощность (кВА)	90 %			100 %			110 %		
		Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)	Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)	Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)
1	100	68	Нет	52	70	Нет	50	86	Нет	50
2	100	102	Да	64	103	Да	61	124	Да	63
3	250	250	Нет	57	250	Нет	54	250	Нет	66
4	400	412	Да	70	415	Да	67	550	Да	68
5	400	400	Нет	62	400	Нет	60	420	Да	75
6	400	400	Нет	60	400	Нет	58	402	Да	75
7	400	348	Нет	51	356	Нет	51	400	Нет	58
8	400	308	Нет	57	322	Нет	54	394	Нет	58
9	250	151	Нет	55	153	Нет	52	200	Нет	52
10	400	372	Нет	51	342	Нет	52	400	Нет	57
11	100	96	Нет	55	100	Нет	55	104	Да	68

Таблица 6 – Сводка нагрузки трансформаторов с различными нагрузками СР в эксперименте V2G с анализом чувствительности

Трансформаторы	Мощность (кВА)	СР 11,04			СР 22,08		
		Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)	Макс. нагрузка (кВт)	Перегруженность	Коэффициент нагрузки (%)
1	100	70	Нет	50	79	Нет	57
2	100	103	Да	61	113	Да	64
3	250	250	Нет	54	250	Нет	56
4	400	400	Да	67	475	Да	72
5	400	400	Нет	60	400	Нет	69
6	400	400	Нет	58	400	Нет	69
7	400	400	Нет	51	384	Нет	53
8	400	400	Нет	54	344	Нет	58
9	250	153	Нет	52	177	Нет	53
10	400	342	Нет	52	388	Нет	53
11	100	100	Нет	55	100	Нет	60

Вывод по разделу

- Реализованная стратегия умной зарядки способна перенести спрос на зарядку с вечера на ночь;
- Реализованная стратегия умной зарядки не создаст нового пика в ночное время , а равномерно распределит зарядную нагрузку в зависимости от нагрузки трансформатора;
- В рамках сценария «умной зарядки» В районе Т перегрузка трансформаторов все равно будет происходить;
- Пиковое потребление электроэнергии вечером будет выше , чем утром;
- Реализованная стратегия V2G способна предотвратить почти все перегрузки , присутствующие в окрестностях;
- Реализованная стратегия V2G лучше справляется с перегрузкой в начале сеанса зарядки , чем в конце сеанса зарядки;

Заключение

Разумная стратегия зарядки, основанная на заполнении провалов и управлении перегрузками, позволит избежать увеличения пикового спроса в вечернее время из-за зарядки электромобилей. Однако стратегия Smart grid не может предотвратить превышение пикового спроса на электроэнергию над установленной мощностью низковольтной сети. Предлагаемая стратегия зарядки V2G способна предотвратить перегрузку низковольтных сетевых трансформаторов. В районе T управление перегрузками с помощью V2G является жизнеспособной стратегией, позволяющей избежать перегрузки трансформаторов в этом районе. По крайней мере половина трансформаторов, испытавших перегрузку во время эксперимента с интеллектуальной зарядкой, не перегружена в эксперименте с V2G.

Для предотвращения перегрузки трансформаторов V2G может быть более эффективным, чем комбинация интеллектуальной зарядки и усиления сети. Однако, если перегрузка в сетевых активах ожидается каждый день, источник гибкости, обеспечиваемый электромобилями, может оказаться нежелательным из-за меньшей предсказуемости и, следовательно, безопасности поставок по сравнению с другими более последовательными мерами, такими как стационарная батарея. Это в первую очередь связано с тем, что одной из основных целей DSO является обеспечение надежного распределения электроэнергии. Возможность электромобилей не присутствовать на зарядной станции, потому что владельца нет дома, может вызвать проблему. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную оценку влияния доступности электромобилей с V2G на стабильность.

Это исследование дает представление о влиянии зарядки V2G на теоретическую электросеть. Поэтому результаты, полученные в этом исследовании, не могут рассматриваться как репрезентативные для оценки

ценности V2G для управления перегрузками во всей России. Наиболее важными характеристиками представленного случая являются: жилая площадь, текущая перегрузка, высокий средний уровень владения автомобилем. Для районов с аналогичными характеристиками, как у района Т, результаты могут в большей степени соответствовать представленным результатам. Предлагаемая модель в этом исследовании создана гибким образом и позволяет использовать в других районах. Чтобы получить более универсальные результаты, в модель следует импортировать и проанализировать данные нескольких реальных районов. Благодаря этому дополнению ценность управления перегрузками V2G для этой группы районов станет более репрезентативной. Кроме того, следует оценить районы с различными характеристиками. Эти районы должны быть оценены, чтобы получить более универсальные результаты о ценности управления перегрузками низкого напряжения в России. Районы с различными типами жилья допускали бы различную зарядку и спрос на электроэнергию и имели бы результаты, отличные от результатов, представленных в этом исследовании. Влияние V2G в течение всего года также можно было бы лучше оценить за счет изменения продолжительности моделирования. Продление моделируемого периода до одного года или даже увеличение продолжительности повысило бы точность оценки воздействия V2G.

Список используемых источников

1. Анчарова Т. В., Рашевская М.А., Стебунова Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. 415 с.
2. Глушкова Д.В., Ермоленко Б.В. Гибридные системы электро- и теплоснабжения автономных автозаправочных станций // МКХТ-2017: XIII Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии, Москва, Россия, РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2017 г. № 9. С. 71-74.
3. Данов, Б.А. Электрооборудование автомобилей. М. : ГЛТ, 2005. 206 с.
4. Затраты энергии для автомобиля с ДВС и электродвигателем [Электронный ресурс] : Форум электротранспорта. URL: <https://electrotransport.ru/ussr/index.php?topic=41189.648>.
5. Коломиец, А.П. Электропривод и электрооборудование: учебник для ВУЗов. М.: Колос, 2007. 328 с.
6. Крепления для зарядных станций [Электронный ресурс] : URL:<http://evtime.ru/ru/krepleniya-dlya-zaryadnykh-stantsij.html>.
7. Кулеева Л. И., Митрофанов С. В., Семенова Л. А. Проектирование подстанции : учеб. пособие. Оренбург : ОГУ, 2016. 110 с.
8. Мощность и вращающий момент электродвигателя. [Электронный ресурс] : URL: https://eti.su/articles/elektricheskie-mashini/elektricheskie-mashini_1571.html.
9. Ответы на вопросы о зарядке электрокаров [Электронный ресурс] : URL: <https://auto.ria.com/news/electric-cars/223967/zaryazhennyj-elektrokargde-kak-i-skolko-zapravlyat-elektromobil.html>.
10. Развитие инфраструктуры для электромобилей: мировой опыт [Электронный ресурс] : URL: <https://searu.com/news/view3372>.

11. Русина, А. Г. Режимы электрических станций и электроэнергетических систем : учеб. пособие для студентов вузов. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 398 с.

12. Сафиуллин, Р.Н. Электротехника и электрооборудование транспортных средств: учебное пособие. СПб.: Лань, 2019. 400 с.

13. Современные тенденции формирования транспортной инфраструктуры городов [Электронный ресурс] : URL:[https://studref.com/371331/stroitelstvo/sovremennye tendentsii formirovaniya transportra infrastruktury gorodov](https://studref.com/371331/stroitelstvo/sovremennye_tendentsii_formirovaniya_transportra_infrastruktury_gorodov).

14. Способы зарядки электромобилей [Электронный ресурс] : Википедия. URL: <https://ecotechnica.com.ua/stati/786-sposoby>.

15. Устройство и принцип работы электромобиля. Плюсы и минусы электрокаров [Электронный ресурс] : URL: <https://promdevelop.ru/osobennosti-ustrojstva-elektromobilya-plyusy-minusyelektrokarov>.

16. Что такое зарядная станция для электромобиля, ее особенности и виды [Электронный ресурс] : URL: <https://1electrocar.ru/princip/zaryadnayastanciya.html>.

17. Электрический аккумулятор [Электронный ресурс] : Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический аккумулятор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_аккумулятор).

18. Chukwu U., Mahajan S. Impact of V2G on Distribution Feeder : An Energy Loss Reduction Approach. 2014. № 2. С. 19–27. URL: <https://doi.org/10.12691/iteces-2-1-4>.

19. Divshali P., Choi B. Efficient Indirect Real-Time EV Charging Method based on Imperfect Competition Market. // In 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm): Control and Operation for Smart Grids, Microgrids and Distributed Resources. 2016. С. 25-27.

20. Elshof Beng. Changing energy demand in the residential sector due to decentralized generators and the electrification of heating and driving: tutorial. China : State Grid, 2016. 80 p.

21. EVVolumes база данных мировых продаж электромобилей [Электронный ресурс] : URL: <http://www.ev-volumes.com>.
22. Haque, A., Nguyen, P., & Kling, W. (2014). Congestion Management in Smart Distribution Network. In 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC).
23. Humayun, M., Degefa, M., Safdarian, A., & Lehtonen, M. (2015). Utilization Improvement of Transformers Using Demand Response. IEEE Transactions on Power Delivery, 30(1), 202–210. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2325610>.
24. Love, J., Smith, A., Watson, S., Oikonomou, E., Summerfield, A., Gleeson, C., ... Lowe, R. (2017). The addition of heat pump electricity load profiles to GB electricity demand : Evidence from a heat pump field trial. Applied Energy, 204, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.026>.
25. Tuttle, D., Fares, R., Baldick, R., & Webber, M. (2013). Plug-In Vehicle to Home (V2H) Duration and Power Output Capability, (June). <https://doi.org/10.1109/ITEC.2013.6574527>.
26. Vehicle-to-grid [Электронный ресурс] // Википедия URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Vehicle-to-grid>.
27. Verzijlbergh, R. (2013). The Power of Electric Vehicles.
28. Verzijlbergh, R., De Vries, L., & Lukszo, Z. (2014). Renewable Energy Sources and Responsive Demand. Do We Need Congestion Management in the Distribution Grid? Power Systems, IEEE Transactions On, 29(5), 2119–2128. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2300941>.
29. Xiang, X., Kennedy, R., & Madey, G. (2005). Verification and Validation of Agent-based Scientific Simulation Models. In ADS'05 (pp. 47–55).
30. Yilmaz, M., & Krein, P. (2013). Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces. IEEE Transactions on Power Electronics, 28(12), 5673–5689. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2227500>.