

Технология электромобилей V2G как способ выравнивания графиков нагрузки бизнес-центров в энергосистеме Москвы

Vehicle-to-grid technology as a way to align business center load schedules in Moscow's energy system

Владислав БИТНЕЙ

Руководитель проектов, служба экспертизы и технического развития, инженерное управление ПАО «Мосэнерго»
E-mail: BitneyVD@mosenergo.ru

Vladislav BITNEY

Project Manager, Expertise and Technical Development Service, Engineering Department of PJSC Mosenergo
E-mail: BitneyVD@mosenergo.ru

Алёна БУЛАВИНА

Главный специалист, филиал ПАО «Россети Московский регион» – Московские кабельные сети

Alena BULAVINA

Chief Specialist Branch of PJSC «Rosseti Moscow Region» – Moscow Cable Networks

Николай СМОТРОВ

Доцент, к. т. н., НИУ «МЭИ»

Nikolay SMOTROV

Associate Professor, PhD, National Research University «MPEI»

Аннотация. В ходе исследования был выполнен анализ технологии vehicle-to-grid (двунаправленный поток электрической энергии между транспортным средством и электрической сетью) с целью её применения в московской энергосистеме для выравнивания графика нагрузки. По результатам обзора текущего состояния нагрузки, видов аккумуляторных батарей и принципа работы данной технологии были проведены расчеты различных способов установки зарядных станций в крытом подземном паркинге типового московского бизнес-центра. Целью данной статьи являлся анализ концепции двухстороннего использования электромобилей, подразумевающей подключение машины в общую электрическую сеть для его подзарядки с возможностью выдачи электроэнергии для участия в управлении графиком нагрузки. Сравнительный анализ проведенных расчетов позволил выбрать наиболее экономически целесообразный способ по установке зарядных станций с целью выравнивания графика нагрузки, то есть снижения дневного максимума и подъем ночного провала за счет цикла разряда-заряда электромобиля, соответственно. *Ключевые слова:* график нагрузки, бизнес-центры, электромобиль, зарядные станции, модернизация сети, vehicle-to-grid, выравнивание нагрузки, дневной максимум, ночной минимум, аккумуляторные батареи.

Abstract. The study analyzed the vehicle-to-grid technology (bidirectional flow of electrical energy between the vehicle and the electrical grid) for the purpose of its application in the Moscow power grid to equalize the load schedule. Based on the results of the review of the current state of the load, types of batteries and the operating principle of this technology, calculations were made of various methods for installing charging stations in a covered underground parking lot of a typical Moscow business center. The purpose of this article was to analyze the concept of two-way use of electric vehicles, which implies connecting the car to the general electrical grid for its recharging with the ability to generate electricity to participate in managing the load schedule. A comparative analysis of the calculations made it possible to choose the most economically feasible method for installing charging stations in order to equalize the load schedule, that is reducing the daytime maximum and raising the nighttime failure due to the discharge-charge cycle of the electric vehicle, respectively.

Keywords: load schedule, business centers, electric vehicle, charging stations, network modernization, vehicle-to-grid, load balancing, daytime maximum, nighttime minimum, storage batteries.

Технология vehicle-to-grid (V2G) подразумевает возможность организации контролируемого и двунаправленного потока электрической энергии между транспортным средством и электрической сетью. Электрическая энергия поступает от сети к автомобилю для того, чтобы зарядить батарею. С другой стороны, электрическая энергия, при необходимости, отдается от транспортного средства обратно в сеть, например, для обеспечения пиковой мощности. Другими словами, батареи автомобиля используются в качестве накопителя и поставщика энергии.

Исследования показывают, что транспортные средства не используются для активных перевозок более 90% времени [1]. В это время батареи электромобилей (ЭМ) могут использоваться для обслуживания

рынков электроэнергии без ущерба для их основной транспортной функции.

При правильно построенном алгоритме работы «умных» сетей электромобили выступают инструментом балансировки потребления и накопления электроэнергии, что положительно влияет на общую загрузку сети. Энергосбытовые компании и ВИЭ при широком внедрении двунаправленной зарядки смогут сглаживать пики энергопотребления, а владельцы электротранспорта – заряжать автомобиль по сниженным тарифам и возвращать электроэнергию обратно в сеть по выгодной стоимости [10].

Технология V2G включает в себя концепции vehicle-to-home (когда электромобиль находится дома) или vehicle-to-building (когда электромобиль находится в коммерческом здании). В этих случаях батарея

может использоваться для питания электрической нагрузки [2].

Для проведения циклов зарядки или разрядки электромобилей задействуются 3 системных компонента:

- место, где электромобиль соединяется с электрической сетью;
- оборудование электропитания, к которому подключается транспортное средство;
- аккумулятор для электромобиля с системой контроля заряда.

Место, где электромобиль соединяется с электрической сетью, может быть домом владельца, парковкой или общественной зарядной станцией.

В последние десятилетия мировое общество сталкивается с необходимостью адаптации к вызовам изменяющегося климата, и энергетическая отрасль играет ключевую роль в этом процессе. Одним из перспективных вариантов является активное использование технологии V2G – возможности электромобилей принимать и отдавать энергию в электросеть [3].

Активное внедрение технологии V2G в будущем несет в себе огромный потенциал для изменения ландшафта электромобилей и экологически чистого транспорта. Благодаря постоянному прогрессу в интеграции V2G, электромобили могут стать активными участниками более сбалансированной и эффективной энергетической экосистемы. Таким образом, V2G находится в авангарде инноваций и прогресса в инициативах по устойчивому транспорту, прокладывая путь к более экологически сознательному подходу к мобильности.

Существует тенденция по усилению неравномерности суточного графика нагрузки, что негативно влияет на эффективность

Технология vehicle-to-grid подразумевает возможность организации контролируемого и двунаправленного потока электрической энергии между транспортным средством и электрической сетью



Аккумулятор V2G для электрокаров

Источник: carsweek.ru

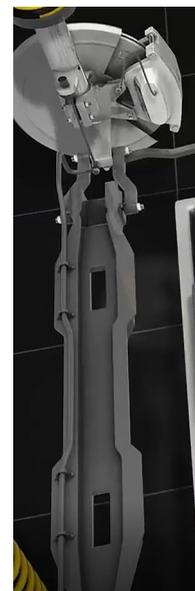
работы генерирующего оборудования. Для решения данной проблемы предлагается применение технологии vehicle-to-grid, которая позволяет передавать электроэнергию как в сторону электромобиля с установленным в нем аккумулятором, так и обратно в сеть.

Одним из основных преимуществ технологии V2G является возможность управления пиковой нагрузкой. В периоды пикового спроса электромобили могут функционировать как аккумуляторы, помогая выравнять нагрузку на электросеть и снижать потребность в использовании традиционных генераторов электроэнергии.

Кроме того, V2G открывает новые возможности для временного хранения энергии, что становится особенно важным с увеличением доли возобновляемых источников энергии. Электромобили могут быть задействованы для сбора и временного хранения избыточной энергии от солнечных и ветровых установок на периоды, когда эти источники энергии могут быть неактивны [4].

Большим плюсом технологии V2G для электромобильных владельцев является возможность продажи в сеть излишней энергии и получение дополнительного дохода.

Однако, несмотря на перспективы, технология V2G все еще сталкивается с вызовами, такими как технические стандарты,



безопасность и обеспечение конфиденциальности данных. Поэтому для полноценной реализации данной технологии необходимо серьезное внимание к разработке соответствующих нормативов и правил использования.

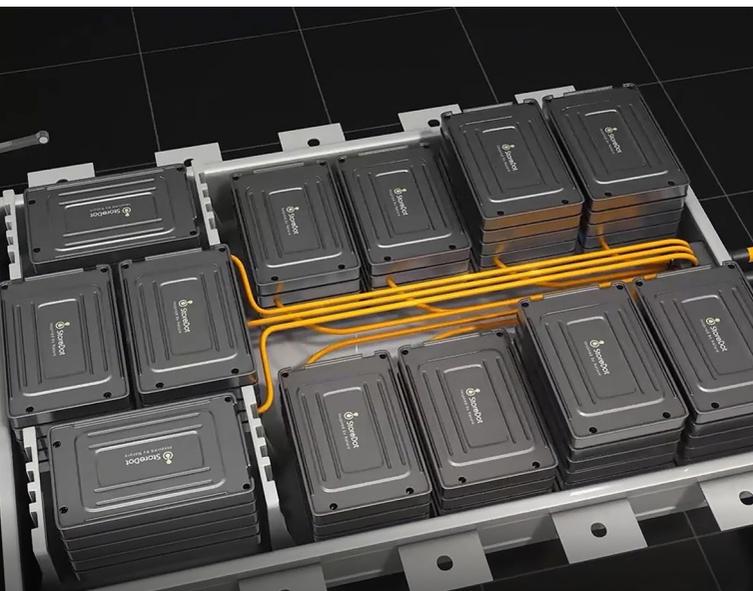
В целом технология V2G представляет собой важную и перспективную альтернативу в современной энергетике. Активное использование этой технологии может содействовать повышению стабильности и устойчивости электросети, обеспечивая новые возможности для снижения экологического воздействия и генерации дохода. Вместе с тем, успешная реализация технологии V2G потребует тесного сотрудничества между автомобильной и энергетической промышленностями, разработку специальных государственных программ и взаимодействие с министерствами и ведомствами, при этом сами технологии должны полностью отвечать международным стандартам [5].

Результатом концепции vehicle-to-grid являются следующие преимущества:

- выравнивание пиковой нагрузки: V2G помогает обеспечить питание сети, когда спрос высок, и заряжает батареи машины ночью, когда спрос низкий;
- финансовые: владельцы электромобилей могут получить финансовую выгоду от V2G;

Аккумулятор с технологией XFC FlashBattery

Источник: prnewswire.com



- хранение возобновляемой энергии: электромобиль может помочь развитию возобновляемых источников энергии, поскольку может хранить избыточную энергию в ветреные или солнечные периоды, и возвращать ее в сеть. Таким образом, электромобиль может стабилизировать и сгладить неравномерность выработки возобновляемой энергии;
- поддержка во время отключения электроэнергии: V2G, как ожидается, будет иметь жизненно важную роль во время отключения электроэнергии [6].

Однако стоит отметить, что данная концепция имеет следующие недостатки:

- капитальные затраты на электронику и модернизацию сетей: для подключения электромобиля к электросети требуется двунаправленный интерфейс, который должен быть адаптирован к возврату энергии в сеть;
- время работы от батарей: батареи электрокара живут порядка 1000 циклов. Частая зарядка и разрядка сократят время работы батарей. Следовательно, каждый владелец такой машины должен продавать накопленную энергию обратно в сеть, когда спрос достаточно высок, чтобы вернуть стоимость;
- сложность моделирования: концепция V2G по-прежнему находится в стадии исследования, поскольку большинство проектов и схем управления, предложенных учеными, слишком сложны для реализации. Еще больше исследований требуется для снижения сложности и стоимости совместимости V2G с сетью и машиной;
- рынок электрической мощности должен быть адаптирован для покупки электроэнергии у владельцев электромобилей [7];
- подготовка инфраструктуры: V2G требует разработки современных инверторов и интеллектуальных сетевых систем, которые смогут эффективно управлять потоками электроэнергии в сеть и из нее, обеспечивая стабильность и надежность.

При этом существует целый ряд условий, которые необходимы для использования данной технологии:

Исследования показывают, что электромобили не используются для активных перевозок более 90 % времени. В это время их батареи могут использоваться для обслуживания рынков электроэнергии

- должно быть обеспечено достаточное для управления спросом количество электромобилей;
- электромобили должны иметь возможность подключения к сети;
- процедуры заряда и отдачи в сеть должны быть управляемыми;
- устройства сопряжения электромобилей с сетью должны быть оснащены точными приборами учета.

Целью данной работы является анализ концепции двухстороннего использования электромобилей, подразумевающей подключение машины в общую электрическую сеть для её подзарядки и возможность вы-

дачи электроэнергии для участия в управлении графиком нагрузки. Дополнительно произведена разработка технических мероприятий для выравнивания графика нагрузки путем установки зарядных станций с технологией V2G.

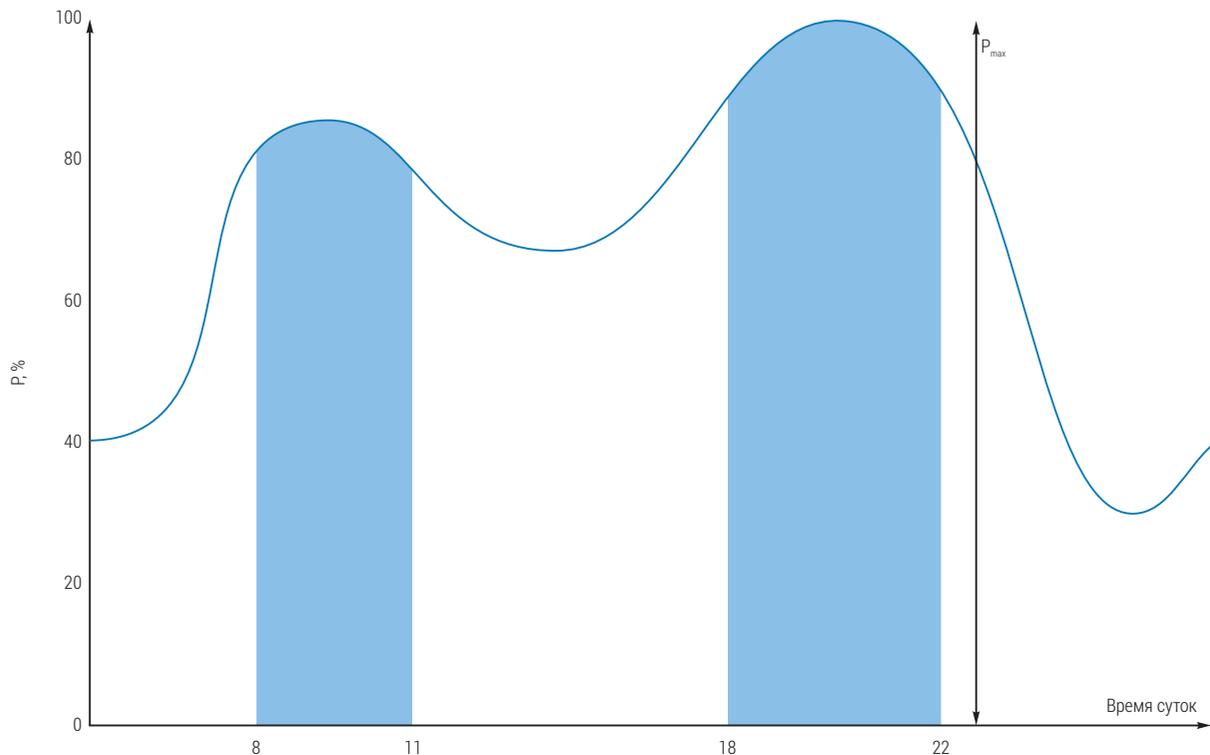
В данной работе была рассмотрена возможность применения технологии V2G для выравнивания графика нагрузки типового бизнес-центра в московской энергосистеме.

Анализ существующего состояния параметров электроснабжения московской энергосистемы

Для решения поставленной задачи необходимо разобраться с текущей ситуацией в части электроснабжения в московской энергосистеме. Определение конфигурации графика нагрузки, анализ новых технологий и возможных модернизаций помогут в достижении заданной цели.

График нагрузки типового московского бизнес-центра. Современные бизнес-центры – это не только квадратные метры, сдаваемые собственником в аренду для ведения бизнеса, это многофункциональ-

Рис. 1. Типовой суточный график нагрузки



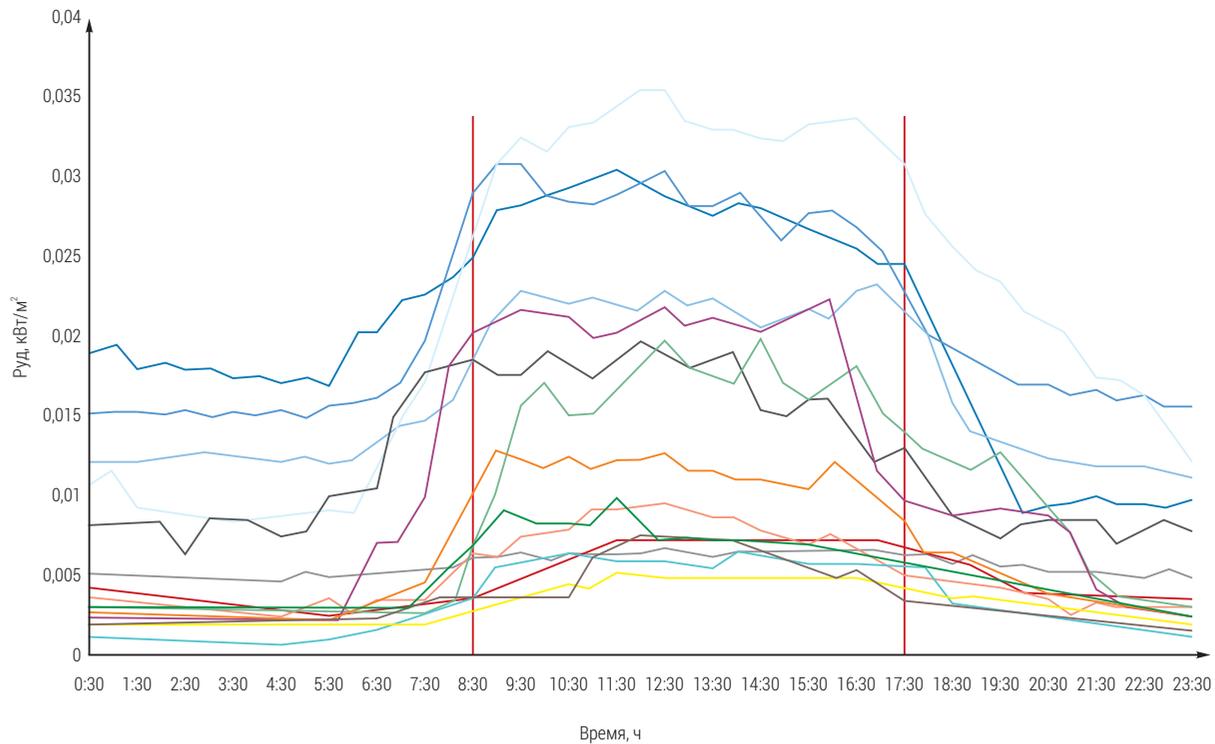


Рис. 2. График нагрузки бизнес-центра

ная структура, перекрывающая растущие потребности сотрудников и посетителей. Само понятие «деловой центр» уже не ассоциируется с однотипными кабинетами, серыми коридорами в стандартном здании. На сегодняшний день компании предъявляют к рабочему пространству повышенные запросы: развитая инфраструктура, большая площадь, современный ремонт, вместительные парковки, транспортная доступность – это минимальные требования к бизнес-центрам высокого класса [8].

Графики нагрузки в большинстве случаев представляют собой неравномерную линию, состоящую из множества отрезков, с пиками в утренние (8–11) и вечерние (18–22) часы. На рис. 1 приведен типовой суточный график нагрузки энергосистемы.

Представленные получасовые профили электрической нагрузки на рис. 2 иллюстрируют характерный график изменения, связанный с временем работы офисных помещений. Разумеется, что в нерабочее время нагрузка снижается в разы, так как практически отсутствуют включенные электроприемники.

Неравномерность графика нагрузки становится фактором роста конечных цен и тарифов на электроэнергию, поскольку:

- необходимо изыскивать инвестиции и средства на содержание дополнительной генерирующей мощности, а также мощности сетей и трансформаторных подстанций, что в итоге оплачивает потребитель;
- многие электростанции вынуждены набирать и снижать нагрузку несколько раз в течение суток, что увеличивает удельные расходы топлива, снижает эксплуатационный ресурс и в итоге также влияет на увеличение цены;
- пики потребления, особенно вечернего, в низковольтных сетях приводят к возрастанию риска аварий и отключений, ухудшению качества электроэнергии, возрастанию потерь в линиях [9].

Поэтому выравнивание графика нагрузки – важная задача по снижению средних цен на электрическую энергию и повышения надежности энергоснабжения.

Виды аккумуляторных батарей электромобилей. Тяговые аккумуляторные батареи электромобилей состоят из нескольких блоков-модулей, внутри которых находятся ячейки (элементы питания) в виде призм или цилиндров. Элементы состоят из катода (положительный полюс), элек-

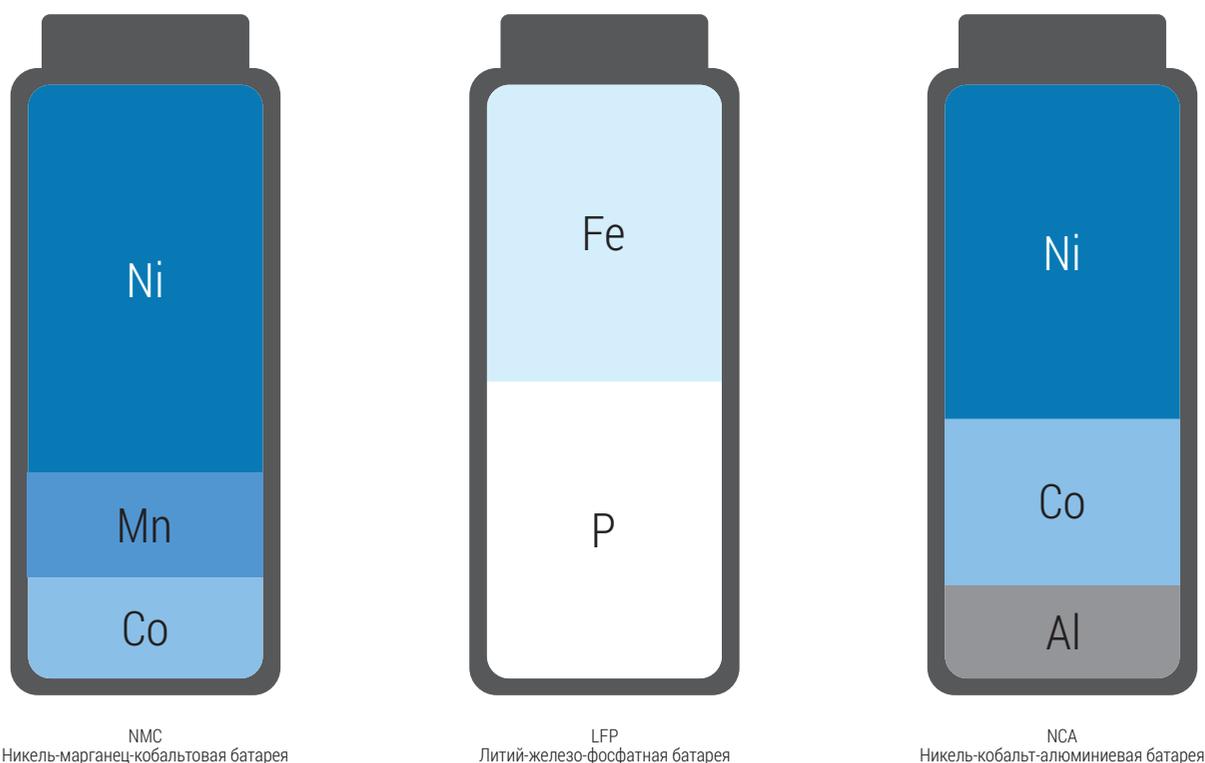


Рис. 3. Три основных типа аккумуляторных батарей для электромобилей

тролита, сепаратора и анода (отрицательный полюс). Заряженные частицы (ионы) перемещаются от катода к аноду через сепаратор при зарядке и в обратном направлении – при разрядке.

Тяговая батарея электромобиля работает под высоким напряжением – минимум 350–450 В. Некоторые марки электромобилей уже перешли на 800-вольтовую архитектуру, среди них: Porsche, Audi, Rimac, Kia, Hyundai, а Lucid Air использует уже 900 В. Увеличение вольтажа позволяет заряжать электромобиль быстрее, так как за единицу времени аккумулятор будет получать больше электричества от зарядной станции при той же силе тока. Кроме того, можно использовать провода меньшей толщины без риска их перегрева [13].

Каждая ячейка оборудована собственными датчиками температуры и контроллером для безопасной зарядки и защиты от перегрева. Если какой-либо элемент выходит из строя, электроника отключает его от зарядки, чтобы минимизировать риск внутреннего повреждения аккумулятора.

Для изготовления аккумуляторов электромобилей используются различные химические элементы. В зависимости от этого, выделяются 2 основных типа

аккумуляторов: литий-ионные и литий-железо-фосфатные. Литий-ионные, в свою очередь, подразделяются на никель-марганец-кобальтовые и никель-кобальт-алюминиевые. Виды аккумуляторных батарей представлены на рис. 3.

Ключевым преимуществом аккумуляторов NMC является более высокая плотность энергии, достигающая примерно 250 Вт·ч/кг, что означает, что они могут обеспечить большую дальность поездки за счет большего количества энергии в объеме каждого элемента и занимают мало места. Кроме того, их можно отправлять на вторичную переработку.

Однако из-за высокой плотности энергии элементы аккумулятора обладают меньшей термической стабильностью и склонны раньше достигать точки термического разгона – опасной цепной реакции нагрева, вызывающей пожар. Кроме того, при его изготовлении требуются более дорогие материалы. Аккумуляторы NMC используют такие электромобили, как Polestar 2, BMW iX3, Volvo EX30, Tesla Model Y и Model 3 в версиях Long Range и Performance.

Литий-ионные батареи с никель-кобальт-алюминиевым катодом NCA в ос-

новном похожи на NMC. Однако в NCA марганец заменен на более экологичный алюминий, а в катоде используется меньше кобальта. Поэтому они по-прежнему имеют схожие с NMC преимущества и недостатки в отношении дальности хода, зарядки, долговечности и термической безопасности. Аккумуляторы NCA установлены на электромобилях Audi Q8 e-Tron и Tesla Model 3 до 2021 г.

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы LFP лишены недостатков литий-ионных. Они безопаснее, имеют гораздо более длительный срок службы и выдерживают 3000–5000 циклов зарядки до значительной деградации – примерно вдвое больше, чем литий-ионные NMC и NCA.

Зарядка до 100% не оказывает существенного влияния на здоровье батареи LFP, что позволяет смело использовать весь доступный запас хода и реже останавливаться на зарядных станциях. Регулярная полная зарядка даже приветствуется для того, чтобы откалибровать элементы.

Будучи более стабильным, аккумулятор LFP также менее подвержен тепловому разгону в случае короткого замыкания или сильного удара, его безопаснее эксплуатировать в условиях экстремально низких и высоких температур.

При правильно построенном алгоритме работы «умных» сетей электромобили выступают инструментом балансировки потребления электроэнергии, что положительно влияет на общую загрузку сети

Однако батареи LFP тяжелее и имеют более низкую плотность энергии – до 150 Вт·ч/кг, поэтому они обеспечивают меньший запас хода, чем литий-ионные аналогичного размера. Кроме того, литий-железо-фосфатные аккумуляторы более чувствительны к низким температурам, что приводит к снижению скорости зарядки постоянным током в холодное время года. Батареи LFP можно увидеть на электромобилях BYD Dolphin, Ora Funky Cat, BYD Seal, а также Tesla Model 3 и Model Y в заднеприводных версиях.

Виды и особенности зарядных станций.

Существует 3 основных типа зарядки электромобилей:

Литий-ионный аккумулятор в электромобиле

Источник: [firefox / depositphotos.com](https://www.depositphotos.com/11714148/stock-photo/11714148/11714148.html)



тромобилей – быстрая, средняя и медленная. Они различаются выходной мощностью и, следовательно, скоростью зарядки. Каждый тип зарядного устройства имеет соответствующий набор разъемов, предназначенных для использования с малой или высокой мощностью, а также для зарядки переменным или постоянным током [14].

Быстрозарядные устройства (Rapid) – это самый быстрый способ зарядить электромобиль. Станции часто можно найти на автомагистралях или в местах, близких к основным маршрутам. Устройства Rapid обеспечивают высокую мощность постоянного или переменного тока – для максимально быстрой подзарядки автомобиля.



Зарядка электрокара

Источник: *c-o-k.ru*

В зависимости от модели электромобиля можно зарядить до 80% всего за 20 минут, хотя в среднем новый электромобиль занимает около часа на стандартной точке быстрой зарядки мощностью 50 кВт. Мощность от устройства представляет собой максимально доступную скорость зарядки, хотя автомобиль будет снижать скорость зарядки по мере того, как батарея приближается к полному заряду. Таким образом, время указано для зарядки до 80%, после чего скорость зарядки значительно снижается. Это максимизирует эффективность зарядки и помогает защитить аккумулятор [15].

Сверхбыстрые зарядные устройства постоянного тока обеспечивают мощность 100 кВт и более. Обычно это 100 кВт, 150

кВт или 350 кВт, хотя возможны и другие максимальные скорости между этими цифрами. Это точки быстрой зарядки следующего поколения, способные сократить время подзарядки, несмотря на увеличение емкости аккумуляторов в новых электромобилях.

Для тех электромобилей, которые способны потреблять 100 кВт и более, время зарядки сокращается до 20–40 минут, в том числе для моделей с большой емкостью аккумулятора. Даже если электромобиль может принимать не более 50 кВт постоянного тока, он все равно может использовать точки сверхбыстрой зарядки.

Зарядные станции средней скорости обычно рассчитаны на 7 кВт или 22 кВт (одно- или трехфазные 32 А). Подавляющее большинство таких зарядных устройств обеспечивают зарядку переменным током, хотя в некоторых сетях устанавливаются зарядные устройства постоянного тока мощностью 25 кВт.

Время зарядки зависит от скорости устройства и транспортного средства, но зарядное устройство на 7 кВт зарядит совместимый электромобиль с аккумулятором на 40 кВт·ч за 4–6 часов, а зарядное устройство на 22 кВт – за 1–2 часа.

Медленные зарядные устройства (Slow). Большинство устройств с медленной зарядкой рассчитаны на мощность до 3 кВт – округленная цифра, которая охватывает большинство устройств с медленной зарядкой. На самом деле медленная зарядка осуществляется от 2,3 кВт до 6 кВт, хотя наиболее распространенные медленные зарядные устройства рассчитаны на 3,6 кВт (16 А). Зарядка от трехконтактной вилки обычно приводит к тому, что автомобиль потребляет 2,3 кВт (10 А).

Время зарядки зависит от зарядного устройства и заряжаемого электромобиля, но полная зарядка устройства мощностью 3 кВт обычно занимает 6–12 часов.

Медленная зарядка – очень распространенный метод, используемый многими владельцами для зарядки дома на ночь. Тем не менее, медленные устройства не обязательно ограничиваются домашним использованием, их также можно найти на рабочем месте и в общественных местах. Из-за более длительного времени зарядки по сравнению с быстрыми устройствами медленные общедоступные точки зарядки встречаются реже и, как правило, являются более старыми устройствами [16].



а) ПСС Стандарт;



б) ПСС Mode 4.

Рис. 4. Ультрабыстрые зарядные станции ПСС

Для проекта были выбраны зарядные станции отечественного производства ПСС Стандарт мощностью 150 кВт и ПСС Mode 4 мощностью 30 кВт. Внешний вид зарядных станций ПСС представлен на рис. 4.

Модернизация системы электроснабжения типового московского бизнес-центра путем применения технологии V2G

В данном исследовании была рассмотрена модель применения технологии V2G с помощью электромобилей для выравнивания графика нагрузки типового московского бизнес-центра в дневное и ночное время. Основная идея заключается в установке зарядных станций на его крытом паркинге. В дневное время сотрудники бизнес-центра для снижения максимума нагрузки здания могут продавать электроэнергию с электромобиля, количество которой они могут установить с учетом прогноза возможных передвижений после рабочего времени [17].

Для ближайших жилых домов будут выделены бесплатные машино-места для владельцев электромобилей при условии, что они будут заряжать свой транспорт в ночное время, тем самым выравняя ночной провал в графике нагрузки бизнес-центра.

Основной проблемой является возможное отсутствие запаса мощности у трансформаторной подстанции (ТП), встроенной в здание бизнес-центра. В таком случае необходимо провести замену трансформаторов на более мощные, при условии, что новые габаритные размеры будут допустимы на подстанции.

В рамках данной работы были рассмотрены 5 вариантов установки ЗС в ТП для оптимизации графика нагрузки бизнес-центра:

1. Замена трансформаторов в ТП без учета использования разницы дневного максимума и ночного минимума. Исходные параметры: замена трансформаторов марки ТМГ-1000 на ТМГ-1250, загрузка трансформаторов на 70%, установка зарядных станций в количестве 10 штук.

2. Без замены трансформаторов в ТП с учетом использования неполной разницы дневного максимума и ночного минимума. Исходные параметры: трансформаторы марки ТМГ-1250, установка зарядных станций в количестве 10 штук.
3. Замена трансформаторов в ТП с учетом использования полной разницы дневного максимума и ночного минимума. Исходные параметры: замена трансформаторов марки ТМГ-1000 на ТМГ-1250, установка зарядных станций в количестве 23 штук.
4. Без замены трансформаторов в ТП с учетом использования полной разницы дневного максимума и ночного минимума. Исходные параметры: трансформаторы марки ТМГ-1250, установка зарядных станций в количестве 20 штук.
5. Замена трансформаторов в ТП с учетом использования неполной разницы дневного максимума и ночного минимума. Исходные параметры: замена трансформаторов марки ТМГ-1000 на ТМГ-1250, установка зарядных станций в количестве 20 штук.

Установка зарядных станций без замены трансформаторов в ТП с учетом использования неполной разницы дневного максимума и ночного минимума.

Рассмотрим один из вариантов, в котором в ТП бизнес-центра установлено 2 трансформатора марки ТМГ-1250. С учетом того, что трансформаторы в пиковом режиме загружены на 70%, а минимальная нагрузка в ночное время суток составляет 30%, получим возможную разницу в 40% от мощности трансформатора. На дельту разности нагрузки от дневного максимума и ночного провала будут установлены ЗС также для снижения пика днем и подъема провала ночью. Для такого проекта срок окупаемости будет гораздо ниже, как и суммарные затраты без замены трансформаторов.

Свободная мощность будет составлять в более загруженном варианте 40% от 1250 кВт, то есть 500 кВт на одном трансформаторе. При этом необходимо учесть возможные набросы нагрузки, для этого введем коэффициент запаса, равный 0,7. Таким образом:



Электромобиль на парковке

Источник: techgaga.com

$$P_{св} = 0,4 \cdot P_{ТР} \cdot \cos\varphi_{ТР} \cdot k_s =$$

$$0,4 \cdot 1250 \cdot 0,88 \cdot 0,7 = 308 \text{ кВт.}$$

Таким образом, можно установить зарядные станции на 308 кВт на каждом лучше ТП. Получим свободную мощность в размере:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P \cdot n_{ТР} = 308 \cdot 2 = 616 \text{ кВт.}$$

Тогда количество зарядных станций составит:

$$n_{ЗС} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{ЗС}} = \frac{616}{30} = 20,5 \rightarrow 20.$$

Для наглядности сравнения оставим количество ЗС в количестве 10 шт.

Для подключения каждой зарядной станции к ТП необходимо проложить кабель. Для данного проекта будем использовать кабель марки АПвзБбШп.

Рассчитаем ток, протекающий по кабельной линии в нормальном режиме:

$$I_p = \frac{P_{ЗС}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot n_{ц} \cdot \cos\varphi} =$$

$$\frac{30}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 1 \cdot 0,8} = 57 \text{ А.}$$

Эквивалентная плотность тока:

$$j_{эк} = 1,2 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$





Эквивалентное сечение:

$$S_{\text{эк}} = \frac{I_p}{J_{\text{эк}}} = \frac{57}{1,2} = 47,5 \text{ мм}^2.$$

Минимальное сечение для прокладки кабельной линии 70 мм^2 , значит в данном проекте используем кабель АПвзБШп 4х70.

Проведем проверку по току.

Длительно допустимый ток для выбранного кабеля:

$$I_{\text{доп}} = 176 \text{ А.}$$

Поправочный температурный коэффициент:

$$k_{\theta} = \sqrt{\frac{90 - 20}{90 - 15}} = 0,966.$$

Коэффициент аварийной перегрузки:

$$k_{\text{ав}} = 1,25.$$

Длительно допустимый режим:

$$I_{\text{длит}} = k_{\theta} \cdot k_{\text{ав}} \cdot I_{\text{доп}} = 0,966 \cdot 1,25 \cdot 176 = 212,5 \text{ А.}$$

Таким образом, $I_{\text{доп}} < I_{\text{длит}}$, значит кабель проходит проверку по току.

Выполним проверку по потерям напряжения в линии.

При расположении зарядной станции на подземном паркинге -1 этажа, максимальная длина кабельной линии будет составлять 50 м.

Электрические скутеры в Палермо, Италия
Источник: *watman / depositphotos.com*



Реализация технологии V2G потребует тесного сотрудничества между автомобильной и энергетической промышленностями, разработку специальных гос. программ и взаимодействие с ведомствами

Удельное активное сопротивление жилы кабеля сечением 70 мм^2 составляет:

$$R_0 = 0,447 \frac{\text{МОм}}{\text{М}}.$$

Активное сопротивление жилы кабеля сечением 70 мм^2 составляет:

$$R = \frac{R_0 \cdot l_{\text{кл}}}{n_{\text{ж}}} = \frac{0,447 \cdot 50}{1} = 22,4 \text{ МОм.}$$

Удельное реактивное сопротивление жилы кабеля сечением 70 мм^2 составляет:

$$X_0 = 0,082 \frac{\text{МОм}}{\text{М}}.$$

Реактивное сопротивление жилы кабеля сечением 70 мм^2 составляет:

$$X = \frac{X_0 \cdot l_{\text{кл}}}{n_{\text{ж}}} = \frac{0,082 \cdot 50}{1} = 4,1 \text{ МОм.}$$

Коэффициент мощности зарядной станции 30 кВт составляет:

$$\cos \varphi_{\text{зс}} = 0,977.$$

Рассчитаем реактивную составляющую мощности зарядной станции на основе исходных данных. Для начала получим значение полной мощности:

$$S_{\text{зс}} = \frac{P_{\text{зс}}}{\cos \varphi_{\text{зс}}} = \frac{30}{0,977} = 30,7 \text{ кВА},$$

$$Q_{\text{зс}} = \sqrt{S_{\text{зс}}^2 - P_{\text{зс}}^2} = \sqrt{30,7^2 - 30^2} = 6,52 \text{ квар.}$$

Потери напряжения в КЛ составляют:

$$\Delta U = \frac{P_{\text{зс}} \cdot R + Q_{\text{зс}} \cdot X}{U_{\text{ном}}} = \frac{30 \cdot 22,4 + 6,52 \cdot 4,1}{380} = 1,84 \text{ В,}$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{1,84}{380} \cdot 100\% =$$

$0,484\% < 5\% \rightarrow$ проверка выполняется.

Проведя все проверки, можно сделать вывод, что кабель АПвзББШп 4х70 выбран верно. Проведем расчет затрат на данный проект:

- стоимость 1 м кабеля АПвзББШп 4х70: 276,59 руб.
- стоимость зарядной станции ПСС–Mode 4 30 кВт: 1 000 000 руб.

При этом для определения общих затрат необходимо учесть стоимость строительно-монтажных работ (СМР), проектно-изыскательских работ (ПИР) и пуско-наладочных работ (ПНР).

Проведя усредненный анализ проектов по установке зарядных станций с учетом замены трансформаторов и прокладке кабельных линий, были получены следующие затраты.

Стоимость оборудования составляет:

$$Z_{\text{оборуд}} = Z_{\text{кл}} \cdot l_{\text{кл}} \cdot n_{\text{зс}} + Z_{\text{зс}} \cdot n_{\text{зс}} = 276,59 \cdot 50 \cdot 10 + 1000000 \cdot 10 = 10138295 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты на данный проект:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{оборуд}} + \text{СМР}_{\text{зс}} + \text{ПНР}_{\text{зс}} + \text{ПИР}_{\text{зс}} + \text{СМР}_{\text{кл}} + \text{ПНР}_{\text{кл}} + \text{ПИР}_{\text{кл}} = 10138295 + 21000 + 11000 + 5000 + 380000 + 4000 + 97000 = 10656295 \text{ руб.}$$

Для определения срока окупаемости необходимо учесть стоимость зарядки электромобиля. Средняя цена 1 кВт электроэнергии от источника с постоянным током в Москве составляет 15 руб. Емкость батареи электромобиля варьируется от 40 до 100 кВт/ч. Для дальнейшего расчета усредненное среднее значение равно 70 кВт/ч.

При зарядке электромобиля от зарядной станции мощностью 30 кВт для полного заряда необходимо $70/30 = 2$ часа 20 минут, либо 4 часа 40 минут при параллельной зарядке двух электромобилей. Стоимость 1 зарядки составит:

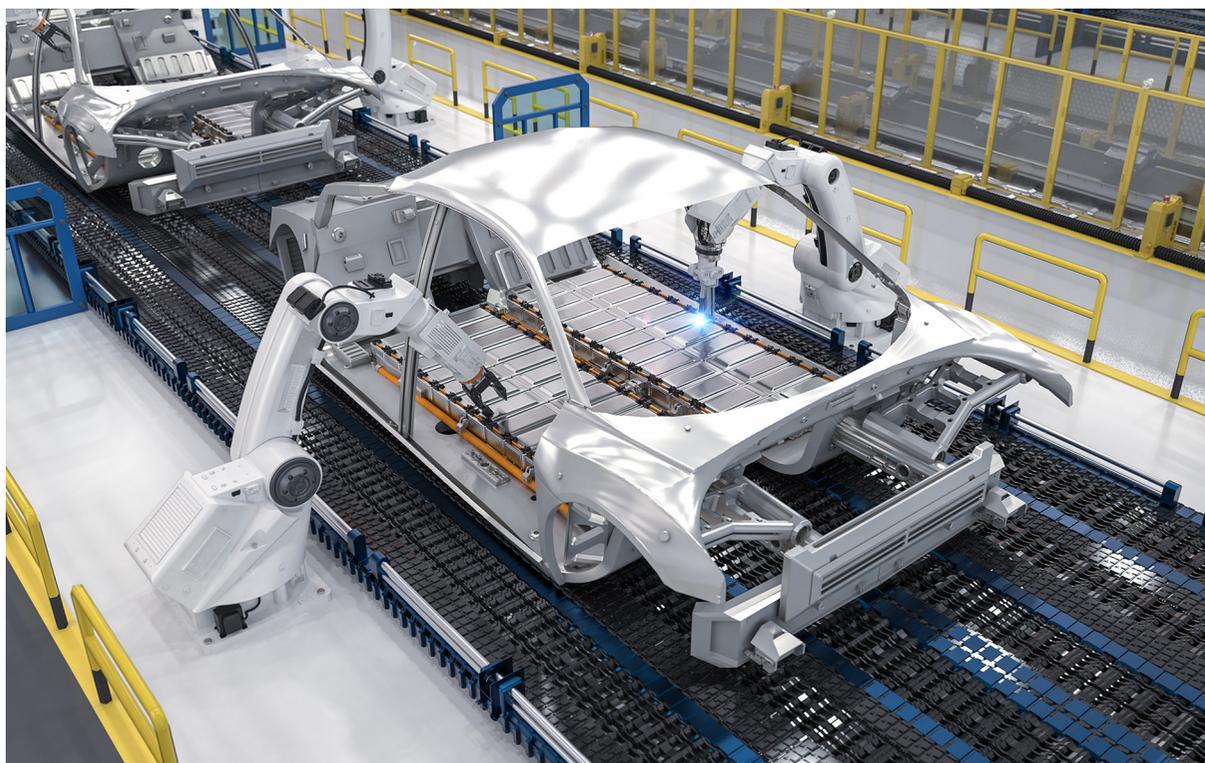
$$Z_{\text{заряд}} = c_{\text{эс}} \cdot C_{\text{ЭМ}} = 15 \cdot 70 = 1050 \text{ руб.}$$

В среднем одного полного цикла заряда электромобиля хватает на 700 км. Для жителей Москвы суточное расстояние, проезжаемое на автомобиле, составляет не более 50 км. Таким образом, электромобиль необходимо заряжать 1 раз в 14 дней ($700/50 = 14$ дней).

При установке 10 зарядных станций с двумя каналами зарядки одновременно могут заряжаться 20 электромобилей. Проведем статистику на 2023 г. по количеству электромобилей в одном районе Москвы.

Аккумулятор в электромобиле в сборочном цехе

Источник: [phonlamai / depositphotos.com](https://phonlamai.depositphotos.com)



Год	Электромобиль, шт.	Одновременное использование, шт.	Доход в месяц, руб.	Затраты, руб.	Прибыль, руб.
2024				10 656 295	-10 656 295
2025	95	7	154 350		-8 804 095
2026	190	14	308 700		-5 099 695
2027	280	20	441 000		192 305
2028	280	20	441 000		5 484 305
2029	280	20	441 000		10 776 305
2030	280	20	441 000		16 068 305

Таблица 1. Срок окупаемости проекта для варианта без замены трансформаторов в ТП с учетом использования неполной разницы дневного максимума и ночного минимума без учета дисконтирования

Год	Электромобиль, шт.	Одновременное использование, шт.	Доход в месяц, руб.	Затраты, руб.	$(1+E)^{-t}$	Прибыль, руб.
2024				10 656 295	1	-10 656 295
2025	95	7	154 350		0,8621	-9 059 513
2026	190	14	308 700		0,7432	-6 306 403
2027	280	20	441 000		0,6407	-2 915 818
2028	280	20	441 000		0,5523	6 952
2029	280	20	441 000		0,4761	2 526 473
2030	280	20	441 000		0,4104	4 698 310

Таблица 2. Срок окупаемости проекта для варианта без замены трансформаторов в ТП с учетом использования неполной разницы дневного максимума и ночного минимума с учетом дисконтирования

Согласно предыдущему расчету было получено, что на 1633 человека приходится 1 владелец автомобиля, так мы получим текущее количество электромобилей в районе:

$$N_{\text{ЭМ-Район}} = \frac{N_{\text{чел-Район}}}{1633} = \frac{155807}{1633} = 95,4 \rightarrow 95 \text{ электромобилей.}$$

Получим, что при зарядке 1 раз в 14 дней одновременно будут заряжаться:

$$N_{\text{ЭМ-одновр}} = \frac{N_{\text{ЭМ-Район}}}{14} = \frac{95}{14} = 6,79 \rightarrow 7 \text{ электромобилей.}$$

Суточный доход составит:

$$D_{\text{сут}} = N_{\text{ЭМ-одновр}} \cdot 3_{\text{Заряд}} = 7 \cdot 1050 = 7350 \text{ руб.}$$

В связи с неплановыми ситуациями, количество электромобилей в сутки может быть меньше. Введем коэффициент неравномерности $k_{\text{нер}}$ равный 0,7. Тогда ежемесячный доход составит:

$$D_{\text{мес}} = D_{\text{сут}} \cdot k_{\text{нер}} \cdot N_{\text{дней в мес.}} = 7350 \cdot 0,7 \cdot 30 = 154350 \text{ руб.}$$

При таком соотношении, данный проект откупится за:

$$C_{\text{окуп}} = \frac{Z_{\text{з}}}{D_{\text{мес}} \cdot 12} = \frac{10656295}{154350 \cdot 12} = 5,75 \text{ лет.}$$

Также необходимо добавить еще одно условие, которое сократит срок окупаемости. Ежегодно число электромобилей в Москве растет в 2 раза. Соответственно, максимальное число владельцев электромобилей, заряжающихся на данном паркинге, может достичь не более 280. В таблицах 1 и 2 представлены сроки окупаемости данного проекта без учета дисконтирования и с учетом дисконтирования, соответственно. Ключевая ставка дисконтирования принята равной 16% годовых, согласно данным Центрального банка России.

Получим, что данный проект окупается в интервале от 2,9 до 4 лет. Для наглядности, выполненные расчеты окупаемости представлены на рис. 5.

Для жителей Москвы суточное расстояние, проезжаемое на автомобиле, составляет не более 50 км. Таким образом, электромобиль необходимо заряжать 1 раз в 14 дней ($700/50 = 14$ дней)

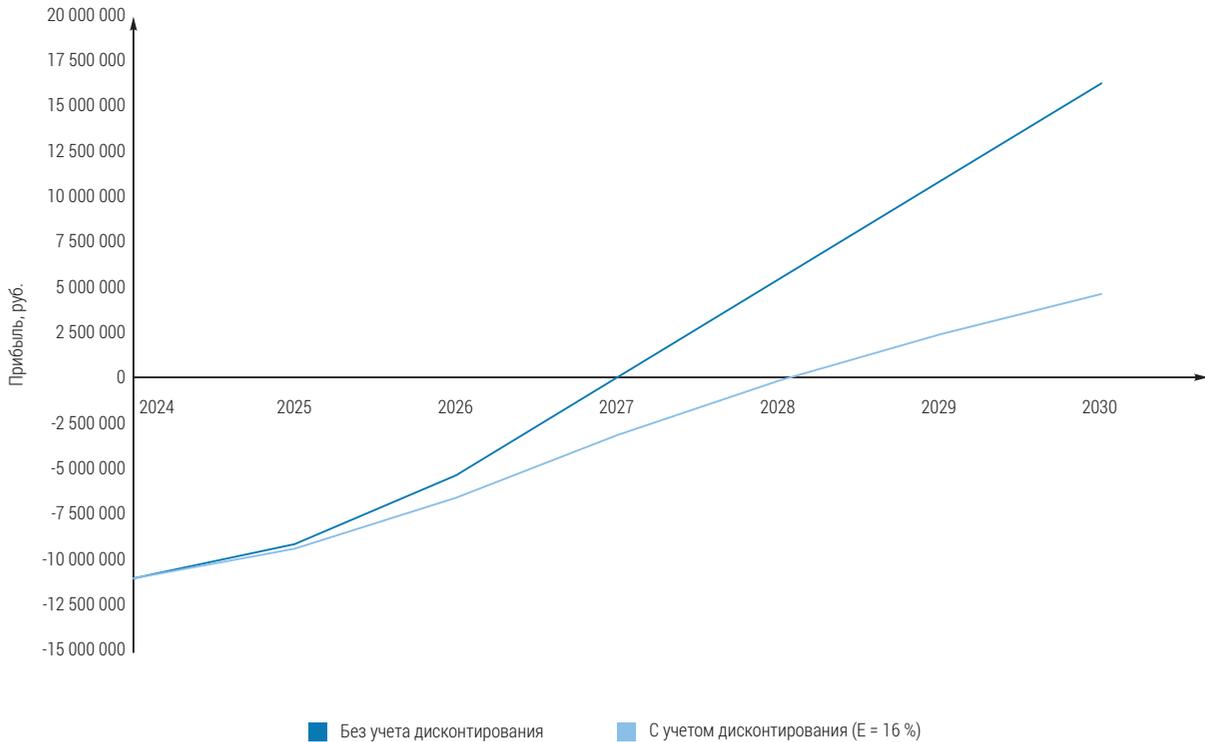


Рис. 5. Окупаемость проекта для варианта без замены трансформаторов в ТП с учетом использования неполной разницы дневного максимума и ночного минимума (ЗС в количестве 10 шт.)

Сравнительный анализ. Расчет остальных четырех вариантов был проведен аналогично. Результат сведен и представлен в таблице 3. При зарядке ночью, суточный график нагрузки данной ТП будет выровнен относительно провала напряжения. При этом с применением технологии V2G днем от электромобилей можно выдавать лишнюю электроэнергию обратно в сеть, тем самым снижая дневной максимум. Для привлечения владельцев электромобилей возможно обеспечить продажу э/э днем за более высокую цену, чем при заряде ночью за более низкую.

Также при успешном внедрении данного проекта для бизнес-центров с РТП (с большим количеством секций) можно будет со временем увеличивать количество зарядных станций, еще сильнее выравнивая график нагрузки.

Заключение

В рамках данной работы были рассмотрены различные способы по установке зарядных станций с применением технологии V2G для выравнивания нагрузки бизнес-центра.

Таким образом, сравнивая варианты по замене трансформаторов в ТП на более мощные и без замены (только за счет разницы в нагрузке между дневным максимумом и ночным провалом) при условии установки 10 зарядных станций наиболее экономически выгодным является второй вариант с затратами на 2,44 млн руб. меньше и сроком окупаемости почти на полгода короче. При этом прибыль на 2030 г. будет на 2,44 млн руб. больше. Получим, что вариант с заменой трансформаторов менее выгодный и не целесообразный.

При сравнении вариантов с заменой трансформаторов в ТП с использованием

Электромобили V2G могут выдавать лишнюю электроэнергию обратно в сеть днем. Для стимулирования владельцев электрокаров возможно обеспечить продажу э/э днем за более высокую цену



Парковка электромобилей в Москве

Источник: Агентство городских новостей «Москва»

полной разницы нагрузок и без замены при условии установки 20 зарядных станций можно сделать следующий вывод: затраты с заменой трансформаторов будут на 2,456 млн руб. больше, срок окупаемости возрастет менее, чем на полгода, при этом прибыль на 2030 г. будет на 2,456 млн руб. больше. Получим, что вариант без замены трансформаторов с использованием полной разницы нагрузки между дневным максимумом и ночным провалом наиболее экономически выгоден.

В данном исследовании был также проработан вариант с использованием всех возможных способов увеличения свободной мощности для установки зарядных станций. В случае, если одновременно заряжаться могут 46 электромобилей, срок окупаемости составит 4,2 года с первоначальными затратами в 27,171 млн руб., а прибыль на 2030 г. будет 22,31 млн руб.

Наиболее перспективным вариантом с точки зрения инвестиций является вариант № 2. Это связано с тем, что капиталъ-

Таблица 3. Сравнение вариантов установки ЗС в ТП для оптимизации графика нагрузки бизнес-центра

Вариант	Стоимость, руб.	Срок окупаемости, год	Количество ЗС, шт.	Прибыль на 2030 год без дисконтирования, руб.	Прибыль на 2030 год с дисконтированием, руб.
Замена трансформаторов в ТП без учета использования разницы дневного максимума и ночного минимума	13 096 067	3,5–5	10	13 628 533	2 258 538
Без замены трансформаторов в ТП с учетом использования неполной разницы дневного максимума и ночного минимума	10 656 295	2,9–4	10	16 068 305	4 698 310
Замена трансформаторов в ТП с учетом использования полной разницы дневного максимума и ночного минимума	27 170 653	4,2–6,1	23	22 309 547	- 561 445
Без замены трансформаторов в ТП с учетом использования полной разницы дневного максимума и ночного минимума	20 794 590	3,7–5,2	20	23 922 810	3 530 379
Замена трансформаторов в ТП с учетом использования неполной разницы дневного максимума и ночного минимума	23 251 133	3,9–5,6	20	21 466 267	1 073 836

В случае, если одновременно заряжаться могут 46 электромобилей, срок окупаемости составит 4,2 года с первоначальными затратами в 27,171 млн руб., а прибыль на 2030 г. будет 22,31 млн руб.

ные вложения минимальны при высоком показателе прибыли на 2030 г. При этом для энергосистемы более эффективным будет вариант № 4. Количество зарядных станций возрастает в 2 раза, тем самым увеличивая количество электроэнергии, выдаваемой обратно в сеть, для покрытия пиков нагрузки и подъема ночного провала. Прибыль на 2030 г. также достаточно существенна.

Предлагаемое решение является обоюдно выгодным, как для владельцев электромобилей, так и для энергосистемы московского региона. Владельцы электромобилей могут получить потенциальный дополнительный доход или закрепленное место на крытом паркинге. При этом снижение неравномерности графика нагрузки

также имеет неоспоримое значение для создания более устойчивой и эффективной энергетической системы.

Реализация предлагаемых мероприятий требует совместных усилий и партнерства между государственными органами власти, предприятиями, исследовательскими институтами и обществом. V2G представляет собой инновационную технологию, которая может улучшить эффективность энергетической системы и приносить выгоды владельцам электромобилей. Решение вызовов, связанных с ее внедрением, имеет стратегическое значение для будущего энергетической устойчивости [18].

Система V2G не только снижает затраты владельцев электромобилей на зарядку и обслуживание, но также способствует увеличению срока службы батареи и поддерживает развитие местной экономики. Экономические преимущества системы V2G не ограничиваются только владельцами электромобилей, они также оказывают положительное воздействие на общественный сектор и инфраструктуру. Это делает V2G важным элементом устойчивого и экономически выгодного транспорта и энергетики, но для успешного внедрения V2G рекомендуется активное участие государственных органов, инвестиции в инфраструктуру, образование и стимулирование экономических выгод [19].



Использованные источники

1. Алиев К. И. Оценка эффективности и качества использования транспортных средств / К. И. Алиев, А. Ф. Гасанов, А. Ю. Исаев // *Аграрная наука*. 2011. № 10. С. 30–32.
2. Николаева Т. А. Электроэнергия для электромобилей / Т. А. Николаева, Л. А. Чердакова // *Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции: Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 26 марта 2021 г. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. С. 213–216.*
3. Гурьянов С. Г. Развитие рынка и популяризация электромобилей в крупных городах / С. Г. Гурьянов, Р. Ф. Шаихов // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2022. Т. 3. С. 197–201.
4. Загайнов М. А. Развитие электромобилей / М. А. Загайнов, Е. А. Костенков, Д. С. Кузнецов // *Colloquium-Journal*. 2019. № 16–1(40). С. 47–48.
5. Студенков Н. О. Зарядная станция переменного тока для электротранспорта с возможностью зарядки двух электромобилей одновременно / Н. О. Студенков, В. О. Касьянов // *Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции*. 2020. № 1–1. С. 248–249.
6. Ахмадеев А. Р. Влияние электромобилей и зарядных станций на электрические сети // *Энергоэксперт*. 2018. № 1(65). С. 24–28.
7. Лимарев А. С. Обзор возможности применения электромобилей / А. С. Лимарев, И. Ю. Мезин, М. Ю. Воронников // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2021. Т. 12. № 1. С. 87–90.
8. Кузнецова Л. П. Электромобили, современные достижения и перспективы / Л. П. Кузнецова, В. А. Куликов // *Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2013): Сборник статей V Международной научно-технической конференции, Курск, 30 ноября 2013 г. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2013. С. 71–74.*
9. Мубораккадамов Ф. М. История появления и перспективы развития электромобилей / Ф. М. Мубораккадамов, М. М. Мишин // *Наука и Образование*. 2022. Т. 5. № 2.
10. Реут А. А. Этапы формирования электромобилей в России и в мире // *Аллея науки*. 2021. Т. 1. № 3(54). С. 223–230.
11. Сусаренко М. Ю. Система V2G (Vehicle To Grid) как важнейший элемент интеграции электромобилей в энергетическую систему страны // *Флагман науки*. 2023. № 8(8). С. 383–387.



Электрокар Audi на Turin Motor Show

Источник: LuigiB2302 / depositphotos.com

12. Мамедов О. М. Влияние электромобилей на энергетическую систему мегаполиса // *Энергосбережение*. 2017. № 4. С. 56–59.
13. Хитрых Д. Электромобили: мировые тренды, проблемы и перспективы // *Энергетическая политика*. 2021. № 1(155). С. 22–33.
14. Калашников В. И. Анализ концепции Vehicle-to-grid / В. И. Калашников, А. А. Чепига // *Вестник Донецкого национального технического университета*. 2019. № 2(16). С. 89–94.
15. Давидов А. О. Механизмы старения и деградации литий-ионных аккумуляторов / А. О. Давидов, Б. В. Жмуров, В. П. Степанченко // *Электропитание*. 2018. № 3.
16. Калинин В. В. Обоснование применения проточных батарей в электромобилях // *Международный научный журнал*. 2016. № 1. С. 66–70.
17. Федотов А. А. Исследование работы ячейки ванадиевой проточной батареи / А. А. Федотов, А. Б. Тарасенко // *Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов: Материалы VI Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и XII школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э. Э. Шпильрайна, Махачкала, 12–15 октября 2020 г. Выпуск 8. – Махачкала: Общество с ограниченной ответственностью «АЛЕФ», 2020. С. 438–442.*
18. Габдерахманова Т. С., Директор Л. Б., Попель О. С., Тарасенко А. Б. Сравнительный анализ электрохимических накопителей энергии // *International Scientific Journal Life and Ecology*. 2015. № 2. С. 177.
19. Наумкин, Р. Б. Оптимизация загрузки трансформаторов 6(10)/0,4 КВ // *Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс-2012: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Кемерово, 1–2 ноября 2012 г. Т. 2. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2012. С. 60–63.*