

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51>

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ МОДЕЛИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯМИ

Научная статья

Поляков Д.К.^{1,*}, Коровкин Н.В.², Гарайшина Е.Р.³¹ORCID : 0009-0003-9632-5319;²ORCID : 0000-0002-1173-8727;^{1,2,3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (fanat1026[at]yandex.ru)

Аннотация

Данная статья посвящена моделированию воздействия электрической нагрузки, создаваемой электромобилями, на суточный график нагрузки. Для реализации поставленной задачи используется программный комплекс «MATLAB». Используемая для моделирования система дорог совпадает с реальной упрощенной системой дорог г. Санкт-Петербург и представляется в качестве взвешенного графа, что позволяет произвести моделирование передвижения электрокара между какими-либо двумя вершинами по самой короткой дистанции с помощью алгоритма Дейкстры. Также в данной части работы рассчитывается энергопотребление, созданное текущим количеством электромобилей, прогнозируется рост энергопотребления с ростом их количества и отображается влияние электрокаров на электрическую нагрузку г. Санкт-Петербург. В результате определено, что текущее количество электромобилей влияет на суточный график нагрузки незначительно, величина влияния равна 0,045%. С увеличением числа электромобилей до 20 000, данный показатель стал равен 2,142%, что уже оказывает значительное влияние. Созданная модель предоставляет возможность оценить потребляемую электрокарами мощность в момент времени, и в зависимости от результатов использовать различные методы по сглаживанию суточного графика нагрузки, что позволяет учитывать данные значения при проектировании системы ЭЭС.

Ключевые слова: моделирование, электромобили, электрозаправочные станции, потребление электроэнергии.

DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT MODEL OF ELECTRIC VEHICLE ELECTRICITY CONSUMPTION

Research article

Polyakov D.K.^{1,*}, Korovkin N.V.², Garaishina Y.R.³¹ORCID : 0009-0003-9632-5319;²ORCID : 0000-0002-1173-8727;^{1,2,3} Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (fanat1026[at]yandex.ru)

Abstract

This article is dedicated to modelling the impact of electric load generated by electric vehicles on the daily load schedule. To fulfil this task, the software package "MATLAB" is used. The road system used for modelling coincides with the real simplified road system of St. Petersburg and is represented as a weighted graph, which allows modelling the movement of an electric car between any two vertices by the shortest distance using the Dijkstra algorithm. Another part of this paper calculates the energy consumption created by the current number of electric cars, predicts the growth of energy consumption with the increase of their number and shows the impact of electric cars on the electric load of St. Petersburg. As a result, it is determined that the current number of electric cars influences the daily load schedule insignificantly, the influence value is equal to 0.045%. With the increase in the number of electric cars up to 20 000, this indicator became equal to 2.142%, which already has a significant impact. The created model provides an opportunity to evaluate the power consumed by electric cars at the moment of time, and depending on the results, to use different methods to smooth the daily load schedule, which allows taking into account these values when designing the EVCS system.

Keywords: modelling, electric vehicles, electric fuelling stations, electricity consumption.

Введение

В связи с расширением автопарка электромобилей в мире и в Российской Федерации, в частности, для решения задачи по эффективному расположению электрозаправочных станций в мегаполисах, требуются современные системные подходы. Целью данной работы является исследование воздействия электромобилей на энергосистему г. Санкт-Петербурга.

Посредством программного комплекса «MATLAB» моделируется упрощенная система улично-дорожной сети города, что позволяет произвести расчеты энергопотребления в динамике роста количества электромашин.

Моделирование системы дорог города при помощи теории графов

Построение модели перемещений электроавтомобиля по городу выполним с помощью теории графов, раздела дискретной математики, который изучает графы. Граф – это множество точек (вершин, узлов), которые соединены множеством линий (ребер, дуг). Сам граф обозначим буквой G, а множества узлов и ребер между ними, как V и E [13].

Рассмотрим основные типы графов: ориентированный, неориентированный и взвешенный. В ориентированном графе ребрам присвоено направление, в графе без ориентации – ребра не имеют направления, во взвешенном – каждому ребру соответствует некоторое значение, называемое весом.

Главными преимуществами теории графов являются наглядность (отображение в матричной форме) и удобство поиска минимального пути между двумя вершинами графа. Простейший граф из 6 вершин показан на рисунке 1.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

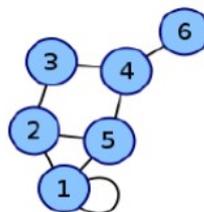


Рисунок 1 - Представление простейшего графа

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.1>

Разберем некоторые определения в теории графов. На рисунке 1 граф представлен в виде матрицы смежности. Это квадратная матрица, в которой значение элемента матрицы a_{ij} равно числу ребер, выходящих из вершины графа i в вершину j . Матрица смежности простого графа определяется как бинарная матрица, содержащая нули на главной диагонали. Также возможно представление в виде матрицы инцидентности. Матрица инцидентности – это матрица, размера $n \times m$, где n – число вершин V , m – число ребер E , элементы которой принимают значения: $b_{ij} = 1$, если v_j и e_j соединены между собой, и $b_{ij} = 0$, если между v_j и e_j отсутствует связь. В дополнение вводится понятие матрицы весов. Это квадратная матрица, в которой элемент ребра w_{ij} равен весу ребра (v_i, e_j) . Таким образом, для теории графов вводится широкий математический аппарат, который позволяет переводить графы в числовой вид для дальнейшего вычисления.

Для дальнейших расчетов возьмем карту автодорог г. Санкт-Петербург, которую представим в виде неориентированного графа. Вершинами графа будут пересечения и изгибы дорог, а весами ребер графа – длины соответствующих прямых дорог. Карта реальных дорог и соответствующий ей граф представлены на рисунке 2.

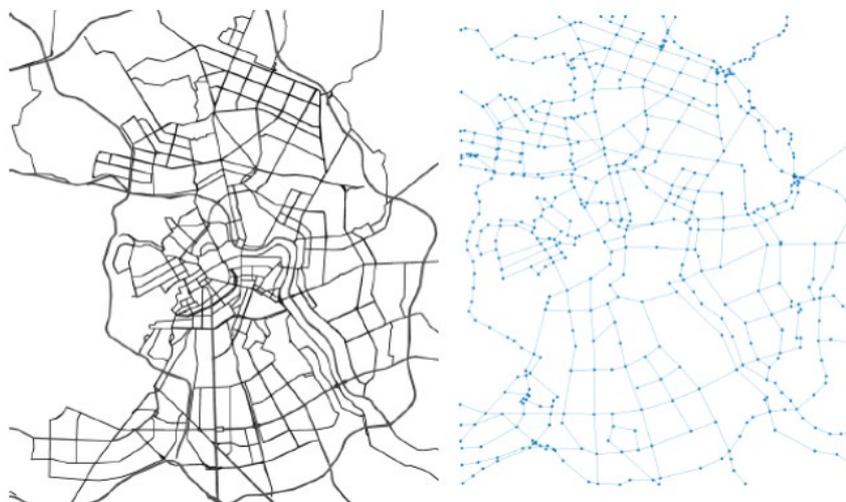


Рисунок 2 - Карта реальных дорог Санкт-Петербурга и соответствующий ей граф

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.2>

Граф, соответствующий г. Санкт-Петербург, включает в себя 550 вершин и практически все важнейшие связующие дороги. Перемещение электроавтомобиля по улицам опишем с помощью алгоритма нахождения кратчайшего пути. Для моделирования перемещения электроавтомобиля в программной среде «MATLAB» воспользуемся алгоритмом Дейкстры.

Принцип действия алгоритма Дейкстры

Впервые алгоритм был представлен нидерландским ученым Эдсгером Дейкстрой в 1959 году [14]. Изначально алгоритм был разработан для поиска минимальных дистанций между выбранным узлом и всеми остальными. Работает он по следующим этапам:

1. Инициализация. Исходный узел, от которого будет происходить поиск минимальных расстояний – начальный узел. А узел, до которого необходимо найти дистанцию – Y .
2. Все узлы обозначим как «непосещенные». Составим набор из таких узлов и назовем его U .

3. Присвоим временное значение расстояния каждому узлу. Для начального узла оно будет равным 0, для всех остальных – бесконечности. Установим начальный узел в качестве текущего.

4. Произведем оценку всех «непосещенных» соседей для текущего узла и вычислим их временно расстояние до него. Проанализируем вычисленное предварительное расстояние и текущее присвоенное значение, выберем наименьшее.

5. После посещения всех соседних вершин текущего узла, отмечаем его как «посещенный» и исключаем из набора U .

6. Алгоритм останавливается в тот момент, когда U обозначается «посещенным» или минимальное временное расстояние между узлами в наборе U принимает значение бесконечности. Для первой ситуации это означает, что расстояние между двумя вершинами вычислено, и оно является конечным. Во второй ситуации – не обнаружена связь между исходным узлом и остальными узлами в наборе U .

7. В обратной ситуации выбираем следующий узел с минимальным временным расстоянием в качестве текущего и производим повтор этапа 3.

В нашем случае алгоритм моделирует перемещение электромобиля по самой короткой дистанции. Например, от дома до офиса для группы «Рабочий» или от текущего расположения до ближайшей ЭЗС. Модель дорог г. Санкт-Петербург подходит для данного алгоритма, так как вес ребра определяется расстоянием соответствующих спрямленных участков дорог между вершинами графа.

Алгоритм работы разработанной модели

Иллюстрация упрощенного описания алгоритма работы разработанной модели представлена в виде блок – схемы на рисунке 3.

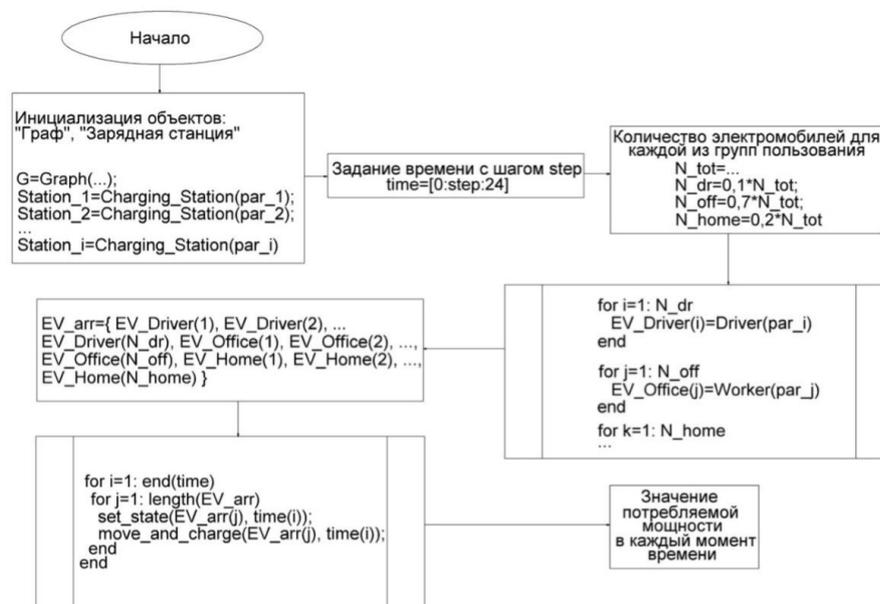


Рисунок 3 - Блок – схема разработанной модели

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.3>

Первые шаги модели – загрузка графа и введение объектов класса «Зарядная станция» в нужном количестве. Создается вектор времени с дискретным шагом 0,002 ч. Далее, согласно долям между подгруппами модели, вычисляется общее число электрокаров и число пользователей для каждой подгруппы.

Основной цикл – это вычисление координат и текущей скорости электрокара в каждый дискретный момент времени и вычисление величины SoC (с англ. – «state of charge» – «состояние заряда») для всех объектов класса «Электромобиль» в массиве. Происходит последовательный вызов методов данного класса: метода «set_state» для вычисления состояния электрокара в данный момент времени и метода «move_and_charge». Свойство «state» класса, которое описывает состояние электромобиля, представляется в виде строкового литерала, принимающего значения «office», «home» и «driving_home» для класса «Worker», моделирующего поведение реального работника.

Потребляемая мощность из сети вычисляется как производная от SoC по времени, выражается в кВт·ч.

Пробный расчет разработанной модели

Произведем калибровку модели, взяв за исходный граф систему дорог г. Санкт-Петербург. В начале процесса значения SoC выставляются случайным образом при помощи равномерного распределения от 0% до 100%. Для того чтобы уточнить моделирование, необходимо рассчитать характерные значения SoC для всех групп и подгрупп в начальный момент времени. Первый шаг – это выполнение пробного расчета для получения значений SoC в конце суток. Посчитанные значения принимаются как новые начальные, и расчет повторяется снова. После нескольких итераций получатся характерные значения SoC для начала расчета в каждой группе. В дополнение необходимо

следовать довольно обширной выборке для получения более достоверных результатов. Таким образом, был проведен расчет, в котором количество пользователей электрокаров составило 5000.

Количество интервалов перемещения совпадает с заданным для данной модели. Форма распределения остается неизменной несмотря на то, что трафик снижает скорость в определенное время суток. Осуществим оценку потребляемой мощности в течение суток. Вычисленное значение потребляемой мощности, зависящее от времени суток, представлено на рисунке 4.

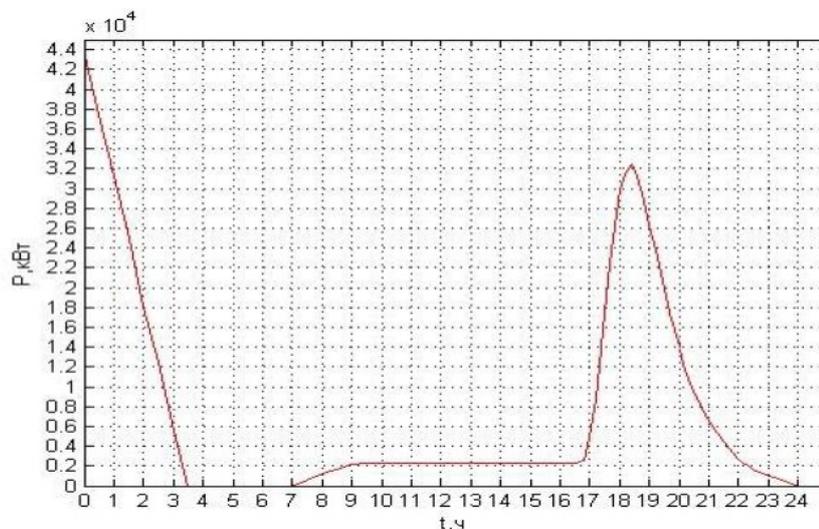


Рисунок 4 - Потребляемая мощность для N=5000
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.4>

В интервале от 0 до 3 часов происходит ночная зарядка дома. Из-за того, что первоначальные значения уровня заряда батареи описывались равномерным распределением, происходит постепенный «выход» из сети аккумуляторов, у которых в исходном варианте был большой уровень заряда. На интервале с 7 до 9 работники выезжают на свои рабочие места, и, так как зарядка не осуществляется, то потребление мощности из сети отсутствует. С прибытия на работу и отъезда с нее учитывается, что некоторая часть работников заряжает свои электрокары от бытовых розеток, из-за чего наблюдается постоянная величина на данном интервале. На интервале от 18 до 21 появляется «пик» нагрузки, так как произошло возвращение домой и последующая подзарядка. Полученные значения SoC в 24 часа принимаем вместо исходных и производим новый расчет. После нескольких таких итераций получим потребление мощности в течение суток, который приведен на рисунке 5.

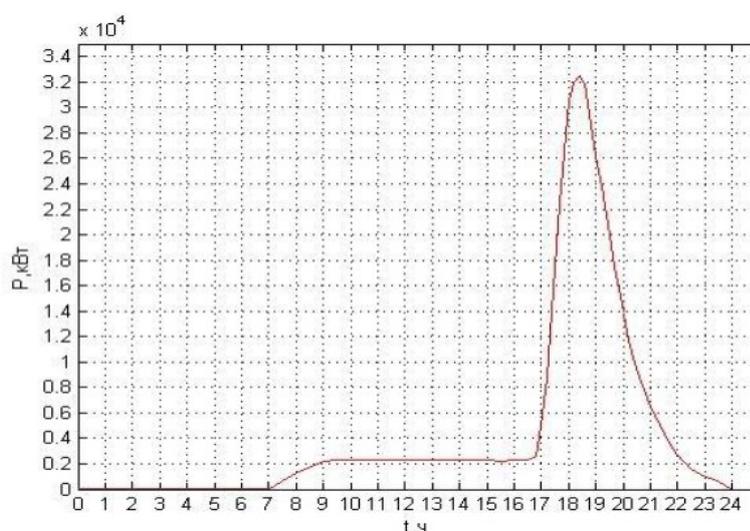


Рисунок 5 - Потребляемая мощность для N=5000 после калибровки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.5>

Из рисунка 5 видно, что промежуток от 0 до 4 часов характеризуется отсутствием потребления мощности, так как батарея зарядилась до максимума на интервале от 17 до 24. Следуя из всего вышперечисленного, заметно, что группа «Рабочий» не отличается полной разрядкой аккумулятора, так как суммарно в дороге она проводит около 2 часов, и

что зарядка производится в основном от бытовых розеток. Введем допущение о том, что величина SoC для данной группы в начале расчета равна 100%, то есть полностью заряженной батарее.

По официальной статистике ПАО «Россети Ленэнерго» в г. Санкт-Петербург и Ленинградской области сегодня работает 53 зарядные станции, 40 из которых осуществляют быструю зарядку, а 13 – медленную [17]. Максимальное их скопление отмечается в центральном районе города. Медленная зарядка происходит с разъемом Type 2, а быстрая – CHAdeMO и CCS. Модель Porsche Taycan снабжена разъемом CHAdeMO, то есть для нее возможна ускоренная зарядка мощностью до 50 кВт. Введем допущение, что все ЭЭС города предусматривают зарядку на мощности 50 кВт. Разместим станции на графе в узлах, исходя из реального их местоположения, и введем минимальное число зарядных устройств, равное 3.

Имитация потребления активной мощности электрокарами в г. Санкт-Петербург

Произведем вычисление потребления активной мощности г. Санкт-Петербург по приведенным выше данным. Количество электрокаров примем равным 420 шт., а число ЭЭС – 53 шт.; разместим их в соответствующие узлы графа. Получившийся нагрузка, приведена на рисунке 6.

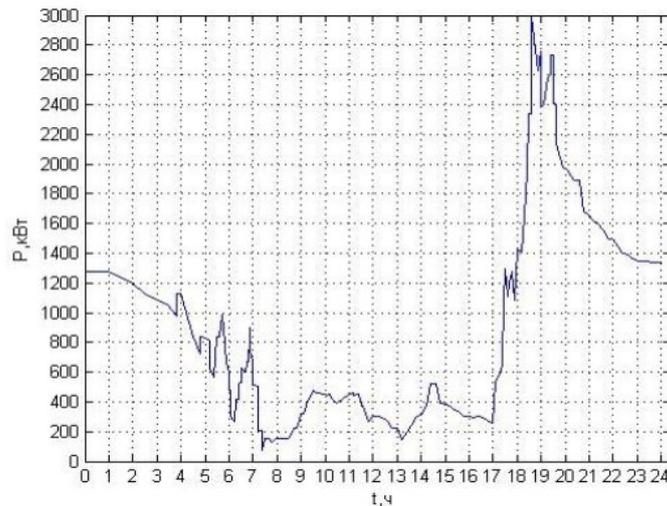


Рисунок 6 - Вычисленная потребляемая энергия для текущего числа пользователей
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.6>

Из графика видно, что в часы максимума нагрузки потребление равно 3000 кВт и 75 кВт в часы минимума. Оценим влияние числа электромобилей на базовый суточный график нагрузки, как среднее изменение нагрузки в каждой точке графика, используя формулу 1.

$$\Delta = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|P_{\text{общ},i} - P_{\text{баз},i}|}{P_{\text{баз},i}} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

где N – количество точек данного графика;

$P_{\text{общ},i}$ – общая нагрузка в i -ой точке;

$P_{\text{баз},i}$ – базовая нагрузка в том же месте.

Произведя расчет по формуле 1, получаем Δ для 417 пользователей:

$$\Delta_{420} = 0,045\%$$

Эта величина получилась довольно небольшой. График загрузки ЭЭС приведен на рисунке 7.

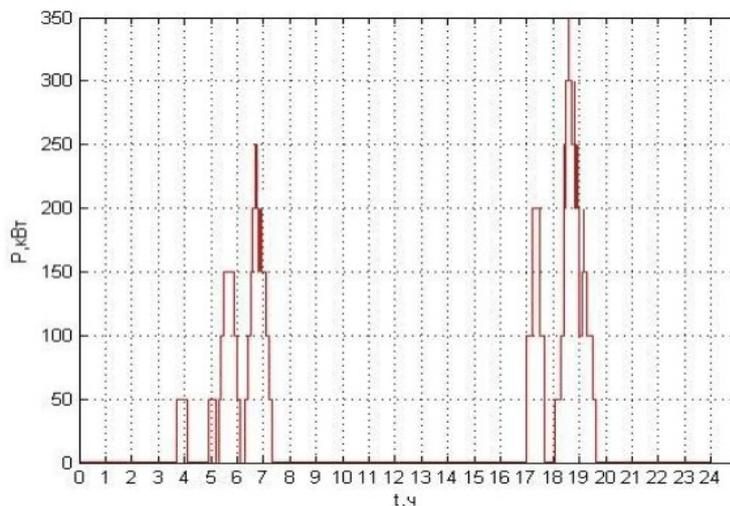


Рисунок 7 - График загрузки ЭЭС
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.7>

Проанализируем величину интеграла под графиком данной функции. Из расчетов в «MATLAB» она получилась равной 606,4939 кВт·ч. Исходя из числа ЭЭС в текущий момент – 53, числа свободных зарядных устройств – 3 и средней выдаваемой мощности – 50 кВт, получим величину загрузки ЭЭС в течение суток при 420 пользователях:

$$\frac{606,4939}{50 \cdot 3 \cdot 72} \cdot 100\% = 5,62\%$$

Полученное число демонстрирует, что текущее количество электрокаров в г. Санкт-Петербург не влияет существенно на график нагрузки. Отметим, что при нынешнем уровне генерации и потребления число электромобилей должно быть на порядок выше, чтобы оказывать влияние на суточный график нагрузки. Спрогнозируем, какое влияние будет оказывать увеличение количества электрокаров. Примем количества пользователей 5000, 10000, 15000, 20000, но оставим пропускную способность сети такой же, так как данные для нее конечны. Прогноз влияния роста парка электромобилей представлен на рисунке 8.

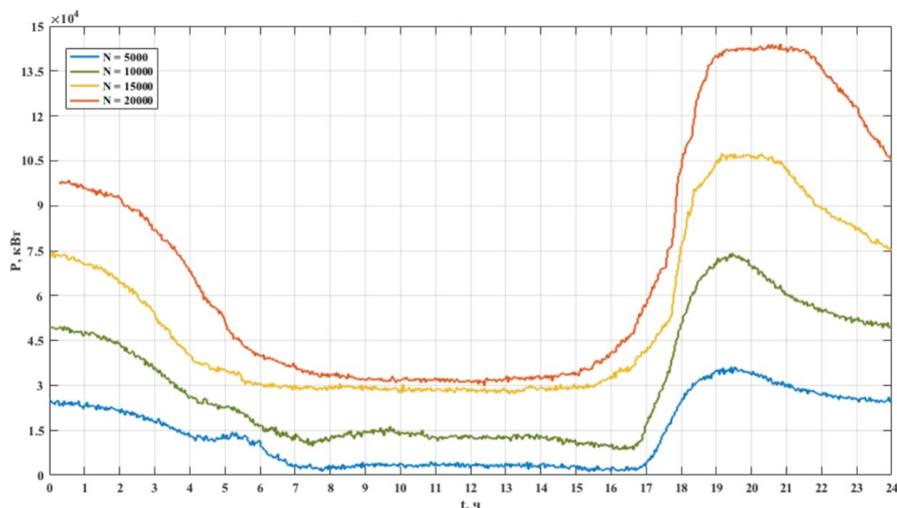


Рисунок 8 - Потребление активной мощности электрокарами с увеличением их количества
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.8>

Произведем оценку влияния для каждого числа пользователей:

$$\begin{aligned} \Delta 5000 &= 0,536\%, \\ \Delta 10000 &= 1,071\%, \\ \Delta 15000 &= 1,61\%, \\ \Delta 20000 &= 2,142\%. \end{aligned}$$

На рисунке 9 приведен полученный график нагрузки с учетом влияния электрокаров.

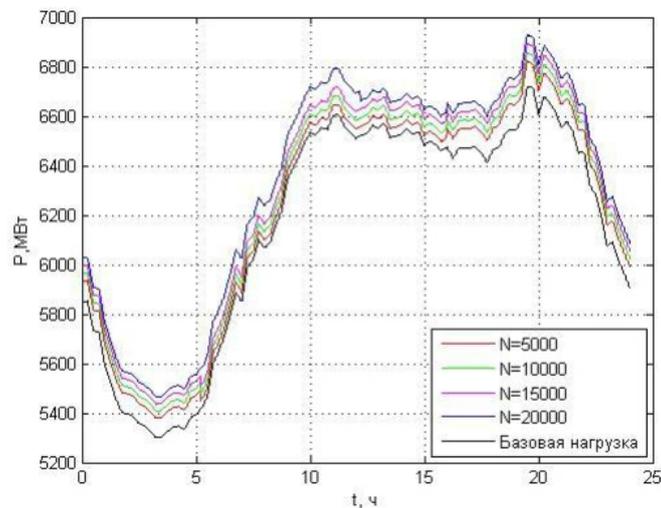


Рисунок 9 - График нагрузки с учетом влияния электрокаров
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.51.9>

Из полученного графика можно отметить значительное увеличение потребления в часы с 17 до 22 и небольшое сглаживание в часы с 1 до 5. Увеличение нагрузки ведет к увеличению расхода резервной мощности. Резервная мощность является важной составляющей управления потоками мощности в энергосистеме и состоит из нескольких элементов:

- Оперативного резерва, который необходим в случае отказа энергетического оборудования, чтобы компенсировать аварийное снижение мощности электростанций.
- Ремонтного резерва, который возмещает мощность оборудования, выведенного в плановый ремонт.
- Стратегического резерва, который компенсирует нарушение баланса мощности при энергетическом строительстве.

То есть расход резерва мощности приводит к уменьшению надежности энергосистемы. Необходимо отметить и нулевой резерв мощность. Баланс между потребляемой мощностью и генерируемой создается при определенной частоте данной сети. Поддержание частоты котируется повышенными требованиями, так как из-за достаточно больших отклонений может случиться выход оборудования из строя, снижение КПД двигателей, сбой технологического процесса и дальнейшую порчу конечного продукта. Для избегания всего вышеперечисленного необходимо регулировать резервную мощность и поддерживать ее на оптимальном уровне. В нашем случае нагрузка от электромобилей снижает имеющуюся резервную мощность, за счет увеличения нагрузки в пиковые часы. Однако ранее было отмечено, что мощность, потребляемая электрокарами, немного сглаживает утренний провал на графике нагрузки. Все это указывает на необходимость стимулирования пользователей производить зарядку в утренние часы для сглаживания графика нагрузки и ограничения потребления электроэнергии в часы пиков.

Заключение

В данной работе был осуществлен тест модели на реальной энергосистеме города. По итогу вычислений, текущее количество электромобилей влияет на суточный график нагрузки незначительно, величина влияния равна 0,045%. При увеличении числа пользователей до 20000 данный показатель стал равен 2,142%, что уже оказывает существенное влияние.

В результате созданная модель дает возможность производить оценку потребляемой электрокарами мощности во времени и применять различные технологии по сглаживанию суточного графика нагрузки, что, в свою очередь, приводит к высокому практическому результату при проектировании системы ЭЭС.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Global EV Outlook 2022. — URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> (accessed: 13.08.2024).
2. Шустов П.М. Разработка эффективной модели потребления электроэнергии электромобилями / П.М. Шустов. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021. — 99 с.

3. Гарайшина Е.Р. Разработка эффективной модели потребления электроэнергии электромобилями / Е.Р. Гарайшина. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. — 101 с.
4. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 23.08.2021 № 2290-р. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202108240015> (дата обращения: 13.08.2024)
5. Plugshare — карта зарядных станций. — URL: <https://www.plugshare.com> (дата обращения: 13.08.2024).
6. Отчет о функционировании ЕЭС. — URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (дата обращения: 13.08.2024).
7. Метод Монте Карло. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_Монте-Карло (дата обращения: 13.08.2024).
8. Кадомская К.П. Теория вероятности и её приложения к задачам электроэнергетики. / К.П. Кадомская, М.В. Костенко, М.Л. Левинштейн. — Спб.: Наука, 1992. — 376 с.
9. Труд и занятость в России. 2021: Статистический сборник / Росстат. — М., 2021. — 177 с.
10. Автомобили в России: сколько их приходится на 1000 человек? — URL: <https://www.autostat.ru/news/48510/> (дата обращения: 13.08.2024).
11. ГОСТ Р МЭК 61851-1-2013. Системы токопроводящей зарядки электромобилей. — Москва: Стандартинформ, 2014.
12. Jun B. A data-based model for driving distance estimation of battery electric logistics vehicles / B. Jun, W. Yongxing, Z. Jiawei // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. — 2018.
13. Буркатовская Ю.Б. Теория графов / Ю.Б. Буркатовская; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — Ч. 1. — 200 с.
14. Левитин А.В. Глава 9. Жадные методы: Алгоритм Дейкстры / А.В. Левитин // Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. — М.: Вильямс, 2006. — С. 189–195.
15. Бадд Т. Объектно-ориентированное программирование в действии / Т. Бадд. — СПб.: Питер, 1997. — 304 с.
16. Автомобильные пробки в Санкт-Петербурге — исследования Яндекса. — URL: <https://yandex.ru/company/researches/2015/spb/jams> (дата обращения: 13.08.2024).
17. Электрозаправки в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. — URL: <https://lenenergo.ru/ev/> (дата обращения: 13.08.2024).
18. Tariff structure statement —Appendix 5: Price elasticity of demand. — URL: <https://www.aer.gov.au/system/files/Ausgrid%20Appendix%20Price%20Elasticity%20of%20Demand%20November%202015.pdf> (accessed: 13.08.2024).
19. Тарифы на электроэнергию по СПб — Петербургская сбытовая компания. — URL: https://www.pes.spb.ru/for_customers/electricity_tariffs/electricity_tariffs_for_st_petersburg/ (дата обращения: 13.08.2024).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Global EV Outlook 2022. — URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> (accessed: 13.08.2024).
2. Shustov P.M. Razrabotka jeffektivnoj modeli potreblenija jelektrojenergii jelektromobiljami [Development of an effective model of electric power consumption by electric vehicles] / P.M. Shustov. — St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2021. — 99 p. [in Russian]
3. Garajshina E.R. Razrabotka jeffektivnoj modeli potreblenija jelektrojenergii jelektromobiljami [Development of an efficient model of electric vehicle electricity consumption] / E.R. Garajshina. — St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2022. — 101 p. [in Russian]
4. Konceptcija po razvitiiju proizvodstva i ispol'zovanija jelektricheskogo avtomobil'nogo transporta v Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda [Concept for the development of production and use of electric motor transport in the Russian Federation for the period up to 2030]: Order of the Government of the Russian Federation from 23.08.2021 № 2290-r. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202108240015> (accessed: 13.08.2024) [in Russian]
5. Plugshare — karta zarjadnyh stancij [Plugshare – map of charging stations]. — URL: <https://www.plugshare.com> (accessed: 13.08.2024). [in Russian]
6. Otchet o funkcionirovanii EJeS [Report on the functioning of the UES]. — URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (accessed: 13.08.2024). [in Russian]
7. Metod Monte Karlo [Monte Carlo method]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_Монте-Карло (accessed: 13.08.2024). [in Russian]
8. Kadomskaja K.P. Teorija verojatnosti i ejo prilozhenija k zadacham jelektrojenergetiki [Probability theory and its applications to power engineering problems] / K.P. Kadomskaja, M.V. Kostenko, M.L. Levinstein. — Spb.: Nauka, 1992. — 376 p. [in Russian]
9. Trud i zanjatost' v Rossii. 2021: Statisticheskij sbornik [Labour and Employment in Russia. 2021: Statistical Collection] / Rosstat. — М., 2021. — 177 p. [in Russian]
10. Avtomobili v Rossii: skol'ko ih prihoditsja na 1000 chelovek? [Cars in Russia: how many per 1,000 people?] — URL: <https://www.autostat.ru/news/48510/> (accessed: 13.08.2024). [in Russian]
11. GOST R MJeK 61851-1-2013. Sistemy tokoprovodjashhej zarjadki jelektromobilej [GOST R MEC 61851-1-2013. Conductive charging systems for electric vehicles]. — Moscow: Standartinform, 2014. [in Russian]
12. Jun B. A data-based model for driving distance estimation of battery electric logistics vehicles / B. Jun, W. Yongxing, Z. Jiawei // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. — 2018.
13. Burkatovskaja Ju.B. Teorija grafov [Graph theory] / Ju.B. Burkatovskaja; Tomsk Polytechnic University. — Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2014. — Pt. 1. — 200 p. [in Russian]

14. Levitin A.V. Glava 9. Zhadnye metody: Algoritm Dejstry [Chapter 9. Greedy methods: Dijkstra's algorithm] / A.V. Levitin // Algoritmy. Vvedenie v razrabotku i analiz [Algorithms. Introduction to development and analysis]. — M.: Williams, 2006. — P. 189–195. [in Russian]
15. Badd T. Ob'ektno-orientirovannoe programmirovaniye v dejstvii [Object-oriented programming in action] / T. Badd. — SPb.: Piter, 1997. — 304 p. [in Russian]
16. Avtomobil'nye probki v Sankt-Peterburge — issledovaniya Jandeksa [Traffic jams in St. Petersburg – Yandex research]. — URL: <https://yandex.ru/company/researches/2015/spb/jams> (accessed: 13.08.2024). [in Russian]
17. Jelektrozapravki v Sankt-Peterburge i Leningradskoj oblasti [Electric petrol stations in St. Petersburg and Leningrad Oblast]. — URL: <https://lenenergo.ru/ev/> (accessed: 13.08.2024). [in Russian]
18. Tariff structure statement —Appendix 5: Price elasticity of demand. — URL: <https://www.aer.gov.au/system/files/Ausgrid%20%20Appendix%205%20Price%20Elasticity%20of%20Demand%20-%20November%202015.pdf> (accessed: 13.08.2024).
19. Tarify na jelektrojenergiju po SPb — Peterburgskaja sbytovaja kompanija [Electricity tariffs in St. Petersburg – St. Petersburg Power Supply Company]. — URL: https://www.pes.spb.ru/for_customers/electricity_tariffs/electricity_tariffs_for_st_petersburg/ (accessed: 13.08.2024). [in Russian]