

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

*ДУ СИЧЖОУ, д-р техн. наук, проф. А.О. ЛОБАШОВ,
д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Исследуется проблема определения рациональных параметров сети зарядных станций электромобилей. Проанализированы основные факторы, влияющие на размещение зарядных станций электромобилей. Разработана многоцелевая модель выбора места размещения зарядных станций. Предложена алгоритмическая модель для совершенствования метода «поиска по воробьям», который используется в качестве основы решения задачи определения рациональных параметров сети зарядных станций электромобилей.

Ключевые слова: транспортные системы, электромобили, зарядные станции, алгоритм «поиска по воробьям».

Введение. Сегодня в Китае количество автомобилей с электродвигателями стремительно увеличивается, завоевывая все большую популярность у населения. Они являются экологически чистыми и экономичными, т.к. не требуют расхода топлива и не выделяют вредных выбросов. Однако по техническим причинам запас хода электромобиля не очень велик, и для обеспечения непрерывной работы его надлежит своевременно заряжать. В связи с этим возникает потребность в развитии инфраструктуры для зарядки электромобилей. И важной тенденцией ее развития является повышение их эффективности и удобства для пользователей.

Между тем при строительстве современных зарядных станций существует проблема их нерационального расположения, заключающаяся в том, что одна часть зарядных станций используется интенсивно, другая простаивает. Это не только влияет на экономические результаты использования зарядных станций, но и не способствует непрерывной работе электромобилей.

Цель исследования – определение рациональных параметров размещения сети зарядных станций электромобилей.

Основная часть. *Факторы, влияющие на выбор места установки зарядных станций для электромобилей.* На выбор места для зарядной станции электромобиля влияет множество факторов. Только комплексное рассмотрение всех аспектов может повысить рациональность выбора места для зарядной станции. На опыте многолетней практической работы можно утверждать, что при выборе места для зарядной станции электромобиля в основном учитываются:

1) затраты на строительство. Строительство зарядных станций требует больших затрат: на рабочую силу, оборудование, снос существующих зданий, последующие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание и т.д. [1]. Только при полном учете всех статей издержек можно добиться того, чтобы зарядная станция удовлетворяла потребностям пользователей и обеспечивала экономическую эффективность использования. Если входная стоимость высока, то это приведет к длительному циклу восстановления инвестированного капитала и, соответственно, повлияет на экономические преимущества зарядной станции. Если низкая – это повлечет уменьшение размера зарядной станции или ее нерациональное расположение, что вызовет понижение уровня сервиса для пользователей [1]. Таким образом, стоимость строительства – один из основных факторов размещения зарядной станции;

2) расстояние зарядки. Современные электромобили имеют небольшой запас хода, поэтому их требуется своевременно заряжать после движения в течение определенного времени. Для достижения этой цели при строительстве зарядных станций следует учитывать расстояние между двумя соседними зарядными станциями, т.е. расстояние зарядки. Если расстояние слишком велико, то снижается возможность вовремя пополнить запасы электроэнергии в автомобиле, что, в свою очередь, влияет на готовность потенциальных клиентов пользоваться зарядной станцией. Если мало – это приведет к растрате зарядных ресурсов, увеличению стоимости строительства зарядных станций и снижению экономической выгоды от использования зарядных станций [2]. Таким образом, при выборе места расположения зарядной станции необходимо учитывать фактор расстояния до нее;

3) удовлетворенность пользователей. Если пользователь зарядной станции, управляющий электромобилем, имеет высокую степень удовлетворенности, это может мотивировать его снова воспользоваться этой станцией для зарядки своего электромобиля, что повысит коэффициент ее использования. Напротив, если пользователь не удовлетворен зарядной станцией, это приведет к снижению эффективности ее использования [3]. Поэтому при строительстве зарядной станции следует обращать внимание на удовлетворенность пользователей, среди которых в основном рассматриваются два аспекта:

– удовлетворенность расстоянием до зарядной станции, т.е. расстояние между пользователем и зарядной станцией соответствует потребностям пользователя. Чем дальше расстояние между ними, тем сложнее пользователю добраться до зарядки [4];

– удовлетворенность временем ожидания зарядки. Если время ожидания из-за очереди затягивается, это с большой вероятностью вызовет недовольство пользователя.

Следует отметить, большое количество зарядных станций в одном районе приведет к дополнительным материальным потерям. Поэтому необходимо обеспечить рациональный баланс между всеми факторами, влияющими на параметры сети зарядных станций [6–11].

Построение оптимизационной модели для выбора места расположения зарядных станций для электромобилей. Для решения этой проблемы предлагается принять следующие положения и допущения:

1. Принцип близости. С точки зрения пользователя, чем меньше расстояние между зарядной станцией и точкой спроса пользователя, тем большее предпочтение он будет отдавать ближайшей зарядной станции, т.е. каждая точка спроса определяет выбор ближайшей зарядной станции для зарядки электромобилей [11].

2. Город разделен на небольшие микрорайоны, каждый из которых можно рассматривать как точку спроса, который определяется общим количеством электромобилей в этом микрорайоне.

3. Игнорирование размера и уровня зарядных станций. Все зарядные станции следует рассматривать, как если бы они были одной модели и оснащены постами для быстрой зарядки, с одинаковой мощностью обслуживания на каждой станции и т.д.

4. Расстояние между точкой спроса и зарядной станцией рассматривается как прямая линия без учета фактической конфигурации транспортной сети.

5. В процессе зарядки электромобиля соблюдается принцип «один пост – одна машина», т.е. один пост зарядки может одновременно заряжать только один электромобиль.

6. Строительство и использование зарядных станций не будет мешать окружающей транспортной системе, т.е. не вызовет проблем с пробками.

На основе вышеуказанных факторов и анализа описания проблемы можно построить модель выбора места и компоновки зарядных станций для электромобилей, включающую:

– модель удовлетворенности расстоянием и временем. Из приведенного выше анализа видно, что расстояние зарядки является одним из основных факторов, влияющих на спрос пользователей [13]. Между тем, когда уровень удовлетворенности достигнет предела, спрос на зарядную станцию не будет продолжать расти. Исходя из этого, можно построить модель удовлетворенности пользователей расстоянием и временем:

$$f_i(d_{ij}) = \begin{cases} 0 & d_{ij} > d_{\max} \\ \frac{1}{2} + \cos \left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{d_{\max} - d_{\min}} \left(d_{ij} - \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \right) \right] & d_{\min} \leq d_{ij} \leq d_{\max} \\ 1 & 0 < d_{ij} \leq d_{\min} \end{cases}, \quad (1)$$

где $f_i(d_{ij})$ – модель удовлетворенности расстоянием и временем, d_{ij} – расстояние между точкой спроса i и зарядной станцией j ; d_{\min} – минимальная удовлетворенность; d_{\max} – максимальная удовлетворенность;

– модель удовлетворенности временем ожидания. На зарядной станции установлено несколько постов для зарядки. Каждый пост может одновременно заряжать только один автомобиль. Когда на станции нет простаивающих зарядных постов, другим пользователям приходится ожидать их освобождения. Когда время ожидания превысит определенное значение, пользователи будут искать другие зарядные станции. Исходя из этого, можно построить соответствующую модель и получить выражение [13]

$$f(t_j) = \begin{cases} 0 & t_j > t_{\max} \\ \frac{t_{\max} - t_j}{t_{\max} - t_{\min}} & t_{\min} \leq t_j \leq t_{\max} \\ 1 & t_j < t_{\min} \end{cases}, \quad (2)$$

где $f(t_j)$ – модель удовлетворенности временем ожидания пользователя; t_j – время ожидания пользователя при выборе зарядной станции k ; t_{\max} – максимальное значение времени ожидания; t_{\min} – минимальное значение времени ожидания.

После объединения двух моделей удовлетворенности можно получить комплексную модель удовлетворенности в виде выражения

$$\max F_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_i f_i(d_{ij}) Y_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_i f_i(t_j) Y_{ij}, \quad (3)$$

где $\max F_1$ – комплексная модель удовлетворенности; i – порядковый номер точки спроса; I – обозначает количество всех точек спроса в определенном диапазоне; j – порядковый номер зарядной станции кандидата; J – количество всех зарядных станций кандидата; q_i – количество заявок на зарядку для точки спроса i ; Y_{ij} – переменная решения 0–1, например, если точка спроса i обращается к зарядной станции кандидата j для получения услуги зарядки, она принимает значение 1, и наоборот, она принимает значение 0;

– модель минимизации затрат. Строительство зарядной станции и последующее управление эксплуатацией и техническим обслуживанием требуют больших затрат. В то же время, снижая эксплуатационные расходы, можно обеспечить более высокую экономическую эффективность зарядной станции [14]. В результате модель минимизации затрат может быть построена после интеграции различных затрат:

$$\min F_2 = \sum_{j=1}^J (O + \beta N_j + \mu N_j^2) \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} + \alpha \sum_{j=1}^J (O + \beta N_j + \mu N_j^2), \quad (4)$$

где $\min F_2$ – модель минимизации затрат; r_0 – ставка дисконтирования; μ – коэффициент инвестиций в зарядную станцию за весь ее жизненный цикл; α – коэффициент отношения стоимости эксплуатации и обслуживания к стоимости строительства; β – цена каждой зарядной сваи; O – постоянные инвестиционные затраты; N_j – общее количество зарядных свай на станции.

Для того чтобы оптимизационная модель размещения зарядных станций давала точные результаты, необходимо установить разумные ограничения на их использование. К основным аспектам относятся следующие:

1. Зарядная станция должна удовлетворять потребности пользователей электромобилей в зарядке, т.е.

$$Y_{ij} \leq y_j \forall i \in I \forall j \in J, \quad (5)$$

где Y_{ij} – переменная принятия решения 0–1, которая принимает значение 1, если станция построена в точке j кандидата на строительство зарядной станции, и 0 в противном случае.

2. Все точки спроса могут быть назначены на соответствующую зарядную станцию, т.е.

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} y_j \geq 1 \forall i \in I, \quad (6)$$

3. Количество постов зарядки зарядной станции находится между максимальным и минимальным количеством постов зарядки, необходимых пользователю, т.е. [15]

$$N_{j \max \min}, \quad (7)$$

где N_{\min} – обозначает минимальное значение количество постов зарядки, требуемых пользователем; N_{\max} – максимальное значение количества постов зарядки, требуемых пользователем.

4. Из каждой точки спроса можно посетить только одну зарядную станцию, т.е.

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \forall i \in I, \quad (8)$$

5. Общее количество зарядных станций в регионе должно соответствовать фактическим потребностям региона, т.е.

$$\sum_{j \in J} y_j = H, \quad (9)$$

где H – спрос на зарядные станции в регионе.

Совершенствование алгоритма «поиска по воробьям» (ISSA) на основе выбора местоположения зарядных станций электромобилей. Традиционный алгоритм «поиска по воробьям» (SSA) – это алгоритм оптимизации на основе роевого интеллекта, предложенный в 2020 г. [16; 25], обладающий такими характеристиками, как простота структуры, легкость реализации, высокая способность к локальному поиску. Алгоритм «поиска по воробьям» обладает универсальностью и широко используется в различных областях: оптимизация нейронных сетей BP [17]; планирование траектории [17]; обработка изображений [19]; калибровка камер [20]; покрытие беспроводных датчиков [21]; распределение источников питания [22]; оптимальное планирование работы электросетей [23] и другие практические оптимизационные задачи.

Алгоритм «поиска по воробьям» обусловлен кормовой деятельностью воробьев в природе и имитирует групповую кормовую деятельность популяций воробьев, раннее предупреждение и защиту от хищников [24].

Основные правила алгоритма поиска воробья таковы:

1. Воробьи делятся на первооткрывателей и последователей в зависимости от их кормовой позиции. Роли отдельных воробьев постоянно меняются во время кормежки, но пропорция первооткрывателей и последователей в группе фиксирована [25]. Они кормятся рядом с первооткрывателями. Группа воробьев в процессе кормежки наблюдает за безопасностью кормовой среды. Если она небезопасна, то воробей направляется в группу воробьев, чтобы сделать раннее предупреждение для детектора.

2. Направление кормежки популяции воробьев определяется воробьем-находчиком. Воробей, нашедший лучший источник пищи, определяется как находчик, и он выбирает, продолжать ли кормежку в текущем месте или покинуть его, основываясь на состоянии раннего предупреждения популяции.

3. Воробьи, кроме воробья-находчика, являются последователями. Последователи приближаются к находчику, чтобы покормиться, а когда окрестности находчика оказываются переполненными, он улетает кормиться.

4. Во время кормежки часть группы всегда выступает в роли детектора, и воробей-детектор отвечает за раннее предупреждение и сигнализацию всей популяции воробьев в случае опасности [26; 28].

5. Воробьи-разведчики на краю группы будут перемещаться ближе к центру, а воробьи-разведчики в центре – бродить наугад.

Алгоритм «поиска по воробьям», как и другие алгоритмы, имеет недостатки, такие как зависимость от начального решения, уменьшение разнообразия популяций во время итерационного процесса, стагнация и попадание в ловушку локального оптимального решения [28; 30]. Поэтому в данном исследовании для расчета оптимизационной модели размещения зарядных станций электромобилей используется усовершенствованный алгоритм «поиска по воробьям» (ISSA).

В основе алгоритма лежит вычислительный поток [30]:

1. Инициализировать систему, чтобы вернуть параметры, такие как размер популяции n и количество итераций a , в исходное состояние.

2. На основе данных о местонахождении и численности воробьев вывести значения адаптации воробьев и путем сравнительного анализа адаптаций определить их оптимальное количество.

3. Среди полученной оптимальной популяции воробьев некоторые воробьи выбраны в качестве первооткрывателей. И на основании этого обновляются позиции.

4. Другие воробьи в оптимальной группе теперь рассматриваются как последователи. И позиции вновь обновляются.

5. Определенное количество воробьев случайным образом выбирается в качестве «бдительных» (воробьи-детекторы) для всей популяции воробьев. Их позиции обновляются.

6. Имеющееся оптимальное решение подвергается вычислительной обработке с помощью стратегии обратного обучения с вариационным возмущением Коши на основе вероятности PS для получения нового оптимального решения.

7. Необходимо определить, нужно ли обновлять позицию воробья, проанализировав правило жадности.

8. Оценить, соответствует ли информация о положении воробья конечным требованиям. Если нет, вернуться ко второму шагу, чтобы продолжить анализ и расчеты, и, наоборот, завершить весь процесс расчета, чтобы получить окончательный результат.

Весь алгоритм показан на рисунке.

На модели размещения зарядной станции электромобиля в сочетании с алгоритмом «поиска по воробьям» (ISSA) можно определить оптимальное местоположение зарядной станции:

1. В алгоритмической модели добавляются такие параметры, как точки спроса и количество зарядных станций.

2. Инициализация системы для восстановления параметров: пикового числа точек-кандидатов H , числа популяций n и числа итерационных вычислений a до начального состояния.

3. Случайным образом генерировать места расположения популяций воробьев в существующих точках спроса.

4. Путем итерационных вычислений определить значения адаптации воробьев, которые ранжируются в порядке убывания. Воробьи, находящиеся в верхней части списка, выбираются в качестве первооткрывателей, остальные – в качестве последователей.

5. Поиск пищи и постоянное наблюдение за тем, где находится пища.

6. Когда положение первооткрывателя меняется, последователь начинает добывать корм и автоматически обновляет информацию о положении.

7. Выбрать соответствующее количество воробьев, которые будут выступать в роли наблюдателей, и начать собирать информацию об окрестностях.

8. Новое оптимальное решение получается путем возмущения вокруг оптимального решения с помощью обратного обучения с возмущением по варианту Коши.

9. Проанализировать, соответствует ли количество итерационных вычислений требованиям заданного значения. Если нет – вернуться к четвертому шагу для продолжения вычислений, если соответствует – завершить вычисления. Полученный результат будет оптимальным расположением зарядной станции.

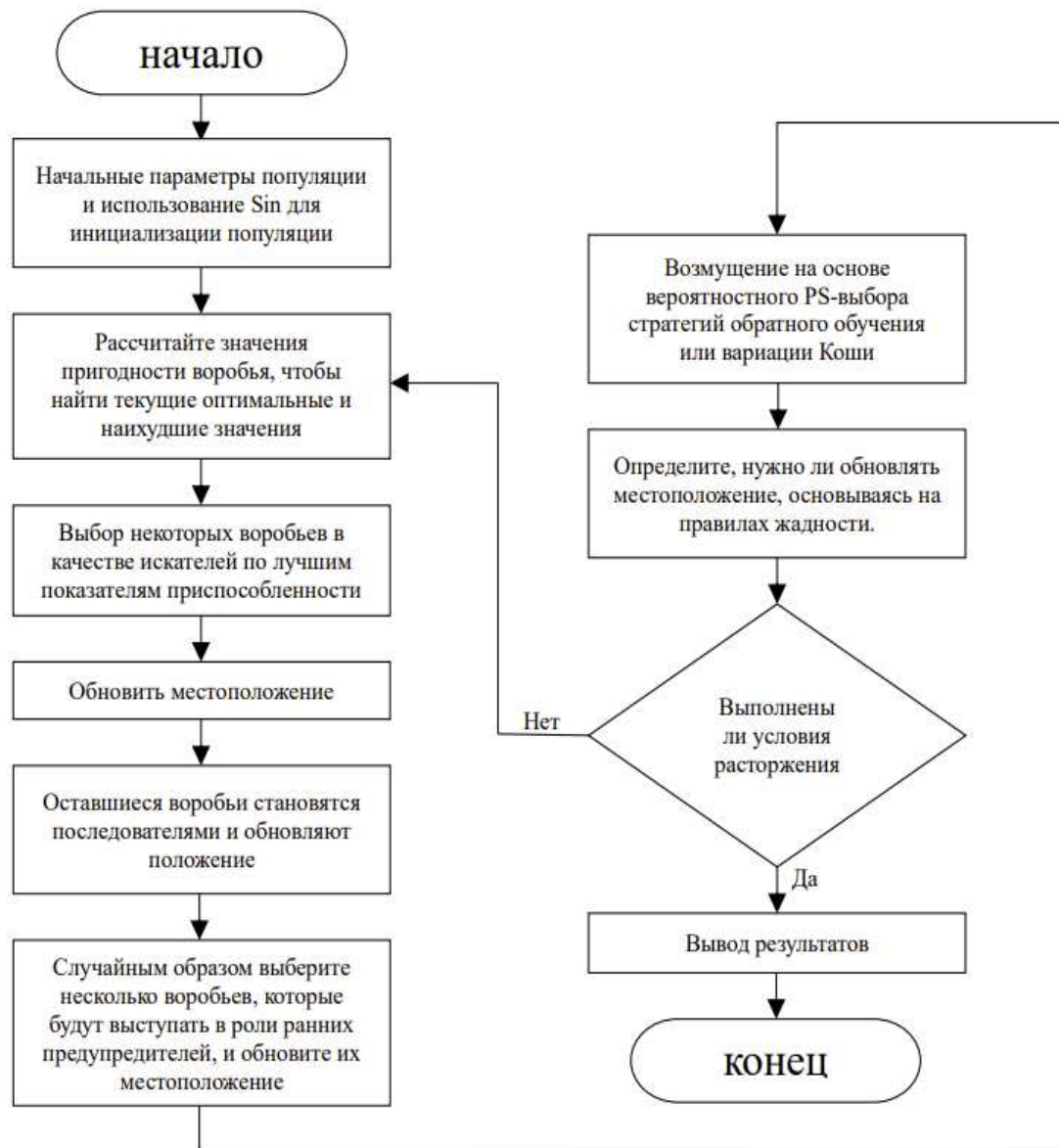


Рисунок. – Блок-схема усовершенствованного алгоритма ISSA

Усовершенствованный алгоритм «поиска по воробьям» (ISSA) вводит рефракционное обратное обучение при инициализации популяции для повышения качества начальной популяции воробьев [31], сохраняет скорость сходимости традиционного алгоритма «поиска по воробьям» и вводит вариационную стратегию Коши для повышения способности алгоритма выходить из локальных экстремумов. Он эффективно улучшает число решений регрессионной модели и точно регулирует количество необходимых станций зарядки чистых электромобилей в числе решений с простым алгоритмическим процессом и быстрой скоростью сходимости.

Заключение. Таким образом, предложена модель усовершенствованного алгоритма «поиска по воробьям» (ISSA), которая обеспечивает повышение точности прогнозирования расположения зарядных станций электромобилей. Усовершенствованный алгоритм «поиска по воробьям» (ISSA) позволяет избавиться от ограничений, связанных с локальными экстремумами, и обладает большей практичностью, высокой точностью оптимизации и скоростью сходимости по сравнению с традиционным алгоритмом «поиска по воробьям».

Автомобильные зарядные станции – важная составляющая развития электромобильности и перехода к низкоуглеродной экономике. В ближайшие годы ожидается рост их количества, эффективности, удобства, экологичности и интеграции с возобновляемыми источниками энергии, что будет способствовать расширению рынка электромобилей, а также улучшению качества жизни и окружающей среды.

Благодаря применению этой модели алгоритма можно достаточно быстро определить места рационального расположения зарядных станций.

Дальнейшие исследования представляется целесообразным посвятить практической проверке разработанного усовершенствованного алгоритма «поиска по воробьям» (ISSA) для решения задач определения радио-

нальной сети зарядных станций электромобилей. Необходимо также произвести сравнительный анализ точности и эффективности разработанной модели с другими традиционными моделями решения аналогичных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Automobile Industry under China's Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals: Challenges, Opportunities, and Coping Strategies / F. Zhao, X. Liu, H. Zhang et al. // *Journal of Advanced Transportation*. – 2022. – № 2022(1). – P. 1–13. DOI: 10.1155/2022/5834707
2. Electric Car Battery: An Overview on Global Demand, Recycling and Future Approaches Towards Sustainability / L.S. Martins, L.F. Guimarães, A.B.B. Junior et al. // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – № 295. – P. 113091. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113091
3. Cao L. Research on the Development and Application of Charging Piles Based on the Development of New Energy Vehicles // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – № 565(1). – P. 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/565/1/012001
4. Pal A, Bhattacharya A, Chakraborty A K. Allocation of Electric Vehicle Charging Station Considering Uncertainties // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. – 2021. – № 25. – P. 100422. DOI: 10.1016/j.segan.2020.100422
5. Bae S., Kwasinski A. Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2012. – № 3(1). – P. 394–403. DOI: 10.1109/TSG.2011.2159278
6. Xu H., Huang X. A Multi-Objective Coordinated Charging and Discharging Strategy for Electric Vehicles Based on Stackelberg Game // *Energy and Power Engineering*. – 2020. – № 12(04). – P. 63. DOI: 10.4236/epe.2020.124B007
7. Mehrjerdi H., Hemmati R. Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2020. – № 37. – P. 157–177. DOI: 10.1016/j.seta.2019.100577
8. Integrated optimal dispatching strategy considering power generation and consumption interaction / Z. Liu, Z. Xiao, Y. Wu et al. // *IEEE Access*. – 2020. – № 9. – P. 1338–1349.
9. Wu W., Lin Y., Liu R. Online EV charge scheduling based on time-of-use pricing and peak load minimization: Properties and efficient algorithms // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2020. – № 23(1). – P. 572–586. DOI: 10.1109/TITS.2020.3014088
10. Optimal EV charging scheduling by considering the limited number of chargers / J. Liu, G. Lin, S. Huang et al. // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2020. – № 7(3). – P. 1112–1122. DOI: 10.1109/TTE.2020.3033995
11. Optimal dynamic scheduling of electric vehicles in a parking lot using particle swarm optimization and shuffled frog leaping algorithm / G.S. Fernandez, V. Krishnasamy, S. Kuppasamy et al. // *Energies*. – 2020. – № 13(23). – P. 6384. DOI: 10.3390/en13236384
12. A novel consumer-friendly electric vehicle charging scheme with vehicle to grid provision supported by genetic algorithm based optimization / S. Abdullah-Al-Nahid, T.A. Khan, M.A. Taseen et al. // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – № 50. – P. 104655. DOI:10.1016/j.est.2022.104655
13. Rahmani-Andebili M., Bonamente M., Miller J.A. Mobility Analysis of Plug-in Electric Vehicles in San Francisco Applying Monte Carlo Markov Chain // *2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC) / Manhattan, KS, USA (13–14 July 2020)*. – IEEE, 2020. – P. 1–6. DOI: 10.1109/KPEC47870.2020.9167668
14. Methodology to evaluate the impact of electric vehicles on electrical networks using Monte Carlo / D. Betancur, L.F. Duarte, J. Revollo et al. // *Energies*. – 2021. – № 14(5). – P. 1300. DOI: 10.3390/en14051300
15. Anand M.P., Bagen B., Rajapakse A. Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2020. – № 117. – P. 105609. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105609
16. Meng Z., Pan J.S. QUasi-Affine TRansformation Evolution with External ARchive (QUATRE-EAR): an enhanced structure for differential evolution // *Knowledge-Based Systems*. – 2018. – № 155. – P. 35–53. DOI: 10.1016/j.knsys.2018.04.034
17. Mirjalili S., Lewis A. The whale optimization algorithm // *Advances in engineering software*. – 2016. – № 95. – P. 51–67. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008
18. Integration of Computer Vision and IOT Into an Automatic Driving Assistance System for “Electric Vehicles” / S. Du, J. Zhang, Y. Wang et al. // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2024. – Vol. 20, No. 3. – P. 4765–4772.
19. Kathirolu P, Selvadurai K. Energy efficient cluster head selection using improved Sparrow Search Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, 34(10): 8564-8575. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.08.031
20. Zhang G., Zhang E. A random opposition-based sparrow search algorithm for Path Planning Problem // *Artificial Intelligence: First CAAI International Conference, CICA 2021 / Hangzhou, China (June 5–6, 2021). Part II 1*. – Springer International Publishing, 2021. – P. 408–418. DOI: 10.1007/978-3-030-93049-3_34
21. Yang X.S., Deb S. Engineering optimisation by cuckoo search // *J. Math. Modell. Numer. Optim.* – 2010. – Vol. 1, No. 4. – P. 330–343. DOI: 10.48550/arXiv.1005.2908
22. Ghamami M., Nie Y., Zockaie A. Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city centers // *International Journal of Sustainable Transport*. – 2016. – № 10. – P. 343–353.
23. Mirjalili S. SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems // *Knowledge-Based Syst.* – 2016. – Vol. 96. – P. 120–133.
24. Harris hawks optimization: Algorithm and applications / A.A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris et al. // *Future Generat. Comput. Syst.* – 2019. – Vol. 97. – P. 849–872. DOI: 10.1016/j.future.2019.02.028
25. Jain M., Singh V., Rani A. A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm // *Swarm Evoluti. Comput.* – 2019. – Vol. 44. – P. 148–175. DOI: 10.1016/j.swevo.2018.02.013
26. Fathollahi-Fard A.M., Hajiaghahi-Keshteli M., Tavakkoli-Moghaddam R. Red deer algorithm (RDA): a new nature-inspired meta-heuristic // *Soft Comput.* – 2020. – Vol. 24. – P. 14637–14665. DOI: 10.1007/s00500-020-04812-z

27. Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach / D.A. Gimenez-Gaydou, A.N. Ribeiro, J. Gutierrez et al. // *International Journal of Sustainable Transport*. – 2016. – № 10. – P. 393–405. DOI: 10.1080/15568318.2014.961620
28. Braik M., Sheta A., Al-Hiary H. A novel meta-heuristic search algorithm for solving optimization problems: capuchin search algorithm // *Neural Comput. Appl.* – 2021. – Vol. 33. – P. 2515–2547. DOI: 10.1007/s00521-020-05145-6
29. Aquila optimizer: a novel metaheuristic optimization algorithm / L. Abualigah, D. Yousefi, M. Abd Elaziz et al. // *Comput. Indust. Engin.* – 2021. – Vol. 157. – P. 107250. DOI:10.1016/j.cie.2021.107250
30. Braik M.S. Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems // *Expert Syst. Appl.* – 2021. – Vol. 174. – P. 114685. DOI:10.1016/j.eswa.2021.114685
31. Aptenodytes forsteri optimization: Algorithm and applications / Z. Yang, L. Deng, Y. Wang et al. // *Knowledge-Based Syst.* – 2021. – Vol. 232. – P. 107483. DOI:10.1016/j.knsys.2021.107483
32. Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal / I. Frade, A. Ribeiro, G. Goncalves et al. // *Transportation Research Record*. – 2011. – № 2. – P. 91–98. DOI:10.3141/2252-12
33. Ду Сячжоу, Капский Д.В., Лобашов А.О. Анализ преимуществ и недостатков методов восполнения энергии для зарядных станций электромобилей // *Современные технологии в транспортной отрасли: электрон. сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (25–26 апр. 2024 г.) / Полоц. гос. ун-т имени Евфросинии Полоцкой*. – Новополоцк, 2024. – С. 122–124.

REFERENCES

1. Zhao, F., Liu, X., Zhang, H. & Liu, Z. (2022). Automobile Industry under China's Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals: Challenges, Opportunities, and Coping Strategies. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 1–13. DOI: 10.1155/2022/5834707
2. Martins, L.S., Guimarães, L.F., Junior, A.B.B., Tenório, J.A.S. & Espinosa, D.C.R. (2021). Electric Car Battery: An Overview on Global Demand, Recycling and Future Approaches Towards Sustainability. *Journal of Environmental Management*, (295), 113091. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113091
3. Cao, L. (2020). Research on the Development and Application of Charging Piles Based on the Development of New Energy Vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 565(1), 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/565/1/012001
4. Pal, A., Bhattacharya, A. & Chakraborty, AK. (2021). Allocation of Electric Vehicle Charging Station Considering Uncertainties. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, (25), 100422. DOI: 10.1016/j.segan.2020.100422
5. Bae, S. & Kwasinski, A. (2012). Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 394–403. DOI: 10.1109/TSG.2011.2159278
6. Xu, H. & Huang, X. (2020). A Multi-Objective Coordinated Charging and Discharging Strategy for Electric Vehicles Based on Stackelberg Game. *Energy and Power Engineering*, 12(04), 63. DOI:10.4236/epe.2020.124B007
7. Mehrjerdi, H. & Hemmati, R. (2020). Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, (37), 157–177. DOI: 10.1016/j.seta.2019.100577
8. Liu, Z., Xiao, Z., Wu, Y., Hui, H., Tao, X., Qingyong, Z. & Changjun, X. (2020). Integrated optimal dispatching strategy considering power generation and consumption interaction. *IEEE Access*, (9), 1338–1349.
9. Wu, W., Lin, Y. & Liu, R. (2020). Online EV charge scheduling based on time-of-use pricing and peak load minimization: Properties and efficient algorithms. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 572–586. DOI: 10.1109/TITS.2020.3014088
10. Liu, J., Lin, G., Huang, S. & Zhou, Ya. (2020). Optimal EV charging scheduling by considering the limited number of chargers. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(3), 1112–1122. DOI: 10.1109/TTE.2020.3033995
11. Fernandez, G.S., Krishnasamy, V., Kuppusamy, S., Jagabar, S. Ali, Ziad, M. Ali, El-Shahat, A. & Abdel Aleem, Shady H.E. (2020). Optimal dynamic scheduling of electric vehicles in a parking lot using particle swarm optimization and shuffled frog leaping algorithm. *Energies*, 13(23), 6384. DOI: 10.3390/en13236384
12. Abdullah-Al-Nahid, S., Khan, T.A., Taseen, M.A. & Taskin, J. (2022). A novel consumer-friendly electric vehicle charging scheme with vehicle to grid provision supported by genetic algorithm based optimization. *Journal of Energy Storage*, (50), 104655. DOI:10.1016/j.est.2022.104655
13. Rahmani-Andebili, M., Bonamente, M. & Miller, J.A. (2020). Mobility Analysis of Plug-in Electric Vehicles in San Francisco Applying Monte Carlo Markov Chain. *IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)* [Manhattan, KS, USA (13–14 July 2020)], 1–6. DOI: 10.1109/KPEC47870.2020.9167668
14. Betancur, D., Duarte, L.F., Revollo, J., Restrepo, C., Diez, A.E., Isaac, I.A. ... Gonzalez, J.W. (2021). Methodology to evaluate the impact of electric vehicles on electrical networks using Monte Carlo. *Energies*, 14(5), 1300. DOI: 10.3390/en14051300
15. Anand, M.P., Bagen, B. & Rajapakse, A. (2020). Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (117), 105609. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105609
16. Meng, Z. & Pan, J.S. (2018). QUasi-Affine TRansformation Evolution with External ARchive (QUATRE-EAR): an enhanced structure for differential evolution. *Knowledge-Based Systems*, (155), 35–53. DOI: 10.1016/j.knsys.2018.04.034
17. Mirjalili, S. & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, (95), 51–67. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008
18. Du, S., Zhang, J., Wang, Y. & Li, Z. (2024). Integration of Computer Vision and IOT Into an Automatic Driving Assistance System for “Electric Vehicles”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 20(3), 4765–4772.
19. Kathirolu, P. & Selvadurai, K. (2022). Energy efficient cluster head selection using improved Sparrow Search Algorithm

- in Wireless Sensor Networks. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(10), 8564–8575. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.08.031
20. Zhang, G. & Zhang, E. (2021). A random opposition-based sparrow search algorithm for Path Planning Problem. *Artificial Intelligence: First CAAI International Conference [CICAI 2021, Hangzhou, China, June 5–6, 2021]*, Part II 1, 408–418. DOI: 10.1007/978-3-030-93049-3_34
 21. Yang, X.S. & Deb, S. (2010). Engineering optimization by cuckoo search. *J. Math. Modell. Numer. Optim.*, 1(4), 330–343. DOI: 10.48550/arXiv.1005.2908
 22. Ghamami, M., Nie, Y. & Zockaie, A. (2016). Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city centers. *International Journal of Sustainable Transport*, (10), 343–353. DOI: 10.1080/15568318.2014.937840
 23. Mirjalili, S. (2016). SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Syst.*, (96), 120–133.
 24. Heidari, A.A., Mirjalili, S., Faris, H. & Mafarja, M. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generat. Comput. Syst.*, (97), 849–872. DOI: 10.1016/j.future.2019.02.028
 25. Jain, M., Singh, V. & Rani, A. (2019). A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm. *Swarm Evoluti. Comput.*, (44), 148–175. DOI: 10.1016/j.swevo.2018.02.013
 26. Fathollahi-Fard, A.M., Hajiaghayi-Keshтели, M. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). Red deer algorithm (RDA): a new nature-inspired meta-heuristic. *Soft Comput.*, (24), 14637–14665. DOI: 10.1007/s00500-020-04812-z
 27. Gimenez-Gaydou, D.A., Ribeiro, A.N., Gutierrez, J. & Antunes, A.P. (2016). Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach. *International Journal of Sustainable Transport*, (10), 393–405. DOI: 10.1080/15568318.2014.961620
 28. Braik, M., Sheta, A. & Al-Hiary, H. (2021). A novel meta-heuristic search algorithm for solving optimization problems: capuchin search algorithm. *Neural Comput. Appl.*, (33), 2515–2547. DOI: 10.1007/s00521-020-05145-6
 29. Abualigah, L., Yousri, D., Abd, Elaziz M., Ewees, A.A., Al-qaness, Mohamed A.A. & Gandomi, Amir H. (2021). Aquila optimizer: a novel metaheuristic optimization algorithm. *Comput. Indust. Engin.*, (157), 107250. DOI:10.1016/j.cie.2021.107250
 30. Braik, M.S. (2021). Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems. *Expert Syst. Appl.*, (174), 114685. DOI:10.1016/j.eswa.2021.114685
 31. Yang, Z., Deng, L., Wang, Y. & Liu, J. (2021). Aptenodytes forsteri optimization: Algorithm and applications. *Knowledge-Based Syst.*, (232), 107483. DOI:10.1016/j.knosys.2021.107483
 32. Frade, I., Ribeiro, A., Goncalves, G. & Antunes, A. (2011). Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, (2), 91–98. DOI:10.3141/2252-12
 33. Du, Sizhuo, Kapski, D.V. & Lobashov, A.O. (2024). Analiz preimuchestv i nedostatkov vospolneniya energii dlya zaryadnykh stanciy elctromobiley. *Sovremenyte tehnologii v transportnoy otrasly: electron. sb. st. Mezhdunar. nauch.-techn. konf.* [Novopolotsk, 25-26 apr. 2024 g.], 122–124. (In Russ.)

Поступила 26.06.2024

DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS FOR A NETWORK OF CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES

DU SIZHUO, A. LOBASHOV, D. KAPSKI
(Belarusian National Technical University, Minsk)

This article examines the problem of determining rational parameters for a network of electric vehicle charging stations. The main factors influencing the placement of electric vehicle charging stations are analyzed. A multi-purpose model for choosing the location of charging stations has been developed. An algorithmic model is proposed to improve the sparrow search method, which is used as the basis for solving the problem of determining the rational parameters of a network of electric vehicle charging stations.

Keywords: transport systems, electric vehicles, charging stations, sparrow search algorithm.