

© 2020 г. М.Я. КОВАЛЁВ, д-р физ.-мат. наук (kovalyov_my@newman.bas-net.by),
Б.М. РОЗИН, канд. техн. наук (rozin@newman.bas-net.by),
Н.Н. ГУЩИНСКИЙ, канд. физ.-мат. наук (gyshin@newman.bas-net.by)
(Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАМЕНЫ ТРАДИЦИОННОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ¹

Исследуется сложная оптимизационная задача, возникающая при планировании процесса перехода от традиционного общественного транспорта к электрическому. Описываются предположения, входные и выходные параметры задачи, а также ее математическая модель и рандомизированный алгоритм решения. Приводится библиография публикаций по исследуемой задаче.

Ключевые слова: электрический транспорт, оптимизация, математическое программирование, рандомизированный алгоритм.

DOI: 10.31857/S0005231020050049

1. Введение

В статье исследуется оптимизационная задача, возникающая при планировании процесса замены парка традиционного общественного транспорта электробусами для заданного множества маршрутов. Предполагается, что электробус оборудован устройством хранения электрической энергии – батареей, которая требует периодической зарядки. В статье рассматривается только технология зарядки, при которой батареи электробусов заряжаются на стационарных станциях зарядки. Замена батарей и зарядка во время движения не предусматриваются.

Парк электробусов характеризуется типами электробусов и количеством электробусов каждого типа. С каждым типом электробуса связаны следующие характеристики такого же типа: множество подходящих типов станции зарядки; время зарядки до рекомендуемого уровня состояния заряда (State Of Charge (SOC)) при отправлении от станции зарядки одного и того же типа, расположенной в одном и том же месте (депо или остановка); индикаторы допустимого движения между любыми двумя остановками одного и того же маршрута; потребление энергии для одного и того же маршрута в течение года; годовые капитальные и эксплуатационные расходы; пассажироместимость.

¹ Работа выполнена в рамках проекта PLATON инициативы ERA-NET Cofund Electric Mobility Europe.

Маршрут характеризуется указанием депо и цикла маршрута, представляющего последовательность остановок, циклически посещаемых электробусами этого маршрута. Интенсивностью пассажиропотока цикла маршрута является историческая или запланированная общая вместимость пассажирских транспортных средств, отправляющихся с любой остановки этого цикла в единицу времени. Блоком циклов маршрута будем называть последовательность следующих друг за другом циклов этого маршрута, моделируемых одной и той же интенсивностью пассажиропотока и одними и теми же индикаторами допустимого движения. Для каждого маршрута будем рассматривать обеспечивающий глобальную допустимость (ОГД) блок циклов, такой что допустимое решение, принятое для этого блока циклов, является допустимым для любого другого блока циклов в течение года. С некоторой степенью неопределенности ОГД блок циклов может быть охарактеризован максимальными потерями уровня SOC при движении по тем же сегментам маршрута в сравнении с другими блоками циклов.

Для заданного маршрута частота отправления электробусов некоторого типа равна количеству электробусов этого типа, отправляющихся с любой одной и той же остановки этого маршрута в единицу времени. Задача оптимизации заключается в определении

- парка электробусов,
- частоты отправления электробусов каждого типа в ОГД блоке циклов для каждого маршрута,
- мест установки станций зарядки и трансформаторов,
- количества станций зарядки каждого типа в каждом выбранном для них месте,
- назначения мест установки станций зарядки трансформаторам и
- назначения станций зарядки маршрутам

таким образом, чтобы электробусам хватало заряда для движения по маршрутам и не была превышена выделенная (на зарядку электробусов) мощность любого трансформатора. В качестве критерия рассматривается максимизация отношения общей эффективности (положительного экологического или социально-экологического эффекта, выраженного количественно) к сумме общих капиталовложений и эксплуатационных расходов (включая стоимость потребляемой энергии), т.е. максимизация удельной эффективности инвестиций. В дальнейшем обозначим эту задачу через **P**. Предполагается, что решение задачи **P** будет повторяться для нескольких последовательных периодов планирования. Элементы решения, принятые в предыдущий период, включаются во входные данные для будущего периода. Такой подход последовательной оптимизации основан на предположении, что оптимизация для ближайшего периода времени более эффективна, чем оптимизация для последующих периодов, когда не все входные данные достаточно точно определены.

Задача **P** сложна как с точки зрения вычислений, так и с точки зрения построения адекватной математической модели. Чтобы решить ее с приемлемым качеством за приемлемое время, в статье сделан ряд предположений, которые приведены в разделе 3. Входные и выходные данные описаны в разделах 4 и 5 соответственно. Математическая модель представлена в разделе 6. В разделе 7 предложен рандомизированный эвристический алгоритм

для решения поставленной задачи. В разделе 2 приводится список публикаций, известных авторам настоящей статьи по рассматриваемой проблеме, классифицированных по тематике.

2. Классификация публикаций по тематике

Подходящие публикации классифицируются по категориям, связанным с планированием внедрения и эксплуатацией электрических транспортных средств (EVs). Названия категорий приведены далее и сопровождаются списком соответствующих публикаций. Если публикация может быть отнесена к нескольким категориям, то она расположена в той, которая, по мнению авторов, является более подходящей.

- История и статистика использования EVs и соответствующей инфраструктуры: ZeEUS eBus Report [1], Nikolić и Živanović [2], Li [3], Ahmad и др. [4], Anderson и др. [5], Todorovic и Simic [6].
- Анализ тестирования и эксплуатации EVs в реальных условиях: Barnitt [7], Wang и González [8], Erkkilä и др. [9], Schmidt и др. [10], ZeEUS Demonstrations [11], Foltiński [12], Rogge и др. [13], Hanlin [14], Olsson и др. [15], Eudy и Jeffers [16], Gao и др. [17], Leou и Hung [18], Christensen и др. [19], Khan и др. [20], Xylia и Silveira [21], Gallet и др. [22], Morganti и Browne [23].
- Сравнение EVs и транспортных средств с другими источниками энергии: Feng и Figliozzi [24, 25], Hallmark и др. [26], Lajunen [27], Mohamed и др. [28].
- Имитационное моделирование эксплуатации EVs: Schoch [29], Teoh и др. [30, 31], Mohamed и др. [32], Marmaras и др. [33], Xylia и др. [34], Fiori и др. [35].
- Оптимизация эксплуатации EVs и требуемой инфраструктуры: Alonso и др. [36], Wen и др. [37], Yu и др. [38], Juan и др. [39], Hiermann и др. [40], Quak и др. [41], Desaulniers и др. [42], Wielinski и др. [43], Kunith и др. [44], Bruglieri и др. [45], Pelletier и др. [46–49], Froger и др. [50, 51], Xylia и др. [52], Liu и др. [53], Hosseini и Sarder [54], Wang и др. [55], Wang и др. [56].
- Экологические проблемы: доклад Всемирной организации здравоохранения [57], Sydbom и др. [58], доклады института Health Effects Institute [59, 60], Ali [61], Chan и др. [62], монография IARC [63], Mohner [64], McClellan [65], Gaskins и др. [66], статьи специального выпуска журнала Transportation Research Part D под редакцией Johem и др. [67].

Анализ приведенных публикаций показывает, что количество математических моделей и алгоритмов решения задач оптимизации эксплуатации электрического общественного транспорта и необходимой инфраструктуры недостаточно, чтобы охватить огромное число разнообразных реальных практических ситуаций.

3. Предположения и допущения

В задаче **P** предполагается следующее:

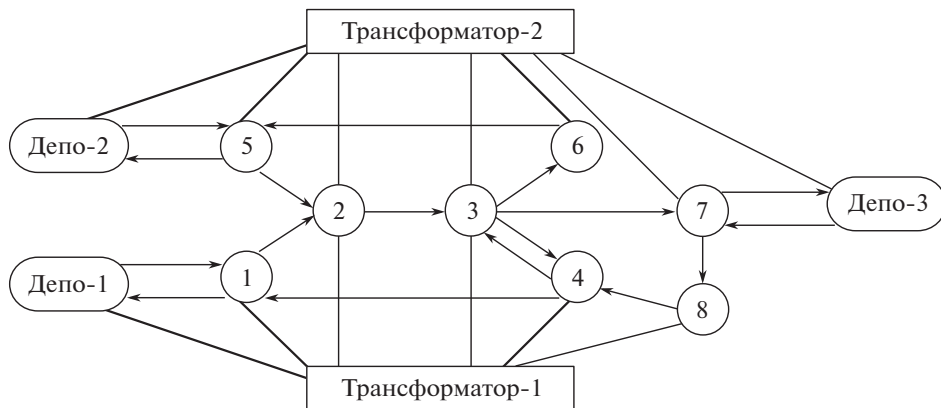
1. Для каждого маршрута известны депо, промежуточные и конечные остановки, а также порядок их посещения соответствующими электробусами;

2. Парк традиционных автобусов может замещаться частично;
3. Каждый маршрут обслуживает единственное депо. Если на некоторый маршрут назначен хотя бы один электробус, то по крайней мере одна подходящая станция зарядки должна быть открыта в депо этого маршрута;
4. Маршруты могут пересекаться в депо, на конечных и промежуточных остановках;
5. Любой электробус некоторого типа, назначенный на некоторый маршрут, заряжается до рекомендуемого уровня SOC каждый раз, когда он посещает место со станцией зарядки того типа, который назначен этому типу электробусов и этому маршруту. Если указанное назначение не сделано для подходящей четверки (тип электробуса, маршрут, место, тип станции зарядки), то при моделировании электробус посещает указанное место без зарядки;
6. В месте зарядки один и тот же тип станции зарядки может быть назначен разным типам электробусов. В этом случае электробусы этих типов совместно используют станции зарядки этого типа в этом месте;
7. Электробусы одного и того же типа и маршрута в одном и том же месте заряжаются на станциях одного типа;
8. Каждая станция зарядки в одном и том же месте соединяется с одними и теми же m трансформаторами. В каждый момент времени только одно произвольное соединение места расположения станции зарядки с трансформаторами является активным;
9. Некоторые электробусы, станции зарядки и их связи с трансформаторами к моменту принятия решения могут уже использоваться. В дальнейшем будем их называть “старые”, а электробусы и элементы инфраструктуры, относительно которых принимается решение, будем называть “новые”;
10. Время, затрачиваемое любым электробусом на прохождение каждого из ОГД блоков циклов, не меняется для одного и того же маршрута, и оно определяется как некоторая оценка или достаточно точная верхняя граница этого времени.

4. Входные данные

Строчные буквы используются для обозначения числовых входных данных (параметров), а прописные – для обозначения множеств и переменных.

- Транспортная и электрическая сеть $G = (NN, R, EE)$, которая представляет собой взвешенный смешанный мультиграф с множеством вершин (мест для станций зарядки и трансформаторов) NN , множеством ориентированных циклов (маршрутов) R и множеством ребер (связей с трансформаторами) EE , см. рисунок в качестве иллюстрации. На этом рисунке маршрут 1 определяется циклом (Депо-1, 1, 2, 3, 4, 1, Депо-1), маршрут 2 – (Депо-2, 5, 2, 3, 6, 5, Депо-2) и маршрут 3 – (Депо-3, 7, 8, 4, 3, 7, Депо-3).
- Множество NN разбито на множество T “трансформаторных” вершин, соответствующих приемлемым местам расположения трансформаторов, и множество N “нетрансформаторных” вершин.



Сеть для трех маршрутов.

- Множество N разбито на подмножества ND и NE вершин депо и вершин остановок соответственно, в которых могут быть установлены станции зарядки.
- Множество N содержит подмножество NO нетрансформаторных вершин, в каждой из которых открыта хотя бы одна старая станция зарядки любого типа.
- Множество T содержит подмножество TO трансформаторных вершин, в каждой из которых находится по крайней мере один старый трансформатор с ненулевой выделенной мощностью для новых электробусов.
- Множество маршрутов R построено на основе множеств ND и NE . Одна и та же вершина может принадлежать разным маршрутам.
- Подмножество $R_0 \subseteq R$ маршрутов, обслуживаемых хотя бы одним старым электробусом.
- Дуга $(i, j) \in r, r \in R$, представляет собой ориентированный участок маршрута, идущий из нетрансформаторной вершины i в нетрансформаторную вершину j .
- Ребро $(i, j) \in EE$ представляет собой приемлемое соединение трансформаторной вершины i и нетрансформаторной вершины j .
- Множество B типов электробусов.
- Подмножество $BO, BO \subseteq B$, старых типов электробусов.
- Множество C типов станций зарядки.
Тип $c \in C$ характеризуется следующими параметрами:
 - Номинальная мощность po_c одной станции зарядки;
 - Капитальные затраты cc_c^{cap} , включающие стоимость приобретения и установки одной станции зарядки без учета затрат, относящихся к подключению к трансформаторам;
 - Расходы cc_c^{ope} на эксплуатацию одной станции зарядки в течение года;
- Множество $N_c \subseteq N$ вершин, приемлемых для открытия станции зарядки типа c ;
- Множество $NO_c \subseteq NO$ вершин, в каждой из которых открыта хотя бы одна старая станция зарядки типа c ;

- Множество $B_c \subseteq B$ типов электробусов, подходящих для станции зарядки типа c .

Каждый тип электробуса $b \in B$ характеризуется следующими параметрами:

- Множество C_b подходящих типов станций зарядки. Электробус типа b может заряжаться только на станциях типа $c \in C_b$;
- Множество NM_b нетрансформаторных вершин, в каждой из которых должна быть открыта хотя бы одна станция зарядки типа $c \in C_b$, если вершина принадлежит маршруту, обслуживаемому электробусами типа b ;
- Множество R_b допустимых маршрутов, $R_b \subseteq R$;
- Пассажировместимость cap_b одного электробуса;
- Капитальные затраты cv_b^{cap} на один электробус;
- Расходы cv_b^{ope} на эксплуатацию одного электробуса в течение года, не включая стоимость потребляемой энергии;

Каждая нетрансформаторная вершина $j \in N$ характеризуется следующими параметрами:

- Множество C_{jb} подходящих типов станций зарядки электробусов типа b . Электробус типа b в вершине j может заряжаться только на станциях типа $c \in C_{jb}$;
- Число m соединений любой вершины $j \in N \setminus NO$, в которой будет открыта хотя бы одна новая станция зарядки, с трансформаторными вершинами. Предполагается, что $m \leq |T|$;
- Множество маршрутов R_j , пересекающихся в j ;
- Множество $TE_j \subseteq T$ трансформаторных вершин, допустимых для соединения с вершиной j ;
- Количество nc_{jc} старых станций зарядки типа c , которые открыты в $j \in N_c$, $c \in C$. Напомним, что если $j \in NM_b$ и j принадлежит маршруту, обслуживаемому старым электробусом типа b , то $nc_{jc} \geq 1$ для $c \in C_b$;
- Множество RO_{jcb} маршрутов r таких, что их старые электробусы типа b заряжаются на станциях типа c в вершине j , $RO_{jcb} \subseteq R_j$, $j \in N_c$, $b \in R_b \cap B_c$, $c \in C$;
- Верхняя граница uc_{jc} на количество станций зарядки типа c , которые могут быть открыты в $j \in N_c$, $c \in C$. Этот параметр может быть опущен или равен бесконечности, если отсутствует необходимость в его использовании;
- Верхняя оценка ct_{jbc} времени зарядки одного электробуса типа b на станции типа $c \in C_b$, открытой в $j \in N_c$, до рекомендованного уровня SOC, либо оценка этого времени, которое для промежуточной остановки определяется средним временем посадки/высадки пассажиров, для конечной остановки – максимальным временем замены или отдыха водителя, для депо – продолжительностью пребывания в депо;
- Длительность t_j^{depot} интервала времени I_j , в котором количество всех электробусов, находящихся в депо $j \in ND$, в единицу времени является наибольшим.

Каждая трансформаторная вершина $i \in T \setminus TO$ характеризуется:

- запасами мощности o_i для питания новых станций зарядки в ОГД блоке циклов;

- капитальной стоимостью трансформатора cb_i ($cb_i = 0$ для $i \in TO$).

Каждое ребро $(i, j) \in EE$ связано с:

- затратами cl_{ij} на соединение трансформаторной вершины i и нетрансформаторной вершины j .

Маршрут $r \in R$ характеризуется следующими параметрами:

- Множество B_r типов электробусов, допустимых для обслуживания маршрута r ;
- Последовательность $\pi_r = (j_0, j_1, \dots, j_r, j_0)$ вершин, где j_0 – вершина депо и j_1, \dots, j_r – вершины остановок, которые посещаются циклически в указанном порядке в течение ОГД блока циклов. Будем использовать записи $j \in r$ и $(i, j) \in r$ для обозначения того, что вершина j и дуга (i, j) принадлежат маршруту r соответственно;
- Индикатор допустимого движения $ei_{r(i,j)b}$: $ei_{r(i,j)b} = 1$, если электробус типа b может доехать из вершины i в вершину j маршрута r в ОГД блоке циклов при условии, что станция зарядки типа $c \in C_b$ установлена в i , иначе $ei_{r(i,j)b} = 0$, $i \in r$, $i \in N_c$, $j \in r$, $b \in B_r$. Для заданного типа электробуса этот индикатор вычисляется на основе рекомендуемого уровня SOC, минимального уровня SOC и условий движения по сегменту (i, j) ;
- Частота fr_{rb} движения старых электробусов типа b на маршруте r в ОГД блоке циклов, $fr_{rb} = 0$ тогда и только тогда, когда ни один старый электробус типа b не назначен на маршрут r , $b \in B_r$;
- Нижняя граница lfr_{rb} , $lfr_{rb} > 0$, частоты движения новых электробусов типа b на маршруте r в ОГД блоке циклов, если маршрут r выбран для конверсии, $b \in B_r$;
- Верхняя граница ufr_{rb} , $lfr_{rb} \leq ufr_{rb}$, частоты движения новых электробусов типа b на маршруте r в ОГД блоке циклов, если маршрут r выбран для конверсии, $b \in B_r$. Этот параметр может быть опущен или равен бесконечности, если отсутствует необходимость в его использовании;
- Наибольшая доля α_{rbj}^{depot} , $0 < \alpha_{rbj}^{depot} \leq 1$, всех электробусов типа b , $b \in B_r$, прибывающих в депо $j \in ND$ за интервал времени длительности t_j^{depot} . Если t_j^{depot} и α_{rbj}^{depot} сложно определить, то можно положить длительность t_j^{depot} равной длительности интервала времени между прибытием последнего электробуса в депо j вечером предыдущего дня и отправлением первого электробуса из депо j утром следующего дня, а также положить $\alpha_{rbj}^{depot} = 1$;
- Количество nv_{rb} старых электробусов типа b , назначенных на маршрут r в ОГД блоке циклов, $b \in B_r$;
- Верхняя граница uv_{rb} количества новых электробусов типа b , назначенных на маршрут r в ОГД блоке циклов, $b \in B_r$. Этот параметр может быть опущен или равен бесконечности, если отсутствует необходимость в его использовании;
- Верхняя оценка d_r продолжительности одного цикла любого электробуса в ОГД блоке циклов;
- Верхняя оценка dc_{rb} суммарного времени зарядки одного электробуса типа b в одном цикле ОГД блока циклов, $b \in B_r$;

- Стоимость энергии (или ее оценка) ce_{rb} , потребляемой одним электробусом типа b на маршруте r в течение года, $b \in B_r$;
- Коэффициент предпочтения (вес) w_r , $w_r \geq 0$;
- Нижняя граница $lc > 0$ суммарной капитальной и операционной стоимости.
- Верхняя граница uc , $uc > lc$, суммарной капитальной и операционной стоимости.
- Интенсивность пассажиропотока pas_r в ОГД блоке циклов, которая поддерживается традиционными автобусами, и, следовательно, может поддерживаться новыми электробусами;
- Функция $co_r(Z)$, аппроксимирующая суммарные вредные выбросы традиционных автобусов, которые перевозят Z пассажиров на маршруте r в единицу времени ОГД блока циклов;
- Функция $fu_r(Z)$, аппроксимирующая суммарное потребление топлива традиционных автобусов, которые перевозят Z пассажиров на маршруте r в единицу времени ОГД блока циклов.

Замечание. Пусть Z_r обозначает максимальное количество пассажиров, отправляющихся в новых электробусах от любой конечной или промежуточной остановки маршрута r в единицу времени ОГД блока циклов. Очевидно, что $Z_r \leq pas_r$. Предполагается, что значение эффективности (частичной) конверсии для маршрута r выражается функцией $v_r(Z_r)$ и предлагаются три подхода для вычисления $v_r(Z_r)$: 1) $v_r(Z_r) = w_r Z_r$, 2) $v_r(Z_r) = w_r co_r(Z_r)$ и 3) $v_r(Z_r) = w_r fu_r(Z_r)$.

5. Выходные данные

Решение X задачи **P** может быть представлено следующими переменными:

- Частота $FR_{rb}(X)$ новых электробусов типа b на маршруте r в ОГД блоке циклов, где $FR_{rb} = 0$ тогда и только тогда, когда ни один новый электробус типа b не обслуживает маршрут r , $r \in R_b$, $b \in B$;
- Множество $R_{jcb}(X)$ маршрутов r таких, что $fr_{rb} + FR_{rb}(X) > 0$ и их старые и новые электробусы типа b заряжаются на станциях типа c в вершине j , $RO_{jcb} \subseteq R_{jcb}(X) \subseteq R_j$, $j \in N_c$, $b \in R_b \cap B_c$, $c \in C$;
- Множество $S_c(X)$ вершин $j \in N_c$, в каждой из которых открыта по крайней мере одна новая станция зарядки типа c ;
- Количество $NC_{jc}(X)$ новых станций зарядки типа $c \in C$, которые должны быть установлены в нетрансформаторной вершине $j \in S_c(X)$, $c \in C$;
- Множество $L_j(X)$ трансформаторных вершин $i \in TE_j$, которые должны быть соединены с нетрансформаторной вершиной j , $j \in N \setminus NO$.

Решение X может быть использовано для вычисления следующих значений:

- $B_r(X) = \{b \in B_r \mid FR_{rb}(X) > 0\}$ – множество типов электробусов таких, что хотя бы один новый электробус такого типа назначен на маршрут $r \in R$;
- $B(X) = \cup_{r \in R} B_r(X)$;

- $R_b(X) = \{r \in R_b \mid FR_{rb}(X) > 0\}$ – множество маршрутов, каждый из которых обслуживается хотя бы одним новым электробусом типа b , $b \in B$;
- $R(X) = \cup_{b \in B} R_b(X)$;
- $C(X)$ – множество типов старых и новых станций зарядки;
- $S(X) = \cup_{c \in C(X)} S_c(X)$ – множество вершин, в каждой из которых установлена хотя бы одна новая станция зарядки любого типа;
- $R_j(X)$ – множество маршрутов, пересекающихся в вершине j и обслуживаемых по крайней мере одним старым или новым электробусом, $j \in S(X)$;
- $SR_{rb}(X)$ – множество дуг маршрута $r \in R_b(X)$, в каждой вершине j которых установлена хотя бы одна старая или новая станция зарядки типа $c \in C_{jb}$ для обслуживания электробусов типа $b \in B(X)$, назначенных на этот маршрут;
- $c_{jrb}(X)$ – единственный тип новой или старой станции зарядки в вершине j новых и старых электробусов типа b , назначенных на маршрут r ;
- $B_{jc}(X) = \{b \mid c_{jrb}(X) \neq False, b \in B, r \in R_b\}$ – множество типов электробусов всех маршрутов, пересекающихся в j , которые будут заряжаться на новых и старых станциях типа c , $j \in S(X)$, $c \in C(X)$;
- $Z_r(X) = \sum_{b \in B_r(X)} cap_b FR_{rb}(X)$ – интенсивность пассажиропотока маршрута r , поддерживаемая новыми электробусами (максимальное количество пассажиров, отправляющихся в новых электробусах с любой остановки маршрута r в единицу времени в ОГД блоке циклов), $r \in R(X)$;
- $NV_{rb}(X) = \lfloor d_r FR_{rb}(X) \rfloor$ – количество новых электробусов типа b , назначенных на маршрут r в ОГД блоке циклов;
- $FN_{jb}(X) = \sum_{r \in R_j(X)} (fr_{rb} + FR_{rb}(X))$ – суммарная частота прибытия новых и старых электробусов типа b в вершину j в ОГД блоке циклов, $j \in NE \cap (S(X) \cup NO)$, $b \in B(X)$;
- $FN_{jb}(X) = \sum_{r \in R_j(X)} \alpha_{rbj}^{depot} (nv_{rb} + NV_{rb}(X)) / t_j^{depot}$ – суммарная частота прибытия новых и старых электробусов типа $b \in B(X)$ в депо j , $j \in ND \cap S(X)$, $b \in B(X)$ за интервал времени I_j длительности t_j^{depot} ;
- $M_i(X) = \{j \in S(X) \mid i \in L_j(X)\}$ – множество новых нетрансформаторных вершин, связанных с трансформаторной вершиной i ;
- $T(X)$ – множество трансформаторных вершин, каждая из которых связана с по крайней мере одной новой станцией зарядки;
- $TP_i(X) = \sum_{j \in M_i(X) \cap N} \sum_{c \in C(X)} poc NC_{jc}(X)$ – суммарная мощность новых станций зарядки, соединенных с трансформаторной вершиной $i \in T(X)$, в ОГД блоке циклов;
- $TP(X) = \sum_{i \in T(X)} TP_i(X)$ – суммарная мощность всех новых станций зарядки в ОГД блоке циклов;
- $V(X) = \sum_{r \in R(X)} v_r(Z_r(X))$ – общая эффективность;
- $CC(X) = \sum_{c \in C(X)} \sum_{j \in S_c(X)} cc_c^{cap} NC_{jc}(X) + \sum_{r \in R(X)} \sum_{b \in B_r(X)} cv_b^{cap} NV_{rb}(X) + \sum_{j \in S(X) \setminus NO} \sum_{i \in L_j(X)} cl_{ij} + \sum_{i \in T(X) \setminus TO} cb_i$ – капитальные затраты;
- $OC(X) = \sum_{c \in C(X)} \sum_{j \in S_c(X)} cc_c^{ope} NC_{jc}(X) + \sum_{r \in R(X)} \sum_{b \in B_r(X)} (cv_b^{ope} + ce_{rb}) NV_{rb}(X)$ – операционные затраты, включая стоимость электроэнергии.

6. Постановка задачи

Обозначим через \mathcal{X} область допустимых решений X задачи \mathbf{P} . Она определяется системой соотношений:

- (1)
$$lc \leq CC(X) + OC(X) \leq uc,$$
- (2)
$$Z_r(X) = \sum_{b \in B_r(X)} cap_b FR_{rb}(X) \leq pas_r, \quad r \in R(X),$$
- (3)
$$TP_i(X) = \sum_{j \in M_i(X)} \sum_{c \in C(X)} poc NC_{jc}(X) \leq oi, \quad i \in T(X),$$
- (4)
$$lfr_{rb} \leq FR_{rb}(X) \leq \min \left\{ ufr_{rb}, \frac{pas_r - \sum_{b' \in B(X), b' \neq b} cap_{b'} lfr_{rb'}}{cap_b} \right\},$$

$$r \in R_b(X), \quad b \in B(X),$$
- (5)
$$c_{jrb}(X) \in C_{jb}, \quad j \in SR_{rb}(X), \quad r \in R_b(X), \quad b \in B(X),$$
- (6)
$$ei_{r(i,j)b} = 1, \quad (i, j) \in SR_{rb}(X), \quad r \in R_b(X), \quad b \in B(X),$$
- (7)
$$\sum_{j \in SR_{rb}(X) \setminus ND} ct_{jbc}^* \leq dc_{rb}, \quad c^* = c_{jrb}(X), \quad r \in R_b(X), \quad b \in B(X),$$
- (8)
$$nv_{rb} + NV_{rb}(X) = nv_{rb} + [d_r FR_{rb}(X)] \leq uv_{rb}, \quad r \in R_b(X), \quad b \in B(X),$$
- (9)
$$nc_{jc} + NC_{jc}(X) \leq uc_{jc}, \quad j \in S_c(X), \quad c \in C(X),$$
- (10)
$$\sum_{c \in C_b} (nc_{jc} + NC_{jc}(X)) \geq 1, \quad j \in NM_b \cap S(X), \quad b \in B(X) \cup BO,$$
- (11)
$$nc_{jc} + NC_{jc}(X) \geq \sum_{b \in B_{jc}(X)} ct_{jbc} FN_{jb}(X), \quad j \in S(X) \cup NO, \quad c \in C,$$
- (12)
$$|L_j(X)| = m, \quad j \in S(X) \setminus NO.$$

Соотношения (1) ограничивают суммарные капитальные и операционные затраты снизу и сверху. Соотношения (2) ограничивают сверху пассажиропоток для каждого маршрута, обслуживаемого новыми электробусами. Ограничения (3) гарантируют, что общая мощность новых станций зарядки, соединенных с одним и тем же трансформатором, не превышает выделенной мощности этого трансформатора. Ограничения (4) определяют нижние и верхние границы частоты движения новых электробусов. Ограничения (5) гарантируют, что подходящая станция зарядки установлена в каждой вершине дуг множества $SR_{rb}(X)$. При выполнении ограничений (6) любой новый электробус может допустимо двигаться по своему маршруту, если подходящие станции зарядки установлены в вершинах дуг множества $SR_{rb}(X)$. Ограничения (7) гарантируют, что общее время зарядки любого нового электробуса некоторого типа на некотором маршруте в одном цикле не превосходит верхнюю границу для этого типа и маршрута. Ограничения (8) обеспечивают то, что

общее количество старых и новых электробусов каждого типа, обслуживающих один и тот же маршрут, не превосходит верхней границы, установленной для этого типа электробуса и маршрута. Соотношения (9) ограничивают сверху общее количество новых и старых станций зарядки определенного типа для каждой вершины. Ограничения (10) указывают, что по крайней мере одна новая или старая станция зарядки типа $c \in C_b$ должна быть установлена в вершине множества NM_b , если эта вершина принадлежит маршруту, обслуживаемому по крайней мере одним новым электробусом. Дено является одной из таких вершин. Ограничения (11) гарантируют, что количества новых и старых станций зарядки типа c , установленных в вершине j для обслуживания электробусов типа $B_{jc}(X)$ (всех маршрутов), достаточно для зарядки равномерно прибывающих электробусов без простоя в предположении, что электробусы прибывают равномерно. Отметим, что равномерное прибытие электробусов является упрощением реальной ситуации. При выполнении ограничений (12) количество новых связей нетрансформаторной вершины, в которой установлена хотя бы одна новая станция зарядки и нет старых станций зарядки, с трансформаторными вершинами равно m .

Задача **P** формулируется так:

$$\max_{X \in \mathcal{X}} \frac{V(X)}{CC(X) + OC(X)}.$$

Следует отметить, что оптимальное решение задачи **P** является Парето-оптимальным решением трехкритериальной задачи максимизации $V(X)$ и минимизации $CC(X)$ и $OC(X)$ для $X \in \mathcal{X}$, см. терминологию и результаты по решению многокритериальных задач в Steuer [68], Vincke [69], Roy [70], Collette и Siarry [71] и Ehrgott [72]. Поскольку задача **P** является сложной с вычислительной точки зрения, в разделе 7 предлагается рандомизированный эвристический алгоритм ее решения.

7. Рандомизированный эвристический алгоритм

Из-за вычислительной сложности задачи **P** предлагается следующий подход к ее решению. Путем случайного выбора частей допустимых или недопустимых решений строится множество допустимых решений $\mathcal{Q} \in \mathcal{X}$, которое, как ожидается, будет содержать решения, близкие к оптимальному. Затем из построенных решений выбирается наилучшее.

Формальное описание алгоритма, называемого далее алгоритмом **A**, приводится далее. Предполагается, что шаги алгоритма **A** выполняются последовательно, если не указано другое. Алгоритм **A** использует вероятности для выбора определенного значения численной характеристики решения. Эти вероятности являются управляющими параметрами алгоритма. Они могут быть определены лицом, принимающим решение, или установлены одинаковыми для всех возможных значений одной и той же характеристики решения. В последнем случае предполагается равномерное распределение вероятностей или распределение, настраиваемое по результатам численных экспериментов.

Алгоритм А.

Шаг 1 (инициализация). Положить $Q = \emptyset$. На шагах 2–6 формируется частичное решение Q . Оно может быть построено до допустимого или недопустимого полного решения.

Шаг 2 (формирование множества маршрутов $R(Q)$, обслуживаемых по крайней мере одним электробусом). Определить вероятности p_r , $0 \leq p_r \leq 1$, включения $r \in R$ в $R(Q)$. Положить $p_r = 1$ для старых маршрутов $r \in R_0$. Сформировать множество $R(Q)$, $|R(Q)| \geq 1$, с помощью этих вероятностей. Определить множество вершин $N(Q) = \{j \mid j \in R(Q)\}$.

Шаг 3 (формирование множества $B_r(Q)$ типов электробусов для обслуживания маршрута $r \in R(Q)$). Для каждого маршрута $r \in R(Q)$ определить вероятность p_{rb} использования электробусов типа b на маршруте r , $b \in B_r$. Положить $p_{rb} = 1$, если электробусы типа b уже используются на маршруте r . Сформировать множества $B_r(Q)$, $r \in R(Q)$, используя эти вероятности таким образом, чтобы $|B_r(Q)| \geq 1$ для всех $r \in R(Q)$. Сформировать множество типов электробусов $B(Q) = \cup_{r \in R(Q)} B_r(Q)$ и множества $R_b(Q)$ маршрутов, обслуживаемых по крайней мере одним электробусом типа $b \in B(Q)$.

Шаг 4 (формирование мест для станций зарядки и определение типов $c_{jrb}(Q)$ станций зарядки в вершине j для старых и новых электробусов типа b , назначенных на маршрут r). Для каждого типа электробусов $b \in B(Q)$ и каждого маршрута $r \in R_b(Q)$ сформировать множество дуг $SR_{rb}(Q)$, в каждой вершине j которых хотя бы одна старая или новая станция зарядки типа $c \in C_{jb}$ назначена типу электробусов b и маршруту r . Для заданных r и b процесс формирования $SR_{rb}(Q)$ начинается с включения в $S_{rb}(Q)$ дуг, соединяющих “обязательные” вершины множества $NM_b \cap r$ и вершины со старыми станциями зарядки $c \in C_b$, назначенными b и r . Предполагается, что типы $c_{jrb}(Q)$ станций зарядки заданы либо случайно сгенерированы для этих обязательных вершин. Далее вычисляем текущее суммарное время зарядки $CT_{rb}(Q) = \sum_{j \in SR_{rb}(Q) \setminus ND} ct_{jbc^*}$, где $c^* = c_{jrb}(Q)$. Если $CT_{rb}(Q) > dc_{rb}$, то Q не может быть построено до полного допустимого решения. В этом случае если время позволяет, то выполнить шаг 2, иначе выполнить шаг 7. Если $CT_{rb}(Q) \leq dc_{rb}$, то выполнить следующие вычисления. Рассмотрим произвольную дугу $(i_1, i_2) \in SR_{rb}(Q)$. Если $ei_{r(i_1, i_2)b} = 1$, то дополнительная станция зарядки для электробусов типа b на маршруте r между вершинами i_1 и i_2 не нужна. Если $ei_{r(i_1, i_2)b} = 0$, то включить в $SR_{rb}(Q)$ дуги (i_1, j) и (j, i_2) , $j \in N_c \cap r$, $c \in C_{jb}$, такие что $CT_{rb}(Q) + \min_{c \in C_b} \{ct_{jbc}\} \leq dc_{rb}$ и $ei_{r(i_1, j)b} = 1$ или $ei_{r(j, i_2)b} = 1$ с некоторой вероятностью, которая может быть больше, если расстояние от i_1 до j (соответственно от j до i_2) больше. Для допустимости подходящая станция зарядки должна быть установлена по крайней мере в одной вершине j между i_1 и i_2 на этой итерации для пары (r, b) . Если никакая вершина не может быть включена и время позволяет, то выполнить шаг 2, иначе выполнить шаг 7. Если дуги (i_1, j) и (j, i_2) включены в $SR_{rb}(Q)$, то определить тип станции зарядки $c^* = c_{jrb}(Q) \in C_b$ для вершины j с некоторой вероятностью так, чтобы $CT_{rb}(Q) + ct_{jbc^*} \leq dc_{rb}$. Изменить текущее общее время зарядки $CT_{rb}(Q) := CT_{rb}(Q) + ct_{jbc^*}$. Повторять приведенный процесс включения дуг до тех пор, пока не будет выполнено $ei_{r(i_1, i_2)b} = 1$ для

любой дуги $(i_1, i_2) \in SR_{rb}(Q)$. Сформировать множества $S(Q)$, $S_c(Q)$, $C(Q)$ и $B_{jc}(Q)$, которые являются аналогами таких же множеств, определенных для решения X . Отметим, что в конце этого шага будут выполнены соотношения

$$\begin{aligned} c_{jrb}(Q) &\in C_{jb}, \quad j \in SR_{rb}(Q), \quad r \in R_b(Q), \quad b \in B(Q), \\ ei_{r(i,j)b} &= 1, \quad (i, j) \in SR_{rb}(Q), \quad r \in R_b(Q), \quad b \in B(Q), \\ \sum_{j \in SR_{rb}(Q) \setminus ND} ct_{jbc^*} &\leq dc_{rb}, \quad c^* = c_{jrb}(Q), \quad r \in R_b(Q), \quad b \in B(Q), \\ \sum_{c \in C_b} (nc_{jc} + NC_{jc}(Q)) &\geq 1, \quad j \in NM_b \cap S(Q), \quad b \in B(Q) \cup BO, \end{aligned}$$

которые являются аналогами ограничений (5), (6), (7) и (10). Также отметим, что $NC_{jc}(Q)$ в последнем соотношении не определено явно, но это соотношение выполняется по определению шага 4.

Шаг 5 (формирование количеств $NC_{jc}(Q)$ новых станций зарядки и частот отправления $FR_{rb}(Q)$ новых электробусов). Определить $NC_{jc}(Q)$ и $FR_{rb}(Q)$ как решение задачи

$$\max_{(NC(Q), FR(Q)) \in \mathcal{NF}(Q)} \frac{V(FR(Q))}{CC(NC(Q), FR(Q)) + OC(NC(Q), FR(Q))},$$

где

$$\begin{aligned} V(FR(Q)) &= \sum_{r \in R(Q)} v_r(Z_r(Q)), \\ CC(NC(Q), FR(Q)) &= \sum_{c \in C(Q)} \sum_{j \in S_c(Q)} cc_c^{cap} NC_{jc}(Q) + \\ &+ \sum_{r \in R(Q)} \sum_{b \in B_r(Q)} cv_b^{cap} NV_{rb}(Q), \\ OC(NC(Q), FR(Q)) &= \sum_{c \in C(Q)} \sum_{j \in S_c(Q)} cc_c^{ope} NC_{jc}(Q) + \\ &+ \sum_{r \in R(Q)} \sum_{b \in B_r(Q)} (cv_b^{ope} + ce_{rb}) NV_{rb}(Q), \\ Z_r(Q) &= \sum_{b \in B_r(Q)} cap_b FR_{rb}(Q), \\ NV_{rb}(Q) &= [d_r FR_{rb}(Q)], \\ FN_{jb}(Q) &= \sum_{r \in R_j \cap R_b(Q)} (fr_{rb} + FR_{rb}(Q)), \quad j \in NE, \\ FN_{jb}(Q) &= \sum_{r \in R_j \cap R_b(Q)} \alpha_{rbj}^{depot} (nv_{rb} + NV_{rb}(Q)) / t_j^{depot}, \quad j \in ND, \end{aligned}$$

и допустимая область $\mathcal{NF}(Q)$ определяется ограничениями:

$$(13) \quad lc \leq CC(Q) + OC(Q) \leq uc,$$

$$(14) \quad Z_r(Q) \leq pas_r, \quad r \in R(Q),$$

$$(15) \quad TP_i(Q) = \sum_{j \in M_i(Q) \cap N} \sum_{c \in C(Q)} pocNC_{jc}(Q) \leq o_i, \quad i \in T(Q),$$

$$(16) \quad lfr_{rb} \leq FR_{rb}(Q) \leq \min \left\{ ufr_{rb}, \frac{pas_r - \sum_{b' \in B(Q), b' \neq b} cap_{b'} lfr_{rb'}}{cap_b} \right\},$$

$$r \in R_b(Q), \quad b \in B(Q),$$

$$(17) \quad nv_{rb} + NV_{rb}(Q) = nv_{rb} + [d_r FR_{rb}(Q)] \leq uv_{rb}, \quad r \in R_b(Q), \quad b \in B(Q),$$

$$(18) \quad nc_{jc} + NC_{jc}(Q) = \left[\sum_{b \in B_{jc}(Q)} ct_{jbc} FN_{jb}(Q) \right], \quad j \in S(Q) \cup NO, \quad c \in C(Q),$$

$$(19) \quad \frac{1}{FR_{rb}(Q)} \in Z_+, \quad NC_{jc}(Q) \in Z_+, \quad j \in S(Q) \cup NO,$$

$$r \in R(Q), \quad b \in B_r(Q), \quad c \in C(Q).$$

Для решения приведенной задачи используется метод роя частиц (Particle Swarm Optimization), см. Clerc [73], Kennedy и Eberhart [74] и Pedersen и Chipperfield [75]. Если решение системы (13)–(19) найдено, то выполнить шаг 6. Если решение не найдено и время позволяет, то выполнить шаг 2, иначе выполнить шаг 7.

Шаг 6 (выбор новых связей станций зарядки и трансформаторов). Для каждой вершины $j \in S(Q) \setminus NO$ обозначим через $L_j(Q)$ множество трансформаторных вершин, связанных с вершиной j в соответствии с частичным решением Q . Обозначим через $M_i(Q) = \{j \in S(Q) \mid i \in L_j(Q)\}$ множество новых нетрансформаторных вершин, связанных с трансформаторной вершиной i . Множества $L_j(Q)$, $j \in S(Q) \setminus NO$, множества $M_i(Q)$, $i \in T$, и множество $T(Q)$ новых трансформаторов отыскиваются случайно. Для каждой вершины $j \in S(Q) \setminus NO$ определяется вероятность p_{ij} связи трансформаторной вершины $i \in TE_j$ с вершиной j . Эта вероятность может быть выше для большей выделенной мощности o_i и она может быть выше для меньшей стоимости $cl_{ij} + cb_i y_i$, где $y_i = 1$, если $i \notin TO$, и $y_i = 0$, если $i \in TO$. Далее связать вершину $j \in S(Q) \setminus NO$ с m вершинами $i \in T$. Вычислить капитальные затраты $CC(Q) = \sum_{j \in S(Q) \setminus NO} \sum_{i \in L_j(Q)} cl_{ij} + \sum_{i \in T(Q) \setminus TO} cb_i + CC(NC(Q), FR(Q))$. Установить $\mathcal{Q} := \mathcal{Q} \cup \{Q\}$. Если время позволяет, то выполнить шаг 2, иначе выполнить шаг 7.

Шаг 7. Найти $Q^* \in \mathcal{Q}$ такое, что

$$\frac{V(Q^*)}{CC(Q^*) + OC(Q^*)} = \max_{Q \in \mathcal{Q}} \frac{V(Q)}{CC(Q) + OC(Q)}.$$

В рассматриваемых в настоящее время реальных ситуациях мощности множеств, генерируемых на шагах 1–4, ограничены следующими значениями. Количество маршрутов: $|R| \leq 18$. Количество депо: $|ND| \leq 3$. Количество типов станций зарядки: $|C| \leq 2$. Количество маршрутов, пересекающихся в одном месте, подходящем для установки станций зарядки: $|R_j| \leq 8$ для $j \in ND$, $|R_j| \leq 5$ для $j \in NE$. Количество остановок одного маршрута, подходящих для открытия станций зарядки: $|N \cap r| \leq 5$, $r \in R$. Количество типов электробусов, подходящих для обслуживания одного маршрута: $|B_r| \leq 5$, $r \in R$. Количество мест, в которых должна быть открыта хотя бы одна станция зарядки для электробусов одного типа и маршрута: $1 \leq |NM_b \cap r| \leq 3$, $b \in B$, $r \in R$. Количество соединений с трансформаторами: $m \in \{1, 2\}$. Количество мест размещения трансформаторов, подходящих для соединения с одним и тем же местом размещения станций зарядки: $|TE_j| \leq 2$, $j \in N$.

8. Заключение

Исследована сложная оптимизационная задача, возникающая при планировании процесса перехода от традиционного общественного транспорта к электрическому. Описаны принятые предположения, входные и выходные параметры задачи, а также ее математическая модель и рандомизированный алгоритм решения. Дальнейшая работа будет сконцентрирована на разработке детального алгоритма, его программной реализации и тестировании на реальных примерах участников проекта PLATON.

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику ОИПИ НАН Беларуси Я.М. Шафранскому за обсуждение постановки задачи и полезные советы по ее моделированию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://zeus.eu/uploads/publications/documents/zeus-report2017-2018-final.pdf>
2. *Nikolič Z., Živanovič Z.* The Contribution and Prospects of the Technical Development on Implementation of Electric and Hybrid Vehicles // *New Generat. Electric Vehicles*. 2012. Chapter 2. P. 27–66.
3. *Li J.-Q.* Battery-Electric Transit Bus Developments and Operations: A Review // *Int. J. Sustain. Transp. Technol.* 2016. V. 10. P. 157–169.
4. *Ahmad A., Khan Z.A., Alam M.S., Khateeb S.* A Review of the Electric Vehicle Charging Techniques, Standards, Progression and Evolution of EV Technologies in Germany // *Smart Sci.* 2018. V. 6. No. 1. P. 36–53.
5. *Anderson J.E., Lehne M., Hardinghaus M.* What Electric Vehicle Users Want: Real-World Preferences for Public Charging Infrastructure // *Int. J. Sustain. Transp.* 2018. V. 12. No. 5. P. 341–352.
6. *Todorovic M., Simic M.* Current State of the Transition to Electrical Vehicles // *Smart Innovat. Syst. Technol.* 2019. V. 98. P. 130–139.
7. *Barnitt R.* Case Study: Ebus Hybrid Electric Buses and Trolleys // *National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-540-38749*. 2006.
8. *Wang X., González J.A.* Assessing Feasibility of Electric Buses in Small and Medium-Sized Communities // *Int. J. Sustain. Transp.* 2013. V. 7. P. 431–448.

9. *Erkkilä K., Nyland N.-O., Pellikka A.-P., Kallio M., Kallonen S., Ojamo S., Ruotsalainen S., Pietikäinen O., Lajunen A.* eBUS – Electric Bus Test Platform in Finland // EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Sympos. Barcelona, Spain, 2013.
10. *Schmidt J., Eisel M., Kolb L.M.* Assessing the Potential of Different Charging Strategies for Electric Vehicle Fleets in Closed Transport Systems // *Energ. Policy*. 2014. V. 74. P. 179–189.
11. <http://zeus.eu/uploads/publications/documents/zeus-local-demo-brochures-mergedcompressed.pdf>
12. *Foltyński M.* Electric Fleets in Urban Logistics // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. V. 151. P. 48–59.
13. *Rogge M., Wollny S., Sauer D.U.* Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport – a Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements // *Energies*. 2015. V. 8. No. 5. P. 4587–4606.
14. *Hanlin J.* Battery Electric Buses Smart Deployment // *Zero Emission Bus conf.* London, 2016.
15. *Olsson O., Grauers A., Pettersson S.* Method to Analyze Cost Effectiveness of Different Electric Bus Systems // EVS29 Int. Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Sympos. Montreal. 2016. P. 1–12.
16. *Eudy L., Jeffers M.* Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results: Second Report // National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-5400-67698. 2017.
17. *Gao Z., Lin Z., LaClair T.J., Liu C., Li J.-M., Birky A.K., Ward J.* Battery Capacity and Recharging Needs for Electric Buses in City Transit Service // *Energy*. 2017. V. 122. P. 588–600.
18. *Leou R.-C., Hung J.-J.* Optimal Charging Schedule Planning and Economic Analysis for Electric Bus Charging Stations // *Energies*. 2017. V. 10. No. 4. 483.
19. *Christensen L., Klauenberg J., Kveiborg O., Rudolph C.* Suitability of Commercial Transport for a Shift to Electric Mobility with Denmark and Germany as Use Cases // *Res. Transp. Econ.* 2017. V. 64. P. 48–60.
20. *Khan W., Ahmad A., Ahmad F., Alam M.S.* A Comprehensive Review of Fast Charging Infrastructure for Electric Vehicles // *Smart Sci*. 2018. V. 6. No. 3. P. 256–270.
21. *Xylia M., Silveira S.* The Role of Charging Technologies in Upscaling the Use of Electric Buses in Public Transport: Experiences from Demonstration Projects // *Transport Res. A – Pol.* 2018. V. 118. P. 399–415.
22. *Gallet M., Massier T., Hamacher T.* Estimation of the Energy Demand of Electric Buses Based on Real-World Data for Large-Scale Public Transport Networks // *Appl. Energ.* 2018. V. 230. P. 344–356.
23. *Morganti E., Browne M.* Technical and Operational Obstacles to the Adoption of Electric Vans in France and the UK: An Operator Perspective // *Transport Policy*. 2018. V. 63. P. 90–97.
24. *Feng W., Figliozzi M.* Conventional vs Electric Commercial Vehicle Fleets: A Case Study of Economic and Technological Factors Affecting the Competitiveness of Electric Commercial Vehicles in the USA // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2012. V. 39. P. 702–711.
25. *Feng W., Figliozzi M.* An Economic and Technological Analysis of the Key Factors Affecting the Competitiveness of Electric Commercial Vehicles: A Case Study from the USA Market // *Transport Res. C – Emer.* 2013. V. 26. P. 135–145.

26. *Hallmark S.L., Wang B., Sperry R.* Comparison of On-Road Emissions for Hybrid and Regular Transit Buses // *J. Air Waste Manage.* 2013. V. 63. No. 10. P. 1212–1220.
27. *Lajunen A.* Energy Consumption and Cost-Benefit Analysis of Hybrid and Electric City Buses // *Transport Res. C – Emer.* 2014. V. 38. P. 1–15.
28. *Mohamed M., Garnett R., Ferguson M.R., Kanaroglou P.* Electric Buses: A Review of Alternative Powertrains // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2016. V. 62. P. 673–684.
29. *Schoch J.* Modeling of Battery Life Optimal Charging Strategies Based on Empirical Mobility Data // *IT – Information Technology.* 2016. V. 58. No. 1. P. 22–28.
30. *Teoh T., Kunze O., Teo C.-C.* Methodology to Evaluate the Operational Suitability of Electromobility Systems for Urban Logistics Operations // *Transportation Res. Procedia.* 2016. V. 12. P. 288–300.
31. *Teoh T., Kunze O., Teo C.-C.* Scenario-Based Electric Bus Operation: A Case Study of Putrajaya, Malaysia // *Int. J. Transp. Sci. Technol.* 2018. V. 7. No. 1. P. 10–25.
32. *Mohamed M., Farag H., El-Taweel N., Ferguson M.* Simulation of Electric Buses on a Full Transit Network: Operational Feasibility and Grid Impact Analysis // *Electr. Pow. Syst. Res.* 2017. V. 142. P. 163–175.
33. *Marmaras C., Xydas E., Cipcigan E.* Simulation of Electric Vehicle Driver Behaviour in Road Transport and Electric Power Networks // *Transport Res. C – Emer.* 2017. V. 80. P. 239–256.
34. *Xylia M., Leduc S., Patrizio P., Silveira S., Kraemer F.* Developing a Dynamic Optimization Model for Electric Bus Charging Infrastructure // *Transport. Res. Procedia.* 2017. V. 27. P. 776–783.
35. *Fiori C., Ahn K., Rakha H.A.* Optimum Routing of Battery Electric Vehicles: Insights Using Empirical Data and Microsimulation // *Transport Res. D – Tr. E.* 2018. V. 64. P. 262–272.
36. *Alonso M., Amaris H., Germain J.G., Galan J.M.* Optimal Charging Scheduling of Electric Vehicles in Smart Grids by Heuristic Algorithm // *Energies.* 2014. V. 7. P. 2449–2475.
37. *Wen M., Laporte G., Madsen O.B.G., Norrelund A.V., Olsen A.* Locating Replenishment Stations for Electric Vehicles: Application to Danish Traffic Data // *J. Oper. Res. Soc.* 2014. V. 65. No. 10. P. 1555–1561.
38. *Yu Z., Chen S., Tong L.* An Intelligent Energy Management System for Large-Scale Charging of Electric Vehicles // *CSEE J. Power Energy.* 2016. V. 2. No. 1. P. 47–53.
39. *Juan A.A., Mendez C.A., Faulin J., de Armas J., Grasman S.E.* Electric Vehicles in Logistics and Transportation: A Survey on Emerging Environmental, Strategic, and Operational Challenges // *Energies.* 2016. V. 9. No. 2. 86.
40. *Hiermann G., Puchinger G., Ropke S., Hartl R.F.* The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations // *Eur. J. Oper. Res.* 2016. V. 252. P. 995–1018.
41. *Quak H., Nesterova N., van Rooijen T.* Possibilities and Barriers for Using Electric-Powered Vehicles in City Logistics Practice // *Transport. Res. Procedia.* 2016. V. 12. P. 157–169.
42. *Desaulniers G., Errico F., Irnich S., Schneider M.* Exact Algorithms for Electric Vehicle-Routing Problems with Time Windows // *Oper Res.* 2016. V. 64. No. 6. P. 1388–1405.
43. *Wielinski G., Trépanier M., Morency C.* Electric and Hybrid Car Use in a Free-Floating Car Sharing System // *Int. J. Sustain. Transp.* 2017. V. 11. No. 3. P. 161–169.

44. *Kunith A., Mendelevitch R., Goehlich D.* Electrification of a City Bus Network – An Optimization Model for Cost-Effective Placing of Charging Infrastructure and Battery Sizing of Fast-Charging Electric Bus Systems // *Int. J. Sustain. Transp.* 2017. V. 11. No. 10. P. 707–720.
45. *Bruglieri M., Mancini S., Pezzella F., Pisacane O., Suraci S.* A Three-Phase Matheuristic for the Time-Effective Electric Vehicle Routing Problem with Partial Recharges // *Electron. Notes Discrete Math.* 2017. V. 58. P. 95–102.
46. *Pelletier S., Jabali O., Laporte G.* Battery Electric Vehicles for Freight Distribution: A Survey of Vehicle Technology, Market Penetration, Incentives and Practices // *CIRRELT, CIRRELT-2014-43.* Montreal. 2014.
47. *Pelletier S., Jabali O., Laporte G.* 50th Anniversary Invited Article. Goods Distribution with Electric Vehicles: Review and Research Perspectives // *Transport Sci.* 2016. V. 50. No. 1. P. 3–22.
48. *Pelletier S., Jabali O., Laporte G.* Charge Scheduling for Electric Freight Vehicle // *Transport Res. B – Meth.* 2018. V. 115 P. 246–269.
49. *Pelletier S., Jabali O., Laporte G., Veneroni M.* Battery Degradation and Behaviour for Electric Vehicles: Review and Numerical Analyses of Several Models // *Transport Res. B – Meth.* 2017. V. 103. P. 158–187.
50. *Froger A., Mendoza J., Jabali O., Laporte G.* New Formulations for the Electric Vehicle Routing Problem with Nonlinear Charging Functions // *CIRRELT, CIRRELT-2017-30.* Montreal. 2017.
51. *Froger A., Mendoza J., Jabali O., Laporte G.* A Matheuristic for the Electric Vehicle Routing Problem with Capacitated Charging Stations // *CIRRELT, CIRRELT-2017-31.* Montreal. 2017.
52. *Xylia M., Leduc S., Patrizio P., Kraemer F., Silveira S.* Locating Charging Infrastructure for Electric Buses in Stockholm // *Transport Res. C – Emer.* 2017. V. 78. P. 183–200.
53. *Liu Z., Song Z., He Y.* Planning of Fast-Charging Stations for a Battery Electric Bus System under Energy Consumption Uncertainty // *Transport Res. Rec.* 2018. <https://doi.org/10.1177/0361198118772953>
54. *Hosseini S., Sarder M.D.* Development of a Bayesian Network Model for Optimal Site Selection of Electric Vehicle Charging Station // *Int. J. Elec. Power.* 2019. V. 105. P. 110–122.
55. *Wang Y., Bi J., Guan W., Zhao X.* Optimising Route Choices for the Travelling and Charging of Battery Electric Vehicles by Considering Multiple Objectives // *Transport Res. D – Tr E.* 2018. V. 64. P. 246–261.
56. *Wang Y.-W., Lin C.-C., Lee T.-J.* Electric Vehicle Tour Planning // *Transport Res. D – Tr E.* 2018. V. 63. P. 121–136.
57. World Health Organization. Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution. Report of a WHO Working Group. Bilthoven, Netherlands, 2000.
58. *Sydbom A., Blomberg A., Parnia S., Stenfors N., Sandström T, Dahmén S.E.* Health Effects of Diesel Exhaust Emissions // *Eur. Respir. J.* 2001. V. 17. No. 4. P. 733–746.
59. HEI Panel on the Health Effects of Traffic-Related Air Pollution. Traffic-Related Air Pollution: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects. HEI Special Report 17. Health Effects Institute, Boston, MA, 2010.
60. HEI Diesel Epidemiology Panel. Executive Summary. Diesel Emissions and Lung Cancer: An Evaluation of Recent Epidemiological Evidence for Quantitative Risk Assessment. HEI Special Report 19. Health Effects Institute, Boston, MA, 2015.

61. *Ali R.* Effect of Diesel Emissions on Human Health: A Review // *Int. J. Appl. Engin. Res.* 2011. V. 6. No. 11. P. 1333–1342.
62. *Chan S., Miranda-Moreno L.F., Patterson Z.* Analysis of GHG Emissions for City Passenger Trains: Is Electricity an Obvious Option for Montreal Commuter Trains? // *J. Transport. Technol.* 2013. V. 3. No. 2A. P. 17–29.
63. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 105 // *Int. Agency for Research on Cancer.* Lyon, France, 2014.
64. *Mohner M.* The Hidden Impact of a Healthy-Worker Effect on the Results of the Diesel Exhaust in Miners Study // *Eur. J. Epidemiol.* 2016. V. 31. No. 8. P. 803–804.
65. *McClellan R.O.* Critique of Health Effects Institute Special Report 19, “Diesel Emissions and Lung Cancer: An Evaluation of Recent Epidemiological Evidence for Quantitative Risk Assessment” // *Report.* Albuquerque, NM, 2016.
66. *Gaskins A.J., Hart J.E., Mínguez-Alarcón L., Chavarro J.E., Laden F., Coull B.A., Ford J.B., Souter I., Hauser R.* Residential Proximity to Major Roadways and Traffic in Relation to Outcomes of in vitro Fertilization // *Environ. Int.* 2018. V. 115. P. 239–246.
67. *Jochem P., Plötz P., Ng W.-S., Rothengatter W.* The Contribution of Electric Vehicles to Environmental Challenges in Transport // *Transport Res. D – Tr E.* 2018. V. 64. P. 1–4.
68. *Steuer R.* Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application. N.Y.: John Wiley & Sons, 1985.
69. *Vincke P.* Multicriteria Decision Aid. N.Y.: John Wiley & Sons, 1992.
70. *Roy B.* Multicriteria Methodology for Decision Aiding / *Nonconvex Optim. Appl.* V. 12. Dordrecht: Kluwer Acad. Publishers, 1996.
71. *Collette Y., Siarry P.* Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies. Springer Science & Business Media, 2004.
72. *Ehrgott M.* Multicriteria Optimization. Springer Verlag, 2005.
73. *Clerc M.* Particle Swarm Optimization. John Wiley & Sons, 2010.
74. *Kennedy J., Eberhart R.* Particle Swarm Optimization // *Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks. IV.* 1995. P. 1942–1948.
75. *Pedersen M.E.H., Chipperfield A.J.* Simplifying Particle Swarm Optimization // *Appl. Soft Comput.* 2010. V. 10. P. 618–628.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 09.07.2019

После доработки 19.10.2019

Принята к публикации 28.11.2019