

## **МОДЕЛ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ МАРШРУТИЗАЦИЯТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА**

**Теодор Беров**

[tberov@vtu.bg](mailto:tberov@vtu.bg),

**ВТУ "Тодор Каблешков", ул. "Гео Милев" № 158, София  
БЪЛГАРИЯ**

*Ключови думи:* транспорт, товарен, автомобилен, градски, електрически, проблем за маршрутизацията на транспортните средства

*Резюме:* В този материал се представя модел за маршрутизация на превозните средства с електрическо захранване (ЕЛПС), който отчита очакваното състояние на заряда на батерията по времетраенето на маршрута, като се вземат в предвид скоростта, натоварването и пътните наклони. Насочен е към градска зона. Използва като основа формулировка на проблема *HFFVRPTW* и мета-евристичен подход за решението му, чрез използване на тип Еволюционен алгоритъм за оптимизация. Към основната формулировка на проблема е добавен, в целевата функция, допълнително разход за изчерпване на капацитета на батерията на ЕЛПС по съответния маршрут.

### **1. ВЪВЕДЕНИЕ**

През последните години се наблюдава бум в производството и продажбите на електромобили (ЕЛМ, ЕЛПС). Все повече автомобилни производители започнаха да залагат на електрически варианти на моделите си. Електрическите коли, в сравнение с колите с двигатели с вътрешно горене, притежават следните предимства [10]: по-голям КПД; по-голямо ускорение; безшумност; ниска цена на километър; значително опростено сервизно обслужване на колите - по-малко на брой и по-неизносващи се части. Днешното ниво на технологиите предопределя и някои недостатъци: нисък капацитет на батериите, водещ до по-къс пробег с едно зареждане; бавно презареждане; неразвита инфраструктура за зареждане. Към момента много компании в света работят по намаляване на посочените недостатъци и част от тях са вече решени.

По отношение на градския товарен транспорт [2], който отговаря за около една четвърт от емисиите на  $\text{CO}_2$  от транспортния сектор, една от целите на ЕС е да се постигне по същество без  $\text{CO}_2$  градска логистика в големите градски центрове до 2030 г. чрез разработване и внедряване на нови и устойчиви горива и задвижващи системи. Постепенното оттегляне на превозните средства, използващи "конвенционални горива" от градската среда допринася за намаляване на зависимостта от петрола, емисиите на парникови газове и замърсяването на въздуха и шума. За да отговорят на европейските стандарти за качество на въздуха, в някои големи европейски градове вече са въведени „зони на емисии“, където достъпът до градските райони е ограничен по отношение на товарните превозни средства, които не отговарят на определени стандарти за емисии.

Проблема за маршрутизация на транспортните средства (VRP) се състои от проектиране на  $m$  маршрути на превозни средства с най-малки общи разходи, всеки с начало и край в депо, като всеки клиент се посещава само един път, общото търсене на всеки маршрут не надвишава капацитета на превозното средство, и пробега/времетраенето на всеки маршрут не надвишава предварително зададеното съответноограничение. Едно характерно разширение на основният VRP проблем, насочено към проблемите на градската логистика, е свързано с отчитане наличния парк от превозни средства за съответния логистичен оператор

В този материал се предлага модифициране, чрез въвеждане на показателите скорост, натоварване и наклон на пътя, и съответния математически апарат, за отчитане особеностите на ЕлПС, към формулирания в [9] проблем „Проблем за маршрутизацията на фиксиран разнороден парк транспортни средства с отчитане на времеви прозорец“ (HFFVRPTW) и мета-евристичен подход за решението му, чрез използване на тип Еволюционен алгоритъм за оптимизация - Империалистически конкурентен алгоритъм(ИКА).

## 2. ОПИСАНИЕ НА ПРОБЛЕМА

ЕлМ са много по-енергийно ефективни от конвенционалните превозни средства (ПС) и следователно се очаква да доведат до значителни икономии на енергия, включително и за градския товарен транспорт. Въпреки това, в сравнение с конвенционалните ПС, ЕМ имат по-кратък пробег за едно зареждане - обикновено 80 - 120км., а за лекотоварните – от >50км. Характерното за този пробег е, че той е дефиниран като „чист“ на база на енергийните характеристики на батерията, без спирания и тръгвания, изключително характерни за градското движение. Освен това, настоящите ЕМса с рекуперативна спирачка, т.е. зареждане на батерията при спиране.

Базирайки се на литературните източници, могат да се открият следните основни проблеми:

- ПРОБЛЕМ ЗА НАМИРАНЕ НА НАЙ-КРАТКИЯ ПЪТ - ЕНЕРГИЕН (ЕнНКП)(ESPP) [6] –състои се в намиране на най-краткия път между два върха от градската пътна мрежа за ЕМ с акумулаторни батерии, като се отчитат енергийното възстановяване(рекуперация) по време на фазите на намаляване на скоростта;
- TSP МОДЕЛ ЗА ДОСТАВКИ С ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА (ЕлПС)[4] - Целта на EV-TSP е да се постигне максимално ниво на наличната енергия (или състояние на заряда на батерията) в края на обиколката. Това ниво се определя с използване на общ Модел за потребление на енергия предложен и тестван в литературата [7], където се отчита теглото на автомобила, скоростта и наклон на пътищата;
- ПРОБЛЕМ ЗА РАЗПОЛОЖЕНИЕ НА СЪОРЪЖЕНИЯТА [6] - Една от основните бариери пред успеха на ЕлПС (дължащо се на ограничения пробег) е в ограничен брой станции за зареждане. Създаването на зареждаща инфраструктура е основен проблем пред развитието на парка от ЕлПС. За да се улесни проблема за зареждане. Поради големите капиталови разходи, свързани с инвестиции в инфраструктурата, икономическите фактори са много важни при определяне на броя и разположението на зарядните станции. Поради това, изследванията трябва да се насочат, към осигуряване теоретична основа за разполагане на станции(модел за местоположение на

дадено съоръжение), за по икономично и ефективно обслужване на ЕлПС маршрутите.

- ПРОБЛЕМ ЗА МАРШРУТИЗАЦИЯТА НА ЕлПС – ЕНЕРГИЕН (EVRP) [6] – това е генерализация на класическите варианти на VRP с целева функция, отчитаща енергийното състояние на хранващите елементи;
- ПРОБЛЕМ ЗА МАРШРУТИЗАЦИЯТА НА ЕлПС [8] – това е генерализация на класическите варианти на VRP с добавяне на ограниченията свързани с енергийната консумация и възможностите за възстановяване на енергията от рекуперацията при процеса на спиране и намаление на скоростта и посещение на зарядни станции.

### 3. МОДЕЛ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ МАРШРУТИЗАЦИЯТА НА ЕлПС

Като основна формулировка се използва описания в [9] проблем *HFFVRPTW*. Той е насочен към разработването на оптимални доставки от дадено депо, за да се задоволи търсенето на клиентите чрез наличния парк от превозни средства, които се различават по отношение на тяхната максимална товароносимост и променливи разходи на единица разстояние. Метода за решение на поставения проблем е ИКА. Използват се следните основни постановки:

- градската пътна мрежа е представена във вид на ориентиран свързан граф  $G=(V,E)$ , където  $V=\{1,2,..n_0\}$  – множеството върхове в гафа с мощност  $d_0$ ,  $E$  – множеството на дъгите, съединяващи върховете. Връх 0 съответства на депо и връх  $i$  съответства на клиент  $i$ , за  $1 \leq i \leq n$ . Всички осъществими маршрути на превозно средство, съответстват на пътища в  $G$ , които започват от  $0$  и завършва на  $0$ .

- всеки клиент  $i \in V$  е асоцииран с известно търсене  $d_i^q$ , от предварително определена стока  $q$  ( $q = 1,2,..,|Q|$ ). Освен това, всеки клиент притежава времеви прозорец  $[a_i, b_i]$ , представляващи най-ранното и най-късното времена за осъществяване на услугата;

- към склада е асоцииран парк от определен брой разнородни превозни средства, съставен от  $m$  типа превозни средства (товароносимост),  $M = \{1,..,m\}$ . За всеки тип  $m \in M$ ,  $m_g$  превозни средства са налични в склада и имат: товароносимост  $Q_g$ ; постоянни разходи  $F_g$ . Освен това, за всяка дъга  $(i,j) \in E$  и всеки тип превозно средство  $g \in M$ , имаме променливи разходи  $c_{ij}^g$ , зависещи от пробегата.

- едно решение  $S$  е колекция от маршрути,  $R_1, R_2 ..R_n$ , по такъв начин, че всеки клиент ще бъде покрит от точно един маршрут  $R_i$ . Маршрута  $(R,k)$  е изпълним, ако сумата от търсенето на клиентите, посетени по маршрута не надвишава капацитета на превозното средство  $Q_g$  по маршрута ( $\sum_{i=1}^n q_{k_i} \leq Q_g$ ). Разходите за даден маршрут, кореспондират със сумата от разходите по дъгите на маршрута плюс постоянните разходи за превозното средство, асоциирано с маршрута ( $F_g + \sum_{i=1}^n c_{ij}^g$ ).

Използвайки формулировката на целевата функция [9] (*поради спецификата на проблема HFFVRPTW*, при обслужването на клиентите, могат да възникнат две характерни събития: необслужени заявки (пълно или частично); неизпълнени ограничения на изискванията на времевите прозорци на клиентите. За отчитането на тези събития, са добавени допълнителен разход за времеви прозорец и за неусвоени заявки), е добавено  $P_{\text{бат.}}(R_i)$  – за изчерпването на капацитета на батерията на ЕлПС по съответния маршрут.

$$(1) \quad C(S) = \sum_{k=1}^m F_k + \sum_{i=1}^n C^{об.}(R_i) + \sum_{i=1}^n P_{бат.}(R_i) + \sum_{i \in V} p_i^t(t_i) + \sum_{i \in V} p_i^q(d_i) \rightarrow \min$$

Според [5], за да се изчисли нарушения капацитет на батерията  $P_{бат.}(R_i)$ , се въвеждат следните две величини:  $\gamma_i^{\rightarrow}$  съдържа заряд на батерията, който е необходим, за да се пътува от последното посещение на станция за зареждане или депо до връх  $i$  и  $\gamma_i^{\leftarrow}$  съдържа заряд на батерията, който е необходим, за да се пътува от връх  $i$  до следващото посещение на станция за зареждане или депо.

$$(2) \quad \gamma_i^{\rightarrow} = (\gamma_i^{\rightarrow} \cdot y_{i-1}^e) \cdot r_e \cdot l_{i-1,i}, \quad y_{i-1}^e \in \{0,1\}, \quad (i = 1, \dots, n+1) \\ y_{i-1}^e = 0 \rightarrow \text{ако } i-1 \in Z'_0; \quad y_{i-1}^e = 1 \rightarrow \text{око не}$$

$$(3) \quad \gamma_i^{\leftarrow} = (\gamma_{i+1}^{\leftarrow} \cdot y_{i+1}^e) \cdot r_e \cdot l_{i,i+1}, \quad y_{i+1}^e \in \{0,1\}, \quad (i = 0, \dots, n) \\ y_{i+1}^e = 0 \rightarrow \text{ако } i+1 \in Z'_{n+1}; \quad y_{i+1}^e = 1 \rightarrow \text{око не}$$

Използвайки така въведените величини, определяме  $P_{бат.}(R_i)$  за всеки маршрут:

$$(4) \quad P_{бат.}(R_j) = \sum_{i+1 \in i(R_j)} \max\{\gamma_i^{\rightarrow}, \gamma_i^{\leftarrow}\} - P_{бат}^{max}, 0$$

Енергийното ниво на заряда на батериите  $E_0^{бат}$  е известно в началото на всеки маршрут [4]. Това ниво на енергия се определя от капацитета на батерията и не може да бъде надвишено по време на процеса на рекуперация. Освен това, наличната енергия на всеки пункт от маршрута не може да падне под определена минимална стойност. То може да бъде определено:

$$(5) \quad E_j^{бат} = \begin{cases} 0, & \text{ако } E_i^{бат} - e_{ij} \cdot x_{ij} \leq 0 \\ P_{бат}^{max}, & \text{ако } E_i^{бат} - e_{ij} \cdot x_{ij} \geq 0 \\ E_i^{бат} - e_{ij} \cdot x_{ij}, & \text{за всички останали} \end{cases}$$

Енергията  $e_{ij}$  използвана (или произведена) за дъгата  $(i,j)$  се определя от общата мощност  $p_{ij}$  за дъгата (вкл. и мощност за допълнителни устройства), и се отчитат общата маса на ЕЛПС, наклони, преодоляване на триенето и др. Тази мощност има негативна стойност при рекуперация.

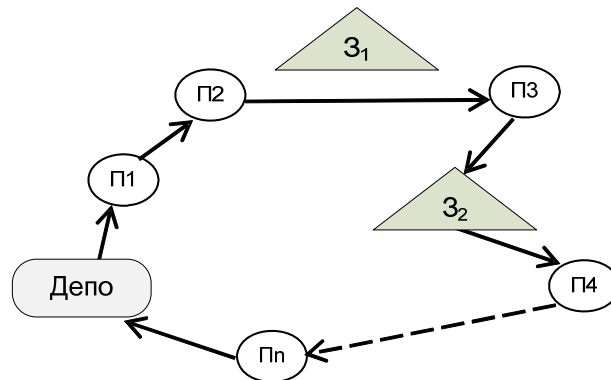
$$(6) \quad e_{ij} = p_{ij} \cdot t_{ij}; \quad t_{ij} = l_{ij}/v_{ij} p_{ij} = M_{ij} \cdot g \cdot v_{ij} \cdot (\sin\theta_{ij} + c_r \cdot \cos\theta_{ij}) + 0,5 \cdot c_d \cdot \rho \cdot A \cdot v_{ij}^3$$

В (6)  $p_{ij}$  е моментната мощност, необходима да се преодолее силите на гравитация, съпротивление от плъзне и търкаляне.  $M_{ij}$  е масата на превозното средство (в кг), (т.е. празен плюс съответният товар за дъгата  $(i, j)$ );  $g$  е гравитационната константа ( $9.81 \text{ m} / \text{s}^2$ ),  $\rho$  е плътността на въздуха ( $\text{кг} / \text{м}^3$ ),  $A$  е предна площ на превозното средство (в  $\text{m}^2$ ), и  $c_r$  и  $c_d$  са безразмерни коефициенти на съпротивление при търкаляне и плъзнете съответно. Може да се приеме, че се променят скоростта и товара за отделните дъги, а останалите параметри са постоянни.

Използвайки разходната норма  $r_e$  и [3] за консумираната енергия може да се приложи:

$$(7) \quad e_{ij} = r_e \cdot l_{ij}, Wh \quad (Wh \rightarrow Wh/km.km)$$

Подробно описание за определяне на енергийните стойности са дадени в [1]. За решаване на поставения проблем може да се използва разгледация в [9] мета евристичен подход.



Фиг.1 Графично представяне на проблема

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В този материал е разгледан проблем, свързан с маршрутизацията на ограничен парк Електрически превозни средства и отчитане времето прозорци при клиентите. Той е характерен с отчитането на броя на използваните ЕЛПС и капацитета на батериите им, свързан с намалението на заряда им от движението по маршрута. Превозните средства имат възможност за посещение на станции за презареждане по маршрута. Времето за зареждане зависи от текущия заряд на батерията при пристигането на станцията. Предложения модел е за ежедневни задачи и разглежда основно проблема за изграждане на маршрути от едно депо.

Показано е използването на показателите скорост, натоварване и наклон на пътя за определяне на текущия капацитет на батерията.

#### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Cedric De Cauwer , Joeri Van Mierlo and Thierry Coosemans, *Energy Consumption Prediction for Electric Vehicles Based on Real-World Data*, Energies 2015, 8, 8573-8593; doi:10.3390/en8088573.
- [2] European Commission, “ White Paper - Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and Resource Efficient Transport System”. COM(2011)-0144final. – online {[http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011\\_white\\_paper\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011_white_paper_en.htm) }
- [3] Inayat Ali et all, *Studying a course about human powered electric vehicles via the Erasmus LLP Intensive Programmes*, МНК „ЕЛЕКТРОМОБИЛИ”, ЕМ’11, Русе, България, стр. 39-46, 2011
- [4] Maud Bay, Sabine Limbourg, *TSP model for electric vehicle deliveries, considering speed, loading and road grades*, ODYSSEUS 2012 Workshop Schedule, 2012
- [5] Michael Schneider, Andreas Stenger, Dominik Goeke, *The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations*, Technical Report 02/2012

- [6] Nora Touati-Moungla and Vincent Jost, *Combinatorial optimization for electric vehicles management*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11), 2011, paper 7 (504) – online {icrepq.com/icrepq'11/504-touati.pdf}
- [7] Prins, R., Hurlbrink, R. and Winslow, L. “Electric Vehicle Energy Usage Modeling and Measurement”, *International Journal of Modern Engineering* 13(1), 2013
- [8] Jane Lina, Wei Zhou, Ouri Wolfson, *Electric vehicle routing problem*, *Transportation Research Procedia* 12 (2016) 508 – 521 – online {www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516000089}
- [9] Карагъзов К., Беров Т., *Приложения на империалистически конкурентен алгоритъм за оптимизиране на маршрута на превозните средства*, *Механика, транспорт, комуникации*, том 12, бр. 3(1), стр. 63-68, 2014  
(Karagyzov K., Berov T., „Prilozheni na imperialisticheski konkurenten algoritam za optimiziranemarshrutizatsiyatanaprevoznitesredstva“, *Mehanika, transport, komunikatsii*, ISSN 1312-3823, tom 12, br. 3(1), 2014, str. 63-68)
- [10] [https://bg.wikipedia.org/wiki/Електрическа\\_кола](https://bg.wikipedia.org/wiki/Електрическа_кола)
- [11] <http://www.bernabe.dorrnsoro.es/vrp/>

## MODEL FOR OPTIMIZATION THE ROUTING OF ELECTRIC VEHICLES

Teodor Berov  
tberov@vtu.bg,

*Todor Kableshkov University of Transport,  
Sofia, 158 Geo Milev str.  
BULGARIA*

**Key words:** *transport, freight, urban, vehicle routing problem, electric vehicles*

**Abstract:** *This paper presents a vehicle routing problem for electric vehicles in urban zone. The model takes into account expected state of charge of the battery in the duration of the route, considering speed, loading and road gradients. It deals with orders weights, road characteristics and vehicle specifications. The base formulation of the HFFVRPTW, meta-heuristic approach (type Evolutionary Optimization Algorithm), and extra cost for running out of battery capacity of vehicle on the route in the objective function of the problem, is used.*