

УДК 629.43.016.2(1–21)

К. О. СОРОКА^{1*}, Т. П. ПАВЛЕНКО², Д. О. ЛИЧОВ³

^{1*}Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. + 38 (097) 499 24 95, ел. пошта kasoroka@ukr.net, ORCID 0000-0001-9091-6861

²Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. + 38 (097) 573 44 25, ел. пошта travlenkoskp@gmail.com, ORCID 0000-0002-2356-4066

³Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. + 38 (050) 996 27 86, ел. пошта dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИБОРУ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ РУХУ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета. Дослідження передбачає розробку системи автоматизованого вибору оптимальних режимів руху та автоматичного контролю витрат електроенергії засобами електротранспорту з метою забезпечення мінімально можливих витрат енергії. **Методика.** У якості методики застосовуються: 1) математичне моделювання режимів руху засобів наземного електричного транспорту; 2) порівняння результатів моделювання з даними статистичних спостережень; 3) а також розробка системи автоматизованого вибору режимів руху електротранспорту з мінімально можливими затратами електроенергії в умовах виконання графіка та дотримання обмежень, регламентованих правилами руху. **Результати.** Авторами одержана математична залежність витрат електроенергії підприємствами електротранспорту від режимів руху та середньомісячної температури навколишнього середовища. Розроблено проект системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху та автоматизованого контролю витрат електроенергії транспортними засобами у вигляді локальної комп'ютерної мережі, працюючої сумісно з діючою системою супутникової навігації. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель розрахунку кривих руху та витрат електроенергії транспортним засобом, яка враховує характеристики тягового двигуна та системи керування, зміну маси при посадці та висадці пасажирів, уклони та радіуси кривих шляху руху, обмеження, що накладаються дорожніми знаками, та інші чинники. Встановлена залежність витрат електроенергії підприємствами електротранспорту від середньомісячної температури навколишнього середовища. **Практична значимість.** Створена математична модель спрощує розрахунки динаміки руху та витрат електроенергії транспортними засобами при їх експлуатації. Вона може знайти використання під час розробки технологічних карт маршрутів, проектуванні та модернізації тягових мереж, розробці засобів енергозбереження. Автоматизована система вибору швидкісного режиму руху полегшує роботу водія транспортного засобу, дозволяє зменшити затрати електроенергії, а також забезпечує автоматизований облік витрат електроенергії. Встановлена залежність витрат електроенергії від температури навколишнього середовища може бути використана для вдосконалення методів нормування роботи підприємств електротранспорту. В результаті виконаних досліджень доведена можливість зменшення витрат електроенергії на 10–45 % при дотриманні раціональних режимів руху. Одержано авторське свідоцтво на винахід системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів міського електричного транспорту.

Ключові слова: міський електричний транспорт; енергозбереження; питомі витрати електроенергії; нормування; моделювання руху; режими руху; CAN мережа

Вступ

В умовах України, коли вартість електроенергії суттєво збільшується, енергозбереження стає однією з основних проблем, яка визначає конкурентну здатність підприємств, їх подальше функціонування. Це відноситься і до міського електричного транспорту. Розрахунки по-

казують, що в 2015 році підприємства електротранспорту за використану електроенергію отримували 12–15 % прибутку, а в 2017 році їм доведеться витратити на оплату електроенергії 75 % прибутку (з урахуванням існуючих розцінок оплати за проїзди, державних субвенцій та дотацій з місцевих бюджетів). Основна частина витрат електроенергії припадає на електричну

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тягу. Суттєве зменшення цих витрат можливе при виборі раціональних режимів руху транспортних засобів. Залежно від умов конкретного маршруту економія може складати від 10 % до 45 %.

Однак, цією проблемою практично не займаються. У трамваях і тролейбусах відсутні лічильники витрат електроенергії, що не спонукає водіїв обирати економні режими руху, тому водій не знає, в якому режимі йому виконувати рух, щоб витрати енергії були мінімальні. Облік електроенергії ведеться тільки за показниками лічильників на входах депо та на тягових підстанціях, тому для підприємства в цілому виконати аналіз напрямків витрат електроенергії в повній мірі неможливо.

Методика

Вихідні дані одержані в результаті аналізу офіційних статистичних даних роботи підприємств електротранспорту України [5, 6] і додаткових даних про витрати електроенергії двома трамвайними і двома тролейбусними депо за 2013–2015 роки. Розрахунки витрат електроенергії проведені відповідно до рекомендацій документів [1, 10, 13] у середніх величинах витрат електроенергії на 1 км пробігу транспортного засобу (кВт·год/км) [6] та у величині питомих витрат електроенергії на одиницю транспортної роботи (Вт год/т км брутто) [1]. Оскільки наявні дані не дозволяють виконувати аналіз залежності витрат від режиму руху, то використовували математичне моделювання режимів руху транспортних засобів на вулицях міст. Результати виконаного аналізу використали при розробці проекту автоматизованої системи вибору швидкісного режиму руху засобів міського електротранспорту. Розробка здійснена на основі отриманого патенту на винахід [15], з урахуванням існуючої і впровадженої в ряді міст України системи диспетчерського керування рухом транспортних засобів з використанням GPS трекерів та системи зв'язку в режимі GSM/GPRS. Також виконано аналіз інформаційного забезпечення водія та розроблена система автоматизованого вибору ним економних режимів руху, в умовах виконання графіка та дотримання обмежень, які регламентовані правилами руху.

Результати

1. Аналіз витрат електроенергії транспортними підприємствами згідно до статистичних даних

В електротранспорті основна доля витрат електроенергії припадає на рух транспортних засобів. Проте, однозначної відповіді на те, скільки електроенергії витрачається на рух, немає. В трамваях та тролейбусах відсутні засоби вимірювання витрат електроенергії. Дотаційний характер міського електротранспорту не спонукає керівництво підприємств до деталізації напрямків витрат і енергозбереження, адже розрахунки за електроенергію здійснюється не із коштів підприємств.

На сайті «Київський трамвайний форум» [5] є орієнтовні дані витрат електроенергії для тролейбуса – 3,3 кВт·год, а для трамвая – 3,2 кВт·год на кілометр шляху. Більш точні дані містяться в «Методических указаниях по планированию, учету расхода электрической энергии трамвайным и троллейбусным транспортом и рекомендации по экономии электроэнергии» [6]. Так, наприклад, для тролейбуса ЗиУ 682, питомі витрати складають 150 Вт·год/т·км брутто, тобто при масі тари тролейбуса рівній 10,05 т і розміщенні в його салоні 91 пасажир витрати електроенергії на 1 км шляху складають 2,46 кВт·год/км. Крім цього, згідно до методики розрахунку, потрібно врахувати витрати на власні потреби у транспортному засобі разом з витратами на нагрівання салону, які залежать від середньорічної температури, та витрати, зумовлені товщиною снігового покриву та нахилом ділянок шляху. До витрат належать також витрати електроенергії на самих підприємствах електротранспорту, а саме: у депо, тягових підстанціях, на тяговій мережі [5].

Як вихідні дані для розрахунку використовувалися результати обліку роботи електротранспорту [6] та додаткові дані офіційного звіту щодо щомісячних сумарних витрат електроенергії чотирьох підприємств електротранспорту одного міста за 2013–2015 роки, а саме: двох трамвайних і двох тролейбусних депо. Як оцінку ефективності роботи підприємств розраховували питомі витрати електроенергії. Причому, використано два показники, а саме: середні витрати електроенергії на 1 км пробігу транспортного засобу (кВт·год/км) та питомі витрати.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Початковий аналіз виконано за показниками середніх витрат електроенергії на 1 км пробігу, оскільки в джерелі [6] об'єм роботи транспортних підприємств України подається як сумар-

ний пробіг. Результати обробки статистичних даних витрат електроенергії на 1 км пробігу представлені на рис. 1.

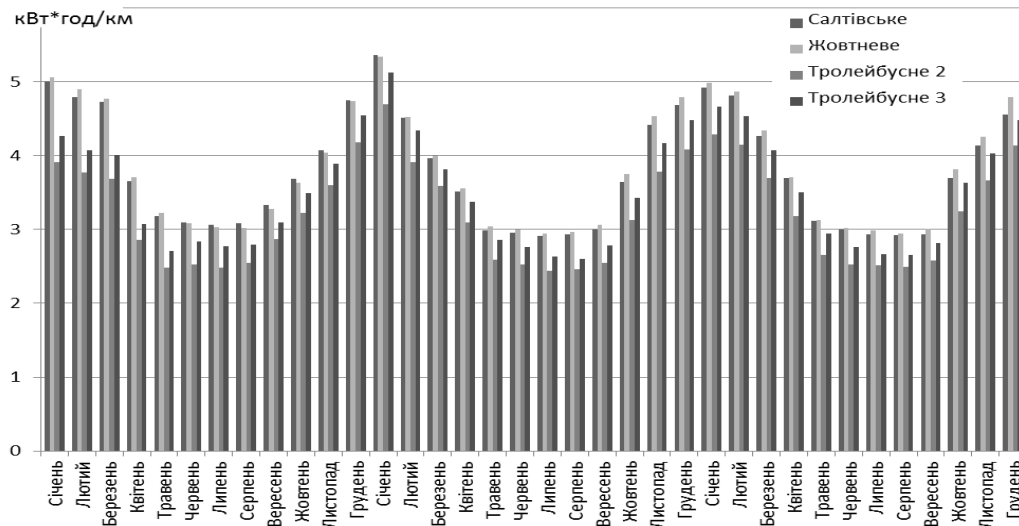


Рис. 1. Середньомісячні витрати електроенергії на 1 км пробігу транспортного засобу

Fig. 1. Average monthly power consumption for 1 km of vehicle run

Аналіз показує збільшення середніх витрат електроенергії в зимові місяці, коли вмикається обігрів салону. Для встановлення залежності величини витрат електроенергії, обумовленої змінами температури, використали дані метеорологічних спостережень, а саме значення середньомісячної температури навколишнього середовища по місту [12, 14]. Графік залежності витрат електроенергії від температури представлено на рис. 2. Розрахунок коефіцієнтів регресійної моделі показав, що між величиною витрат енергії і температурою існує залежність, яка описується таким рівнянням регресії:

$$W(t) = 0,0019t^2 - 0,111t + 4,295, \quad (1)$$

де t – середньомісячна температура повітря.

Коефіцієнт детермінації регресійної моделі R^2 , який дорівнює $R^2 = 0,982$, вказує на її адекватність. Він означає, що 98,2 % варіації витрат електроенергії пояснюються зміною температури, і лише 1,8 % викликано іншими, неврахованими чинниками. Така залежність отримана вперше. Надійність результатів розрахунку підтверджується об'ємом вибірки, а саме: обліком щоденної роботи 400 транспортних

засобів на протязі 3-х років експлуатації, та величиною коефіцієнта детермінації.

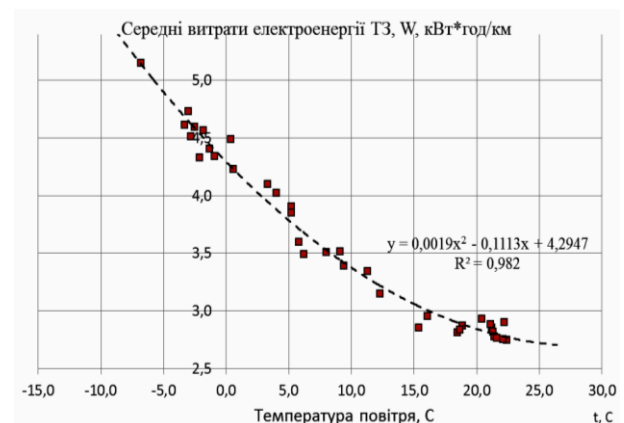


Рис. 2. Графік залежності питомих витрат електроенергії від температури навколишнього середовища

Fig. 2. A dependency graph of the unit cost of electricity on the ambient temperature

Для зменшення втрат електроенергії на підігрів салону необхідно покращити його теплоізоляцію та забезпечити якісну вентиляцію. Проведені дослідження і прийняті заходи, як показано в роботі [18], дозволили отримати се-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

редньорічну економію витрат енергії на опалення та вентиляцію трамваю до 64 %.

Залежність витрат електроенергії від температури використовується під час розрахунків нормативів витрат електроенергії підприємствами електричного транспорту. Згідно до методики розрахунків використовується коефіцієнт впливу температури $\kappa_t = 0,005$ при лінійній залежності [10]. Одержана залежність (1) є квадратичною, і зміна температури більш суттєво впливає на витрати електроенергії. Цю залежність слід використовувати під час виконання розрахунків норм витрат електроенергії.

Для розрахунку розподілу питомих витрат електроенергії, що припадають на одиницю транспортної роботи (у Вт·год/т·км брутто) визначили середнє річне значення питомих витрат, яке дорівнює 179,78 Вт·год/т·км.

Витрати електроенергії (див. рис. 3) найменші в період від травня по вересень місяць. У цей час нагрів салону відімкнутий, тобто електроенергія використовується тільки на рух транспортного засобу. Середні значення питомих витрат за цей період складають 144,96 Вт·год/т·км. Виходячи з припущення, що витрати на рух протягом року практично не змінюються, визначено, що на нагрів салону витрачається 19,37 % всієї спожитої електроенергії.

Додаткові результати обліку витрат електроенергії на власні потреби, які виконані тільки за 2015 рік, показали, що депо та інші підрозділи електротранспорту на власні потреби витрачають 4,6 % від всієї електроенергії.

Крім цих величин необхідно врахувати витрати в тяговій мережі. За наявними даними це зробити неможливо, оскільки розрахунок проводиться за загальними показниками для всього підприємства. Тому для оцінки цих витрат скористалися нормами стандарту [3], згідно до якого номінальна напруга на струмоприймачі трамваю (тролейбуса) дорівнює 550 В, при величині напруги на шинах тягової підстанції 600 В. Отже, спад напруги в тяговій мережі становить 8,33 %. Спад напруги в процентному відношенні співпадає з величиною втрат електроенергії. У результаті аналізу одержано розподіл витрат електроенергії за напрямками, який приведено на діаграмі рис. 4.

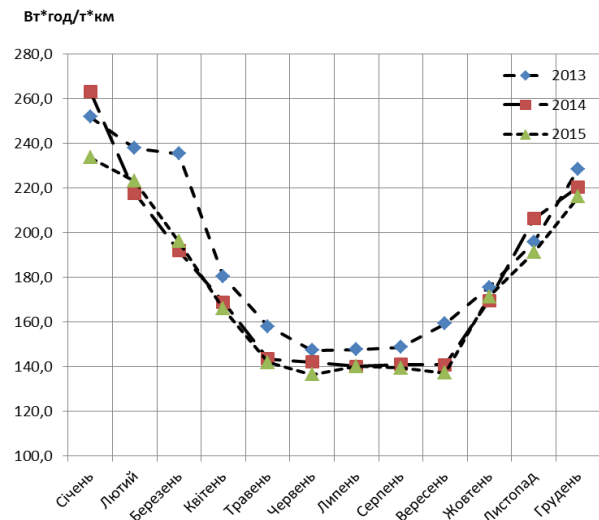


Рис. 3. Зміна питомих витрат електроенергії на рух транспортних засобів за 2013–2015 у Вт·год/т км

Fig. 3. Change of the specific power consumption for vehicular traffic for 2013–2015 in W·h/t·km



a – a

Питоми витрати електроенергії, Вт*год./т*км



b – b

Рис. 4. Розподіл витрати електроенергії підприємствами електротранспорту:

a – розподіл витрат в процентах, *b* – витрати у Вт год/т км

Fig. 4. Distribution of electric power consumption of electric transport enterprises:

a – cost distribution percentage, *b* – costs in W h/t km

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Як видно з діаграми рис. 4, основна доля витрат – 68,14 % припадає на роботу електроприводу (див. рис. 4, а). Питомі витрати електроенергії на рух транспортних засобів (див. рис. 4, б) складають 122,50 Вт/т·км. Сумарні значення витрат електроенергії на вводах транспортного засобу складають 157,33 Вт·год/т·км.

Для порівняння в табл. 1 вказані величини питомих витрат електроенергії на електричну тягу різними типами рухомого складу. Ці величини прийняті як основна нормативна характеристика, що використовується під час розробки індивідуальних норм витрат електроенергії [10] з врахуванням експлуатаційної швидкості трамваю $V_e = 15$ км/год і тролейбуса $V_e = 16$ км/год.

Таблиця 1

Індивідуальні норми питомих витрат електроенергії засобами електротранспорту

Table 1

Individual rules of specific electric power consumption by electric vehicles

Питомі витрати електроенергії на одиницю транспортної роботи, Вт·год/т км бруто			
Трамвайний вагон		Тролейбус	
Тип	Витрати	Тип	Витрати
71-605	86	ЗіУ-682	150
ЛМ-68	86	ЗіУ-682 дв.150 кВт	168
РВЗ-6М	97		
Т-3	108	ЗіУ-683	142
Т-4СУ	112	14-ТР	140
Т-3М	88		
71-608К	100		

Одержані дані знаходяться в межах приведених значень. Вони відображають тільки середні витрати електроенергії, незалежно від виду транспортного засобу (трамвай чи тролейбус) та його типу. Існуюча система обліку, при відсутності лічильників електроенергії на транспортних засобах, не дозволяє розподілити витрати за типом транспортного засобу. Більше того, вона не дозволяє також розділити і витрати різних підприємств, які здійснюють перевезення пасажирів в одному місті. У такій ситуа-

ції практично неможливо розробляти ефективні міри, що спрямовані на енергозбереження.

2. Результати досліджень витрат електроенергії від режимів руху

Оскільки основна доля електроенергії витрачається на рух транспортних засобів, то в роботі досліджували залежність витрат від режиму руху. Дослідження впливу індивідуального стилю водіння на споживання енергії тяги на залізничних лініях виконано за допомогою математичної моделі [19]. Для виконання досліджень впливу режимів ведення засобів міського електричного транспорту на витрати електроенергії розроблена математична модель. Основою моделі є рівняння руху [11, 16, 17]. Математична модель дозволяє враховувати цілий ряд чинників, що впливають на рух транспортного засобу, а саме: робота двигуна і його тягові характеристики, втрати електроенергії в колах живлення та керування, втрати енергії на подолання сил опору, характер маршруту руху та ін. У математичній моделі інтегрування рівняння руху здійснюється за методом Рунге-Кутта 4 порядку [8]. Модель розроблена в програмному середовищі електронної таблиці Excel і представлена на рис. 5.

Згідно до математичної моделі задається маса транспортного засобу (m , кг) з урахуванням наповнення салону. Відповідно до кроку інтегрування h вводяться характеристики маршруту: шлях руху (Sm , м); величина ухилу ділянки шляху (α) та приведені коефіцієнти радіусів кривих (α_R). Відмічаються точки на шляху (Sm), де діють обмеження швидкості, розміщені світлофори та дорожні знаки. У моделі формули розрахунку коефіцієнтів інтегрування k_1, k_2, k_3, k_4 включають рівняння руху [8], в які входять значення або формули розрахунку сил опору, формули апроксимації механічних і електромеханічних характеристик двигуна, передаточне число трансмісії транспортного засобу. Характеристики тягового двигуна для кожного режиму регулювання при 100, 53 %-ному і т.д. ослабленні магнітного поля (див. рис. 5) введені в різні рядки електронної таблиці за порядком їх зміни. Величина струму I , А розраховується відповідно до електромеханічної характеристики двигуна.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

	$Sm, м$	$m, кг$	$\alpha + \alpha_d$	$v, м/с$	k_1	k_2	k_3	k_4	$v, км/год$	$t, с$	$I, А$	$P, Вт \cdot год$
Пуск				1,20					4,32	1,0	270	
Пуск	5,0	18450	0	1,20	0,8824	0,6452	0,6955	0,5586	4,32	1,8	270	34
Пуск	6,0	18450	0	1,89	0,8824	0,6452	0,6955	0,5586	6,79	2,5	270	61
Пуск	7,0	18450	0	2,57	0,5607	0,4885	0,4967	0,4441	9,27	2,9	270	80
Пуск	8,0	18450	0	3,07	0,4105	0,3808	0,3829	0,3579	11,05	3,3	270	94
Пуск	9,0	18450	0	3,45	0,3438	0,3264	0,3273	0,3115	12,43	3,6	270	107
Пуск	10,0	18450	0	3,78	0,3054	0,2935	0,2940	0,2824	13,61	3,9	270	118
Пуск	11,0	18450	0	4,07	0,2787	0,2699	0,2702	0,2612	14,66	4,1	270	129
100%	12,0	18450	0	4,34	0,6316	0,4783	0,4868	0,4604	15,64	4,4	359	140
100%	13,0	18450	0	4,85	0,4966	0,4004	0,4046	0,3872	17,45	4,6	356	152
100%	14,0	18450	0	5,26	0,3187	0,2789	0,2800	0,2723	18,95	4,8	323	162
100%	15,0	18450	0	5,55	0,2214	0,2027	0,2031	0,1993	19,97	5,0	288	171
100%	16,0	18450	0	5,75	0,1723	0,1616	0,1618	0,1595	20,71	5,1	259	178
100%	17,0	18450	0	5,92	0,1436	0,1367	0,1368	0,1352	21,30	5,3	235	185
53%	18,0	18450	0	6,05	0,2598	0,2353	0,2377	0,2130	21,79	5,5	315	192
53%	19,0	18450	0	6,29	0,2317	0,2126	0,2143	0,1936	22,64	5,6	334	200

Рис. 5. Математична модель розрахунку кривих руху транспортних засобів

Fig. 5. Mathematical model of calculation for traffic curves of vehicles

Моделювання руху транспортного засобу здійснюється шляхом покрокового інтегрування рівнянь руху. Для цього розрахункові формули електронної таблиці копіюють впродовж шляху. При змін режиму регулювання (для реліктових систем регулювання зміни позиції контролера), послідовно переходять до відповідного рядка електронної таблиці.

Основною проблемою реалізації математичної моделі було вдосконалення методів розрахунку кривих руху. Справа в тому, що існуючі методи тягових розрахунків [11, 17] дозволяють проводити розрахунки тільки по усереднених «питомих» величинах, що віднесені до «ваги» транспортного засобу і не дозволяють враховувати зміну характеру руху при зміні маси транспортного засобу. Крім цього існуючі рівняння руху розраховані на графоаналітичне інтегрування рівнянь і не дозволяють, використати комп'ютерне інтегрування [11].

Для встановлення залежності витрат електроенергії від режиму руху виконано моделювання руху тролейбуса ЗиУ-682 при наявності в його салоні 91 пасажир і русі на горизонтальній ділянці довжиною 600 м.

Результат моделювання в режимах руху «економному» і «швидкому» приведено на рис. 6.

В «економному» режимі руху (див. рис. 6, а) тролейбус розганяється до швидкості достат-

ньої для продовження руху в режимі вибігу, таким чином, щоб гальмування його здійснювалося при швидкості приблизно рівній 15 км/год. У режимі тяги тролейбус рухається на відстані 150 м і з часом досягає швидкості 50 км/год. Подальший його рух відбувається в режимі вибігу без споживання електричної енергії. При такому режимі руху тролейбус споживає струм з електричної мережі тільки на протязі часу розгону (див. рис. 6, в).

Аналогічно виконано моделювання руху на цій же ділянці шляху при режимі максимальної швидкості і прибутті тролейбуса на зупиночний пункт за мінімальний період часу (див. рис. 6, б).

При цьому споживання струму (див. рис. 6, г) здійснюється протягом всього часу руху, тобто до моменту, коли починається гальмування, а саме за 120 м до зупинки. При цьому, величина струму, переважну більшість часу, знаходиться в межах від 160 до 200 А.

Оскільки під час руху тролейбуса трапляються випадки, коли водій повинен зменшити швидкість для виконання безпечних умов руху, або при появі непередбачених перешкод на маршруті, було виконано моделювання таких ситуацій. На рис. 7, б приведений графік зміни швидкості руху в результаті вимушеного гальмування, а на рис. 7, д графік зміни величини струму.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

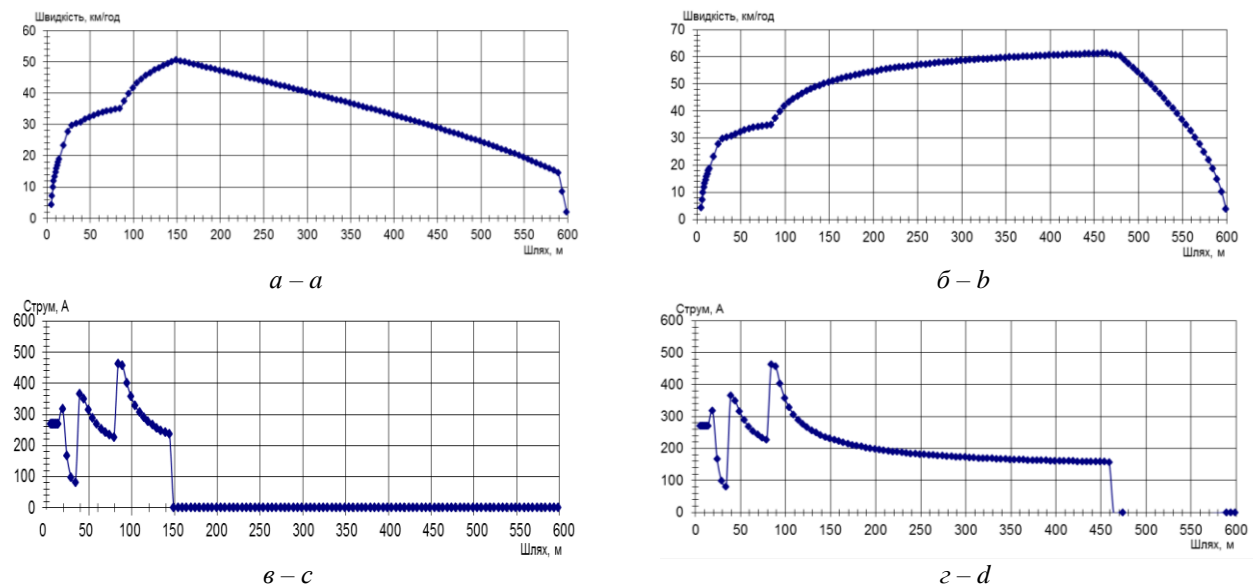


Рис. 6. Результати моделювання руху транспортного засобу:
 a та c – в режимі «економічний»; b та d – в режимі «швидкий»;
 a та b – зміна швидкості впродовж шляху руху; c та d – зміна величини струму

Fig. 6. Results of simulation of vehicle movement:
 a and c – in the «economical» mode; b and d – in the «fast» mode;
 a and b – speed change during travel; c and d – change in the current value

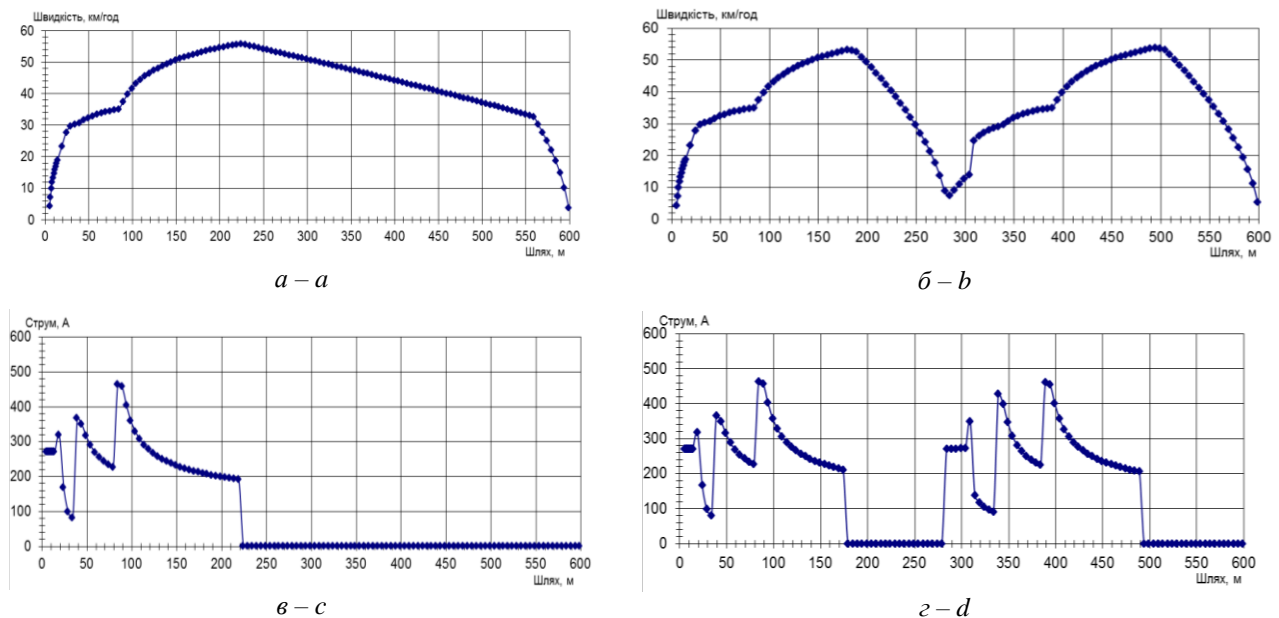


Рис. 7. Результати моделювання руху в різноманітних режимах:
 a , c – проміжному; b , d – з перешкодою;
 a , b – зміна швидкості впродовж шляху руху; c , d – зміна величини струму

Fig. 7. Results of movement simulation in different modes:
 a , c – «intermediate»; b , d – «obstacle»;
 a , b – speed change during travel; c , d – change in the current value

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Також розглянуто третій проміжний варіант, коли рух під струмом продовжується до 220 м, і гальмування розпочинається зі швидкості 30 км/год. Відповідні графіки руху та зміни струму приведені на рис. 7. Проміжний режим забезпечує скорочення часу руху між зупиночними пунктами при помірному споживанні електричної енергії.

Результати моделювання, а саме: час руху та витрати електроенергії транспортним засобом у розглянутих режимах руху приведені в табл. 2.

Приведені в табл. 2 дані показують, що експлуатаційна швидкість в усіх режимах руху перевищує встановлену графіком величину 16 км/год [10, 11], при максимально можливо-му часу стоянки на зупиночному пункті (від 10 до 45 с).

Таблиця 2

Результати аналізу режимів руху засобів електротранспорту
(ділянка горизонтальна, довжина 600 м)

Table 2

Results of the analysis of electric vehicles motion modes
(horizontal section, length 600 m)

Показник	Режим руху			
	економний	проміжний	швидкий	з перешкодою
Затрати електроенергії, кВт·год	0,77 (100 %)	0,96 (125 %)	1,41 (191 %)	1,72 (223 %)
Час проїзду, с	78 (142 %)	60 (111 %)	54 (100 %)	64 (118 %)
Середня швидкість на ділянці, км/год	28,1	36	40	33,7
Час стоянки на зупинці, с	45	45	45	45
Експлуатаційна швидкість, км/год	17,56	20,57	21,81	19,81
Середні витрати електроенергії, кВт·год/км	1,28 (100 %)	1,60 (125 %)	2,35 (183 %)	2,87 224 %
Питомі витрати електроенергії, Вт·год/т·км	78,73	98,16	144,17	175,87

Питомі витрати електроенергії в розглянутих режимах руху суттєво відрізняються. Найменші витрати при економному режимі складають 78,73 Вт·год/т·км, що менше від приведених в табл. 1 значень для цього ж типу транспортного засобу. Витрати електроенергії при «швидкому» режимі руху в порівнянні до «економного» збільшені майже в 2 рази (на 191 %). Якщо за основу взяти режим руху «швидкий», то при виборі економного режиму руху питомі витрати електроенергії зменшуються на величину :

$$\Delta P = \frac{P_{ш} - P_{е}}{P_{ш}} 100 \% = 45 \% ,$$

де $P_{ш}$, $P_{е}$ – питомі витрати в режимах «швидкий» та «економний» відповідно.

Ця величина є максимально можливою економією енергоресурсів. Але в реальній практиці діє ряд чинників, які впливають на транспортні засоби і досягнути такої економії неможливо. Тому, з урахуванням чинників, взята реальна величина економії, яка дорівнює 10 %. Для впровадження заходів енергозбереження на підприємствах електротранспорту слід розробляти технологічні карти маршрутів, в яких вказується режими руху на окремих ділянках [7]. Для розробки таких технологічних карт можна використовувати запропоновану математичну модель.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Але слід зауважити, що математична модель дещо спрощена. В ній замість 18 позицій регулювання, як в тролейбусі ЗиУ-682, розглядається тільки 6 позицій.

Математична модель розроблена для дискретної системи керування. У разі використання електронних систем регулювання неперервної дії, до моделі потрібно ввести параметри регулювання, при яких змінюються механічні та електромеханічні характеристики двигуна.

3. Розробка системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів електротранспорту з метою зменшення витрат електроенергії

Робота водія наземного міського електротранспорту на маршруті досить напружена і вимагає від нього надзвичайної уваги. Водій зобов'язаний виконувати графік руху при дотриманні усіх правил дорожнього руху в досить складній дорожній ситуації. Йому часто доводиться виконувати невласливі йому функції, такі, наприклад, як збір оплати за проїзд. Тому, в умовах складної дорожньої ситуації здійснити вибір режиму руху з мінімальними витратами електроенергії йому досить важко, адже практики вибору економних режимів руху він не має.

Для реалізації економних режимів руху потрібна система, яка б прораховувала варіанти можливого продовження руху і забезпечувала потрібною інформацією водія. Цей вибір потрібно здійснювати в умовах дотримання графіка руху, правил руху і всіх обмежень на ділянці шляху.

Системи автоматизованого ведення транспортних засобів широко впроваджуються в метрополітені, на залізниці. Проте, у міському електротранспорті розробка таких систем пов'язана з рядом труднощів, а саме:

- визначенням місця розміщення транспортного засобу на маршруті в кожен поточний момент руху;
- постійною зміною кількості пасажирів від зупинки до зупинки, що призводить до зміни маси транспортного засобу (майже в 2 рази) та характеру його руху;
- складністю маршруту руху (ділянки з різним ухилом, з поворотами, перехрестями, з розміщенням світлофорів уздовж маршруту, обмежувальні дорожні знаки);

– виникненням непередбачуваних подій, що впливають на рух транспортного засобу, які потрібно враховувати в складній дорожній обстановці.

З урахуванням цих особливостей руху наземного електротранспорту була розроблена «Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху міського електротранспорту з метою економії електроенергії». На розроблену систему одержано патент на винахід. Основою функціонування системи є бортовий комп'ютер транспортного засобу, який розраховує можливі режими руху, обирає оптимальний і підказує водію, якого режиму руху потрібно дотримуватись. Блок-схема автоматизованої системи приведена на рис. 8.

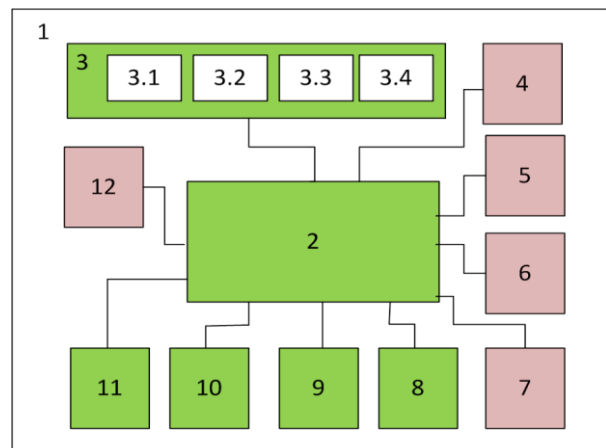


Рис. 8. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху наземного електричного транспортного засобу з метою економії електроенергії

Fig. 8. Computer-aided selection of speed mode of traffic of the ground electric vehicles in order to save the electricity

Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху (див. рис. 8, п. 1), містить встановлений на кожному транспортному засобі 1 бортовий комп'ютер 2, до якого підключено блок пам'яті 3. У блок пам'яті 3 занесено: 3.1 – графік руху; 3.2 – технологічна карта маршруту; 3.3 – цифрова карта міста (маршруту); 3.4 – програма розрахунку оптимального режиму руху. Система працює наступним чином: трекер 8 супутникової навігації (GPS, ГЛОНАСС) визначає координату та швидкість транспортного засобу. Блок вимірювання швидкості та шляху від зупинки 4 уточнює покази трекера. Ці дані поступають в комп'ютер 2,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

який порівнює їх з графіком руху (технологічною картою маршруту). У разі виявлення відхилення комп'ютер прораховує режим руху до наступної зупинки, а в разі необхідності – і до кінця маршруту, і подає повідомлення про розрахований режим руху водію в звуковій або візуальній формі. Водій має можливість дотримуватися рекомендованого режиму руху або самостійно його обирати. Крім цього, система містить блок 5 вимірювальних приладів струму і напруги; а також блок 6 реєстрації кількості пасажирів; блок 7 – датчик закриття дверей; блок 9 – формування сигналів, які передаються на диспетчерський пункт; блок – 10 прийомопередатчик GSM/GPRS; блок 11 – гарнітура водія; блок 12 – дисплей.

Запропонована автоматизована система встановлюється на борту транспортного засобу. Вона контролює режим руху відповідно до технологічної карти маршруту. У разі виявлення відхилення режиму руху від рекомендованого система дає повідомлення водію і автоматично

прораховує можливі варіанти продовження руху до наступної зупинки. З можливих варіантів вибирається режим, який відповідає графіку, при мінімально можливих затратах електричної енергії. Якщо до першої зупинки скорегувати відставання від графіка руху неможливо, система продовжує розрахунки до декількох наступних зупинок таким чином, щоб до кінцевої зупинки прибути точно у визначений графіком момент часу.

Система також забезпечує передачу на диспетчерський пункт даних про виконаний рух і витрати електричної енергії та інші дані, які потрібні для контролю роботи транспортного засобу на маршруті.

Для реалізації системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху запропоновано проект локальної CAN мережі транспортного засобу. CAN мережа може бути побудована за ієрархією як «загальна шина», що показано на рис. 9.

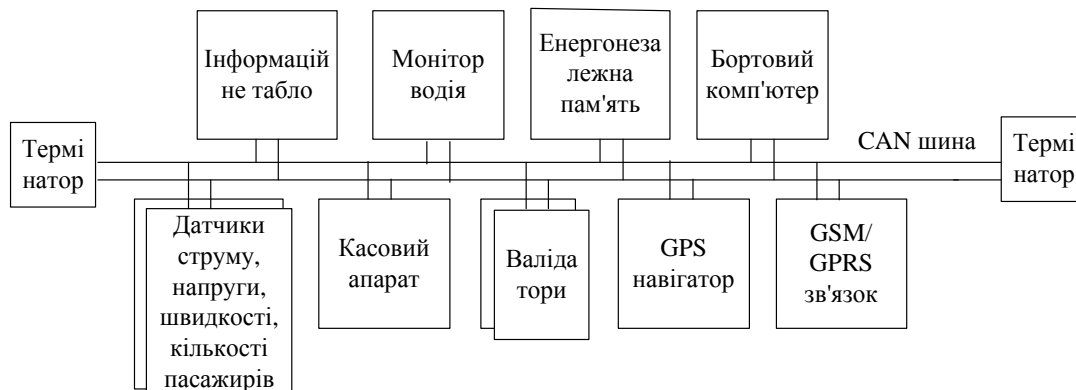


Рис. 9. Схема системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху, побудована на основі локальної мережі транспортного засобу

Fig. 9. Scheme of the automated selection system of speed mode of motion based on local network of electric vehicle

Система створюється самостійно, або як доповнення до існуючої мережі транспортного засобу. Такі комп'ютерні мережі встановлюють на транспортних засобах як автомобільну електроніку, і вони є основою системи діагностики, керування обладнанням транспортного засобу та диспетчерського керування рухом [4, 20]. Комп'ютер чи безпосередньо трекер GPS передає інформаційні пакети, як правило, з періодом 10 с (або при проїзді 50 м). У ці пакети

включають дані про параметри спожитої електроенергії. З метою зменшення обсягів інформації дані про використану електроенергію можна передавати через більші інтервали часу, наприклад на зупиночних пунктах, або по закінченню проїзду маршрутом. З метою забезпечення прийняття заходів енергозбереження, покази датчиків струму та напруги на вводах транспортного засобу можна записувати в енергонезалежну пам'ять бортового комп'ютера поряд

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

з інформацією про режим руху, яка використовується під час аналізу транспортних подій на маршруті руху. Запис може проводитися циклічно (при загальній довжині одного запису порядку 1 год). Для впровадження запропонованої системи потрібно виконати доробку програмного забезпечення комп'ютера транспортного засобу та диспетчерського центру. Одержана таким чином інформація про енергоспоживання повинна бути використана при фінансових розрахунках, коли в одному місці перевізниками є декілька підприємств електротранспорту. Крім цього, вона може бути використана під час розробки заходів енергозбереження.

Наукова новизна та практична значимість

Встановлено стохастичну залежність між величиною витрат енергії підприємствами електротранспорту і температурою навколишнього середовища, яка описується квадратичним рівнянням регресії (1), у протипагу прийнятої в нормативних документах [1, 10] лінійної залежності. Адекватність регресійної моделі підтверджена значним об'ємом вибірки та значенням коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,982$. Рекомендується використовувати цю залежність при вдосконаленні методів нормування витрат електроенергії на міському електротранспорті.

Розроблена математична модель динаміки засобів електротранспорту, яка, на відміну від відомих методів тягових розрахунків, має більшу точність, дозволяє виконувати розрахунки з урахуванням характеристик тягового двигуна та системи керування, зміни маси при посадці та висадці пасажирів, уклонів та радіусів кривих колії руху, обмежень, що накладаються дорожніми знаками, та інших чинників.

На основі використання CAN мережі транспортного засобу розроблений проект системи автоматизованого вибору швидкісного режиму, який дозволяє обрати оптимальний за затратами електроенергії режим руху, з урахуванням місцезнаходження та швидкості транспортного засобу в кожен момент часу, при умові дотримання встановленого графіка руху.

Практична значимість створеної математичної моделі полягає у спрощенні і збільшенні

точності розрахунків режимів руху і витрат електроенергії транспортними засобами. Рекомендується її використання під час розробки технологічних карт маршрутів, проектуванні і модернізації тягових мереж та у розробці засобів енергозбереження.

Запропонована автоматизована система вибору швидкісного режиму руху полегшує роботу водія транспортного засобу, дозволяє зменшити затрати електроенергії, а також забезпечує автоматизований облік витрат електроенергії.

У результаті виконаних досліджень доведено можливість зменшення витрат електроенергії на 10 % – 45 % при дотриманні раціональних режимів руху.

Одержано авторське свідоцтво на винахід системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів міського електричного транспорту.

Висновки

1. Отримано регресійну залежність витрат електроенергії підприємствами електротранспорту від середньомісячної температури навколишнього середовища, яка суттєво відрізняється від рекомендованої в нормативній документації.

2. Показано, що існуюча система обліку електроенергії на міському електротранспорті має суттєві недоліки і не дозволяє ефективно розробляти та впроваджувати заходи енергозбереження.

3. Розроблена математична модель динаміки засобів електротранспорту, яка враховує вплив ряду чинників та забезпечує більшу точність, ніж відомі методи тягових розрахунків.

4. Показано, що вибір оптимальних режимів може привести до зниження енергозатрат на 10–45 %.

5. Розроблена система автоматизованого вибору швидкісного режиму трамваю та тролейбуса дозволяє зменшити затрати електроенергії та автоматизувати облік витрат електроенергії засобами наземного електричного транспорту, що є основою перспективних розробок і прийняття додаткових практичних рішень, спрямованих на енергозбереження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галузеві комунальні норми ГКН 02.07.005–2001. Витрати електроенергії трамвайними вагонами та тролейбусами. Нормативи. Методи розрахунку / Г. П. Щербина, Л. В. Збарський, Е. І. Карпушин, В. Б. Будниченко, В. Х. Далека, В. В. Кривуля. – Чинний від 2001–01–01. – Київ : Держбуд України, 2001. – 23 с.
2. Гетьман, Г. К. Визначення витрат електроенергії на тягу поїздів при розв'язанні задач тягового забезпечення / Г. К. Гетьман, С. М. Голик // Проблемы и перспективы развития ж.-д. трансп. : тез. LXVI Междунар. науч.-практ. конф. (11.05–12.05.2006) / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2006. – С. 115.
3. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений (с изменением № 1). – Введ. 1996–03–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1996. – 3 с.
4. Карпенко, Е. Возможности CAN протокола [Електронний ресурс] / Е. Карпенко. – Промышленные сети. – 1998. – № 4. – С. 16–20. – Режим доступа: <http://www.cta.ru/cms/f/326789.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 16.05.2017.
5. Киевский трамвайный форум. Расход электроэнергии в трамваях [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://forums.mashke.org/cgi-bin/forum.cgi>. – Назва з екрана. – Перевірено : 16.05.2017.
6. Корпорація підприємств міського електротранспорту України «Укрелектротранс» [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://korpmet.org.ua>. – Назва з екрана. – Перевірено : 16.05.2017.
7. Кульбашна, Н. І. Нові підходи щодо складання раціональних режимів водіння рухомого складу по маршрутах / Н. І. Кульбашна, А. Г. Тарновецька, О. І. Балас // Проблеми та перспективи розвитку техн. засобів трансп. та систем автоматизації : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (1.10–3.10.2014) / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2014. – С. 84–85.
8. Кутнів, М. В. Чисельні методи : навч. посіб. / М. В. Кутнів. – Львів : Растр-7, 2010. – 288 с.
9. Логвінова, Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, М. О. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 110–113.
10. Методические указания по планированию, учету расхода электрической энергии трамвайным и троллейбусным транспортом и рекомендации по экономии электроэнергии : Р-29-284702-0365-96 / М-во трансп. Рос. Федерации, 1996. – 22 с.
11. Основи електричної тяги : навч. посіб. / В. Х. Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко [та ін.] ; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 312 с.
12. Пат. 110877 Україна, МПК В 60 W 50/08; В 60 W 50/00. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху наземного електричного транспортного засобу / Сорока Костянтин Олексійович, Личов Дмитро Олександрович ; заявник та патентовласник Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – u201603772 ; заявл. 25.10.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.
13. Погода и климат. Климатический монитор. Харьков [Електронний ресурс]. – Режим доступа: www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34300. – Назва з екрана. – Перевірено : 16.05.2017.
14. Правила експлуатації міського електричного транспорту : навч. посіб. / В. Х. Далека, В. Б. Будниченко, В. І. Коваленко [та ін.] ; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2014. – 447 с.
15. СНиП 23-01-99. Строительная климатология : утв. 11.06.99 г. № 45 с изм. № 1. – Москва : Госстрой России, 2002.
16. Сорока, К. О. Змістовна модель та рівняння руху електричного транспорту / К. О. Сорока, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 97–106. doi: 10.15802/stp2015/46056.
17. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров ; под ред. И. П. Исаева. – Москва : Транспорт, 1995. – 294 с.
18. Beusen, B. Energy savings in light rail through the optimization of heating and ventilation / B. Beusen, B. Degraeuwe, P. Debeuf // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2013. – Vol. 23. – P. 50–54. doi: 10.1016/j.trd.2013.03.005.
19. Individual driving style impact on traction energy consumption in railway lines: A simulation model / A. Capasso, R. Lamedica, F. M. Gatta [et al.] // Intern. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (22.06–24.06.2016) : Conf. Paper. – Anacapri, Italy, 2016. – P. 665–670. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525929.
20. Heinzelman, W. B. Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks : Ph.D Thesis / W. B. Heinzelmaaan / Massachusetts Institute of Technology. – Boston, 2000. – 154 p.

К. А. СОРОКА^{1*}, Т. П. ПАВЛЕНКО², Д. А. ЛЫЧОВ³

^{1*}Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. + 38 (097) 499 24 95, эл. почта k.soroka@ukr.net, ORCID 0000-0001-9091-6861

²Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (097) 573 44 25, эл. почта khpavlenko@yandex.ru, ORCID 0000-0002-2356-4066

³Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (050) 996 27 86, эл. почта dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С ЦЕЛЮ УМЕНЬШЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Цель. Исследование предполагает разработку системы автоматизированного выбора оптимальных режимов движения и автоматического контроля расхода электроэнергии средствами электротранспорта с целью обеспечения минимально возможных затрат энергии. **Методика.** В качестве методики используются: 1) математическое моделирование режимов движения средств наземного электрического транспорта; 2) сравнение результатов моделирования с данными статистических наблюдений; 3) разработка системы автоматизированного выбора режимов движения электротранспорта с минимально возможными затратами электроэнергии в условиях выполнения графика и соблюдения ограничений, регламентированных правилами движения. **Результаты.** Авторами получена математическая зависимость расхода электроэнергии предприятиями электротранспорта от режимов движения и среднемесячной температуры окружающей среды. Разработан проект системы автоматизированного выбора скоростного режима движения и автоматизированного контроля расхода электроэнергии транспортными средствами в виде локальной компьютерной сети, работающей совместно с действующей системой спутниковой навигации. **Научная новизна.** Разработана математическая модель расчета кривых движения и расхода электроэнергии транспортным средством, учитывающая характеристики тягового двигателя и системы управления, изменение массы при посадке и высадке пассажиров, уклоны и радиусы кривых пути движения, ограничения, накладываемые дорожными знаками, и другие факторы. Установлена зависимость расхода электроэнергии предприятиями электротранспорта от среднемесячной температуры окружающей среды. **Практическая значимость.** Созданная математическая модель упрощает расчеты динамики движения и расхода электроэнергии транспортными средствами при их эксплуатации. Она может найти применение при разработке технологических карт маршрутов, проектировании и модернизации тяговых сетей, разработке средств энергосбережения. Автоматизированная система выбора скоростного режима движения облегчает работу водителя транспортного средства, позволяет уменьшить затраты электроэнергии, а также обеспечивает автоматизированный учет расходов электроэнергии. Установленная зависимость расхода электроэнергии от температуры окружающей среды может быть использована для совершенствования методов нормирования работы предприятий электротранспорта. В результате выполненных исследований доказана возможность уменьшения затрат электроэнергии на 10–45 % при соблюдении рациональных режимов движения. Получено авторское свидетельство на изобретение системы автоматизированного выбора скоростного режима движения средств городского электрического транспорта.

Ключевые слова: городской электрический транспорт; энергосбережение; удельный расход электроэнергии; нормирование; моделирование движения; режимы движения, CAN сеть

K. O. SOROKA^{1*}, T. P. PAVLENKO², D. A. LYCHOV³^{1*}Dep. «Electric Transport», Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. N. Beketov, Marshal Bazhanov, St. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 499 24 95, e-mail kasoroka@ukr.net, ORCID 0000-0001-9091-6861²Dep. «Electric Transport», Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. N. Beketov, Marshal Bazhanov, St. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 573 44 25, e-mail khpavlenko@yandex.ru, ORCID 0000-0002-2356-4066³Dep. «Electric Transport», Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. N. Beketov, Marshal Bazhanov, St. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (050) 996 27 86, e-mail dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985

SYSTEM FOR AUTOMATIC SELECTION OF THE SPEED RATE OF ELECTRIC VEHICLES FOR REDUCING THE POWER CONSUMPTION

Purpose. The work is aimed to design a system for automatic selection of the optimal traffic modes and automatic monitoring of the electric energy consumption by electric transport. This automatic system should provide for the minimum energy expenses. **Methodology.** Current methodologies: 1) mathematical modeling of traffic modes of ground electric vehicles; 2) comparison of modelling results with the statistical monitoring; 3) system development for automatic choice of traffic modes of electric transport with minimal electrical energy consumptions taking into account the given route schedules and the limitations imposed by the general traffic rules. **Findings.** The authors obtained a mathematical dependency of the energy consumption by electric transport enterprises on the monthly averaged environment temperature was obtained. A system which allows for an automatic selection of the speed limit and provides automatic monitoring of the electrical energy consumption by electric vehicles was proposed in the form of local network, which works together with existing GPS system. **Originality.** A mathematical model for calculating the motion curves and energy consumption of electric vehicles has been developed. This model takes into account the characteristic values of the motor engine and the steering system, the change of the mass when loading or unloading passengers, the slopes and radii of the roads, the limitations given by the general traffic rules, and other factors. The dependency of the energy consumption on the averaged monthly environment temperature for public electric transport companies has been calculated. **Practical value.** The developed mathematical model simplifies the calculations of the traffic dynamics and energy consumption. It can be used for calculating the routing maps, for design and upgrade of the power networks, for development of the electricity saving measures. The system simplifies the work of the vehicle driver and allows reducing the energy consumption, also provides for an automatic energy cost monitoring. The calculated dependency of the energy consumption on the environment temperature may be used for an improvement of methods which regulate the work of the public electric transport companies. It has been proved that there is a possibility for reducing electrical energy consumption by 10% to 45% using the efficient motion regimes. Author's certificate was obtained for the invention of the system for an automatic selection of the velocity regime for a public electric transport vehicle.

Keywords: public electric transport; energy saving; specific energy consumption; standardization; motion modeling; traffic modeling; traffic regimes; CAN network

REFERENCES

1. Vytraty elektroenerhii tramvainymy vahonamy ta troleibusamy. Normatyvy. Metod rozrakhunku, HKN-02.07.005-2001 (2001).
2. Hetman, H. K., & Golik, S. M. (2006). Vyznachennia vytrat elektroenerhii na tiahу poizdiv pry rozv'iazanni zadach tiahovoho zabezpechennia. *Proceedings of the 66 International Conference «The Issues and Prospects of Railway Transport Development», May, 11-12, 2006, Dnipropetrovsk*. 115. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
3. Transport elektrifitsirovannyi s pitaniem ot kontaktnoy seti. Ryad napryazheniy, GOST 6962-75 (1996).
4. Karpenko, Y. (1998). Features of the CAN-Protocol. *Contemporary Technologies in Automation*, 4, 16-20. Retrieved from <http://www.cta.ru/cms/f/326789.pdf>
5. *Kievskiy tramvaynyy forum. Rashkod elektroenergii v tramvayakh.* (n.d.) Retrieved from <http://forums.mashke.org/cgi-bin/forum.cgi>
6. *Sait korporatsii «Ukrelektotrans».* (n.d.) Retrieved from <http://korpmet.org.ua>
7. Kulbashna, N. I., Tarnovetska, A. H., & Balas, O. Y. (2014). Novi pidkhody shchodo skladannia ratsionalnykh rezhymiv vodinnia rukhomoho skladu po marshrutakh. *Proceedings of the International Conference Problem*

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh zasobiv transportu ta system avtomatyzatsii, October, 01-03, 2014, Kharkiv. 84-85. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.*
8. Kutniv, M. V. (2010). *Chyselni metody*. Lviv: Rastr-7 Publ.
 9. Logvinova, N. A., Bosiy, D. O., & Polyah, O. M. (2012). Reduced operating costs by train traffic optimization. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 42, 110-113.
 10. Ministry of Transport of the Russian Federation. (1996). *Metodicheskiye ukazaniya po planirovaniyu, uchetu raskhoda elektricheskoy energii tramvaynym i trolleybusnym transportom i rekomendatsii po ekonomii elektroenergii*, R-29-284702-0365-96.
 11. Daleka, V. K., Pushkov, P. M., Andriichenko, V. P., & Minieieva, Y. V. (2012). *Osnovy elektrychnoi tiahly*. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.
 12. Soroka, K. O., & Lychov, D. A. (2016). *UA Patent No. 110877*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT).
 13. *Pogoda i klimat. Pogoda v Kharkove*. (n.d.) Retrieved from www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34300
 14. Daleka, V. K., Budnychenko, V. B., Kovalenko, V. I., Khvorost, M. V., & Isaiev, L. O. (2014). *Pravyla ekspluatatsii miskoho elektrychnoho transportu*. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.
 15. Building Climatology, SNiP 23-01-99 (2002).
 16. Soroka, K. O., & Lychov, D. A. (2015). The content model and the equations of motion of electric vehicle. *Science and Transport Progress*, 3 (57), 97-106. doi: 10.15802/stp2015/46056
 17. Rozenfeld, V. Y., Isaev, I. P., Sidorov, N. N., & Ozerov, M. I. (1995). *Teoriya elektricheskoy tyagi*. Moscow: Transport.
 18. Beusen, B., Degraeuwe, B., & Debeuf, P. (2013). Energy savings in light rail through the optimization of heating and ventilation. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, 23, 50-54. doi: 10.1016/j.trd.2013.03.005
 19. Capasso, A., Lamedica, R., Gatta, F.M., Geri, A., Maccioni, M., Ruvio, A., Guidi Buffarini, G., & Carones, N. (2016). Individual driving style impact on traction energy consumption in railway lines: A simulation model. *Proceedings of the Intern. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), June, 22-24, 2016, Anacapri, Italy*. 665-670. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525929
 20. Heinzelman, W. B. (2000). *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*. (PhD Thesis). Massachusetts Institute of Technology.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Україна); д.т.н., проф. Я. В. Щербаком (Україна)

Надійшла до редколегії: 20.01.2017

Прийнята до друку: 27.04.2017