

УДК 629.429.3:621.313

О. М. ПЕТРЕНКО

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ З АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ДВИГУНОМ

В роботі встановлені залежності для визначення енергетичних показників електрорухомого складу: витрати енергії, сили тяги та опору, пройдений шлях. Введено поняття функції, що визначає режим роботи тягового приводу, яка значно спрощує розрахунки витрати енергії електрорухомим складом. Розглянуто різноманітні підходи до визначення складових опорів руху, що застосовуються, як вітчизняними так і закордонними фахівцями.

Ключові слова: витрати енергії електрорухомим складом, режими роботи тягового приводу, опір руху електрорухомого складу залізниць.

В работе установлены зависимости для определения энергетических показателей электроподвижного состава: затраты энергии, силы тяги и сопротивления, пройденный путь. Введено понятие функции, определяющей режим работы тягового привода, которая значительно упрощает расчеты расхода энергии электроподвижного состава. Рассмотрены различные подходы к определению составляющих сопротивления движению, применяемых как отечественными так и зарубежными специалистами.

Ключевые слова: затраты энергии электроподвижного состава, режима работы тягового привода, сопротивление движению электроподвижного состава железных дорог.

The paper set dependencies for determination of electromotive energy performance, energy consumption, thrust and drag traversed path. The concept features defining the mode of the traction drive, which greatly simplifies the calculations electromotive energy consumption structure. The various approaches to determine the components of the resistance movement used as domestic and foreign experts.

Keywords: electromotive energy consumption structure, modes of traction drive resistance movement electromotive rail transport.

Вступ. Для вирішення задачі оптимального руху нами пропонується будівництво експертної системи ведення електрорухомого складу (ЕРС) на ділянці шляху, яка дозволяє визначати оптимальний закон зміни режимів роботи рухомого складу на основі критерію витрати енергії при заданій середній швидкості руху.

На основі експертних систем ведення транспортного засобу на ділянці шляху при різних середніх швидкостях руху вибирається оптимальна середня швидкість руху на основі комплексного критерію ефективності, запропонованого і обґрунтованого в роботах [1-4].

Аналіз останніх досліджень. Теорія оптимального управління є в нашій країні галуззю науки, що розвивається не менш інтенсивно, ніж раніше. Оптимальне управління є потужним інструментом, який дає можливість вирішувати складні завдання управління, у тому числі й керування рухом РС на залізничному транспорті.

У роботах [5-9] автор стверджує, що хоча задачі у безперервній часовій області можуть бути вирішені за допомогою традиційних методів, таких як метод Лагранжа і нелінійного програмування, але якщо проблеми сформульовані в дискретній формі шляхом ділення часу (чи відстані) на кінцеве число інтервалів, моделі реального часу (чи простору) можливо використати в якості експертної системи управління рухом ЕРС. Для даного завдання, часова область розділена на кінцеве число інтервалів часу.

Загальною проблемою стохастичного управління є складність рішення і експоненціальна залежність зростання потреби у кількості пам'яті і обчислювального часу. Причина в тому, що стан об'єкту дослідження має бути представлений у вигляді дискретної області координат, що і призводить до експоненціального зростання кількості

розрахункових точок, що вимагає експоненціально наростаючу кількість обчислень [6].

Оскільки вирішувана задача у своїй основі представляє завдання оптимального управління у безперервній часовій області, необхідно представити формулювання загальної задачі оптимального управління в реальному часі.

Одною з найважливіших складових задачі оптимального управління є визначення енергетичного показника руху ЕРС – витрати енергії на тягу та його складових: сили тяги та опору руху, швидкість та пройдений шлях, що будемо надалі називати енергетичними параметрами, в залежності від часу.

Мета роботи: визначення енергетичних параметрів руху електрорухомого складу у часі.

1 Основне рівняння руху ЕРС

Розрахунок кривих руху заснований на інтегруванні рівняння руху [1,7-9].

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{1+\gamma} (F - W_{nc}) \quad (1)$$

де m – маса ЕРС;

v – швидкість руху ЕРС;

$1+\gamma$ – коефіцієнт інерції частин ЕП, що обертаються;

t – поточне значення часу;

F – сила тяги або гальмування, що її розвиває ЕРС;

W_{nc} – повний опір руху;

γ – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив обертливих частин на прискорення руху поїзда.

Для ЕРС величину $1+\gamma$ визначають як середньозважене значення

$$1 + \gamma = 1 + \frac{\sum m_i \gamma_i}{m} \quad (2)$$

де m_i – маса частини електропоїзда з однотипного

рухомого складу. Для електропоїздів γ приймається рівним 1,068.

2 Опір руху ЕРС

Опір руху, як визначається у вітчизняних джерелах, можна здобути за виразом [10]

$$W_{\text{пс}} = (\omega_0 + i_{\text{пут}} + \omega_{\text{кр}})mg, \quad (3)$$

де ω_0 – основний питомий опір руху;

$\omega_{\text{кр}}$ – додатковий питомий опір руху від кривої радіусом $R_{\text{кр}}$;

$i_{\text{пут}}$ – ухил ділянки шляху,

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення сили ваги.

Для рухомого складу, розробленого в СРСР і Росії визначені аналітичні залежності основних питомих опорів руху для конкретних типів рухомого складу.

Для потягів визначення основного опору руху здійснюється таким чином.

Основний питомий опір руху поїзда визначається за такими формулами:

– при тязі

$$w_o = \frac{w_o' \cdot m_{\text{л}} + w_{\text{сос}}'' \cdot m_{\text{с}}}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}}, \quad (4)$$

– при русі на вибігу

$$w_o = \frac{w_X' \cdot m_{\text{л}} + w_{\text{сос}}'' \cdot m_{\text{с}}}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}}, \quad (5)$$

де w_o' – основний питомий опір руху локомотива при тязі, Н/т;

w_X' – основний питомий опір руху локомотива на вибігу, Н/т;

$w_{\text{сос}}''$ – основний питомий опір вагонів, Н/т.

Величини w_o' ; w_X' ; $w_{\text{сос}}''$ залежать від безлічі параметрів, тому їх значення обчислюється за емпіричними формулами, наведеними в табл. 2.1. Основний питомий опір руху вагонів

$$w_{\text{сос}}'' = w_{08}'' \cdot \frac{n_8}{n_{06}} + w_{06}'' \cdot \frac{n_6}{n_{06}} + w_{04}'' \cdot \frac{n_4}{n_{06}}, \quad (6)$$

де w_{08}'' , w_{06}'' , w_{04}'' – основний питомий опір 8 чотиривісних, 6-вісних і 4-вісних вагонів поїзда відповідно

Таблиця 1 – Опір руху поїзда [11]

Тип рухомого складу та режими роботи	Основний питомий опір руху, Н/т	
	на ланковій колії	на безстиківій колії
Тепловози, електровози у режимі		
тяги	$w_o' = 19,64 + 0,098 V + 0,0029 \cdot V^2$	$w_o' = 18,64 + 0,078 V + 0,0024 V^2$
холостого ходу	$w_X' = 23,54 + 0,108 V + 0,0034 V^2$	$w_X' = 23,54 + 0,088 V + 0,0034 V^2$
Дизель-поїзди Д, Д1 та ДР1 у режимі:		
тяги	$w_o' = 10,79 + 0,118 V + (0,002129 + 0,004522 / m)V^2$	$w_o' = 10,79 + 0,098 V + (0,001638 + 0,004522 / m)V^2$
холостого ходу	$w_X' = w_o' + w_3$ $w_3 = (4,61 + 0,137 V) m_M / m$	$w_X' = w_o' + w_3$ $w_3 = (4,61 + 0,137 V) m_M / m$
Вантажні вагони навантажені		
чотиривісні на під-шипниках ковзання і шестивісні на під-шипниках кочення	$w_{04}'' = w_{06}'' = 6,87 + (78,48 + 0,9 V + 0,0245 V^2) / q_0$	$w_{04}'' = w_{06}'' = 6,87 + (78,48 + 0,78 V + 0,02 V^2) / q_0$
чотиривісні на під-шипниках кочення	$w_{04}'' = 6,87 + (29,43 + 0,98 V + 0,0245 V^2) / q_0$	$w_{04}'' = 6,87 + (29,43 + 0,88 V + 0,0196 V^2) / q_0$
восьмивісні на під-шипниках кочення	$w_{08}'' = 6,87 + (58,9 + 0,373 V + 0,0206 V^2) / q_0$	$w_{08}'' = 6,87 + (58,9 + 0,255 V + 0,0167 V^2) / q_0$
Вантажні вагони порожні		
чотиривісні на під-шипниках ковзання	$w_{04}'' = 14,7 + 0,441 V + 0,00265 V^2$	$w_{04}'' = 14,7 + 0,412 V + 0,00177 V^2$
чотиривісні та шестивісні на підшипниках кочення	$w_{04}'' = w_{06}'' = 9,8 + 0,432 V + 0,00235 V^2$	$w_{04}'' = w_{06}'' = 9,8 + 0,412 V + 0,00157 V^2$
Пасажирські вагони суцільнометалеві на підшипниках кочення	$w_{04}'' = 6,87 + (78,48 + 1,766 V + 0,0294 V^2) / q_0$	$w_{04}'' = 6,87 + (78,48 + 1,57 V + 0,00226 V^2) / q_0$

Примітка: q_0 – маса вагона, що припадає на одну вісь; m – загальна кількість вагонів дизель-поїзду; m_M – кількість моторних вагонів.

У зарубіжній літературі опір руху розглядається детальніше з визначенням опорів руху в наступній послідовності

$$W_{\text{тс}} = F_L + F_s + F_{\text{тр}} + F_{\text{рс}}, \quad (7)$$

де F_L – аеродинамічний опір руху;
 F_s – опір руху викликаний тертям кочення;
 $F_{\text{тр}}$ – опір руху викликаний кривими ділянками шляху;
 $F_{\text{рс}}$ – опір руху викликаний профілем шляху.

Аеродинамічний опір. Повітря перед транспортним засобом і навколо нього, при русі ЕРС викликає опір його руху, а зусилля, необхідне для подолання цього опору відомо як аеродинамічний опір. Величина цієї сили залежить від квадрата швидкості, при якій транспортний засіб рухається і площі поперечного перерізу транспортного засобу [12].

На підставі досліджень в [13] для розрахунку аеродинамічного опору повітря при русі потягу пропонується використати вираження:

$$F_L = 0,5 * \rho * C_L * A_{\text{фр}} (v + v_{\text{wind}})^2, \quad (8)$$

де F_L – повний аеродинамічний опір (Н);
 v – швидкість руху поїзда (м/с);
 v_{wind} – швидкість лобового вітру (м/с);
 ρ – щільність повітря (кг/м³);
 C_L – коефіцієнт аеродинамічного опору;
 $A_{\text{фр}}$ – площа поперечного перерізу (м²).

Опір коченню є сумою механічних сил, за винятком опору повітря і гальмування, що діють проти напрямку руху потягу з постійною швидкістю уздовж рейкового шляху в умовах експлуатації. Вони були розділені на дві частини, які класифікуються як «нормальні» і «аномальні» [14].

Нормальний опір коченню включає втрати енергії в системі підвіски, гістерезис в підрейковому баласті, тертя усередині підшипників і ковзання в контактні колеса-рейка.

Звивистий рух колісних пар, тертя гребеня по бічній грані рейки, нерівні радіуси коліс на одній осі і піднесення одного з коліс є найбільш важливими чинниками аномального опору коченню. Паразитарне розсіювання енергії в зубчастій передачі, викликане змінами класу чистоти і обробки редукторів є ще однією формою аномального опору коченню [14].

Формула, представлена у [13] для розрахунку загального опору коченню (нормального і аномального):

$$F_R = C_R * m_{\text{tot}} * g, \quad (9)$$

де F_R – повний опір коченню;
 C_R – коефіцієнт опору коченню;
 m_{tot} – маса поїзда.

Формула, яка використовується Bombardier і приведена в [16] для розрахунку опору коченню, включає аеродинамічну складову і складову тертя кочення, має вигляд:

$$F_V + F_T = a_{\text{тр}} + b * v + c * v^2, \quad (10)$$

де $a_{\text{тр}}$, b , c – коефіцієнти опору коченню (залежні від навантаження);

v – швидкість руху поїзда (км/год).

Опір в кривих ділянках шляху. При русі транспортного засобу по криволінійній ділянці шляху, на нього діють зовнішні сили. Деякі компоненти цих сил, як правило, уповільнюють рух транспортного засобу. Сума цих компонентів є опором руху екіпажу в кривій. При русі потягу цей опір залежить від тертя між гребнем колеса і рейкою, прослизання колеса по рейці [12].

Опір в кривій обумовлений також збільшенням тиску (у напрямі по дотичній до рейки, рис.1), збільшенням тиску на внутрішню рейку, або на зовнішню – за умови незадовільного стану рейкового шляху [15].

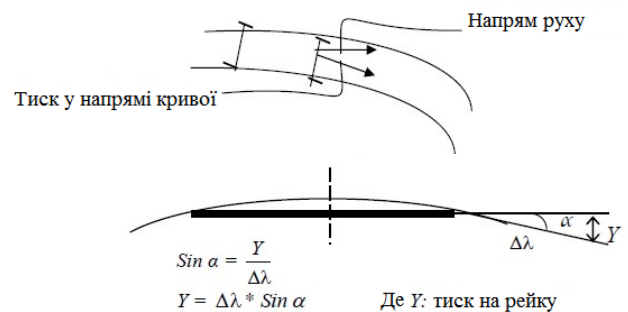


Рис. 1 – Рух по кривій [15]

Формула, використовувана для розрахунку опору руху в кривій компанією Bombardier [16]:

$$F_{\text{рк}} = \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} * m_{\text{stat}}, \quad (11)$$

де m_{stat} – повна статична маса поїзда (т);
 c_{r0} , c_{r1} – постійні відомі коефіцієнти;
 R – радіус кривої.

Сила опору, обумовлена профілем шляху. При русі рейкового транспортного засобу по ділянці шляху без ухилів, складова сили в напрямі, перпендикулярному напрямку сили тяжіння, дорівнює нулю. Проте коли площина шляху має нахил (наприклад, коли потяг рухається па підйом або на спуск), виникає складова сили F_2 , спрямована паралельно площини шляху (рис. 2), а у разі підйому цей компонент є додатковим опором руху транспортного засобу [17].

Рівняння, яке дає опір, обумовлений профілем [13]:

$$F_S = m_{\text{tot}} * g * \sin \alpha = m_{\text{tot}} * g * \frac{\Delta h}{x} * 1000, \quad (12)$$

де F_S – повний опір, обумовлений профілем (Н);
 m_{tot} – маса поїзда (кг);

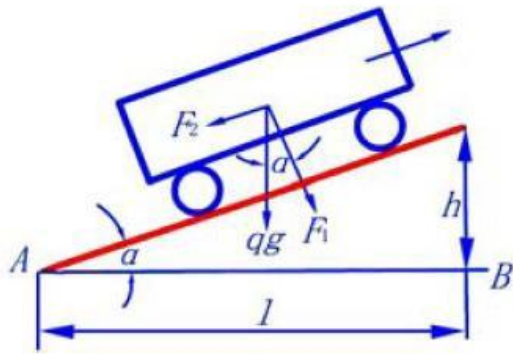


Рис. 2 – Сила опору, зумовлена профілем шляху [17]
 α – кут ухилу Δh – перепад висот (м) на ділянці x (км).

Подібне рівняння використовується і Bombardier [16]:

$$F_{rs} = m_{stat} * g * \frac{i}{1000}, \quad (13)$$

де m_{stat} – повна статична маса поїзда (т);
 i – ухил (%).

3 Визначення витрати енергії

Модель, вибрана для цього дослідження, орієнтована на часову область. Тому загальна необхідна потужність P_2 може бути розрахована як [13]:

$$P_2 = v F_{tot} \quad (14)$$

де v – швидкість руху поїзда (м/с); F_{tot} – сума опорів руху (дивись вище) (N).

На цій підставі, споживання енергії отримуємо шляхом інтегрування повної потужності, необхідної на увесь час руху [13]:

$$E = \int_0^t P_2 dt, \quad (15)$$

де t – час, витрачений на поїздку (с).

Для визначення повної потужності розглянемо основні режими руху ЕРС.

Різні режими руху потягу приведені нижче, на кривій руху потягу в залежності швидкості від часу, рис 3:

Потяг може перебувати в одному з шести різних режимів, заснованих на вихідній потужності та крутному моменті двигуна.

Сила тяги ЕРС, обмежена максимальною потужністю тягових двигунів і зчепленням коліс з рейками, визначається виразами:

$$F_d = \frac{3.6P_2\eta_{зп}}{v_{пс}}, \quad (16)$$

де $\eta_{зп}$ – ККД зубчастої передачі для тягових приводів з редукторним приводом складає величину 0,98, а для безредукторного приводу рівний 1;

P_2 – потужність на валу двигуна.

$$F_k' = 9810 \psi m_{л}, \quad (17)$$

де ψ – коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою;

$$\psi = 0,28 + \frac{3}{50 + 20v} - 0,0007v \quad (18)$$

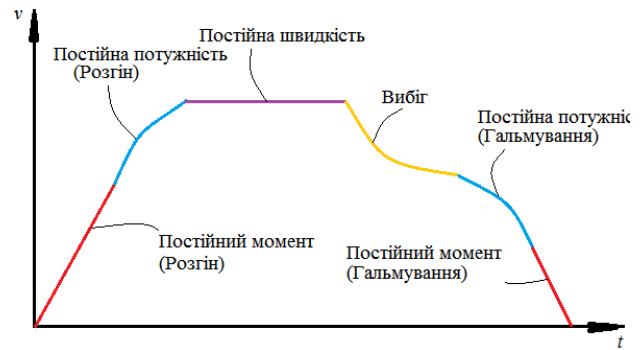


Рис. 3 – Режимы руху потягу

Сила тяги на колесі в результаті визначається вираженням

$$F = \text{MIN}(F_k', F_d). \quad (19)$$

Потужність на валу тягового двигуна визначається режимом його роботи і залежить від його електромагнітного моменту і частоти обертання

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9,55}, \quad (20)$$

де M – електромагнітний момент двигуна.

Електромагнітний момент двигуна залежить від режиму його роботи, частоти його обертання і температури. Оптимальні залежності електромагнітного моменту для різних типів ЕМП можна визначити із залежностей на основі методики зазначеної в [18].

Швидкість руху електропоїзда визначається з вираження

$$v_{пс} = \frac{3,6 \pi D_{кол} n}{60\mu}, \quad (21)$$

де μ – передатне відношення редуктора ЕРС;

$D_{кол}$ – діаметр середньозношеного бандажа колісної пари ЕРС для моторного вагона електропоїзда 1,015 м.

Гальмівна сила, обмежена потужністю тягових двигунів і зчепленням колеса з рейкою, визначається з вираження (17)

$$F_z = \text{MIN}(F_k', F_{Тор}), \quad (22)$$

де $F_{Тор}$ – гальмівна сила, що реалізується в режимі рекуперативного гальмування:

$$F_{Тор} = \frac{3.6P_2}{v\eta_{зп}}. \quad (23)$$

Для електрорухомого складу з рекуперативним гальмуванням витрата електроенергії записується у вигляді наступного функціонала

$$E = n_{ЭП} \int_0^{T_n} \text{sign} \left(\frac{P_2}{\eta} \right)_{\text{sign}} dt, \quad (24)$$

де $n_{ЭП}$ – кількість тягових двигунів ЕРС;
 T_n – час руху ЕРС;
 η – ККД електропривода,
 sign – функція, що визначає режим роботи приводу і визначається як

$$\text{sign} = \begin{cases} \{1; \text{режим тяги,} \\ 0, \text{ режим вибігу} \\ \text{та механічного гальмування} \\ -1; \text{ режим рекуперативного} \\ \text{гальмування} \end{cases}. \quad (25)$$

Для визначення переміщення ЕРС на ділянці шляху, рівняння (1) необхідно доповнити вираженням для лінійного переміщення x

$$\frac{dx}{dt} = v. \quad (26)$$

В результаті вираження (24) дозволяє визначати витрату енергії ЕРС залежно від режимів руху на підставі рішення диференціального рівняння руху (1) і (26) з урахуванням параметрів рухомого складу і шляху, визначуваного опором руху потягу.

Висновки. На підставі розробленої математичної моделі руху поїзду на ділянці колії встановлені залежності для визначення енергетичних показників електрорухомого складу: витрати енергії, сили тяги та опору, пройдений шлях. Введено поняття функції, що визначає режим роботи тягового приводу, яка значно спрощує розрахунки витрати енергії електрорухомим складом. Розглянуто різноманітні підходи до визначення складових опор руху, що застосовуються, як вітчизняними так і закордонними фахівцями.

Список літератури:

1. *Любарський Б. Г.* Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. – «Електротранспорт». Національний технічний

- університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, – 2014. 368с.
2. *Любарський Б.Г.* Выбор типа тягового электромеханического преобразователя энергии для пригородного электропоезда / *Б.Г. Любарский* // Вестник Белгородского государственного университета им. В.Г. Шухова – Белгород: РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова.– 2014. – № 3– С. 184–188
3. *Любарський Б.Г.* Определение рационального угла наклона кузова скоростного электропоезда с тяговым приводом на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / *Б.Г. Любарский* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – 2014. – № 6(1049)– С. 118–123.
4. Правила тяговых расчетов поезда работы. – М.: Транспорт. 1985. – 287 с.
5. Основы локомотивной тяги. Учебник для техникумов ж.-д. трансп. / *С.И. Осипов, К.А. Миронов, В.И. Ревич.* 3-е изд., доп. и перераб. – М.:Транспорт, 1979. – 440 с.
6. *Киреев А.В.* Разработка алгоритмов эффективного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом электропоезда. Дис. канд. техн. наук: 05.09.03– Новочеркасск, 2004. – 187 с.
7. *Любарський Б.Г.* Сили опору руху електрорухомого складу залізниць / *Б.Г. Любарський, С.Ю. Червяков, М.М. Калужний* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».–2012.– № 20. – С. 91-96. 81.
8. *Розенфельд В.Е.* Теория электрической тяги : учебник для вузов ж.-д. трансп. – 2-е изд., перераб. и доп./ *В.Е. Розенфельд* // – М.: Транспорт, 1983. 328с.
9. *Любарський Б.Г.* Оптимизация режимов работы тягового асинхронного привода / *Б.Г. Любарский* // Электрика. Курск– 2014 – №6 –С5–10.

References (transliterated)

1. *Lyubarskiy B.G.* Selezionare il tipo di convertitore di energia di trazione elettrica per i treni elettrici interregionali./ *B.G. Lyubarskiy* //Italian Science Review. 2014; 3(12). pp. 273-276.
2. *Todorov E.* Optimal control theory./ *E. Todorov*// Bayesian brain: Probabilistic approaches to neural coding. 2006. – PP 269-298.
3. *Kappen H. J.* Optimal control theory and the linear bellman equation./ *Hilbert J. Kappen*//Inference and Learning in Dynamic Models. 2011. – pp. 363-387.
4. *Hoel L. A.,* Transportation Infrastructure Engineering: A Multi-Modal Integration./ *L.A. Hoel, N.J. Garber, A.W. Sadek* // Thomson Learning. 2008. – pp. 103-107.
5. *Lindgreen E.* Driving resistance from railroad trains. In Emission Estimating Methodology for Rail Transport, Department of Mechanical Engineering / *E. Lindgreen, S.C. Sorenson,* // Technical University of Denmark. 2005 pp. 1004-1008
6. *Bernsteen S. A.* The Interpretation of Train Rolling Resistance from Fundamental Mechanics. / *S.A. Bernsteen, R.A. Uher, J.P. Romualdi* //In IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-19, no. 5, September/October 1983.
7. *Al Helo* Railway Engineering. Branch of Bridges and Highways Engineering 3rd stage, Department of Buildings and Construction Engineering, Iraq University of Technology.
8. *Panagiotis Gkortzas* Study on optimal trainmovement for minimum energy consumption / *Gkortzas Panagiotis* // School of Innovation, Design and Engineering 2010 – 82 pp.
9. *Ding, Y.* A Correction Model of Loaded Train's Grade Resistance Calculation. / *Y. Ding, F. Zhou, Y. Bai, R. Li*//School of Traffic and Transportation Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China. 2009 – 208 pp.

Надійшла (received) 17.01.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Визначення енергетичних параметрів руху електрорухомого складу з асинхронним тяговим двигуном / *О. М. Петренко* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 5 (1227). – С. 89–94. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0066.

Определение энергетических параметров движения электроподвижного состава с асинхронным тяговым двигателем / А. Н. Петренко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Транспортное машиностроение- Х.: НТУ «ХПИ», 2017 № 5 (1227). – С. 89–94. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0066.

Determination of the energy parameters of electric rolling movement with asynchronous traction motor / O. M. Petrenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Transport machine building. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 5 (1227). – P. 89–94. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0066.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петренко Олександр Миколайович - кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, доцент кафедри електричного транспорту; тел.: +30956882716; e-mail: petersanya2007@mail.ru

Петренко Олександр Николаевич – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, доцент кафедры электрического транспорта; тел.: +30956882716; e-mail: petersanya2007@mail.ru

Petrenko Oleksandr M. – Candidate of Technical Sciences, Kharkiv National University of Municipal Economy named O.M. Beketov, associate professor of electrical transport; тел.: +30956882716; e-mail: petersanya2007@mail.ru