

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЗТ)

Кафедра Електрорухомий склад, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: sarpul@i.ua

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ ТЯГИ ПАСАЖИРСЬКОГО ЕЛЕКТРОВОЗА ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ ТЯГОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Вступ

Проблема оновлення пасажирського тягового рухомого складу залізниць України в нинішній час набула першочергового значення. За даними Укрзалізниці [1] на сьогодні середній знос парку електровозів складає 90 % і до 2015 року з інвентарного парку через зношеність необхідно вилучити близько 95 % електровозів серії ЧС2 та 75 % серії ЧС4 у яких закінчився вже подовжений до 45 років термін служби.

Необхідність оновлення парку пасажирських електровозів Укрзалізниці викликана не тільки морально та фізично застарілим станом парку пасажирських електровозів але й необхідністю освоєння зростаючих обсягів пасажирських перевезень, планованим на перспективу підвищенням швидкості руху поїздів, введенням в експлуатацію прискорених та швидкісних пасажирських поїздів.

Для вирішення таких проблем вкрай необхідним є насичення парку сучасними пасажирськими електровозами.

У зв'язку з охарактеризованим вище станом парку пасажирських електровозів перед Укрзалізницею постає задача по вибору параметрів перспективних електровозів використання яких забезпечить високі значення показників експлуатаційної роботи.

Проблема вибору параметрів номінального режиму тягових засобів перебувала в полі зору галузевої науки практично протягом всієї історії впровадження та експлуатації залізничного транспорту. І в цій області отримано ряд найважливіших рішень відомими вченими залізничниками [2-4].

Проведений аналітичний огляд відомих робіт показав, що для рішення такої задачі можна використовувати підходи, розроблені для вантажних електровозів [3], однак реалізація їх стосовно до пасажирських електровозів вимагає рішення ряду самостійних задач.

Постановка задачі

Розв'язання задач тягового забезпечення не можливе без виконання тягових розрахунків [3]

в зв'язку з чим виникає необхідність у розробці методики визначення керуючих параметрів рівняння руху поїзда при невідомих тягових характеристиках електровоза. В зв'язку з цим в даній роботі пропонується підхід до визначення тягових характеристик пасажирських електровозів з колекторним та асинхронним тяговим приводом.

Основними зовнішніми параметрами пасажирських електровозів є потужність і швидкість руху номінального режиму. Разом з тим ряд їх найважливіших експлуатаційних характеристик залежить від пускової швидкості, пускової сили тяги і залишкового прискорення при конструкційній швидкості. Тому розв'язання задачі визначення номінальної потужності зводиться до моделювання взаємозв'язку цих параметрів та отримання їх раціональної комбінації.

Потужність номінального режиму пасажирського електровоза може бути визначена за виразом

$$N_n = 2,725 \cdot 10^{-3} (k_F \cdot k_V)^{-1} F_{кп} V_n, \text{ кВт} \quad (1)$$

де $F_{кп}$, V_n – пускові сила тяги та швидкість електровоза;

k_F , k_V – відношення пускової сили тяги та швидкості руху електровоза відповідно до сили тяги та швидкості руху номінального режиму.

Пускову силу тяги електровоза визначимо з умови реалізації заданого пускового прискорення за наступним виразом

$$F_{кп} = [w_0 (V_n) + i + 102 a_n (1 + \gamma)] (P + Q), \quad (2)$$

де w_0 – основний питомий опір руху поїзда; i – величина ухилу на якому відбувається пуск;

a_n – максимальне значення прискорення поїзда при пусковій швидкості (пускове прискорення);

$(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас поїзда;

P , Q – маса електровоза та складу пасажирського поїзда.

В вираз (2) входить значення маси електровоза, яка при вирішанні задач тягового забезпечення на перспективу є невідомою, в зв'язку з

чим виникають певні труднощі при визначенні сили тяги та потужності електровоза.

Моделювання маси пасажирського електровоза

Для визначення пускової сили тяги можна скористатися аналітичним виразом, який представляє собою відношення маси електровоза до маси состава [4] пасажирського поїзда Q і за умов повного використання сили зчеплення може бути визначений як

$$k_p = \frac{P}{Q} = \frac{w''_{оп} + w_{пг} + i + 102a_{п}(1 + \gamma_c)}{1000 \psi_{кп} - [w'_{оп} + i + 102a_{п}(1 + \gamma_{л})]}, \quad (3)$$

де $w'_{оп}$, $w''_{оп}$ – основний питомий опір руху локомотива в режимі тяги і пасажирського состава при пусковій швидкості;

$w_{пг}$ – додатковий питомий опір руху пасажирського состава від підвагонних генераторів; $(1 + \gamma_c)$, $(1 + \gamma_{л})$ – коефіцієнти інерції обертових мас состава та електровоза.

Аналіз залежності (3) показав, що значення коефіцієнта k_p визначають тип тягового приводу, пускова швидкість $V_{п}$ та пускове прискорення $a_{п}$ (рис. 1) і для вирішення практичних задач можна апроксимувати залежність (3) поліномом виду

$$k_p = b_0 + b_1 V_{п} + b_2 a_{п}^2, \quad (4)$$

коефіцієнти якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів формули (4)

Тип ЕРС	b_0	b_1	b_2
постійного струму	-0,061	0,0022	1,0146
змінного струму	-0,044	0,0019	0,8171
з асинхронними ТЕД	0,009	0,0011	0,5704

Використовуючи залежність (3), аналітичні вирази для визначення пускової сили тяги $F_{кп}$, основного опору руху поїзда w_0 та потужності номінального режиму пасажирського електровоза $N_{н}$ можна записати у вигляді:

$$F_{кп} = (1 + k_p)[w_0(V_{п}) + i + 102a_{п}(1 + \gamma)]Q; \quad (5)$$

$$w_0 = \frac{k_p w'_0(V_{п}) + [w''_0(V_{п}) + w_{пг}(V_{п})]}{1 + k_p}; \quad (6)$$

$$N_{н} = 2,725 \cdot 10^{-3} [w_0(V_{п}) + i + 102a_{п}(1 + \gamma)]V_{п} Q \frac{(1 + k_p)}{k_F k_V}. \quad (7)$$

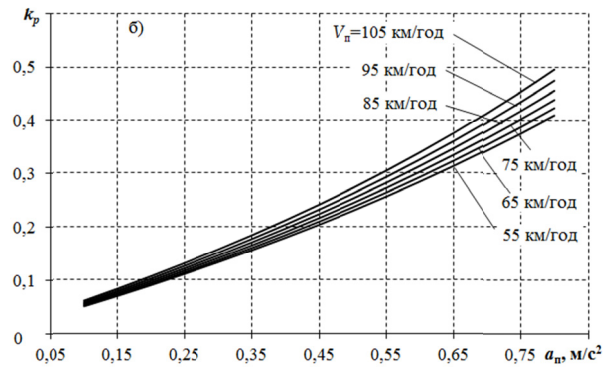
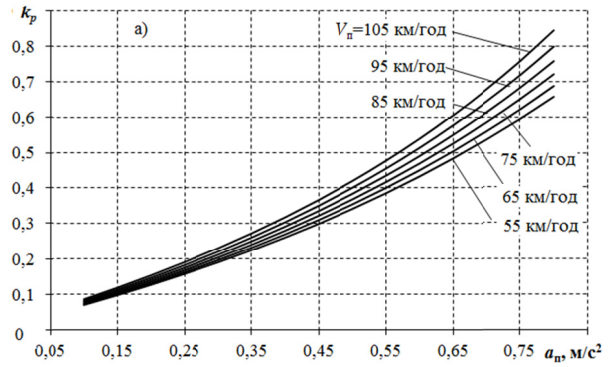


Рис. 1. Залежності k_p від пускового прискорення та пускової швидкості: а – колекторний привод; б – асинхронний привод

Аналіз параметрів існуючих електровозів показав, що при розв'язанні практичних задач коефіцієнти k_V і k_F можуть бути прийняті рівними 0,85 і 1,7 відповідно. Таким чином, при заданій масі состава задача визначення потужності номінального режиму пасажирських електровозів зводиться до визначення пускової швидкості $V_{п}$.

У якості одного з показників раціональності вибору пускової швидкості руху електровоза доцільно вибрати витрати електроенергії на тягу при заданому часі руху поїздів. Визначення витрат електроенергії та часу ходу поїздів базуються на результатах тягових розрахунків, для виконання яких потрібно встановити обмеження області припустимих керувань для режиму тяги, тобто визначити координати тягової характеристики електровоза.

Визначення тягових характеристик пасажирського електровоза

Для пасажирського електровоза тягова характеристика може бути представлена графіками показаними на рис. 2. На інтервалі швидкості $[0; V_{п}]$ (відрізок ab на рис. 2) сила тяги обмежена максимальним припустимим струмом тягових двигунів або максимальною силою зчеплення і може бути визначена за виразом (5).

Лінія *bc* граничної характеристики відповідає реалізації потужності, рівній потужності при пусковій швидкості V_{Π} . При використанні колекторних тягових двигунів сила тяги на цій ділянці $F_{k(bc)}$ забезпечується регулюванням збудження і визначається як

$$F_{k(bc)}(V) = \frac{F_{кп} V_{\Pi}}{V}. \quad (8)$$

Сила тяги на ділянці *cd* (рис. 2а) визначається ступенем допустимого ослаблення збудження β_{\min} та насиченням магнітного кола машини. Її можна визначити за допомогою виразу

$$F_{k(cd)} = \frac{F_{к}^*(V^*) F_{кп}}{k_F \beta_{\min}}, \quad (9)$$

де $F_{к}^*(V^*)$ – універсальна тягова характеристика.

Аналіз тягових характеристик сучасних електровозів постійного та змінного струму показав можливість використання універсальних тягових характеристик – залежність сили тяги від швидкості в одиницях тривалого режиму. Для практичних розрахунків можна апроксимувати ці характеристики аналітичним виразом виду

$$F_{к}^* = \frac{1}{c_1 + c_2 V^* + c_3 V^{*2}}, \quad (10)$$

коефіцієнти якого визначені за методом найменших квадратів і наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів в формулі (10)

Тип ЕРС	c_1	c_2	c_3
постійного струму	0,036	-1,42	2,353
змінного струму	1,852	-4,56	3,703

Аналіз похибок визначення тягових характеристик електровозів за допомогою універсальних тягових характеристик показав, що оцінки математичного очікування m та середньоквадратичного відхилення σ похибок для електровозів постійного струму рівні: $m = 0,0013$ і $\sigma = 0,037$, а для електровозів змінного струму: $m = 0,0005$ і $\sigma = 0,024$.

У електровозів з асинхронними тяговими двигунами (рис. 2б) на ділянці *cd* сила тяги обернено пропорційна квадрату швидкості руху і може бути визначена за виразом

$$F_{k(cd)} = \frac{F_{кп} V_{\Pi} V_c}{V^2}. \quad (11)$$

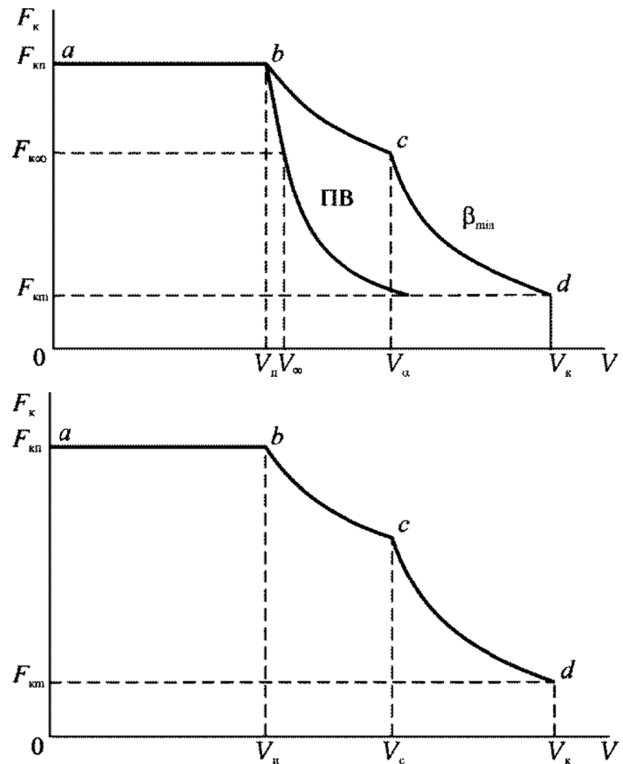


Рис. 2. Гранична тягова характеристика пасажирського електровоза: а – колекторний привод; б – асинхронний привод

В питомих одиницях виміру координати граничної тягової характеристики визначимо за виразом

$$\bar{f}_k(V) = \min \{ f_{кп}(V) + f_{k(bc)}(V) + f_{k(cd)}(V) \},$$

для визначення складових якого отримані формули:

$$f_{кп} = w_{оп} + i + 102 a_{\Pi} (1 + \gamma); \quad (12)$$

$$f_{k(bc)}(V) = \frac{f_{кп} V_{\Pi}}{V};$$

$$f_{k(cd)}(V) = F_{к}^* \left(k_V \frac{V}{V_{\Pi}} \right) \frac{f_{кп}}{k_F \beta_{\min}}. \quad (13)$$

Параметри перспективних електровозів встановлюють за умов можливості реалізації при конструкційній швидкості руху V_k надлишкового прискорення $a_0 \geq a_{03}$, де a_{03} – заданий рівень надлишкового прискорення. Для перевірки виконання названої умови скористаємося виразом

$$a_0 = \left[F_{к}^* \left(k_V \frac{V_k}{V_{\Pi}} \right) \frac{f_{кп}}{k_F \beta_{\min}} - w_0(V_k) \right] \cdot [102(1 + \gamma)]^{-1} \geq a_{03}, \quad (14)$$

який отримано з урахуванням (13).

Співставляючи (12), (13) і (14) доходимо висновку, що як координати граничної тягової характеристики $f_k(V)$, так і залишкове прискорення a_0 є функціями параметрів – пускової швидкості V_n і прискорень a_n та a_{0z} .

Висновок

Використання запропонованих універсальних граничних тягових характеристик і методу

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сергиенко Н. И. Решение проблем подвижного состава железных дорог Украины через взаимодействие государственного и частного секторов экономики / Н. И. Сергиенко // Локомотив-информ. – 2010. – №6. – С. 40-46.
2. Сломьянский А. В. Выбор типов магистральных локомотивов / А. В. Сломьянский // Тр. ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – № 184. – 164 с.
3. Гетьман Г. К. Моделирование ограничений области допустимых управлений уравнения движения поезда в задачах тягового обеспечения / Г. К. Гетьман // Вісник Харківського державного політехнічного університету: зб. наук.пр. – Харків: ХДПУ, 1999. – № 85. – С.44-51.
4. Гетьман Г. К. Определение оптимальной по минимуму расхода энергии на движение поезда мощности локомотива // Транспорт. Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту: Зб. наук.пр. / Ред. кол.: Босов А. А. / гол. ред./ та ін. – Дніпропетровськ: Січ, 1999. – С. 177–182.

Надійшла до друку 18.04.2013.

Статтю рекомендовано до друку д.т.н., професором Г. К. Гетьманом

Специфіка визначення керуючих параметрів рівняння руху в задачах тягового забезпечення полягає у відсутності тягових характеристик і даних про величину маси електровоза.

У роботі запропоновано рішення цієї задачі за рахунок вводу відносної маси локомотива і використання універсальних тягових характеристик, отриманих для електровозів з колекторними тяговими двигунами постійного і пульсуючого струму, а також з асинхронним тяговим приводом. В результаті запропоновані аналітичні вирази для визначення основного питомого опору руху і граничної тягової характеристики для всіх зон регулювання потужності основних типів тягових приводів.

Запропоновано аналітичну залежність для визначення маси електровоза. Аналіз якої показав, що основними параметрами, що визначають масу електровоза при фіксованій масі складу, є: тип тягового приводу і прискорення поїзда при пусковій швидкості.

Основною особливістю отриманих виразів для визначення керуючих параметрів рівняння руху є те, що вони не включають в якості параметра масу складу і електровоза. Це дає можливість рішення поставленої задачі базувати на результатах тягових розрахунків.

Ключові слова: пасажирський електровоз, прискорення поїзда, пускова швидкість, пускова сила тяги, основний питомий опір руху, тягова характеристика, універсальна характеристика.

визначення зчіпної маси електровоза дозволяє визначити обмеження керуючих параметрів рівняння руху поїзда (w_0 та f_k) у вигляді залежностей, що не є функціями маси состава. Ця обставина суттєво спрощує рішення задач тягового забезпечення.

REFERENCES

1. Sergienko N. I. *Reshenie problem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog Ukrainy cherez vzaimodeystvie gosudarstvennogo i chastnogo sektorov ekonomiki* [The solution of the problems of the rolling stock of Railways Ukraine through the interaction of public and private sectors of economy] / N. I. Sergienko // Lokomotiv-inform. – 2010. – №6. – p. 40-46.
2. Slomyanskiy A. V. *Vybor tipov magistralnykh lokomotivov* [Selection of the locomotive types] / A. V. Slomyanskiy // Tr. VNIIZhTa. – M.: Transzheldorizdat, 1960. – № 184. – 164 p.
3. Getman G. K. *Modelirovanie ogranicheniy oblasti dopustimyykh upravleniy uravneniya dvizheniya poezda v zadachakh tyagovogo obespecheniya* [Modeling of the limitations of the tolerance departments of the equations of motion of the train in the tasks of traction ensure] / G. K. Getman // Visnik Kharkivskogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu: zb. nauk.pr. – Kharkiv: KhDPU, 1999. – № 85. – pp. 44-51.
4. Getman G. K. *Opredelenie optimalnoy po minimumu raskhoda energii na dvizhenie poezda moshchnosti lokomotiva* [Determination of optimal on a minimum consumption of energy for the movement of the trains of the the locomotive power] // Transport. Matematichne modelyuvannya v inzhenernikh ta ekonomichnikh zadachakh transportu: Zb. nauk.pr. / Red. kol.: Bosov A. A. / gol. red./ ta in. – Dnipropetrovsk: Sich, 1999. – pp. 177–182.

УДК 656.224.022.846

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЖТ)

Кафедра Электроподвижной состав, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: sarpul@i.ua

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ТЯГИ ПАССАЖИРСКОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЯГОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Специфика определения управляющих параметров уравнения движения в задачах тягового обеспечения состоит в отсутствии тяговых характеристик и данных о величине массы электровоза.

В работе предложено решение этой задачи за счет ввода относительной массы локомотива и использования универсальных тяговых характеристик, полученных для электровозов с коллекторными тяговыми двигателями постоянного и пульсирующего тока, а также с асинхронным тяговым приводом. В результате предложены аналитические выражения для определения основного удельного сопротивления движению и предельной тяговой характеристики для всех зон регулирования мощности основных типов тяговых приводов.

Предложена аналитическая зависимость для определения массы электровоза. Анализ которой показал, что основными параметрами, определяющими массу электровоза при фиксированной массе состава, являются: тип тягового привода и ускорение поезда при пусковой скорости.

Основной особенностью полученных выражений для определения управляющих параметров уравнения движения является то, что они не включают в качестве параметра массу состава и электровоза. Это дает возможность решение поставленной задачи базировать на результатах тяговых расчетов.

Ключевые слова: пассажирский электровоз, ускорения поезда, пусковая скорость, пусковая сила тяги, основной удельное сопротивление движению, тяговая характеристика, универсальная характеристика.

Статью рекомендовано к печати д.т.н, профессором *Г. К. Гетьманом*

UDC 656.224.022.846

S. V. ARPUL (DNURT)

Department of Electric rolling-stock, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: sarpul@i.ua

TRACTION FORCE OF PASSENGER ELECTRIC DEFINITION FOR TRACTION PROVIDING SOLVE

The specificity of the definition of governing parameters of the equations of motion in the tasks of traction security is the lack of traction characteristics, data on the amount of the mass of an electric locomotive.

In the work of the proposed solution to this problem at the expense of input in the relative weight of the locomotive and the use of universal traction characteristics obtained for the electric locomotive with collector traction motors and DC pulsating current, as well as with asynchronous traction drive. As a result of the proposed analytical expressions for determining the principal of specific resistance movement and maximum tractive characteristics for all of the zones of the power of the main types of traction drives.

Proposed analytical dependence for determining the mass of an electric locomotive. The analysis of which showed that the main parameters determining the mass of the locomotive with fixed mass ended, are follows: type of traction drive and the acceleration of the train with starting speed.

The main feature of the obtained expressions for determination of the parameters of the equation of motion is that they do not include the mass of the composition and of the locomotive. It gives the opportunity to the solution of the problem based on the results of traction calculation.

Keywords: passenger electric locomotive, the acceleration of the train, starting speed, starting tractive force, the main specific resistance movement, tractive characteristics, universal characteristic.

Prof. *G. K. Getman*, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published.