

УДК 656.224.022.846

С. В. АРПУЛЬ – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, arpul@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3698-2627  
А. М. АФАНАСОВ – д.т.н., професор, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, afanasof@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4609-2361

## МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛАСТІ КЕРУЮЧИХ ПАРАМЕТРІВ В РІВНЯННІ РУХУ ПОЇЗДА ПРИ ВИРШЕННІ ЗАДАЧ ТЯГОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### Вступ

Проблема оновлення пасажирського тягового рухомого складу залізниць України в нинішній час набула першочергового значення. За даними Укрзалізниці [1] середній знос парку електровозів складає 90 % і 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 протя-

гом всієї історії впровадження та експлуатації залізничного транспорту. І в цій області отримано ряд найважливіших рішень відомими вченими-залізничниками [2–5].

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 [6] 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

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

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 вирішенні 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

$$k_p = \frac{P}{Q} = \frac{w''_{оп} + w_{пр} + i + 102a_n(1+\gamma_c)}{1000 \psi_{кп} - [w'_{оп} + i + 102a_n(1+\gamma_l)]}, \quad (3)$$

де  $w'_{оп}$ ,  $w''_{оп}$  – основний питомий опір руху локомотива в режимі тяги і пасажирського состава при пусковій швидкості;  $w_{пр}$  – додатковий питомий опір руху пасажирського состава від підвагонних генераторів;  $(1+\gamma_c)$ ,  $(1+\gamma_l)$  – коефіцієнти інерції обертових мас состава та електровоза [5].

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

$$k_p = b_0 + b_1 V_n + b_2 a_n^2, \quad (4)$$

коефіцієнти якого наведені в табл. 1.

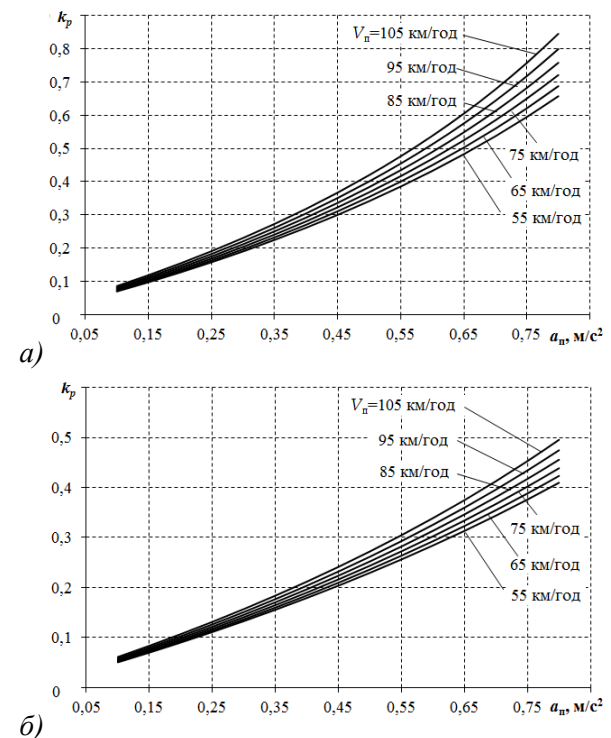


Рис. 1. Залежності  $k_p$  від пускового прискорення та пускової швидкості:  
а) колекторний привод; б) асинхронний привод

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  $N_n$  можна записати у вигляді:

$$F_{кп} = (1 + k_p) \times [w_0(V_n) + i + 102 a_n (1 + \gamma)] Q; \quad (5)$$

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

$$N_n = 2,725 \cdot 10^{-3} [w_0(V_n) + i + 102 a_n (1 + \gamma)] V_n Q \frac{(1 + k_p)}{k_F k_V}. \quad (7)$$

Аналіз параметрів існуючих електровозів показав [5–6], 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  $V_n$ .

У якості одного з показників раціональності вибору пускової швидкості руху електровоза доцільно вибрати витрати електроенергії на тягу при заданому часі руху поїздів [7]. 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  $[0; V_n]$  (відрізок  $ab$  на рис. 2) сила тяги обмежена максимальним припустимим струмом тягових двигунів або мак-

симальною силою зчеплення і може бути визначена за виразом (5).

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

$$F_{к(bc)}(V) = \frac{F_{кп} V_n}{V}. \quad (8)$$

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

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

де  $F_k^*(V^*)$  – універсальна тягова характеристика.

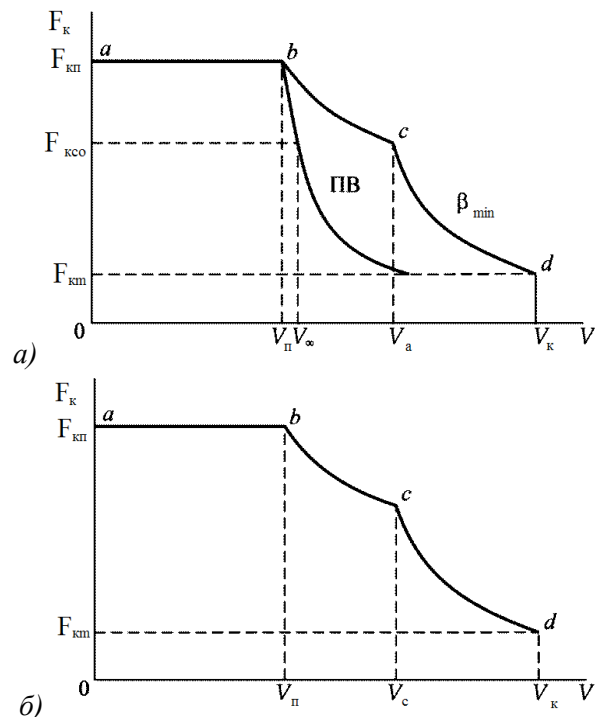


Рис. 2. Гранична тягова характеристика пасажирського електровоза:  
а) колекторний привод; б) асинхронний привод

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

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

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  $\sigma$  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. 2 б) на ділянці  $cd$  сила тяги обернено пропорційна квадрату швидкості руху і може бути визначена за виразом

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

В питомих одиницях виміру координати граничної тягової характеристики визначимо за виразом

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

для визначення складових якого отримані формули:

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

$$f_{к(bc)}(V) = \frac{f_{кп} V_{п}}{V}; \quad (13, а)$$

$$f_{к(cd)}(V) = F_k^* \left( k_V \frac{V}{V_{п}} \right) \frac{f_{кп}}{k_F \beta_{\min}}. \quad (13, б)$$

Параметри перспективних електровозів встановлюють за умов можливості реалізації при конструкційній швидкості руху  $V_k$  надлишкового прискорення  $a_0 \geq a_{0з}$ , де  $a_{0з}$  – заданий рівень надлишкового прискорення. Для перевірки виконання названої умови скористаємося виразом

$$a_0 = \left[ F_k^* \left( k_V \frac{V_k}{V_{п}} \right) \frac{f_{кп}}{k_F \beta_{\min}} - w_0(V_k) \right] \times \\ \times [102(1 + \gamma)]^{-1} \geq a_{0з}, \quad (14)$$

який отримано з урахуванням (13, а) та (13, б).

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  $V_{п}$  і прискорень  $a_{п}$  та  $a_{0з}$ .

### Висновок

Використання запропонованих універсальних граничних тягових характеристик і методу визначення зчпної 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.

### Бібліографічний список

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. Сломянский, А. В. Выбор типов магистральных локомотивов / А. В. Сломянский

- // 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.
  5. Wakiya, H. Разработка поездов изменяемой колеи: поезда изменяемой колеи / H. Wakiya. Железные дороги мира [Текст]: Научно-технический журнал / М.: ИНТЕКСТ, 2010 г. № 10. – С. 36–39.
  6. Мазец, В. А. Новые технологии в области локомотивостроения: на магистралях сотрудничества / В. А. Мазец // Железнодорожный транспорт: Научно-теоретический технико-экономический журнал. – 2011. – № 11. – С. 64–65.
  7. Lustig, D. Повышение энергоэффективности локомотивов: локомотивостроение / D. Lustig // Железные дороги мира: научно-

технический журнал. – 2010. – № 10. – С. 40–45.

**Ключові слова:** пасажирський електро-воз, прискорення поїзда, пускова швидкість, пускова сила тяги, основний питомий опір руху, тягова характеристика, універсальна характеристика.

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

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

**Рецензенти:**

д.т.н., проф. А. М. Муха,  
д.т.н., проф. О. М. Сінчук.

Надійшла до редколегії 23.05.2018.  
Прийнята до друку 30.05.2018.