

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЗТ), Г. К. ГЕТЬМАН (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. (056)373-15-31, ел. пошта: [getman-gk@i.ua](mailto:getman-gk@i.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0002-3471-6096](http://orcid.org/0000-0002-3471-6096)

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДУЛЬНОЇ ТЯГИ

### Вступ

Графіком руху поїздів для кожного напрямку залізничної лінії, виходячи з технічних можливостей тягового засобу, зокрема тягового електрорухомого складу, встановлюється певна норма маси состава, яка повинна відповідати повному використанню потужності тягового засобу. Однак на практиці маса состава носить випадковий характер, а відхилення маси состава від норми в меншу сторону приводить до появи надлишку тягової потужності.

Надлишкова потужність не може бути використана на підвищення швидкості, оскільки в графіку руху, незалежно від маси, всі поїзда прокладаються з однаковою розрахунковою ходовою швидкістю. Наявність надлишкової потужності негативно впливає на економічні показники перевізного процесу, тому що приводить до росту витрат на відновлення (поповнення) і утримання парку тягових засобів, а також до збільшення витрати електроенергії на тягу поїздів.

Зменшити надлишкову потужність тягових засобів, а значить і сумарну потужність парку тягових засобів, можна за рахунок використання модульної тяги, тобто за рахунок водіння поїздів тяговими зчепами, сформованими з окремих тягових модулів з розрахунку, щоб їх потужність була достатньою для водіння конкретного поїзда.

Під тяговим модулем мається на увазі тягова одиниця, придатна для використання як у складі зчепу, так і самостійно.

### Постановка та вирішення задачі визначення параметрів тягових засобів

Наукові й методологічні основи вибору оптимальних зовнішніх параметрів тягових модулів і визначення обумовленої їхнім використанням економії витрат на відновлення (поповнення) експлуатованого парку викладені в [1-3].

Однак для більш повної оцінки економічної доцільності застосування модульної тяги слід вивчити питання її енергетичної ефективності, оскільки в цей час витрати на енергоносії вно-

сять вагому складову у витрати, що визначають собівартість продукції.

Зниження витрати енергії на тягу поїздів при модульній тязі обумовлене зниженням частки маси транспортного засобу в масі поїзда й зниженням витрат енергії на власні потреби.

Установимо взаємозв'язок витрати енергії на рух поїзда й маси тягового зчепу. Нижче визначеності заради необхідні викладення будуть виконані стосовно до електрифікованих залізниць, однак отримані результати можуть бути легко поширені на будь-який вид тяги.

Нехай незалежно від маси поїзда й потужності номінального режиму тягового зчепу реалізується керування, якому відповідає рух поїзда на заданій ділянці зі зміною фазових координат стану відповідно до деякої кривої швидкості .

Віднесені до 1 т маси складу  $Q$  витрати електроенергії на тягу представимо у вигляді [1]

$$a = (1 + k_P) \eta^{-1} \int_{S_{\Pi}}^{S_K} f_K(S) dS, \quad (1)$$

де  $S_{\Pi}$ ,  $S_K$  – координати шляху, відповідно на початку та в кінці дільниці;

$f_K$  – питома (віднесена до одиниці маси поїзда) сила тяги;

$k_P$  – коефіцієнт, що визначається відношенням маси тягового зчепу  $P$  до маси состава  $Q$ , тобто  $k_P = P/Q$ ;

$\eta$  – середнє значення к.п.д. тягового модуля.

На підставі рівняння руху поїзда залежність  $f_K(S)$  визначається по заданій кривій швидкості  $V(S)$  як

$$f_K(S) = \frac{V dV}{\xi dS} + w_0(V(S)) + i(S), \quad (2)$$

де  $V$  – швидкість руху поїзда;

$\xi$  – розмірний коефіцієнт, що залежить від прийнятих одиниць виміру фізичних величин;

$w_0$  – основний питома опір руху поїзда в режимі тяги;

$i(S)$  – поздовжній профіль колії заданої ділянки.

Сила тяги повинна задовольняти умові

$$0 \leq f_K(S) \leq \overline{f_K}(V(S)),$$

де  $\overline{f_K}(V)$  – гранична питома тягова характеристика.

З урахуванням (2) на підставі (1) одержимо

$$a = \frac{1+k_P}{\eta} \left[ \int_{S_{\Pi}}^{S_K} w_O(V(S)) dS + \int_{S_{\Pi}}^{S_K} i(S) dS + \frac{V_K^2 - V_{\Pi}^2}{2\xi} \right], \quad (3)$$

де  $V_{\Pi} = V|_{S=S_{\Pi}}$  та  $V_K = V|_{S=S_K}$ .

Вплив величини надлишкової потужності тяги на витрати електроенергії у виразі (3) враховується за допомогою коефіцієнта  $k_P$ , який фігурує в множнику перед квадратною дужкою, а також у виразах, що визначають величину основного опору руху  $w_O$  [3].

Потужність сучасних тягових засобів у номінальному режимі обмежується умовами зчеплення, тому мінімальна маса тягового зчепу, необхідна для водіння поїздів заданої маси буде визначатися виразом

$$P_0 = \frac{Q(w_O''(V) + a_{\Pi}(1+\gamma))}{1000\psi_K(V) - (w_O'(V) + a_{\Pi}(1+\gamma))} \Big|_{V=V_H}, \quad (4)$$

де  $\psi_K$  – розрахунковий коефіцієнт зчеплення;

$w_O''$  – питомий основний опір руху состава;

$w_O'$  – питомий основний опір руху тягового засобу в режимі тяги;

$1+\gamma$  – коефіцієнт інерції обертових мас;

$a_{\Pi}$  – задане значення пускового прискорення;

$V_H$  – швидкість номінального режиму тягового модуля.

Величині  $P_0$  відповідає мінімальне значення коефіцієнта  $k_{P0} = k_P|_{P=P_0}$  й рівність потужності номінального режиму й потужності, необхідної для ведення поїзда, тобто відсутність надлишкової потужності.

Якщо потужність зчепу перевищує необхідну для ведення поїзда, то маса такого зчепу  $P > P_0$ , тобто є надлишок маси, а коефіцієнт  $k_P > k_{P0}$ .

Позначимо відносну величину надлишкової маси як

$$\delta_P = (P - P_0) / P_0.$$

Тоді буде мати місце співвідношення

$$k_P = k_{P0} (1 + \delta_P). \quad (5)$$

Допустимо, що за час рейсу потенційна й кінетична енергія поїзда не зміниться. Тоді витрати електроенергії будуть визначатися роботою з подолання сил основного опору руху поїзда

$$a = \frac{1+k_P}{\eta} \int_{S_{\Pi}}^{S_K} w_O(V(S)) dS. \quad (6)$$

Слід зазначити, що на підставі (6) для зниження витрат енергії на тягу за рахунок застосування модульної тяги одержимо оцінку знизу, тому що тут не враховується можливе збільшення потенційної енергії поїзда та втрати в гальмах.

Відносну величину збільшення витрат енергії на тягу, обумовлену наявністю надлишкової потужності тяги (маси зчепу), представимо як

$$\alpha(\delta_P) = \frac{a(k_P)}{a_0} - 1, \quad (7)$$

де  $a_0 = a|_{k_P=k_{P0}}$ .

На підставі (6) запишемо

$$\frac{a}{a_0} = \frac{1+k_P}{1+k_{P0}} \cdot \frac{\int_{S_{\Pi}}^{S_K} w_O(k_P, V) dS}{\int_{S_{\Pi}}^{S_K} w_O(k_{P0}, V) dS}. \quad (8)$$

Введемо в розгляд поняття так званого середнього по шляху питомого опору руху поїзда  $w_{OS}$ , тобто

$$\int_{S_{\Pi}}^{S_K} w_O(V(S)) dS = w_{OS} (S_K - S_{\Pi}).$$

Тоді замість (8) отримаємо

$$\frac{a}{a_0} = \frac{1+k_P}{1+k_{P0}} \cdot \frac{w_{OS}(k_P)}{w_{OS}(k_{P0})}. \quad (9)$$

Згідно даним [4] середній по шляху питомий опір руху  $w_{OS}$  можна представити у вигляді

$$w_{OS} = k_W w_{OC}$$

де  $k_W$  – коефіцієнт пропорційності, який для тягового зчепу й для складу можна прийняти однаковими;

$w_{OC}$  – опір руху поїзда при середній швидкості руху на дільниці.

Згідно [3]

$$w_{OC} = \frac{k_P w'_{OC} + w''_{OC}}{1 + k_P} \quad (10)$$

Враховавши (10) на підставі (9) і (7) отримаємо:

$$\frac{a}{a_0} = \frac{k_P w'_{OC} + w''_{OC}}{k_{P0} w'_{OC} + w''_{OC}} \alpha(\delta_P) = \frac{k_{P0} \delta_P}{k_{P0} + \rho} \quad (11)$$

де  $\rho = w''_{OC} / w'_{OC}$ .

Вираз (11) дозволяє звести завдання про енергетичну ефективність модульної тяги до завдання визначення надлишкової маси тягового зчепу.

Очевидно, що  $\rho$  є функцією швидкості поїзда.

Величина  $k_{P0}$  визначається формулі, яка впливає з (4)

$$k_P = \frac{w''_0(V) + a_{II}(1 + \gamma)}{1000 \psi_{\kappa}(V) - (w'_0(V) + a_{II}(1 + \gamma))} \Big|_{V = V_H} \quad (12)$$

Нехай для заданої дільниці відомий закон розподілу маси составів. Тоді, використовуючи вираз (4), можна отримати закон розподілу необхідної маси тягового зчепу  $f_P(y)$ , показаний на рис. 1.

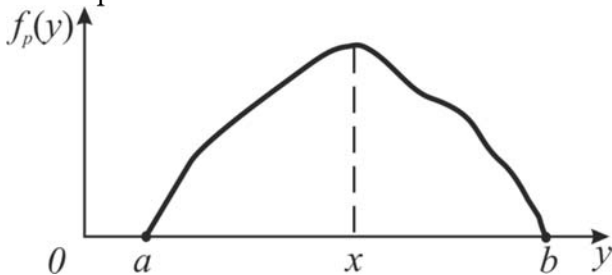


Рис. 1. Розподіл імовірностей необхідної маси тягового зчепу

Відрізки  $0a$  та  $0b$  представляють найменше й найбільше значення необхідної маси тягового зчепу.

Для випадку, коли тягові зчепи формуються з однотипних модулів, а мінімальна потужність модуля вибирається так, що відповідна їй маса

модуля задовольняє умові  $x \geq a$ , надлишкова маса тягових зчепів, що доводиться на один поїзд, складе

$$y_P = \sum_{i=0}^n \int_{ix}^{(i+1)x} [(i+1)x - y] f_P(y) dy, \quad (13)$$

де  $x$  – маса тягового модуля;

$n$  – ціла частина числа  $b/x$ .

При виводі рівняння (13) враховане, те що:

$$\int_a^x (x-y) f_P(y) dy = \int_0^x (x-y) f_P(y) dy$$

$$\begin{aligned} & \int_0^b (x-y) f_P(y) dy = \\ & = \int_{nx}^{(n+1)x} [(n+1)x - y] f_P(y) dy \end{aligned}$$

$$\text{тому що: } \int_0^a f_P(y) dy = 0 \quad ; \quad \int_b^{(n+1)x} f_P(y) dy = 0$$

Середнє значення потужності кіл власних потреб  $P_{ВП}$  визначається номінальною потужністю  $N_H$  тягового модуля

$$P_{ВП} = k_{ВП} N_H \quad (14)$$

де коефіцієнт  $k_{ВП}$  залежить від типу тягового засобу та може бути визначений на підставі даних, наведених в [5].

При заданій номінальній швидкості  $V_H$  і масі состава  $Q$  потужність номінального режиму тягового модуля визначається як [1]

$$N_H = 2,725 \psi_{KH} k_P V_H Q, \text{ кВт.} \quad (15)$$

З виразів (14) і (15) випливає, що ріст питомих витрат енергії на власні потреби обумовлений збільшенням маси тягового зчепу  $P$  відносно його необхідної величини  $P_0$ , можна визначити як

$$\alpha_{ВП} = \frac{a_{ВП}(k_P) - a_{ВП}(k_{P0})}{a_{ВП}(k_{P0})} \quad (16)$$

або

$$\alpha_{ВП} = k_P / k_{P0} - 1$$

## Висновки

Приведена вище методика дозволяє отримати оцінку енергетичної ефективності модульної тяги для залізниць України.

Так, попередні розрахунки показали, що використання модульної тяги, в порівнянні з використанням в експлуатації тільки тягових засобів одного типу, забезпечує можливість знизити до 8 % обсяги закупівлі тягових засобів для укомплектування парку. В такій же проп

рції знизяться витрати на утримання тягових засобів. Застосування в експлуатації тягових засобів, які формуються з тягових модулів, забезпечує, як встановлено за розробленою в роботі методикою, можливість зменшення до 3 % витрат електроенергії на тягу поїздів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гетьман Г. К. Выбор параметров номинального режима магистральных электровозов / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, Р. Н. Демчук // Залізничний транс-порт України. – 2009. – № 3. – С.11-14.
2. Гетьман Г. К. Определение оптимального мощностного ряда тяговых средств для пассажирских перевозок на полигоне тяги / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, Е. А. Довгань // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 9. – С.47-50.
3. Арпуль С. В. Моделирование области допустимых управлений уравнения движения пассажирского поезда / С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2004. – Вип. 4. – С.17-22.
4. Тихонов К.К. Оптимальные ходовые скорости грузовых поездов // Труды МИИТ. Вып. 172. – М.: Транспорт, 1964. – 282 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

Надійшла до друку 21.04.2017.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

Так як маса составів на практиці не відповідає повному використанню потужності тягового засобу, то це приводить до появи надлишку тягової потужності.

Надлишкова потужність не може бути використана на підвищення швидкості, оскільки в графіку руху, незалежно від маси, всі поїзда прокладаються з однаковою розрахунковою ходовою швидкістю. Наявність надлишкової потужності негативно впливає на економічні показники перевізного процесу, тому що приводить до росту витрат на відновлення (поповнення) і утримання парку тягових засобів, а також до збільшення витрати електроенергії на тягу поїздів.

Зменшити надлишкову потужність тягових засобів, а значить і сумарну потужність парку тягових засобів, можна за рахунок використання модульної тяги, тобто за рахунок водіння поїздів тяговими зчепами, сформованими з окремих тягових модулів з розрахунку, щоб їх потужність була достатньою для водіння конкретного поїзда.

Наведені в роботі залежності дозволяють отримати оцінку енергетичної ефективності модульної тяги для залізниць України.

Використання модульної тяги, в порівнянні з використанням в експлуатації тільки тягових засобів одного типу, забезпечує можливість знизити до 8% обсяги закупівлі тягових засобів для укомплектування парку. В такій же пропорції знизяться витрати на утримання тягових засобів. Застосування в експлуатації тягових засобів, які формуються з тягових модулів, забезпечує, як встановлено за розробленою в роботі методикою, можливість зменшення до 3% витрат електроенергії на тягу поїздів.

**Ключові слова:** тяговий модуль; надлишкова маса; надлишкова потужність; тяговий зчеп; гранична тягова характеристика.

УДК 656.224.022.846

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЖТ), Г. К. ГЕТЬМАН (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Макарова 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. (056) 373-15-31, эл. почта: getman-gk@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-3471-6096

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДУЛЬНОЙ ТЯГИ

Так как масса составов на практике не отвечает полному использованию мощности тяговых средств, то это приводит к появления излишка тяговой мощности.

Избыточная мощность не может быть использована на повышение скорости, поскольку в графике движения, независимо от массы, все поезда прокладываются с одинаковой расчетной ходовой скоростью. Наличие избыточной мощности отрицательно влияет на экономические показатели перевозочного процесса, потому что приводит к росту расходов на восстановление (пополнение) и содержание парка тяговых средств, а также к увеличению расходов электроэнергии на тягу поездов.

Уменьшить избыточную мощность тяговых средств, а значит и суммарную мощность парка тяговых средств, можно за счет использования модульной тяги, то есть за счет вождения поездов тяговыми сцепками, сформированными из отдельных тяговых модулей из расчета, чтобы их мощность была достаточной для вождения конкретного поезда.

Приведенные в работе зависимости позволяют получить оценку энергетической эффективности модульной тяги для железных дорог Украины.

Использование модульной тяги, в сравнении с использованием в эксплуатации только тяговых средств одного типа, обеспечивает возможность снизить до 8 % объема закупки тяговых средств для комплектации парка. В такой же пропорции снизятся расходы на содержание парка тяговых средств. Применение в эксплуатации тяговых средств, которые формируются из тяговых модулей, обеспечивает, как установлено по разработанной в работе методике, возможность уменьшения до 3 % расхода электроэнергии на тягу поездов.

**Ключевые слова:** тяговой модуль; избыточная масса; избыточная мощность; тяговый сцеп; предельная тяговая характеристика.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

UDC 656.224.022.846

S. V. ARPUL (DNURT), H. K. HETMAN (DNURT)

Department of "Electric rolling stock of railways", Dnepropetrovsk national university of railway transport of the name of academician V. Lazaryana, street of Lazaryana 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: getman-gk@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-3471-6096

## DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF MODULAR TRACTION

Because mass of compositions does not answer the complete use of power of hauling facilities in practice, then it results in appearances of surplus of hauling power.

Surplus power can not be used on a rev-up, as in the graphic arts of motion, regardless of mass, all trains are laid with identical working on-speed. The presence of surplus power negatively influences on the economic indicators of vehicular process, because results in the height of charges on renewal (addition) and maintenance of park of hauling facilities, and also to the increase of charges of electric power on traction of trains.

To decrease surplus power of hauling facilities, and total power of park of hauling facilities, it is possible due to the use of module traction, id est due to driving of trains the hauling hooks formed from the separate hauling modules from a calculation, that their power was sufficient for driving of concrete train.

The dependences driven to work allow to get the estimation of power efficiency of module traction for the railways of Ukraine.

The use of module traction, by comparison to the use in exploitation only of hauling facilities of one type, provides possibility to bring down to 8 % volumes of purchase of hauling facilities for acquisition of park. In the same proportion charges will go down on maintenance of park of hauling facilities. Application is in exploitation of hauling facilities that is formed from the hauling modules, provides, as set on the methodology worked out in-process, possibility of reduction to 3 % expenses of electric power on traction of trains.

**Keywords:** traction module; excess weight; excess capacity; towing coupling; maximum traction characteristics.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

© Арпуль С. В., Гетьман Г. К., 2017