

УДК 629.421.2.016.2

DOI: 10.34029/2311-4061-2020-134-1-04-10

*Д-р техн. наук Гетьман Г. К.**Аспирант Марикуца С. Л.**Інженер Васильев В. Е.***СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЁМКОСТИ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНОЙ ТЯГИ**

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, электроэнергия, тяговый модуль, расход, норма, мощность, масса поезда, тяговый сцеп, кратность тяги, удельный расход энергии, локомотивный парк.

Введение

Железнодорожный транспорт является энергоёмкой отраслью. На его нужды в Украине ежегодно расходуется приблизительно 4,5 млрд. кВт·ч. электрической энергии, причём львиная доля затрат электроэнергии приходится на электрическую тягу поездов. Поэтому изыскание резервов экономии потребляемой энергии – одно из основных заданий, которые стоят перед отраслью.

В результате непрерывного улучшения использования энергоресурсов на всех этапах преобразования топлива – от его добычи до превращения в механическую работу электроподвижного состава – за время использования электрической тяги её средневзвешенный к.п.д. возрос приблизительно в 2,5 раза (с 10,7 % до 25 %). Однако резервы повышения энергетической эффективности этого вида тяги исчерпаны далеко не полностью, поскольку реальны перспективы совершенствования устройств по производству и преобразованию электроэнергии, дальнейшего совершенствования электроподвижного состава, пополнение локомотивного парка электровозами с наиболее рациональными параметрами номинального режима, а также, использования так называемой модульной тяги.

Несмотря на то, что графиком движения поездов для каждого направления установлена норма их массы, на практике всегда име-

ют место значительные отклонения массы поезда от нормируемого значения даже в случае, когда выполняется продиктованное стремлением полного использования мощности тяговых средств и полезной длины приёмо-отправочных путей станций правило формирования состава, согласно которому грузовые поезда должны быть или полносоставными, или полновесными. Имеющие место отклонения массы составов от нормы объясняются колебаниями поездной погонной нагрузки, обусловленной, в свою очередь, спецификой перевозимых на данной линии грузов.

Критическая норма массы поезда соответствует полному использованию мощности тягового средства, поэтому отклонение этой массы от нормы в меньшую сторону приводит к появлению избытка тяговой мощности. Она не может быть использована на повышение скорости, поскольку в графике движения независимо от массы маршруты для всех поездов прокладываются с одной и той же расчётной ходовой скоростью. Вместе с тем наличие избыточной мощности локомотива отрицательно влияет на экономические показатели перевозочного процесса, так как приводит к росту затрат на обновление (пополнение) и содержание тягового парка, а также к увеличению расхода энергии на тягу поездов. Последнее объясняется тем, что рост избыточной мощности локомотива связан с увеличением доли его массы в общей массе поезда и с ростом затрат энергии на так называемые собственные нужды.

Уменьшить избыточную мощность тяги, а значит и энергоёмкость перевозок, можно за счёт использования модульной тяги, то есть за счёт вождения поездов тяговыми сцепами, сформированными из отдельных тяговых модулей из расчёта, чтобы их мощность была достаточной для вождения поезда конкретной массы (под тяговым модулем подразумевается тяговая единица, пригодная для использования как в составе сцепа, так и самостоятельно).

Цель работы

Разработка методики оценки эффективности снижения энергоёмкости железнодорожных перевозок за счёт использования в эксплуатационной работе тяговых сцепов,

сформированных из однотипных модулей (локомотивов) с оптимальными тяговыми характеристиками и номинальной мощностью.

Обзор литературы

Издержки на возмещение затрат на электроэнергию для тяги поездов составляют ощутимую долю эксплуатационных расходов железных дорог, поэтому вся история их электрификации неразрывно связана с поиском и реализацией резервов снижения энергоёмкости перевозок.

Проблема экономии электроэнергии на тягу поездов изучалась в течение практически всей истории электрификации железных дорог. В результате внедрения различных энергосберегающих мероприятий расширение полигона электрической тяги сопровождалось значительным снижением энергоемкости перевозок. Так, в период 1950-1975 г.г. на железных дорогах бывшего СССР удельный расход электроэнергии на тягу поездов во всех видах движения снизился приблизительно на 42 %.

Особую актуальность вопросы энергосбережения приобрели в последнее десятилетие в связи с ростом цен на энергоносители. Возросло количество работ, посвящённых экономии электроэнергии на тягу поездов. В поле зрения исследователей находятся оба главных звена, определяющие общий энергобаланс электротяги, — устройства электроснабжения [1-5] и тяговый электроподвижной состав [6,7,8]. Ряд новых исследований посвящен усовершенствованию методов нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов.

Величина расхода электроэнергии на тягу поезда используется в качестве показателя предпочтительности при решении целого ряда задач, относящихся к сфере железнодорожного транспорта, в частности, задач оптимизации режимов вождения поездов [9, 10] и тягового обеспечения участка движения, т.е. задач выбора оптимальных параметров номинального режима работы тяговых средств [11, 12].

Как показано в работе [12], посвящённой определению оптимального мощностного ряда электровозов, для грузовых и пассажирских перевозок целесообразно использование модульной тяги, что обеспечивает возможность снижения капитальных затрат на обновление локомотивного парка и эксплуатационных расходов на его содержание, а также повышение энергетической эффективности железнодорожных перевозок.

Вопросу энергетической эффективности модульной тяги посвящена также работа [13]. Однако в ней не приведены методики

оценки влияния параметров номинального режима работы тягового модуля на расход электроэнергии на тягу поездов. В настоящей статье сделана попытка восполнить этот пробел.

Основной материал исследований

Установим взаимосвязь расхода энергии на движение поезда и мощности тягового сцепа.

Пусть на рассматриваемом поездо-участке распределение массы составов на интервале

$$\underline{m}_c \leq m_c \leq \bar{m}_c, \quad (1)$$

где \bar{m}_c и \underline{m}_c — соответственно, наибольшее и наименьшее значения m_c , определяется закономерностью

$$f_m(m_c), \quad (2)$$

Для каждого значения m_c можно определить требуемую мощность номинального режима тягового средства [11]

$$N = 2,725 \psi_k k_N k_{po} v_p m_c, \quad (3)$$

где k_N — коэффициент, равный отношению мощности номинального режима тягового модуля к мощности, реализуемой им на расчетном подъеме; ψ_k — расчетный коэффициент сцепления; v_p — расчетная скорость тягового модуля, k_{po} — отношение потребной сцепной массы $m_{яo}$ тягового модуля к массе состава, то есть

$$k_{po} = \frac{m_{эо}}{m_c}. \quad (4)$$

Согласно ранее проведённым исследованиям [12]

$$k_{po} = \frac{w''_{op} + i_p}{1000 \psi_{пр} - (w'_{op} + i_p)}, \quad (5)$$

где w''_o и w'_o — удельное основное сопротивление движению состава и локомотива в режиме тяги при расчётной скорости движения; i_p — расчётный подъем.

Перейдя с помощью (3) к переменной N , на основании зависимости $f_m(m_c)$ получим распределение потребной мощности тя-

гового сцепа модулей $f_N(N)$, показанное на рис. 1а (значения $N = a$ и $N = b$ соответствуют массам состава \underline{m}_c и \bar{m}_c).

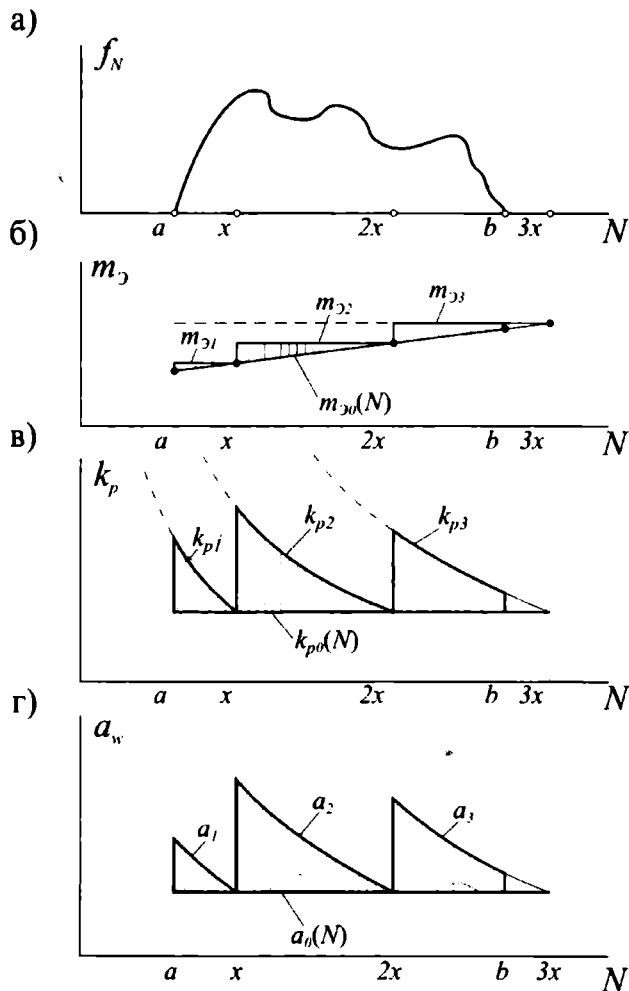


Рис. 1 – Распределение потребной мощности тягового сцепа

Рассмотрим случай применения модульной тяги при номинальной мощности модуля $N_H = x$, когда ряд тяговых мощностей составляют сцепы модулей, суммарная мощность которых составляет $N_H = x$, $N_H = 2x$ и $N_H = 3x$ (см. рис. 1а).

Соответствующая потребной мощности N сцепная масса (минимальная) на основании (3) пропорциональна мощности N (см. рис. 1б) определяется как

$$m_{э0} = \frac{N}{d}, \quad (6)$$

$$\text{где } d = 2,725\psi_k k_N v_p. \quad (7)$$

Сцепная масса тяговых сцепов в пределах соответствующих диапазонов необходимой мощности остаётся неизменной:

$$\begin{aligned} m_{э1} &= \frac{x}{d} \quad \text{для } a \leq N \leq x; \\ m_{э2} &= \frac{2x}{d} \quad \text{для } x \leq N \leq 2x; \\ m_{э3} &= \frac{3x}{d} \quad \text{для } 2x \leq N \leq b. \end{aligned} \quad (8)$$

На указанных в зависимостях (8) интервалах изменения мощности масса электроваза (модуля) неизменна, а её отношение к массе состава, определяемое значением коэффициента k_p , который есть величина переменная (см. рис. 1в) и может быть представлен как функция потребной мощности тяги N .

В самом деле, значению номинальной мощности $N_H = N_i$ соответствует сцепная масса

$$m_{э0i} = \frac{N_i}{d}. \quad (9)$$

Но поскольку согласно приведённого соотношения (3) масса состава

$$m_c = \frac{N}{dk_{po}}, \quad (10)$$

то для мощности $N_H = N_i$ имеем

$$k_{pi} = \frac{m_{э0i}}{m_c} \quad \text{или} \quad k_{pi} = \frac{N_i}{N}.$$

На основании приведённых выражений для рассматриваемого случая получим зависимости:

$$\begin{aligned} k_{p1} (a \leq N < x) &= k_{po} \frac{x}{N}; \\ k_{p2} (x \leq N < 2x) &= k_{po} \frac{2x}{N}; \\ k_{p3} (2x \leq N \leq b) &= k_{po} \frac{3x}{N}, \end{aligned} \quad (11)$$

графические значения которых показаны на рисунке 1в.

Отметим, что коэффициент $k_p > k_{po}$ характеризует величину избыточной сцепной массы в поезде и, следовательно, обусловленное этим обстоятельством повышение расхода электроэнергии на тягу. В качестве примера ниже рассмотрим расход электроэнергии тяговой единицей, обусловленный работой сил основного сопротивления движению поезда:

$$A_w = \frac{m_{\text{э}} + m_c}{\eta_c} \int_{s_H}^{s_K} w_0(v(s)) ds, \quad (12)$$

где w_0 – основное сопротивление движению поезда в режиме тяги; η_c – среднее значение к.п.д. модуля (электровоза) при работе на данном участке.

Расход электроэнергии на единицу полезной перевозочной работы (удельный расход) определяется как

$$a_w = \frac{A}{m_c (s_K - s_H)}. \quad (13)$$

Для рассматриваемого случая на основании выражения (12) имеем

$$a_w = \frac{1 + k_p}{\eta_c (s_K - s_H)} \int_{s_H}^{s_K} w_0(v(s)) ds. \quad (14)$$

Согласно публикации [15] величина

$$w_{0s}(s) = \frac{\int_{s_H}^{s_K} w_0(v(s)) ds}{s_K - s_H} \quad (15)$$

и представляет собой среднее по пройденному пути сопротивление движению поезда, определяемое как [16]

$$w_{0s} = k_w w_{0c}, \quad (16)$$

где k_w – коэффициент пропорциональности; w_{0c} – основное сопротивление движению поезда при средней скорости движения на участке, определяемое как [11]

$$w_{0c} = \frac{k_p w'_{0c} + w''_{0c}}{1 + k_p}, \quad (17)$$

где w'_{0c} и w''_{0c} – основное сопротивление движению, соответственно, локомотива в режиме тяги и состава при средней скорости движения.

С учётом зависимости (17), выражение (14) приводится к виду

$$a_w = \frac{2,725 (k_p w'_{0c} + w''_{0c})}{\eta_c} k_w. \quad (18)$$

Влияние избыточной мощности тяги на расход электроэнергии в выражении (18) отражается через коэффициент k_p .

Графические зависимости $a_w(N)$ показаны на рисунке 1г. Минимальный удельный расход энергии равен

$$a_{w0} = \frac{k_w}{\eta_c} [k_{po} w'_{0c} + w''_{0c}], \quad (19)$$

соответствует условию реализации потребной мощности, то есть отсутствию избыточной сцепной массы поезда.

При использовании тяговой мощности $N_H = N_i$ имеем

$$a_{wi}(N) = \frac{k_w}{\eta_c} [k_{pi}(N) w'_{0c} + w''_{0c}], \quad (20)$$

$i = 1 - n,$

где i равно кратности тяги, используемой для реализации мощности N_i .

Тогда для рассматриваемого случая получаем:

$$\begin{aligned} a_1(N) &= \frac{k_w}{\eta_c} [k_{p1}(N) w'_{0c} + w''_{0c}]; \\ a_2(N) &= \frac{k_w}{\eta_c} [k_{p2}(N) w'_{0c} + w''_{0c}]; \\ a_3(N) &= \frac{k_w}{\eta_c} [k_{p3}(N) w'_{0c} + w''_{0c}]. \end{aligned} \quad (21)$$

Увеличение удельного расхода электроэнергии, обуславливается избытком сцепной массы

$$\Delta a_i(N) = a_{wi}(N) - a_{w0},$$

а на один поезд и единицу пути

$$\Delta A_i(N) = [\Delta a_{wi}(N) - a_{w'o}] m_c(N), \quad (22)$$

или с учётом (18) и (19)

$$\Delta A_i(N) = m_c(N) k_w \eta_c^{-1} w_o' \cdot [k_{pi}(N) - k_{po}] \quad (23)$$

Но, так как

$$m_c(N) = \frac{N}{dk_{po}} \text{ и } k_{pi} = \frac{N_i}{N} k_{po}, \quad (24)$$

$$\text{то } \Delta A_i(N) = \frac{k_w w_o'}{\eta_c d} (N_i - N). \quad (25)$$

Среднее значение увеличения расхода электроэнергии при мощности тягового модуля $N_H = x$ будет равно

$$\begin{aligned} \Delta \bar{A} &= \int_a^x \Delta A_1(N) f_N(N) dN + \\ &+ \int_x^{2x} \Delta A_2(N) f_N(N) dN + \\ &+ \int_{2x}^b \Delta A_3(N) f_N(N) dN. \end{aligned}$$

или с учётом полученной зависимости (25)

$$\begin{aligned} \Delta \bar{A}(N_x = x) &= \frac{k_w w_o'}{d} \cdot \\ &\cdot \left[\int_a^x (x - N) f_N(N) dN + \right. \\ &+ \int_x^{2x} (2x - N) f_N(N) dN + \\ &\left. + \int_{2x}^b (3x - N) f_N(N) dN \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Как следует из монографии [12], выражение в квадратных скобках представляет среднее на один поезд значение избыточной мощности тяги Y_N , при $N_H = x$, поэтому (26) можно представить как

$$\Delta \bar{A}(N_x = x) = \frac{k_w w_o'}{d} Y_N(N_x = x). \quad (27)$$

Об эффективности применения модульной тяги можно судить, сравнивая соответствующие средние значения избыточной мощности тяги $\Delta \bar{A}$. Например, при использовании только тяговой мощности $N_H = 3x$, среднее значение избыточной мощности тяги будет равно

$$\Delta \bar{A}(N_x = 3x) = \frac{k_w w_o'}{d} Y_N(N_x = 3x). \quad (28)$$

Относительное увеличение расхода энергии при переходе с варианта $N_H = x$ к варианту $N_H = 3x$ можно определить как

$$\delta = \frac{\Delta \bar{A}(N_x = 3x) - \Delta \bar{A}(N_x = x)}{\Delta \bar{A}(N_x = x)} \quad (29)$$

$$\text{или } \delta = \frac{Y_N(N_x = 3x)}{Y_N(N_x = x)} - 1. \quad (30)$$

Уменьшение избыточной мощности тяги обуславливает также снижение расхода электроэнергии на собственные нужды локомотива, причём его относительное значение определяется тоже выражением (30). Подтвердим это утверждение.

Расход электроэнергии на собственные нужды составляет [14]

$$A_{сн} = P_{сн} T$$

$$\text{или } A_{сн} = P_{сн} (s_k - s_H) v_y^{-1},$$

где $P_{сн}$ – мощность цепей собственных нужд; T – время работы на участке; v_y – участковая скорость движения.

Мощность цепей собственных нужд модуля (электровоза) $P_{сн}$ пропорциональна его номинальной мощности N_H , т.е.

$$P_{сн} = k_{сн} N_H, \quad (31)$$

где коэффициент $k_{сн}$ зависит от типа локомотива и может быть определен на основании данных, приведённых в правилах тяговых расчётов [14].

Тогда расход энергии на собственные нужды поезда на единицу пройденного пути составит

$$A_{\text{сн}} = k_{\text{сн}} v_y^{-1} N.$$

Увеличение мощности номинального режима сверх потребного значения N ($N_i > N$) составляет

$$\Delta A_i(N) = A_{\text{сн}}(N_i) - A_{\text{сн}}(N)$$

$$\text{или } \Delta A_i(N) = k_{\text{сн}} v_y^{-1} (N_i - N).$$

Среднее значение увеличения ΔA_i определяется как

$$\Delta \bar{A} = k_{\text{сн}} v_y^{-1} Y_N,$$

где Y_N – избыточная мощность тяги (на один поезд).

Относительная величина роста $A_{\text{сн}}$ определяется как

$$\delta = \frac{\Delta \bar{A}(N_H = N_i) - \Delta \bar{A}(N_H = N)}{\Delta \bar{A}(N_H = N)},$$

которая сводится к выражению (30).

Полученное выражение (30) позволяет оценить эффективность применения модульной тяги непосредственно в ходе решения задач тягового обеспечения движения поездов, когда в качестве одного из критериев оптимальности при выборе параметров номинального режима работы тягового модуля принимается избыточная мощность локомотивов в имеющемся локомотивном парке.

Выводы

1. В связи с ростом цен на энергоносители актуальность задачи поиска и реализации снижения энергоёмкости железнодорожных перевозок возрастает.

2. Использование в эксплуатации модульной тяги за счёт снижения избыточной мощности локомотивного парка благоприятно сказывается на снижении затрат энергии на тягу поездов.

3. В результате выполненного анализа получены математические модели взаимосвязи расхода электроэнергии на тягу и избыточной мощности тяговых средств, которые позволяют получить оценку энергоэффективности применения модульной тяги.

4. Предварительный анализ поставленной задачи показал, что применение на железных

дорогах модульной тяги поездов обеспечивает снижение затрат энергии на перевозки на 2-3 %, за счёт уменьшения работы сил сопротивления движению и затрат на собственные нужды локомотива.

Литература

1. Бойко С.М. К вопросу развития системы электроснабжения предприятий горнодобывающей промышленности с использованием возобновляемых источников электроэнергии. / С.М. Бойко // Электрификация транспорта. – 2017. - № 14. - С.7-14.

2. Денисюк С.П. Повышение энергетической эффективности предприятий железнодорожного транспорта на основе технологического подхода. / С.П. Денисюк // Электрификация транспорта. – 2017. - № 14. – С. 78-85.

3. Сиченко В. Г., Саенко Ю. Л., Босий Д. О.: Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саенко, Д.О. Босий: за загальною редакцією Сиченка В. Г. – Дн-вск : ПФ "Стандарт – Сервіс", 2015. – 344 с.

4. Синчук О.Н. Малый комментарий к тактике создания тяговых электромеханических комплексов рудничных электровозов комбинированного вида / О.Н. Синчук // Электрический транспорт. – 2017. - № 14. - С. 42-55.

5. Малишко І.В. Основні напрямки енергозбереження на залізничному транспорті України / І.В. Малишко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – 2006. - № 13. – С. 36-38.

6. Гетьман Г.К. Еще раз об определении экономии электроэнергии на тягу за счет частичного отключения тяговых двигателей электроподвижного состава / Г.К. Гетьман, В.Н. Васильев // Электрический транспорт. – 2013. - № 5. - С. 33-40.

7. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги : підручник у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – Т. 2.– 490 с.

8. Гетьман Г. К. Методика определения экономии электроэнергии на тягу поездов при частичном отключении тяговых двигателей / Г.К. Гетьман, В.Е. Васильев // Материалы 73 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Дн-вск: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2013. – С. 113.

9. Костромин А.М. Оптимизация управления локомотивом / А.М. Костромин.– М.: Транспорт, 1979. – 119 с.

10. Петров Ю.П. Оптимальное управление движением транспортных средств / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1969. – 96 с.

11. Гетьман Г. К. Определение оптимальной мощности тягового модуля / Г.К. Гетьман // Вестник ОАО «ВЭЛНИИ». – Новочеркасск. – 2007. – С. 155–176.

12. Гетьман Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта: монография / Г.К. Гетьман. – Дн-вск: Дніпропет. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – 444 с.

13. Арпуль С.В. Визначення ефективності модульної тяги / С.В. Арпуль, Г.К. Гетьман // Електрифікація транспорту. – 2017. – № 13. – С. 28-32.

14. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

15. Тихонов К.К. Оптимальные ходовые скорости грузовых поездов / К.К. Тихонов // Труды МИИТ, вып. 172. – М.: Транспорт, 1964. – С. 282-298.

16. Тихонов К.К. Теоретические основы выбора оптимальных параметров перспективных локомотивов для грузового движения / К.К. Тихонов // Вопросы эксплуатации железных дорог. Труды МИИТа, вып. 307. – М.: Транспорт, 1969. – С. 3-23.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гетьман Геннадій Кузьмович, д.т.н., професор кафедри «Електричний рухомий склад залізниць» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна (ДНУЗТ).

Вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна.
Тел. +38 050 575 09 33.

E-mail: getman-gk@i.ua.

ORCID: orcid.org/0000-0002-3471-6096.

Марікуца Сергій Леонідович, аспірант, викладач кафедри «Електричний рухомий склад залізниць» ДНУЗТ.

Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна.
Тел.: +38 095 035 36 06.

E-mail: marikutsasergei@gmail.com.

ORCID: orcid.org/0000-0002-0429-6633.

Васильєв Вячеслав Євгенович, інженер, старший викладач кафедри «Електричний рухомий склад залізниць» ДНУЗТ.

Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна.
Тел.: +38 099 960 03 96.

E-mail: wasiljew@ukr.net.

ORCID: orcid.org/0000-0001-7551-2332.

«ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ» ДЕ ПЕРЕДПЛАТИТИ ВИДАННЯ?

Оформити передплату на науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України» на 2020 рік, можливо у кожному поштовому відділенні України за Каталогом видань України або на офіційному сайті ДП «Преса» www.presa.ua.

Періодичність видання журналу – 4 рази на рік.

**Передплатний індекс: для індивідуальних передплатників – 74126,
для підприємств і організацій – 40294.**

Передплату (річну, на півріччя чи на один кварталний випуск) підприємства та фізичні особи також можуть оформити на договірних умовах у видавця журналу філії «НДКТІ» ПАТ «Укрзалізниця», за адресою:

03038, м. Київ, вул. Івана Федорова, 39.

Електронна пошта: ztu1520mm@gmail.com.

Тел.: +38 (044) 465-38-11; +38 (044) 309-68-93.