

УДК 656.224.022.846

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: arpul@ukr.net

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ И УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Введение

Необходимость обновления парка пассажирских электровозов Укрзалізничці вызвана не только морально и физически устаревшим парком тягового подвижного состава, но и необходимостью освоения возрастающих объемов пассажирских перевозок, запланированным на перспективу повышением скоростей движения поездов, введением в эксплуатацию ускоренных и скоростных пассажирских поездов.

В связи с этим перед Укрзалізничці возникает задача по выбору основных параметров перспективных электровозов, использование которых обеспечит высокие значения показателей эксплуатационной работы.

Проблема выбора параметров номинального режима тяговых средств находилась в поле зрения отраслевой науки практически в течение всей истории внедрения и эксплуатации железнодорожного транспорта. И в этой области получен ряд самых важных решений известными учеными железнодорожниками [1-3].

Следует отметить, что названные выше исследования посвящены грузовым электровозам.

Вместе с тем для пассажирских перевозок эта важная проблема исследована недостаточно.

Хотя в подходах к решению задачи определения основных параметров номинального режима грузовых и пассажирских электровозов много общего, следует указать и на имеющие место отличия. Основное из них состоит в следующем.

Ряд важнейших показателей эксплуатационной работы грузового парка определяется не только мощностью номинального режима, но и параметрами, так называемого, расчетного режима – расчетной силой тяги и расчетной скоростью движения, поскольку эти параметры определяют важнейшие показатели перевозочного процесса – критическую массу поезда и скорость движения по расчетному подъему.

Для пассажирских электровозов показатели расчетного режима не устанавливаются, поскольку

Арпуть составность пассажирских поездов определяется из условий освоения заданного объема перевозок при известном времени хода и минимальных издержках. Вместе с тем важными эксплуатационными параметрами пассажирского электровоза являются пусковая сила тяги и так называемая пусковая скорость. Если сила тяги расчетного режима грузового электровоза определяет критическую массу поезда для заданного расчетного подъема, то пусковая сила тяги пассажирского электровоза и его пусковая скорость определяют ускорение поезда в период разгона и достижимый уровень технической скорости движения.

В связи с изложенным, основной целью настоящего исследования является определение рационального значения скорости номинального режима пассажирских электровозов для повышения эффективности перевозок на железных дорогах Украины за счет снижения расхода энергоресурсов на тягу поездов.

Формулировка задачи оптимизации мощностного ряда пассажирских электровозов

Мощность номинального режима тяговых средств определяют два параметра – скорость движения и сила тяги. Поэтому решение задачи об определении параметров номинального режима электровоза, в общем случае должно содержать рекомендации по выбору обоих названных выше параметров.

Однако при использовании предложенной в [4] методики учета массы электровоза и расчета области определения управляющих параметров в уравнении движения поезда, задача определения оптимальной скорости движения номинального режима может рассматриваться как самостоятельная задача. Чтобы подтвердить сказанное, рассмотрим подробнее постановку задачи об определении параметров номинального режима.

В качестве показателей рациональности выбора мощностного ряда пассажирских локомо-

тивов целесообразно принять минимум затрат энергоресурсов на тягу поездов, суммарной мощности потребного локомотивного парка и кратности тяги, поскольку снижение численных значений этих показателей ведет к уменьшению капитальных вложений на обновление локомотивного парка и снижению эксплуатационных затрат, а следовательно обуславливает повышение рентабельности пассажирских перевозок. Последнее обстоятельство в настоящее время приобретает особую значимость, так как в современных экономических условиях для рынка транспортных услуг характерна жесткая конкуренция между различными видами транспорта.

Подробное обоснование названных выше критериев оптимизации изложено в исследовании [3] для решения задачи выбора оптимальных параметров грузовых электровозов.

С учетом условий, изложенных при определении предельных тяговых характеристик в [4], задачу определения оптимального мощностного ряда пассажирских электровозов сформулируем следующим образом.

Для заданных:

– значений технической скорости движения пассажирских поездов v_T ;

– характеристик профиля пути $i(s)$;

– составности пассажирских поездов n

найти такое сочетание параметров номинального режима мощностного ряда

$$\begin{aligned} & \{N_{н1}, v_{н1}, F_{кн1}\}; \\ & \{N_{н2}, v_{н2}, F_{кн2}\}; \\ & \dots; \\ & \{N_{нn}, v_{нn}, F_{кнn}\}, \end{aligned}$$

которые обеспечили бы освоение заданного пассажиропотока при минимальных значениях:

– затрат электроэнергии на тягу поездов a ;

– избыточной мощности потребного инвентарного парка y_N ;

– кратности тяги, необходимой для ведения поездов реальной составности y_k ,

т.е. чтобы

$$\left. \begin{matrix} a \\ y_N \\ y_k \end{matrix} \right\} \rightarrow \min$$

при выполнении условий:

– минимальное ускорение поезда при разгоне

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{0 \leq v \leq v_{п}} \geq a_{пз} \quad (1)$$

– ускорение при конструкционной скорости

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{\substack{v=v_k \\ i=0}} \geq a_{оз} \quad (2)$$

– максимальная скорость движения на участке

$$v \leq v_{max};$$

– максимальная сила тяги

$$F_{кп} \leq F_{сц};$$

– температура обмоток тяговых двигателей

$$\tau \leq \tau_{доп};$$

Заметим, что рассматриваемая задача от сформулированной в [3] задачи выбора оптимального мощностного ряда грузовых электровозов существенно отличается присутствием ограничений (1) и (2).

Сформулированная задача является задачей векторной оптимизации с числом показателей равным трем. Как показано в [5], при таком числе показателей оптимальности весьма трудоемок процесс алгоритмизации решения и интерпретации полученных результатов.

Прежде, чем приступить к решению сформулированной задачи, рассмотрим возможные пути ее упрощения. Для этого установим параметры, определяющие удельный расход электроэнергии на тягу поездов.

Как следует из [4], при принятом подходе к определению координат предельной тяговой характеристики, т.е. в случае, когда масса локомотива определяется из условия полного использования сил сцепления и обеспечения заданной величины пускового ускорения $a_{пв}$, предельная величина удельной силы тяги не является функцией массы состава, а определяется величиной пусковой (или номинальной) скорости движения.

Это значит, что при фиксированной скорости номинального режима сила тяги электровоза пропорциональна массе состава, и в то же время величина удельной силы тяги и удельного сопротивления движению остаются одинаковыми. Сказанное иллюстрируют графики

$F_k(v)$, $W_k(v)$ и $f_k(v)$, $w_k(v)$, показанные на рис. 1 и 2.

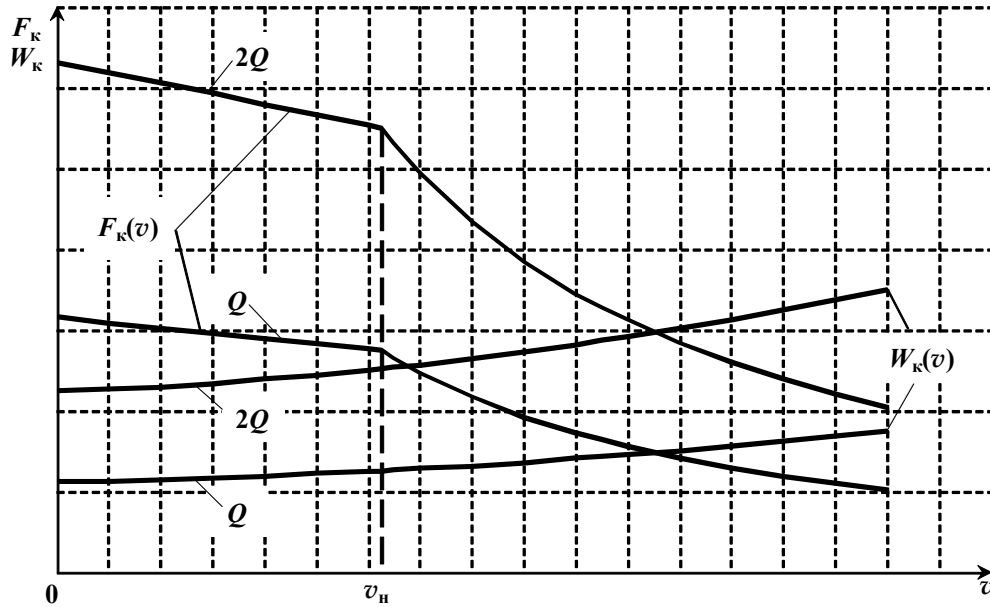


Рис. 1. Зависимость силы тяги электровоза F_k и сопротивления движению поезда W_k от массы состава Q

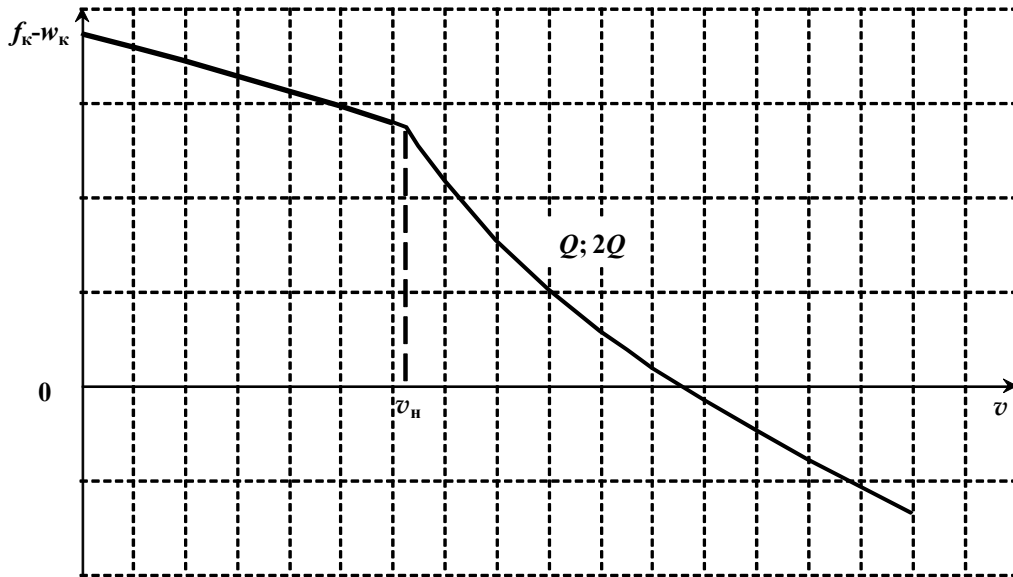


Рис. 2. Зависимость удельной ускоряющей силы от скорости движения поезда

Из изложенного факта следует важный вывод о том, что при используемом подходе к определению массы электровоза, при фиксированном значении скорости движения номинального режима, управление в режиме тяги, соответствующее минимальному расходу электроэнергии, будет одним и тем же для поездов различной составности и определяется единственным параметром – пусковой скоростью (или скоростью движения в номинальном режиме).

Правомерность выше сказанного очевидна из выражения

$$a = \frac{2,725(1+k_p)}{(s_k - s_n)} \int_{s_n}^{s_k} \frac{f_k(s)}{\eta(s)} ds, \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{т}\cdot\text{км} \quad (3)$$

где k_p – коэффициент, который представляет долю массы локомотива в массе состава;

$f_k(s)$ – удельная сила тяги электровоза;

s_n, s_k – начальное и конечное значения пути;

η – к.п.д. электровоза.

Из выражения (3) следует, что удельный расход электроэнергии при заданном законе управления $f_k(s)$ не зависит от массы состава.

Таким образом, трехкритериальная задача оптимизации, сформулированная выше, распадается на две самостоятельные задачи:

– определение скорости номинального режима $v_{H(opt)}$ из условия

$$a(v_{H(opt)}, v_T) \rightarrow \min \quad (4)$$

при соблюдении сформулированных выше ограничений;

– определение оптимальной мощности электровоза, обеспечивающего при скорости номинального режима $v_{H(opt)}$, выполнение требования

$$\left. \begin{matrix} y_N \\ y_k \end{matrix} \right\} \rightarrow \min \quad (5)$$

В данной работе остановимся на решении первой из двух вышеназванных задач.

Методика определения оптимальной скорости движения номинального режима

Как показано в [4], скорость номинального режима практически однозначно определяется пусковой скоростью. Поэтому далее, краткости

для режима тяги $w_0(v) = \frac{k_p w'_0(v) + [w''_0(v) + w_{пг}(v)]}{1 + k_p},$

для режима выбега $w_{ox}(v) = \frac{k_p w'_x(v) + [w''_0(v) + w_{пг}(v)]}{1 + k_p},$

где $w'_0(v)$ и $w'_x(v)$ – удельное основное сопротивление движению электровоза в режиме тяги и выбега соответственно;

$w''_0(v)$ – удельное основное сопротивление движению состава;

$w_{пг}(v)$ – удельное сопротивление движению состава от подвагонных генераторов.

Режиму торможения соответствует условие $u < 0$, причем u определяется по $b_k = 1000 \mathcal{G}_p \varphi_{кр}$, где \mathcal{G}_p – расчетный тормозной коэффициент, определяемый действующими тормозными нормативами; $\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения тормозных колодок.

Из приведенного выше следует, что используемая методика установления области опреде-

ради, будем говорить об определении именно этой скорости.

Оптимальное значение пусковой скорости, согласно (4), соответствует минимуму затрат электроэнергии на тягу поездов.

В [3] предложена методика решения задачи определения скорости расчетного режима грузовых электровозов из условия минимизации расхода электроэнергии. Проанализируем, в какой степени указанная методика может быть использована применительно к определению пусковой скорости пассажирских электровозов.

Рассмотрим задачу о движении поезда на некотором участке пути, то есть при условии, что $i(s)$ задано для $s \in [s_H, s_K]$. Уравнение движения поезда представим в виде

$$v \frac{dv}{ds} = \xi [u - w_0(v) - i(s)] \quad (6)$$

где u – параметр управления.

При $u > 0$ имеет место режим тяги, причем $u=f(v)$ определяется выражениями, приведенными в [4].

В режиме холостого хода $u = 0$ и в (6) $w_0(v)$ должно быть заменено на $w_{ox}(v)$.

Основное сопротивление движению пассажирского поезда на основании получим в виде:

ления допустимых управлений в уравнении (6), позволяет для каждого заданного значения пусковой скорости $v_{п}$ рассчитать допустимые управления $u(s)$ и расход электроэнергии на тягу поездов.

Таким образом, предложенная в [3] методика определения скорости грузовых электровозов концептуально может быть использована для решения задачи об установлении параметров номинального режима пассажирских электровозов. Суть этой методики для рассматриваемой здесь задачи можно изложить следующим образом.

Каждому значению пусковой скорости $v_{п}$ соответствует множество допустимых управлений $u(s)$, и соответствующих им кривых скорости $v(s)$, которые есть решениями уравнения

движения при существующих граничных условиях, ограничениях скорости и заданном времени хода. Решением сформулированной выше задачи есть такое управление $u(s)$ которым соответствует минимальный расход электроэнергии при заданном времени хода по участку.

Варьируя время хода по участку и ставя в соответствие каждому его значению минимальный расход электроэнергии, получим некоторую кривую $a_{\min}(t)$, подобную показан-

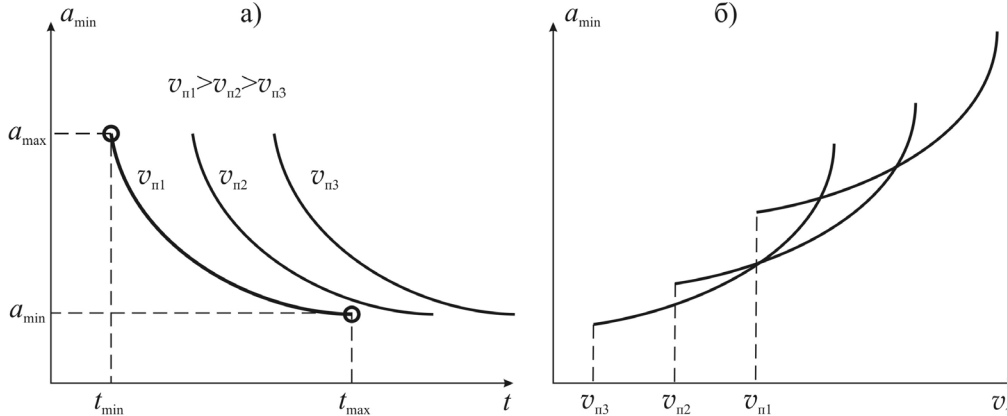


Рис. 3. Зависимость минимального расхода электроэнергии от времени (а) и технической скорости (б)

При решении задачи в качестве t_{\max} можно принять время хода с некоторой постоянной скоростью движения, например $v = v_{\Pi}$.

Каждому значению пусковой скорости будет соответствовать своя кривая $a_{\min}(t)$. Однако время хода зависит не только от скорости движения, но и от протяженности участка. Поэтому при решении поставленной задачи удобнее вместо кривых $a_{\min}(t)$ использовать зависимости $a_{\min}(v_T)$, где v_T – техническая скорость движения поезда. Они будут иметь вид графиков, показанных на рис. 3б.

Каждому значению v_{Π} соответствует зависимость $a(v_{\Pi}, v_T)$, причем она характеризует данный участок независимо от составности поезда и его длины.

Варьируя значения пусковых скоростей, получим семейство кривых $a_{\min}(v_T)$ как показано на рис. 3а, и затем зависимость

$$N_{y(opt)} = \frac{2,725}{k_f k_v} \left[1 + k_p (v_{\Pi(opt)}(v_T)) \right] \left[w_{оп} (v_{\Pi(opt)}(v_T)) + i + 102 a_{\Pi} (1 + \gamma) \right] v_{\Pi(opt)}(v_T). \quad (8)$$

ной на рис. 3а. Точка кривой $a_{\min}(t)$ с координатами (a_{\max}, t_{\min}) соответствует минимально возможному времени хода на данном участке, т.е. управлению по быстрдействию. Наибольшее время хода по участку t_{\max} и минимальный расход электроэнергии a_{\min} соответствует движению с некоторой более низкой скоростью.

$$a_{opt}(t) = \min_{v_{\Pi} \in V_{\Pi}} a(v_T, v_{\Pi}) \quad (7)$$

где v_{Π} – множество допустимых значений пусковых скоростей.

Для заданного участка эта зависимость определяет пусковую скорость $v_{\Pi(opt)}$ при которой заданная техническая скорость движения v_T может быть реализована при минимальном удельном расходе энергоресурсов.

Полученная изложенным способом зависимость $v_{\Pi(opt)}(v_T)$ (рис. 4а) может быть рекомендована для выбора пусковой скорости электровозов, предназначенных для вождения поездов на данном направлении.

Зависимость $v_{\Pi(opt)}(v_T)$ однозначно определяет удельную мощность электровоза, которую можно представить в виде, Вт/т

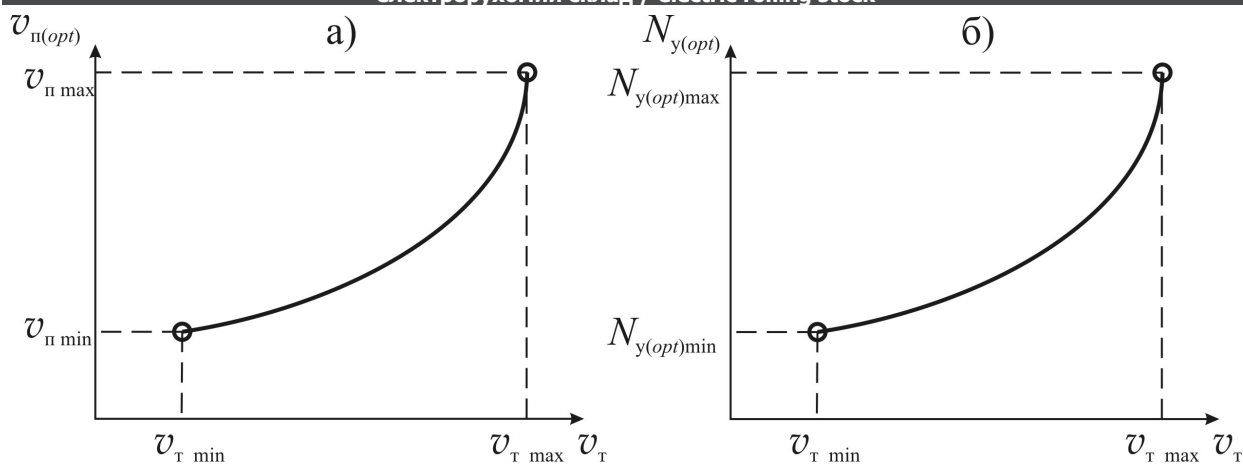


Рис. 4. Характер зависимости оптимальной пусковой скорости (а) и номинальной удельной мощности (б) от технической скорости

Выводы

Приведенные зависимости $v_{n(opt)}(v_T)$ и $N_{y(opt)}(v_T)$ дают возможность, по заданным значениям массы состава и технической скорости

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сломянский А. В. Выбор типов магистральных локомотивов / А. В. Сломянский // Тр. ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – № 184. – 164 с.
2. 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.
3. Гетьман Г. К. Определение оптимальной по минимуму расхода энергии на движение поезда мощностью 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.
4. 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. – № 4. – С.17-22.
5. Гетьман Г. К. Применение методов векторной оптимизации для решения задач тяговых расчетов / Г. К. Гетьман // Вісник Харківського державного політехнічного університету: зб. наук. пр. – Харків: ХДПУ, 1999. – № 62. – С.12-19.

Поступила в печать 12.06.2014.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

сти движения (времени движения поезда), определить параметры номинального режима пассажирского электровоза, при которых перевозки могут быть осуществлены с минимальными энергозатратами.

REFERENCES

1. Slomyanskiy A. V. *Vybor tipov magistralnykh lokomotivov* [Selection of the locomotive types] / A. V. Slomyanskiy // Tr. VNIIZhTa. – M.: Transzheldorizdat, 1960. – № 184. – 164 p.
2. 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.
3. Getman G. K. *Opreделение 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.
4. Arpul S. V. *Modelirovanie oblasti dopustimyykh upravleniy uravneniya dvizheniya passazhirskogo poezda* [Modeling of the feasible region of the departments of the equations of motion a passenger train] /S/ V/ Arpul // Visnik Dnipropetrovskogo natsionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V.Lazariana. – 2004. – № 4. – С.17-22.
5. Getman G. K. *Primenenie metodov vektornoj` optimizatsii dlia resheniya zadach tyagovy`kh raschetov* [The use of the vector optimization methods for solving problems of traction calculation] / G. K. Getman // Visnik Kharkivskogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu: zb. nauk.pr. – Kharkiv: KhDPU, 1999. – № 62. – С.12-19.

Внешний рецензент Андриенко П. Д.

© Арпуль С. В., 2014

Проанализированы основные работы и методики определения параметров номинального режима грузовых электровозов и внесены соответствующие корректировки в методику определения номинальных скорости и мощности пассажирских электровозов.

Установлены основные критерии определяющие оптимальные значения параметров электровозов для пассажирского движения, а также рациональные значения мощностного ряда электровозов.

Показано, что при используемом подходе к определению массы электровоза, при фиксированном значении скорости движения номинального режима, управление в режиме тяги, соответствующее минимальному расходу электроэнергии, будет одним и тем же для поездов различной составности и определяется единственным параметром – пусковой скоростью (или скоростью движения в номинальном режиме).

Изложена методика определения оптимальной пусковой скорости пассажирских электровозов и удельной мощности номинального режима.

Ключевые слова: скорость номинального режима, ускоряющая сила, удельная номинальная мощность, основное удельное сопротивление движению, масса поезда.

УДК 656.224.022.846

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухоми́й склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: arpul@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ТА ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМА ПАСАЖИРСЬКИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Проаналізовано основні роботи та методики визначення параметрів номінального режиму вантажних електровозів і внесені відповідні коригування в методику визначення номінальних швидкості та потужності пасажирських електровозів.

Встановлені основні критерії, що визначають оптимальні значення параметрів електровозів для пасажирського руху, а також раціональні значення ряду потужностей електровозів.

Показано, що при використовуваному підході до визначення маси електровоза, при фіксованому значенні швидкості руху номінального режиму, керуванні в режимі тяги, що відповідає мінімальній витраті електроенергії, буде однаковим для поїздів різної маси і визначається єдиним параметром – пусковою швидкістю (або швидкістю руху в номінальному режимі).

Викладена методика визначення оптимальної пускової швидкості пасажирських електровозів і питомої потужності номінального режиму.

Ключові слова: швидкість номінального режиму, прискорююча сила, питома номінальна потужність, основний питомий опір руху, маса поїзда.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 656.224.022.846

S. V. ARPUL (DNURT)

Department of electrorolling stock of railways. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010 tel.: (056) 373-15-31, e-mail: arpul@ukr.net

THE DEFINITION OF SPEED AND POWER DENSITY NOMINAL MODE OF PASSENGER ELECTRIC LOCOMOTIVES

Analyze the core of the work and methods of definition of parameters nominal mode of freight locomotives and made appropriate adjustments to the method of determination of rated speed and power passenger locomotives.

The main criteria determining the optimum values of parameters of electric locomotives for passenger traffic, as well as rational values of the cardinality of a number of electric locomotives.

It is shown that when used the approach to determining the weight of electric locomotive, at the fixed value of speed of movement of the nominal mode, control mode draught corresponding to the minimum consumption of electricity, will be the same for different trains and is determined only parameter is the starting rate (or rate movements in the nominal mode).

Methodology of determining the optimal starting speed passenger electric locomotives and power density of the nominal mode.

Keywords: speed rated mode, accelerating power unit rated power of the main specific resistance movement, weight train.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

© Арпуль С. В., 2014