

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДУЛЬНОЙ ТЯГИ

Запропоновано методика визначення енергетичної ефективності модульної тяги для забезпечення вантажних залізничних перевезень.

Предложена методика определения энергетической эффективности модульной тяги для обеспечения грузовых железнодорожных перевозок.

A technique of determining power efficiency of modular traction for provision of the freight railway operations is offered in the article.

Графиком движения поездов для каждого направления железнодорожной линии, исходя из технических возможностей тяговых средств и полезной длины приемо-отправочных путей, устанавливается определенная норма массы состава. Однако на практике из-за, главным образом, различия погонной нагрузки вагонных струй масса поезда носит случайный характер.

Норма массы соответствует полному использованию мощности тягового средства, поэтому отклонение массы поезда от нормы в меньшую сторону приводит к появлению избытка тяговой мощности.

Избыточная мощность не может быть использована на повышение скорости, поскольку в графике движения независимо от массы все поезда прокладываются с одной и той же расчетной ходовой скоростью. Поэтому наличие избыточной мощности 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.

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

Под тяговым модулем подразумевается тяговая единица, пригодная для использования как в составе сцепа, так и самостоятельно.

Научные и методологические основы выбора оптимальных внешних параметров тяговых модулей и определения обусловленной их использованием экономии затрат на обновление

(пополнение) эксплуатируемого парка изложены в [1–3]. Однако для более полной оценки экономической целесообразности применения модульной тяги следует изучить вопросы её энергетической эффективности, поскольку в настоящее время затраты на энергоносители вносят весомую составляющую в расходы, определяющие себестоимость перевозок.

Несмотря на важность энергетического аспекта применения модульной тяги, он не нашел до настоящего времени должного освещения в литературе и настоящая статья – попытка восполнить этот пробел.

Снижение расхода энергии на тягу поездов при модульной тяге обусловлено снижением доли массы транспортного средства в массе поезда и снижением затрат энергии на так называемые собственные нужды.

Установим взаимосвязь расхода энергии на движение поезда и массы тягового сцепа. Определенные ниже необходимые выкладки будут выполнены применительно к электрифицированным железным дорогам, однако полученные результаты могут быть легко распространены на любой вид тяги.

Пусть независимо от массы поезда и мощности номинального режима тягового сцепа реализуется управление, которому соответствует движение поезда на заданном участке с изменением фазовых координат состояния в соответствии с некоторой кривой скорости $V(S)$.

Отнесенный к 1 т массы состава Q расход электроэнергии на тягу представим как [1]

$$a = (1 + k_p) \eta^{-1} \int_{S_n}^{S_k} f_k(S) dS, \quad (1)$$

где k_p – коэффициент, равный отношению массы тягового сцепа P к массе состава Q , то

есть $k_p = P/Q$; η – среднее значение к. п. д. тягового модуля; S_n, S_k – координаты пути, соответствующие началу и концу участка; f_κ – удельная (отнесенная к единице массы поезда) сила тяги.

На основании уравнения движения поезда зависимость $f_\kappa(S)$ определяется по заданной кривой скорости $V(S)$ как

$$f_\kappa(S) = \frac{VdV}{\xi dS} + w_o(V(S)) + i(S), \quad (2)$$

где V – скорость движения поезда; ξ – размерный коэффициент, зависящий от принятых единиц измерения физических величин; w_o – основное удельное сопротивление движению поезда в режиме тяги; $i(S)$ – продольный профиль пути заданного участка.

Сила тяги должна удовлетворять условию

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

где $\overline{f_\kappa}(V)$ – предельная тяговая характеристика.

С учетом (2) на основании (1) получим

$$a = \frac{1+k_p}{\eta} \left[\int_{S_n}^{S_k} w_o(V(S)) dS + \int_{S_n}^{S_k} i(S) dS + \frac{V_k^2 - V_n^2}{2\xi} \right], \quad (3)$$

где $V_n = V|_{S=S_n}$ и $V_k = V|_{S=S_k}$.

Влияние величины избыточной мощности тяги на расход электроэнергии в выражении (3) отражается через коэффициент k_p , который фигурирует в множителе перед квадратной скобкой, а также в выражениях, определяющих величину основного сопротивления движению w_o [4].

Мощность современных грузовых электровозов в расчетном режиме ограничивается условиями сцепления, поэтому минимальная масса тягового сцепа, необходимая для вождения поездов заданной массы, равна

$$P_o = \frac{Q(w_o''(V) + i_p)}{1000\psi_\kappa(V) - (w_o'(V) + i_p)} \Big|_{V=V_p}, \quad (4)$$

где ψ_κ – расчетный коэффициент сцепления; w_o'' – удельное основное сопротивление движению состава; w_o' – удельное основное сопро-

тивление движению локомотива в режиме тяги; i_p – расчетный подъем; V_p – расчетная скорость тягового модуля.

Величине P_o соответствует минимальное значение коэффициента $k_{po} = k_p|_{P=P_o}$ и равенство мощности номинального режима и мощности, потребной для ведения поезда, то есть отсутствие избыточной мощности.

Если мощность сцепа превышает потребную для ведения поезда, то масса такого сцепа $P > P_o$, то есть имеется избыток массы, а коэффициент $k_p > k_{po}$.

Обозначим относительную величину избыточной массы как $\delta_p = (P - P_o)/P_o$.

Тогда будет иметь место соотношение

$$k_p = k_{po}(1 + \delta_p). \quad (5)$$

Допустим, что за время рейса потенциальная и кинетическая энергия поезда не изменится. Тогда расход электроэнергии будет определяться работой по преодолению сил сопротивления движению

$$a = \frac{1+k_p}{\eta} \int_{S_n}^{S_k} w_o(V(S)) dS. \quad (6)$$

Следует отметить, что на основании (6) для снижения расхода энергии на тягу за счет применения модульной тяги получим оценку снизу, так как здесь не учитывается возможное увеличение потенциальной энергии поезда и потери в тормозах.

Относительную величину увеличения расхода энергии на тягу, обусловленную наличием избыточной мощности тяги (массы сцепа), представим как

$$\alpha(\delta_p) = \frac{a(k_p)}{a_o} - 1, \quad (7)$$

где $a_o = a|_{k_p=k_{po}}$.

На основании (6) запишем

$$\frac{a}{a_o} = \frac{1+k_p}{1+k_{po}} \cdot \frac{\int_{S_n}^{S_k} w_o(k_p, V) dS}{\int_{S_n}^{S_k} w_o(k_{po}, V) dS}. \quad (8)$$

Введем в рассмотрение понятие так называемого среднего по пути сопротивления движению поезда w_{os} , то есть такое, что

$$\int_{S_H}^{S_K} w_o(V(S))dS = w_{os}(S_K - S_H).$$

Тогда вместо (8) получим

$$\frac{a}{a_o} = \frac{1+k_p}{1+k_{po}} \cdot \frac{w_{os}(k_p)}{w_{os}(k_{po})}. \quad (9)$$

Согласно данным [5] среднее по пути сопротивление движению w_{os} можно представить в виде

$$w_{os} = k_w w_{oc},$$

где w_{os} – сопротивление движению поезда при средней скорости движения на участке; k_w – коэффициент пропорциональности.

Согласно [4]

$$w_{oc} = \frac{k_p w'_{oc} + w''_{oc}}{1+k_p}, \quad (10)$$

а коэффициенты k_w для тягового сцепа и для состава можно принять одинаковыми.

С учетом (10) на основании (9) и (7) получим:

$$\frac{a}{a_o} = \frac{k_p w'_{oc} + w''_{oc}}{k_{po} w'_{oc} + w''_{oc}}; \quad \alpha(\delta_p) = \frac{k_{po} \delta_p}{k_{po} + \rho}, \quad (11)$$

где $\rho = w''_{oc}/w'_{oc}$.

Выражение (11) позволяет свести задачу об энергетической эффективности модульной тяги к задаче определения избыточной массы тягового сцепа.

Очевидно, что ρ есть функцией скорости и характеризующих состав поезда параметров (нагрузка от оси на рельсы и процентное содержание в составе вагонов различных типов).

Величина k_{po} определяется по вытекающей из выражения (4) формуле

$$k_p = \frac{w''_o(V) + i_p}{1000\psi_\kappa(V) - (w'_o(V) + i_p)} \Big|_{V=V_p}. \quad (12)$$

Пусть для заданного участка известен закон распределения массы поездов. Тогда, используя выражение (4), можно получить закон распределения потребной массы тягового сцепа $f_p(y)$, показанный на рис. 1.

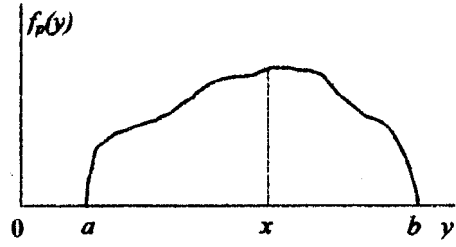


Рис. 1. Распределение вероятностей потребной массы тягового сцепа

Отрезки $0a$ и $0b$ представляют наименьшее и наибольшее значения потребной массы тягового сцепа.

Для случая, когда тяговые сцепы формируются из однотипных модулей, а минимальная мощность модуля выбирается так, что соответствующая ей масса модуля удовлетворяет условию $x \geq a$, избыточная масса тяговых сцепов, приходящаяся на один поезд, составит

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

где x – масса тягового модуля; n – целая часть числа b/x .

При выводе уравнения (13) учтено, что:

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

$$\int_{nx}^b (x-y) f_p(y) dy = \int_{nx}^{(n+1)x} [(n+1)y - y] f_p(y) dy,$$

$$\text{так как: } \int_0^a f_p(y) dy = 0; \quad \int_b^{(n+1)x} f_p(y) dy = 0.$$

Среднее значение мощности цепей собственных нужд $P_{сн}$ определяется номинальной мощностью N_n тягового модуля

$$P_{сн} = k_{сн} N_n, \quad (14)$$

где коэффициент $k_{сн}$ зависит от типа локомотива и может быть определен на основании данных, приведенных в [6].

При заданной расчетной скорости V_p и массе состава Q мощность номинального режима тягового модуля, кВт, [1]

$$N_n = 2,725\psi_{kp} k_N k_p V_p Q, \quad (15)$$

где k_N – коэффициент, равный отношению мощности номинального режима к мощности, реализуемой на расчетном подъеме.

Из выражений (14) и (15) следует, что рост удельного расхода энергии на собственные нужды $\alpha_{сн} = \frac{a_{сн}(k_p) - a_{сн}(k_{po})}{a_{сн}(k_{po})}$, обусловленный

увеличением массы тягового сцепа P по отношению к его потребной величине P_o , можно определить как

$$\alpha_{сн} = k_p / k_{po} - 1. \quad (16)$$

Полученные выше зависимости позволяют определить оценку энергетической эффективности модульной тяги. Данные такого исследования применительно к железным дорогам Украины будут приведены в отдельной статье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гетьман Г. К. Выбор оптимальных параметров перспективных электровозов для грузового

движения // Залізничн. транспорт України. – 2000. – № 3. – С. 47–51.

2. Гетьман Г. К. Оптимальная стратегия обновления электровозного парка // Залізничн. транспорт України. – 2002. – № 5. – С. 17–19.
3. Гетьман Г. К. Определение рационального мощностного ряда грузовых электровозов для железных дорог Украины // Залізничн. транспорт України. – 2002. – № 6. – С. 29–34.
4. Гетьман Г. К. Математическая модель поезда для производства тяговых расчетов в задачах выбора параметров тяговых средств // Транспорт: Зб. наук. пр. Випуск 1. – Д.: Наука і освіта, 1999. – С. 75–79.
5. Тихонов К. К. Оптимальные ходовые скорости грузовых поездов // Труды МИИТ. Вып. 172. – М.: Транспорт, 1964. – 282 с.
6. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

Поступила в редколлегию 14.10.03.