

## БЕЗРАЗМЕРНАЯ ТЯГОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОВЗОВ

Побудована безрозмірна математична модель тягової характеристики тепловозів.

Построена безразмерная математическая модель тяговой характеристики тепловозов.

A dimensionless mathematical model has been constructed for tractive performance description of diesel locomotives.

В работе [1] при построении предельных тяговых характеристик электроподвижного состава, следуя работе [2], в качестве базисных значений силы тяги и скорости принято значение силы тяги и скорости часового режима.

Сформировав силу тяги и скорость на базовые значения, удалось получить безразмерную обобщенную предельную тяговую характеристику электровозов, которую в дальнейшем используют при определении рациональной мощности тягового модуля электровоза.

В предлагаемой работе рассматривается построение безразмерной тяговой характеристики для тепловозов.

В общем виде при построении предельной тяговой характеристики локомотивов исходим из того, что на значения силы тяги влияют два фактора:

- ограничения на значения силы тяги по сцеплению;
- ограничения на значения силы тяги по мощности.

Исходя из этого, в качестве базовых значений силы тяги и скорости принимаем их значения при переходе с ограничения по сцеплению к ограничению по мощности.

Исходной информацией для построения безразмерной тяговой характеристики тепловозов являются тяговые характеристики тепловозов, приведенные в работе [3].

Ограничение на значение силы тяги по сцеплению в работе [3] рекомендуется вычислять по формуле

$$F_{\text{к.сц}} = 1000\Psi_{\text{к.кр}}P_{\text{сц}},$$

где  $F_{\text{к.сц}}$  – касательная сила тяги по сцеплению (кгс);  $\Psi_{\text{к.кр}}$  – расчетный коэффициент сцепления движущихся колес локомотива с рельсами при движении по кривым малого радиуса;  $P_{\text{сц}}$  – сцепной вес локомотива (тс).

Расчетный коэффициент сцепления  $\Psi_{\text{к.кр}}$  определяется следующим образом:

$$\Psi_{\text{к.кр}} = \Psi_{\text{к}}K_{\text{кр}},$$

где  $\Psi_{\text{к}}$  – расчетный коэффициент сцепления движущихся колес локомотива;  $K_{\text{кр}}$  – коэффициент снижения силы тяги локомотива по сцеплению при движении в кривых участка пути.

Данные коэффициенты для рассмотренных тепловозов вычисляются по формулам [3]:

$$\Psi_{\text{к}} = 0,118 + \frac{5}{27,5 + V},$$

$$K_{\text{кр}} = \frac{3,5R}{400 + 3R},$$

где  $V$  – скорость движения (км/ч);  $R$  – радиус кривой (м).

В дальнейшем базовые значения силы тяги и скорости будем обозначать через  $F_*$  и  $V_*$ , а безразмерные значения через  $f$  и  $v$  соответственно.

Так, например, для тепловоза 2ТЭ116 базовые значения сил тяги и скорости равны

$$F_* = 60\,300 \text{ кгс},$$

$$V_* = 19,5 \text{ км/ч}.$$

Сцепной вес этого тепловоза равен  $P_{\text{сц}} = 271$  тс тогда безразмерное ограничение силы тяги для тепловоза будет следующим:

$$f_{\text{сц}} = \frac{1000\Psi_{\text{к.кр}}}{608\,000} = 4,457\Psi_{\text{к.кр}}, \quad (1)$$

а коэффициент  $\Psi_{\text{к.кр}}$  как функцию безразмерной скорости  $v$  вычислять по формуле

$$\Psi_{\text{к.кр}} = K_{\text{кр}} \left( 0,18 + \frac{5}{27,5 + 19,5v} \right). \quad (2)$$

Если принять прямолинейный участок пути, то в базовой точке значение  $\Psi_{\text{к.кр}}$  будет равно

$$\Psi_{\text{к.кр}} = 0,118 + \frac{5}{27,5 + 19,5} = 0,224$$

и, подставив (1), получим

$$f_{\text{сц}} = 4,457 \cdot 0,224 = 1,000075 \approx 1.$$

Аналогичные расчеты для тепловоза М62 показывают, что в формуле (1) вместо коэффициента 4,457 должен быть взят коэффициент 4,061.

Для других рассмотренных тепловозов значение коэффициента представляют собой:

$$ТЭМ1 \rightarrow 3,676; \quad ТЭМ2 \rightarrow 3,806;$$

$$ЧМЭЗ \rightarrow 3,935.$$

Среднее значение равно 3,987, поэтому в дальнейшем для расчета ограничения безразмерной силы тяги по сцеплению будем вычислять по формуле

$$f_{\text{сц}}(v) = 3,987 \cdot \Psi_{\text{к.кр}}(v), \quad (3)$$

а значение  $\Psi_{\text{к.кр}}$  по формуле типа (2) только в качестве  $V_*$  принимаем среднее значение базовой скорости равной 11,2 км/ч.

Что касается ограничения по мощности, то учитывая, что с ростом скорости сила тяги падает предлагается в качестве математической модели принять

$$f(v) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k}{v^k}. \quad (4)$$

Ограничиваясь заданной точностью, в соотношении (4) можно принять конечное число слагаемых.

В математическом плане оставив в (4)  $n$  слагаемых, получим определенную точность. Желание сделать  $n$  как можно меньшим, а точность как можно лучшей, приходим к задаче векторной оптимизации [4]

В математическом плане данная задача принимает вид: задавшись числом слагаемых в (4)  $n = 1, 2, \dots$  при каждом фиксированном значении  $n$ , по методу наименьших квадратов определяем коэффициенты  $a_0, a_2 \dots a_n$ , а затем определяем максимальную по модулю относительную погрешность  $\varepsilon$ .

Так, например, при  $n = 1$  максимальная погрешность составляет 10 %, а при  $n = 2$  погрешность равна 5 %.

На рисунке представлена безразмерная тяговая характеристика тепловозов

$$f = a_0 + \frac{a_1}{v},$$

а также огибающие сверху

$$\bar{f} = a_{\text{max}} + \frac{b_{\text{max}}}{v}$$

и снизу

$$\underline{f} = a_{\text{min}} + \frac{b_{\text{min}}}{v}.$$

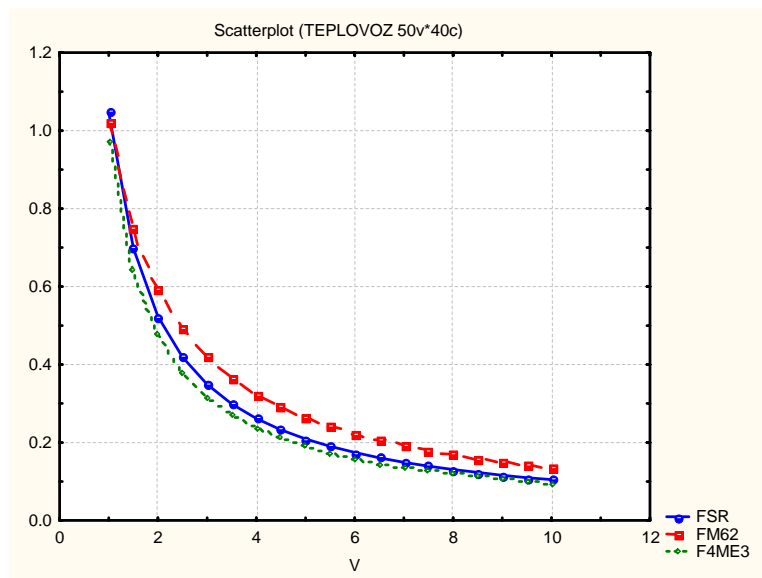


Рис. Графическое представление безразмерной тяговой характеристики тепловозов

Численные значения коэффициентов представляют собой:  $a_0 = 0,023$   $a_1 = 0,996$ ;  $a_{\text{max}} = 0,7$ ;  $b_{\text{max}} = 1,04$ ;  $a_{\text{min}} = -0,02$ ;  $b_{\text{min}} = 0,967$ ; таким образом, в диапазоне от 0 до 1 изменения безразмерной скорости необходимо пользоваться зави-

симостью (3), а при  $v \in [1, 10]$  расчет безразмерной силы тяги вычислять по формуле

$$f = 0,023 + \frac{0,996}{v}. \quad (5)$$

Следовательно, при составлении уравнения движения поезда в безразмерной форме силу тяги можно вычислять по зависимостям (3) и (5).

Рассмотрим пример применения безразмерной тяговой характеристики тепловоза при следующих исходных данных:

- задан расчетный подъем  $i_p$ ;
- скорость движения поезда на расчетном подъеме  $v_p$ ;
- масса состава  $Q$ ;
- тип вагонов и нагрузка;
- масса, приходящая на ось колесной пары.

Масса тепловоза определится из условия равномерного движения поезда на расчетном подъеме [3]

$$P = \frac{Q \left[ W_0''(v) + i_p \right]}{1000 \Psi_k - \left[ W_0'(v) + i_p \right]} \Bigg|_{v=v_p},$$

где  $\Psi_k$  – расчетный коэффициент сцепления;  $W_0''$  – удельное основное сопротивление состава;  $W_0'$  – удельное основное сопротивление движению локомотива в режиме тяги.

Тогда положив

$$K_p = \frac{W_0''(v_p) + i_p}{1000 \Psi_k(v_p) - \left[ W_0'(v_p) + i_p \right]},$$

получаем

$$P = K_p \cdot Q,$$

Следовательно, на участке ограничения по сцеплению имеем

$$F_{\text{сц}}(v) = 1000 \Psi_k(v) K_p \cdot Q.$$

Далее полагаем  $v_* = v_p$  и базовое значение силы тяги с учетом (3) будет равно

$$F_* = \frac{1000 K_p Q}{3,987},$$

а для скорости более  $v_*$  сила тяги с учетом (5) будет равной

$$F_k(v) = F_* \left( 0,023 + \frac{0,996 \cdot v_*}{v} \right),$$

а полезная мощность локомотива будет следующей:

$$N = F_* \cdot v_* = \frac{1000 K_p \cdot v_*}{3,987} Q. \quad (6)$$

Положив

$$K_N = \frac{1000 K_p \cdot v_*}{3,987},$$

из (6) получаем зависимость полезной мощности тепловоза от массы состава

$$N = K_N \cdot Q.$$

Окончательный выбор мощности тепловоза на данном направлении или объекте работы будет определяться распределением веса состава, который моделируем случайной величиной, обозначаемой той же буквой  $Q$ .

Если  $f_Q(x)$  – плотность распределения масс составов, то ожидаемая мощность будет следующей:

$$N_{\text{ср}} = K_N \int_{\underline{Q}}^{\bar{Q}} f_Q(x) dx,$$

где  $\underline{Q}$  – минимальная масса состава;  $\bar{Q}$  – максимальная масса состава.

### Численный пример

Пусть состав состоит из четырехосных и шестиосных вагонов на роликовых подшипниках и  $q_0 \leq 6$  т, тогда основное удельное сопротивление состава вычисляем по формуле [3]

$$W_0'' = 1,0 + 0,044v + 0,00024v^2$$

и если  $v_p = 25$  км/ч, то получим

$$W_0''(v_p) = 2,25.$$

Основное удельное сопротивление движению тепловоза [3]

$$W_0' = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2$$

и при расчетной скорости имеем

$$W_0'(v_p) = 2,34.$$

Значение расчетного коэффициента сцепления вычисляем по формуле

$$\Psi_k = 0,118 + \frac{5}{27,5 + 25} = 0,213.$$

На расчетном подъеме  $i = 9\%$  коэффициент  $K_p$  будет равен

$$K_p = \frac{2,25 + 9}{1000 \cdot 0,213 - (2,34 + 9)} = 0,0558.$$

Масса тепловоза вычисляется по формуле

$$P = 0,0558 \cdot Q,$$

а базовое значение сил тяги составит

$$F_* = \frac{1000 \cdot 0,0558}{3,987} Q = 13,995 \cdot Q.$$

Для скорости более  $v_* = 25$  км/ч сила тяги будет определяться по формуле

$$F_k = 13,995 \left( 0,023 + \frac{0,996 \cdot 25}{v} \right) Q$$

или

$$F_k = \left( 0,322 + \frac{348,476}{v} \right) Q.$$

Мощность тепловоза от массы состава представляет собой

$$N = 0,3499 \cdot Q,$$

где  $Q$  – масса состава в т;  $N$  – мощность в кВт.

Если  $Q = 4000$  т, то масса тепловоза и мощность будут равными

$$P = 0,0558 \cdot 4000 = 223,2 \text{ т.}$$

$$N = 0,3499 \cdot 4000 = 1399,6 \text{ кВт (1903,5 л.с)}$$

Удельная сила тяги рассчитывается по формуле

$$f_{к.у} = 0,305 + \frac{330,058}{v},$$

которую можно использовать при интегрировании уравнения движения поезда.

Заметив, что приведенное значение мощности представляет собой полезную мощность необходимую для реализации равновесной скорости на расчетном подъеме

С учетом коэффициента полезного действия  $\eta \approx 0,3$  получим мощность силовой установки (дизеля)

$$N_d = \frac{1399,6}{0,3} = 4665,3 \text{ кВт (6345 л.с.).}$$

Если сравнивать полученную мощность с мощностью тепловоза 2ТЭ116, то она будет равна мощностям его двух секций.

Таким образом, предложенная безразмерная тяговая характеристика может быть использована не только при тяговых расчетах, но и определении рациональной мощности тепловозного модуля.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Босов А. А. Научные основы решения задач проблемы обновления локомотивного парка железных дорог Украины / А. А. Босов, Г. К. Гетьман, А. И. Мосендз. – Д.: Вега, 2004. – 331 с.
2. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. – Л.: Энергия, 1977. – 444 с.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
4. Босов А. А. О Парето оптимальных решениях задач векторной оптимизации. // Диференціальні рівняння та їх застосування: Зб. наук. праць ДДУ. 1998. – С. 66–70.

Поступила в редколлегию 06.07.2005.