

УДК 629.423.1

Ю. В. ЧЕРНЯК, кандидат технических наук, М. А. РЕВЧУК, ассистент, Государственный экономико-технологический университет транспорта, г. Киев; С. А. МАТВИЕНКО, старший преподаватель, А. В. САЦЮК, аспирант, Донецкий институт железнодорожного транспорта, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТРАТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ ВЛ8 ПРИ РАБОТЕ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

На станциях Донецкой железной дороги для надвига на сортировочные горки используются электровозы ВЛ8. Приведен анализ и сделан расчет потребления электрической энергии с учетом потерь в реостатах и в цепи ТЭД без учета потерь в реостатах. С этой целью была создана многофакторная математическая модель работы электровоза постоянного тока для подталкивания составов на подвижной части горки. Решение обеих задач опирается на расчет тягово-энергетических параметров работы электровоза при надвиге расформируемого состава.

**В**связи с использованием электровозов серии ВЛ8 для роспуска поездов на сортировочных горках возникает необходимость в расчете их экономической эффективности по сравнению с применением маневровых тепловозов и анализе использования электрической энергии узлами электровоза.

Исследование особенностей работы электровозов на сортировочных горках требует расчета затрат электроэнергии по отдельным звеньям силовых цепей (т.е. отдельно на пусковых реостатах и ТЭД). С этой целью была создана многофакторная математическая модель работы электровоза постоянного тока для подталкивания составов на подвижной части горки. При этом ставились задачи оценить расход электроэнергии и его распределение на реостатах и ТЭД, во-первых, в целом на роспуск состава и, во-вторых, расчет этих расходов в течение роспуска.

Решение обеих задач опирается на расчет тягово-энергетических параметров работы электровоза при надвиге расформируемого состава. Наиболее подробно рассмотреть этот процесс позволяет случай повагонного формирования отцепов, что логично вызывает дискретизацию модели надвига состава именно по количеству вагонов в нем  $N_{\text{ваг}}$ . В модели учтены профиль подвижной части горки большой мощности с подъемом  $i_1 = 2,5\%$ , а на последних 50 м перед вершиной – с подъемом  $i_2 = 12\%$ . Учитывая повагонную дискретизацию модели, можно считать, что количество шагов, которые соответствуют движению по участку с подъемом  $i_2$ , составляет  $50 / 15 \approx 3$ , где 15 – условная длина (м) четырехосного вагона. При расчете надвига состава предполагается необходимость поддержания его скорости на постоянном уровне  $\bar{v} = 5$  км/час, что определяется технологией расформирования на большинстве сортировочных горок.

В качестве исходных тягово-энергетических характеристик модели использованы паспортные характеристики его ТЭД [ПРТ], в частности электротяговые  $F_k(I_d)$  и скоростные  $v(I_d)$ . Имеющиеся скоростные характеристики установлены для номинальных напряжений на зажимах ТЭД 375, 750 и 1500 В, в то время как анализ реостатного пуска электровоза требует расчета характеристик  $v(I_d)$  с учетом падения напряжения на сопротивлениях. Для этого был вы-

полнен расчет характеристики удельной ЭДС ТЭД  $c\Phi(I_d)$  по характеристике  $v(I_d)$  для напряжения 375 В (при последовательном соединении ТЭД), на основании которой были построены скоростные характеристики ТЭД в зависимости от позиции реостатного пуска (рисунок 1) (сопротивления ступеней пускового реостата рассчитаны согласно таблице переключений индивидуальных контакторов [ВЛ8]). Полученные характеристики позволяют выполнить расчет режимов тяги и расхода электроэнергии при езде на реостатных позициях.

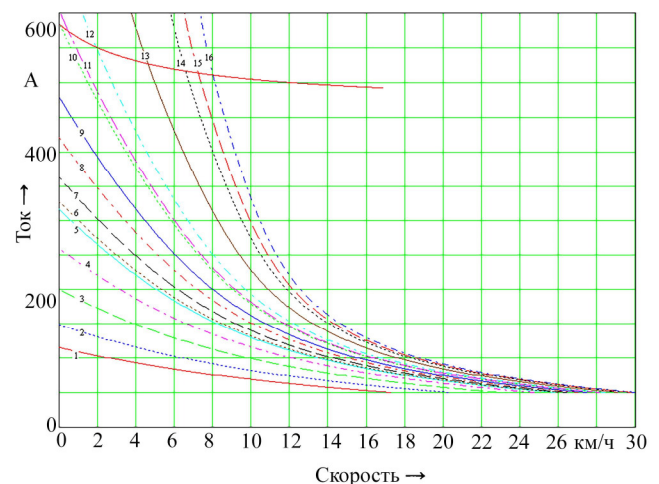


Рисунок 1 – Скоростные характеристики ТЭД в зависимости от позиции реостатного пуска

Средние расходы электроэнергии на надвиг одного состава однозначно определяются средней силой тяги  $\bar{F}_k$  за все время роспуска:

$$\bar{F}_k = \bar{W}'_o + \bar{W}'_i + \bar{W}''_o + \bar{W}''_i, \quad (1)$$

где  $\bar{W}'_o, \bar{W}'_i$  – соответственно среднее значение основного и дополнительного сопротивлений движению электровоза, Н;  $\bar{W}''_o, \bar{W}''_i$  – то же, для состава, Н.

Среднее значение основного сопротивления электровоза определим по средней скорости надвига:

$$\overline{W}_0' = w_0'(\bar{v})Pg, \quad (2)$$

где  $w_0'(\bar{v})$  – удельное основное сопротивление движению локомотива, принимается по [ПРТ], Н/кН;  $P$  – расчетная масса электровоза, т;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Средневзвешенное дополнительное сопротивление движению электровоза (при его длине 27,5 м) найдем, исходя из его расположения на подъеме  $i_2$  на протяжении (50–27,5) / 15  $\approx$  2 шагов:

$$\overline{W}_i' = \frac{(N_{\text{вар}} - 2)i_1 + 2i_2}{N_{\text{вар}}}Pg. \quad (3)$$

Для определения среднего сопротивления состава необходимо рассмотреть процесс надвига по каждому шагу. На первом шаге, согласно принятым предположениям, 3 вагона находятся на подъеме  $i_2$  подвижной части горки, другие  $N_{\text{вар}} - 3$  вагонов – на подъеме  $i_1$ . Тогда для первого ( $n = 1$ ) шага

$$W_{\alpha}'' + W_{i1}'' = (N_{\text{вар}} - 3)(w_0''(\bar{v}) + i_1) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g + 3(w_0''(\bar{v}) + i_2) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g, \quad (4)$$

где  $w_0''(\bar{v})$  – удельное основное сопротивление движению состава, принимается по [ПРТ], Н/кН.

На следующих шагах, пока в составе не останется 3 вагона ( $n \leq N_{\text{вар}} - 3$ ), будет уменьшаться только количество вагонов на участке профиля  $i_1$ , и силы сопротивления

$$\begin{aligned} W_{\alpha}'' + W_{in}'' &= (N_{\text{вар}} - 3 - (n-1))(w_0''(\bar{v}) + i_1) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g + (w_0''(\bar{v}) + i_2) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g = \\ &= (N_{\text{вар}} - 2 - n)(w_0''(\bar{v}) + i_1) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g + 3(w_0''(\bar{v}) + i_2) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g. \end{aligned} \quad (5)$$

На последних шагах  $n > N_{\text{вар}} - 3$ , очевидно,

$$\begin{aligned} W_{\alpha}'' + W_{in}'' &= (N_{\text{вар}} - (n-1))(w_0''(\bar{v}) + i_2) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g = \\ &= (N_{\text{вар}} - n + 1)(w_0''(\bar{v}) + i_2) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая это, среднее значение сопротивления движению состава по всем  $N_{\text{вар}}$  шагам

$$\begin{aligned} \overline{W}_0'' + \overline{W}_i'' &= \frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{вар}}} W_{\alpha}'' + W_{in}''}{N_{\text{вар}}} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{вар}}-3} (N_{\text{вар}} - 2 - n)(w_0''(\bar{v}) + i_1) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g + \\ &+ \frac{3(N_{\text{вар}} - 3)(w_0''(\bar{v}) + i_2) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g + \sum_{n=N_{\text{вар}}-2}^{N_{\text{вар}}} (N_{\text{вар}} - n + 1)(w_0''(\bar{v}) + i_2) \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g}{N_{\text{вар}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Отметив, что сумма  $\sum_{n=N_{\text{вар}}-2}^{N_{\text{вар}}} (N_{\text{вар}} - n + 1) = 6$ , с учетом

(2), (3), (7) имеем выражение для средней в течение роспуска силы тяги

$$\overline{F}_\kappa = w_0'(\bar{v})Pg + \frac{(N_{\text{вар}} - 2)i_1 + 2i_2}{N_{\text{вар}}}Pg + \left[ \frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{вар}}-3} (N_{\text{вар}} - 2 - n)(w_0''(\bar{v}) + i_1) + 6 + 3(N_{\text{вар}} - 3)(w_0''(\bar{v}) + i_2)}{N_{\text{вар}}} \right] \frac{Q}{N_{\text{вар}}}g. \quad (8)$$

Рассчитанная средняя сила тяги определяет ток одного ТЭД, необходимый для ее реализации. По формуле обратной интерполяции из таблиц электротяговых характеристик  $F_\kappa(I_\Delta)$  имеем значение тока (в А):

$$I_\Delta = -107,743 + 0,625 \frac{F_{\kappa\Delta}}{100} + 20 \ln F_{\kappa\Delta}, \quad (9)$$

где  $F_{\kappa\Delta}$  – сила тяги одного колесо-моторного блока, Н.

По скоростным характеристикам ТЭД (см. рисунок 1) при принятой скорости  $\bar{v}$  определяется позиция контроллера машиниста, которая наилучшим образом позволяет добиться нужного режима по току  $I_\Delta$ . Эта позиция определяет сопротивление ступени пускового реостата  $R_p$  (в Ом), что дает возможность определить усредненную величину мощности потерь электроэнергии в реостатах

$$P_p = I_\Delta^2 R_p, \quad (10)$$

а также суммарную мощность электровоза

$$P = U_e I_\Delta, \quad (11)$$

где  $U_e$  – напряжение в контактной сети, В.

Рассчитав время роспуска состава (в мин.) по формуле

$$T = \frac{15 \cdot 60 N_{\text{вар}}}{1000 \bar{v}}, \quad (12)$$

где 15 – условная длина четырехосного вагона (в м), имеем усредненные значения суммарных затрат электроэнергии (в кВт·час) на один надвиг

$$A = \frac{PT}{1000 \cdot 60}, \quad (13)$$

а также части этих расходов, соответствующие потерям в реостатах

$$\alpha A = \frac{P_p T}{1000 \cdot 60}, \quad (14)$$

и в остальной электрической цепи электровоза

$$\beta A = A - \alpha A. \quad (15)$$

При необходимости определения изменения силы тяги и расхода электроэнергии в течение роспуска расчеты выполняются для каждого шага по формулам (4)–(6), (1), (10)–(15), а в формуле (12) время  $T$  определяет время движения по одному шагу, длина которого равна длине вагона (в модели 15 м), то есть по формуле  $T = 15 \cdot 60 / (1000 \bar{v})$ .

Рассмотрим результаты расчетов по модели для составов массой от 1500 до 5000 т с фиксированным количеством вагонов 57. Таким образом, минимальная масса состава соответствует порожнему составу, максимальная – максимально загруженному.

На основании моделирования установлено, что необходимый пусковой ток для трогания состава на горку лежит в пределах от 130 до 266 А (что соответствует 2-й и 5-й позициям реостатного пуска). При дальнейшем разгоне и поддержании скорости надвига на постоянном уровне  $\bar{v}$  средняя за время расформирования сила тяги составляет от 44,3 до 130,5 кН, что соответствует току

от 100 до 189 А. Изменение силы тяги при расформировании состава массой 5000 т приведено на рисунке 2.

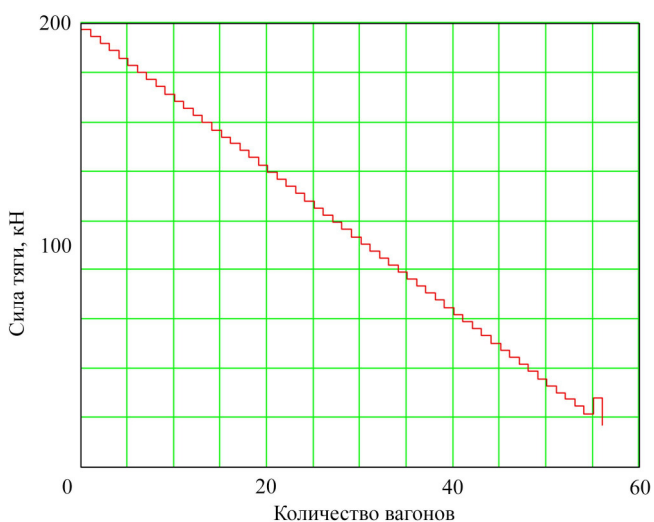


Рисунок 2 – Изменение силы тяги при расформировании состава массой 5000 т

Расчитанные на основании этого расходы электроэнергии электровоза и в цепи ТЭД, без учета потерь в реостатах, приведены на рисунке 3. Из анализа графика видно, что для всего диапазона масс составов потери электроэнергии в реостатах составляют большую часть общих расходов (от 51 до 72 %), при этом потребление энергии ТЭД увеличивается нелинейно из-за релейного характера управления (увеличение количества циклов набора-сброса позиций при снижении массы состава).

Также из рисунка 3 видно, что потери в реостатах на расформирование одного состава могут достигать до 50 кВт·час. Для одной смены горочной работы с 10 роспусков и при ориентировочной цене силовой электроэнергии 1 грн / (кВт·ч) денежный эквивалент этих потерь составляет 500 грн., что в сумме за год составляет 350 тыс. грн.

Получено 12.05.2014

**Y. V. Chernyak, M. A. Revchuk, S. A. Matvyenko, A.V. Satsuk.** Investigation of electricity consumption electric locomotive series VL8 at work on humps.

At the Donetsk railway stations on the humps used electric locomotives VL8. The article presents the analysis and made the calculation of electricity consumption, taking into account losses in the rheostat and the electric motor in the circuit, excluding losses in the rheostat.

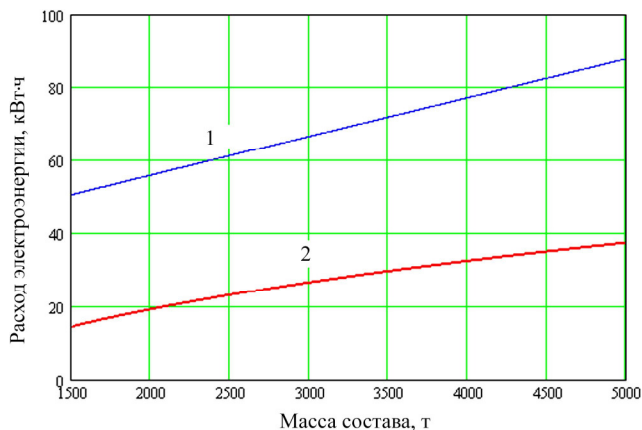


Рисунок 3 – Расходы электроэнергии электровоза с учетом потерь в реостатах (1) и в цепи ТЭД без учета потерь в реостатах (2)

На основе приведенных выше результатов исследований можно сделать следующие выводы:

1 Многофакторная математическая модель позволяет оценить эффективность использования электрической энергии электровозом ВЛ8 при горочной работе.

2 Пользуясь методикой моделирования, предложенной в данной статье, можно рассчитывать потери на реостатах на переходных позициях электровозов серии ВЛ8.

3 Используя данный энергетический расчет, можно делать выводы об эффективности использования электровозов при маневровой горочной работе.

#### Список литературы

- 1 **Гетьман, Г. К.** Теория электрической тяги [моногр.]. В 2 т. Т. 2 / Г. К. Гетьман. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкого Ю. В., 2011. – 364 с.
- 2 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.
- 3 Электровоз ВЛ8. Руководство по эксплуатации. – М. : Транспорт, 1982. – 320 с.
- 4 **Охорзин, В. А.** Компьютерное моделирование в системе Mathcad / В. А. Охорзин. – М. : Финансы и статистика, 2006. – 144 с.