

Л.В. Дубинец, д-р техн. наук, О.Л. Маренич, А.Н. Момот, А.Н. Муха кандидаты техн. наук, Л.В. Корепанова, Д.В. Устименко

(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАЦИИ НА СПУСКАХ

В настоящее время остро стоит вопрос о повышении эффективности работы железнодорожного транспорта на основе внедрения ресурсосберегающих технологий перевозок, включая способы экономии электроэнергии. Это говорит о необходимости проведения исследований в области рекуперативного торможения электроподвижного состава (ЭПС) с учетом современных условий работы железных дорог Украины.

С этой точки зрения представляет интерес рекуперация на спуске с уменьшением скорости, что является нетрадиционным, т. к. обычно рекуперативное торможение применяется на спуске для поддержания скорости движения поезда постоянной в пределах допустимых значений.

Рекуперация с уменьшением скорости целесообразна, если после спуска предусмотрена остановка или ограничение скорости, чтобы увеличение времени хода по спуску не отразилось существенно на значении перегонного времени хода, и чтобы не пришлось после рекуперации применять режим тяги для компенсации потерянной скорости. В связи с тем, что частота движения поездов по многим направлениям в настоящее время уменьшилась, некоторое увеличение времени хода на спуске не вызовет затруднений при разработке графика движения поездов, но может дать существенное увеличение рекуперированной энергии. Конечно, реализация рекуперации на спуске с уменьшением скорости возможна при определенном сочетании характеристик поезда, профиля пути и т.п.

На эксплуатируемом ныне ЭПС предусмотрено ступенчатое регулирование тормозной силы при рекуперативном торможении.

Но в настоящее время возникла возможность получить непрерывное (плавное) изменение тормозной силы по заданному закону, если применить аппараты на базе современных микроконтроллеров. Исследуем эффективность использования этой возможности с точки зрения увеличения энергии рекуперации.

Удельное сопротивление движения поезда [1]

$$\omega_{0i} = 0,7 + \frac{3 + 0,09v_{cp} + 0,002v_{cp}^2}{q}, \quad (1)$$

где q - нагрузка на ось вагона, т; v_{cp} - средняя скорость для i -ой ступени, км/ч.

Удельная сила рекуперативного торможения на i -й ступени, отнесенная к весу поезда, Н/кН:

$$b_i = \frac{B_{cp} 10^3}{(P + Q)g}, \quad (2)$$

где P - вес электровоза, т; Q - вес состава, т; B_{cp} - средняя тормозная сила на i -й ступени, Н; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Из уравнения движения поезда при его рекуперативном торможении на спуске [2]

$$a_i = \frac{\xi}{1 + \nu} (i_{cp} - \omega_{0i} - b_i), \quad (3)$$

где a_i - замедление при рекуперации на i -й ступени, м/с^2 ; $\xi = 0,00981$ - переводной коэффициент; $1 + \nu = 1,06$ - коэффициент инерции вращающихся частей; i_{cp} - средний уклон на спуске, ‰.

Количество энергии рекуперации A_{pi} (кВт·ч), получаемой при рекуперации от начальной скорости v_{Hi} (км/ч) до конечной v_{Ki} (км/ч), определяется как [3]

$$A_{pi} = 1.073(P + Q)(v_{Hi}^2 - v_{Ki}^2)(1 + \nu)10^{-5} \left(1 - \frac{\omega_{0i} - i_{cp}}{102(1 + \nu)a_i}\right) \eta_p, \quad (4)$$

где $\eta_p = 0,85$ - КПД при рекуперации.

Известно, что при равномерно замедленном движении: $v_{Ki} = v_{Hi} - a_i \cdot t_{pi}$.
Откуда

$$t_{pi} = \frac{v_{Hi} - v_{Ki}}{a_i}, \quad (5)$$

где t_{pi} - время рекуперации на i -й ступени.

Время рекуперации на n ступенях равно $\sum_1^n t_{pi}$ должно превышать время t_0 при рекуперации с постоянной скоростью в пределах, допустимых по условиям движения поездов на данном участке.

Длина пути S_i , соответствующая процессу рекуперации, на i -й ступени может быть определена по известной формуле:

$$S_i = \frac{v_{ki}^2 - v_{hi}^2}{2 \cdot a_i}. \quad (6)$$

Общая длина пути, соответствующая рекуперации на n ступенях, запишется как $\sum_1^n S_i$.

Время хода поезда по участку $\sum_1^n S_i$ при рекуперации с постоянной скоростью

$$t_0 = \frac{\sum_1^n S_i}{v_{\Pi}}, \quad (7)$$

где $v_{\Pi} = \text{const}$ - скорость при рекуперации на спуске с постоянной скоростью.

По вышеприведенным формулам можно найти параметры правой части уравнения (4) при плавной рекуперации с уменьшением скорости на спуске и изменением от v_{H1} до v_{K1} , определив при этом количество энергии рекуперации A_p .

Если A_p окажется существенно больше $\sum_1^n A_{pi}$, а $\sum_1^n t_{pi}$ при этом будет больше t_0 в пределах, допустимых по условиям движения, то с точки зрения увеличения энергии рекуперации при модернизации действующего и разработке нового ЭПС целесообразно обеспечить плавное непрерывное регулирование тормозной силы.

Числовой пример

Для реального определения эффективности непрерывного регулирования возьмем в качестве базовых характеристики рекуперативного торможения электроваз ВЛ8 (см. рисунок 1).

Исследования проведем в интервале скоростей от 80 до 68 км/ч. В этом интервале тормозная сила изменяется от 185 кН (при скорости $v_{H1} = 80$ км/ч) до 180 кН (при скорости $v_{K1} = 77$ км/ч) – 5-я позиция тормозного контроллера. При скорости 77 км/ч происходит переход на 6-ю позицию, на которой тормозная сила изменяется от 228 кН (при скорости $v_{H2} = 77$ км/ч) до 200 кН (при скорости $v_{K2} = 68$ км/ч).

На первой ступени средняя тормозная сила $B_{cp1} = 182,5$ кН, на второй - $B_{cp2} = 214$ кН. Соответственно средние значения скоростей $v_{cp1} = 78,5$ км/ч $\approx 21,8$ м/с и $v_{cp2} = 72,5$ км/ч $\approx 20,13$ м/с. Принимаем, что все вагоны в поезде 4-осные и нагрузка на ось $q = 17$ т.

В соответствии с формулой (1) для первой ступени $\omega_{o1} = 2,02$ Н/кН, для второй ступени $\omega_{o2} = 1,87$ Н/кН.

Принимаем $Q = 3500$ т, вес электровоза ВЛ8 $P = 184$ т.

В соответствии с формулой (2) для первой ступени $b_1 = 5,06$ Н/кН, для второй ступени $b_2 = 5,93$ Н/кН. В соответствии с формулой (3) для первой ступени $a_1 = |0,028|$ м/с², для второй $a_2 = |0,035|$ м/с². Для расчета принимаем $i_{cp} = 4\text{‰}$.

В соответствии с формулой (4) $A_{p1} = 27,67$ кВт · ч, $A_{p2} = 72,5$ кВт · ч. Всего в интервале от 80 км/ч до 68 км/ч на двух ступенях будет отрекупировано

$\sum_1^2 A_{pi} = A_{p1} + A_{p2} = 27,67 + 72,5 = 100,17$ кВт · ч. В соответствии с формулой (5)

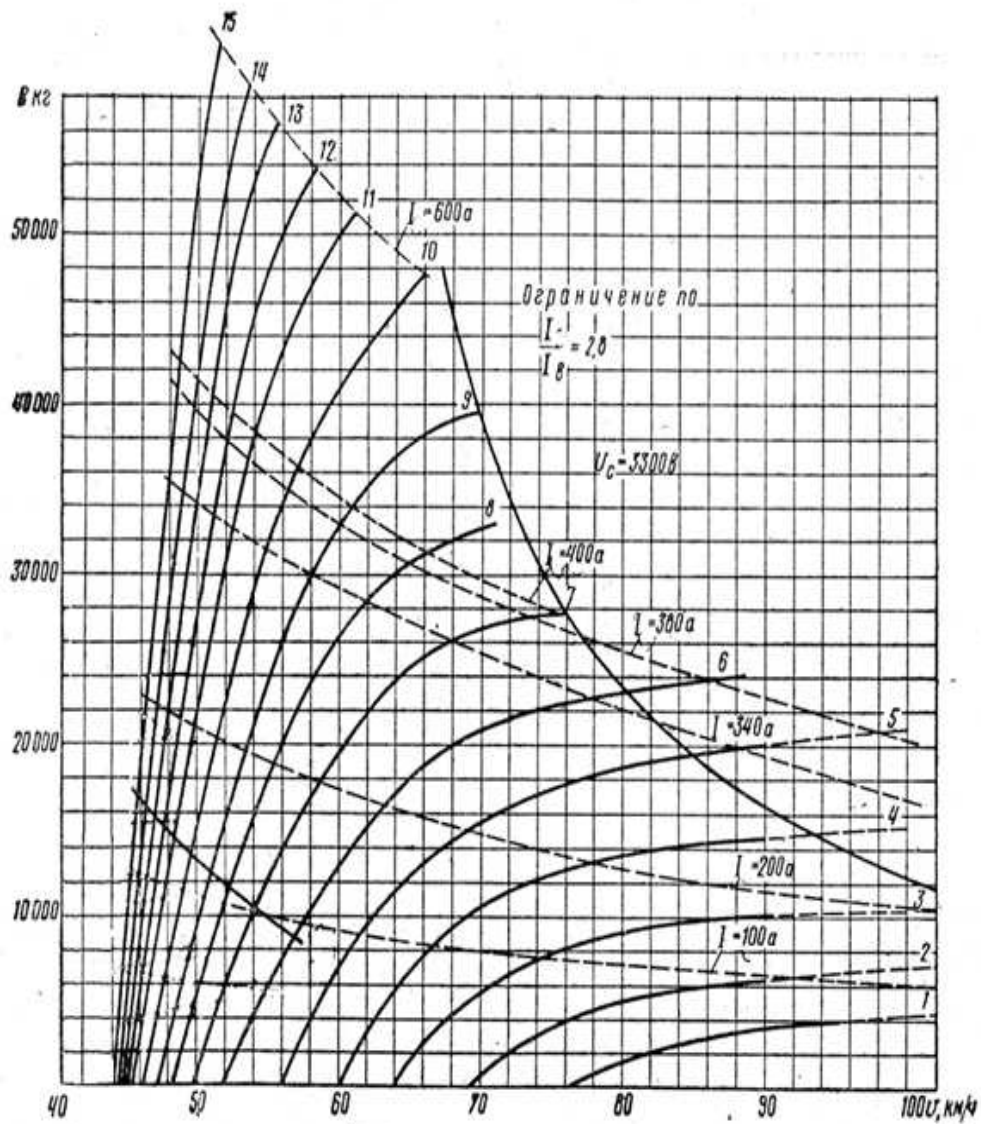


Рис.1. Характеристики рекуперативного торможения электровоза ВЛ8 при параллельном соединении тяговых двигателей

$t_{p1} = 29,64 \text{ с}$, $t_{p2} = 71,4 \text{ с}$. Тогда $\sum_1^2 t_{pi} = 29,64 + 71,4 = 101,04 \text{ с}$.

В соответствии с формулой (6) $S_1 = 646,4 \text{ м}$ $S_2 = 1258,75 \text{ м}$.

Тогда $\sum_1^2 S_i = 646,4 + 1258,75 = 1905,15 \text{ м}$.

Параметры режима при непрерывном плавном регулировании обозначим штрихом. Для этого режима $t' = \sum_1^2 t_{pi} = 101,04 \text{ с}$, а начальная скорость $v'_H = 80 \text{ км/ч} = 22,22 \text{ м/с}$. Конечную скорость предварительно принимаем $v'_{к\text{пред}} = v_{к2} = 68 \text{ км/ч} = 18,89 \text{ м/с}$. Тогда в интервале от v'_H до $v'_к$ получим $B_{ср}' = 240 \text{ кН}$ (смотри кривую ограничения при токе якоря 340 А на рисунке).

В соответствии с формулами (1),-(3): $\omega'_0 = 1,91 \text{ Н/кН}$, $b_{\text{ср}}' = 6,65 \text{ Н/кН}$,
 $a' = |0,042|_{\text{м/с}^2}$

По формуле (6)

$$v'_k = \sqrt{2 \cdot a' \cdot \sum_1^2 S_i + v_H'^2} = \sqrt{2 \cdot (-0,042) \cdot 1905,15 + 22,22^2} = 18,27 \text{ м/с},$$

что составляет 65,77 км/ч. В соответствии с формулой (4)

$$A_p' = 1,073 \cdot (184 + 3500) \cdot (80^2 - 65,77^2) \cdot 1,06 \times \\ \times 10^{-5} \cdot \left(1 - \frac{1,91 - 4}{102 \cdot 1,06 \cdot 0,042}\right) \cdot 0,85 = 107,74 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Итак, получаем увеличение энергии рекуперации по сравнению со ступенчатым регулированием тормозной силы на

$$\frac{107,74 - 100,17}{100,17} \cdot 100\% = 7,56\% , \text{ что весьма существенно.}$$

Список литературы

1. Осипов С.И. Основы электрической и тепловозной тяги. – М.: Транспорт, 1985. – 408 с.
2. Розенфельд В.Е., Исаев Н.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
3. Эффективность и надежность рекуперации на электрифицированных дорогах постоянного тока //Труды ВНИИЖТа. – М.: Транспорт, 1965.-Вып. 219. – 142 с.