

Д. В. Устименко

(Украина, Днепрпетровск, Национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Рекуперация важная составляющая энергосберегающей технологии перевозочного процесса. С течением времени характеристики перевозочного процесса и подвижного состава меняются, соответственно должны меняться рекомендации по наиболее эффективному использованию рекуперативного торможения. Десять и более лет тому назад на дорогах Украины предпочтение отдавалось тяжеловесным (около 6000 т) поездам и ставилась задача максимально уменьшить перегонное время. При этом рекуперативное торможение применялось, прежде всего, на затяжных спусках, с уклонами 7-10‰ и более, для поддержания скорости движения, близкой к допустимой. Но за последние годы условия работы железных дорог Украины существенно изменились: уменьшились объемы перевозок, повысились удельные эксплуатационные расходы, наблюдается постоянный рост цен на электроэнергию, существенно уменьшилось количество тяжеловесных составов. Все это говорит о необходимости проведения исследований в области рекуперативного торможения электроподвижного состава (ЭПС).

Один из способов повышения эффективности рекуперативного торможения – применение систем на базе микроконтроллеров, способных формировать заданные формы тормозных характеристик.

Основная цель исследований показать, что использование относительно мягких характеристик рекуперативного торможения способствует увеличению энергии рекуперации при торможении с уменьшением скорости.

Особый интерес представляет рекуперативное торможение с уменьшением скорости перед местами ее ограничения, либо остановками, поскольку может быть увеличение объема энергии, возвращаемой в сеть. Некоторое увеличение времени хода при этом можно заложить в графики движения поездов.

На эксплуатируемом ныне ЭПС рекуперативное торможение осуществляется по ограничениям тормозной характеристики и, как правило, применяется для поддержания скорости движения поезда постоянной в пределах допустимых значений. Одно из основных требований к тормозным характеристикам в этом случае удовлетворение условию механической устойчивости [1]:

$$\frac{dB}{dV} \geq \frac{d(i_{cp} - w_0)G}{dV}, \quad (1)$$

где B - тормозное усилие, развиваемое электровозом, кН;

V - скорость движения, км/ч;

i_{cp} - средняя величина спрямленного уклона, ‰;

w_0 - основное удельное сопротивление движению поезда, Н/кН;

G - масса поезда, т.

При торможении поезда с уменьшением скорости требование механической устойчивости теряет свое значение, т. к. тормозная сила превышает силу сопротивления движению, что разрешает применить мягкие тормозные характеристики[1]. Значительная часть ЭПС постоянного тока оборудована системами ступенчатого регулирования тормозной силы, в которых торможение происходит по относительно жестким кривым I (рис. 1). Но результирующая тормозная характеристика представляет собой относительно мягкую кривую II, построенную по средним значениям тормозной силы для каждой ступени.

Характеристику II можно деформировать с целью увеличения объема рекуперированной энергии.

Исследуем процесс рекуперации при изменении функции $B(V)$ по параболе (первая зависимость) и уравнению $y = a_0 + a_1x^{-1} + a_2x^{-2}$ (вторая зависимость).

Эти кривые хорошо вписываются в область, очерченную ограничениями

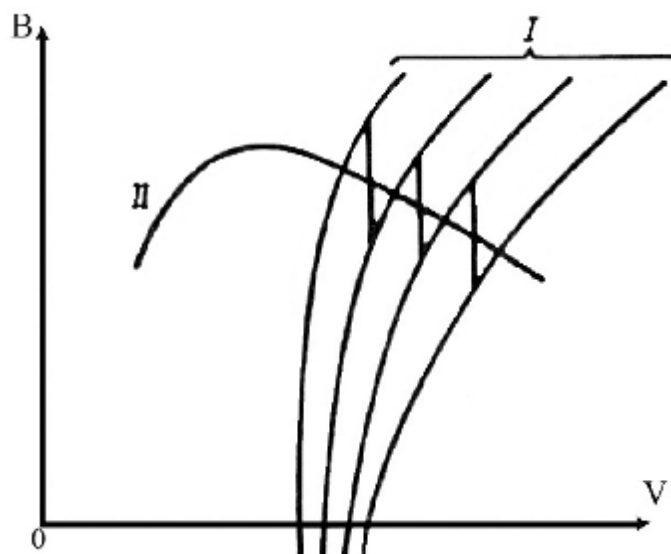


Рис. 1. Замена группы жестких характеристик (I) одной мягкой (II)

рекуперативных характеристик, и могут быть сформированы с помощью системы управления, построенной на базе современных микроконтроллеров.

Математическая форма записи уравнения квадратичной параболы:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (2)$$

Считаем, что в процессе рекуперации скорость движения снижается от значения V_n (точка 1) до значения V_k (точка 2).

Используя выражение (2), запишем уравнения для двух заданных точек с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , соответственно:

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 \quad (3)$$

$$y_2 = a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 \quad (4)$$

Вычитая выражение (3) из (2) и (3) из (4), получим:

$$y - y_1 = a_1(x - x_1) + a_2(x^2 - x_1^2) \quad (5)$$

$$y_2 - y_1 = a_1(x_2 - x_1) + a_2(x_2^2 - x_1^2) \quad (6)$$

Разделив выражение (5) на (6), запишем:

$$\begin{aligned} \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} &= \frac{a_1(x - x_1) + a_2(x^2 - x_1^2)}{a_1(x_2 - x_1) + a_2(x_2^2 - x_1^2)} = \frac{a_1(x - x_1) + a_2(x - x_1)(x + x_1)}{a_1(x_2 - x_1) + a_2(x_2 - x_1)(x_2 + x_1)} = \\ &= \frac{(x - x_1)[a_1 + a_2(x + x_1)]}{(x_2 - x_1)[a_1 + a_2(x_2 + x_1)]} = \frac{a_1(x - x_1) \left[1 + \frac{a_2}{a_1}(x + x_1) \right]}{a_1(x_2 - x_1) \left[1 + \frac{a_2}{a_1}(x_2 + x_1) \right]}. \end{aligned} \quad (7)$$

Заменяя $\frac{a_2}{a_1}$ на коэффициент k и выделив y , имеем формулу для расчета квадратичной параболы, проходящей через заданные две точки в координатной плоскости $xу$:

$$y = \left[\frac{(x - x_1)[1 + k(x + x_1)](y_2 - y_1)}{(x_2 + x_1)[1 + k(x_2 + x_1)]} \right] + y_1. \quad (8)$$

Применим полученную форму записи квадратичной параболы, для построения тормозной характеристики ЭПС постоянного тока:

$$B = \left[\frac{(V - V_1)[1 + k(V + V_1)](B_2 - B_1)}{(V_2 - V_1)[1 + k(V_2 + V_1)]} \right] + B_1, \quad (9)$$

где $(V_1; B_1)$, $(V_2; B_2)$ - точки, через которые проходит рассчитываемая характеристика;

k - коэффициент деформации расчетной характеристики.

Величины скоростей V_1 и V_2 определяются, соответственно, минимальной и максимальной скоростями, реализуемыми электровозом при заданной схеме соединения тяговых двигателей. Величины тормозных сил B_1 и B_2 выбираются из условия реализации процесса торможения поезда с уменьшением скорости с

заданным замедлением и получением наибольшей величины энергии рекуперации при приемлемом по условиям движения времени торможения. Форму тормозной характеристики между указанными точками можно деформировать, варьируя значение коэффициента деформации k в пределах от -1 до 1 .

Применив указанную выше вторую зависимость для записи рекуперативной характеристики ЭПС, получим:

$$B(V) = a_0 + \frac{a_1}{V} + \frac{a_2}{V^2}. \quad (10)$$

В общем случае значения коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 неизвестны, для их нахождения необходимо составить систему уравнений:

$$\begin{cases} B_1 = a_0 + a_1 \cdot V_1^{-1} + a_2 \cdot V_1^{-2}; \\ B_2 = a_0 + a_1 \cdot V_2^{-1} + a_2 \cdot V_2^{-2}; \\ B_3 = a_0 + a_1 \cdot V_3^{-1} + a_2 \cdot V_3^{-2}, \end{cases} \quad (11)$$

где $(V_1; B_1)$, $(V_2; B_2)$, $(V_3; B_3)$ - задаваемые точки, через которые проходит рассчитываемая характеристика. Координаты для точек $(V_1; B_1)$, $(V_2; B_2)$ определяются аналогично параболе, а точка $(V_3; B_3)$ определяет степень деформации гиперболы.

Для примера рассчитаем и сравним величины энергии рекуперации, времени торможения и длины тормозного пути при изменении тормозной силы по параболе, второй зависимости и при торможении по ограничениям. За базовые взяты характеристики рекуперативного торможения электровоза ВЛ8. Принимаем: массу состава $Q=3000$ т, массу электровоза $P=184$ т, начальную скорость торможения $V_n=80$ км/ч, конечную $V_k=65$ км/ч, среднюю величину спрямленного уклона $i_{cp}=4$ ‰. Характеристики строятся для движения при соединении тяговых двигателей по схеме «П», что определяет значения $V_1=47,8$ км/ч, $V_2=100$ км/ч. Значения тормозных сил выбираются для обеспечения процесса торможения с замедлением $a \approx 0.03 \text{К} 0.06$ м/с² [3]. Кроме того, при рекуперации с уменьшением скорости с такими значениями замедления имеем $I_{я}/I_{в} \ll 2,8$, что обеспечивает хорошие условия на коллекторе тягового двигателя.

Первая зависимость (парабола): $B_1=290$ кН, $V_1=47,8$ км/ч; $B_2=120$ кН, $V_2=100$ км/ч; $k=-0,012$:

$$B = \left[\frac{(V - 47,8)[1 - 0,012(V + 47,8)](120 - 290)}{(100 - 47,8)[1 - 0,012(100 + 47,8)]} \right] + 290.$$

Значение $k = -0,012$ получено автором в результате проведенных исследований. При таком k в заданном интервале скоростей получаем рациональное значение рекуперированной энергии.

Вторая зависимость: $B_1 = 340$ кН, $V_1 = 47,8$ км/ч; $B_2 = 136$ кН, $V_2 = 100$ км/ч; $B_3 = 240$ кН, $V_3 = 70$ км/ч. Подставив значения тормозных сил и соответствующих им скоростей в уравнение (11) и решив его, определим: $a_0 = -226,9$, $a_1 = 44710$, $a_2 = -842000$:

$$B(V) = -226,9 + \frac{44710}{V} - \frac{842000}{V^2}.$$

Графики параболы и второй зависимости представлены на рис. 2.

Объем энергии рекуперации определяем по следующей формуле, кВт·ч[5]:

$$A'_p = 1,073(P + Q)(V_H^2 - V_K^2)(1 + n)10^{-5} \left(1 - \frac{w_0 - i_{cp}}{102(1 + n)a}\right) h_p, \quad (12)$$

где V_H, V_K - начальная и конечная скорости торможения, км/ч;

$(1 + n) = 1,06$ - коэффициент инерции вращающихся частей;

P, Q - соответственно масса электровоза и состава, т;

a - замедление поезда, м/с²;

h_p - КПД электровоза при рекуперации, принимается равным 0,85.

Величину замедления находим из уравнения движения поезда [2]:

$$a = \frac{X}{1 + n}(i_{cp} - w_0 - b).$$

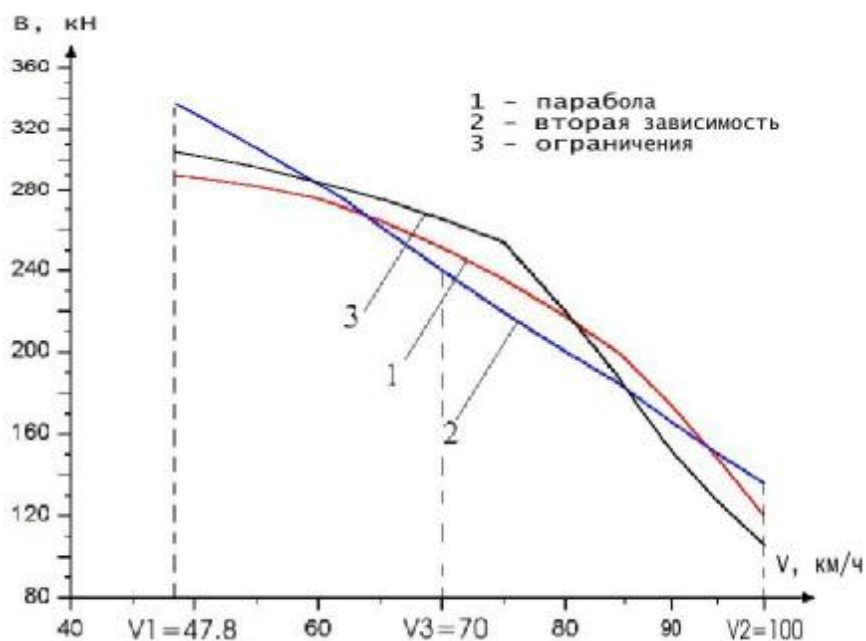


Рис. 2. Графики расчетных тормозных характеристик

Здесь $x = 0,00981$ - переводной коэффициент;

b - удельное значение силы рекуперативного торможения, отнесенной к весу поезда, Н/кН:

$$b = \frac{B \cdot 10^3}{(P + Q)g}.$$

Основное сопротивление движению поезда на участке торможения определяем по выражению из работы [4] как:

$$w_0 = \frac{w'_0 P + w''_0 Q}{P + Q},$$

где w'_0 - основное сопротивление движению электровоза,

$$w'_0 = 1,9 + 0,008V + 0,00025V^2;$$

w''_0 - основное сопротивление движению состава,

$$w''_0 = 0,7 + \frac{8 + 0,09V + 0,002V^2}{q_0}.$$

Значения тормозной и удельной тормозной сил, замедления для каждого вида тормозной характеристики сведены в табл. 1. Поскольку тормозная сила изменяется при изменении скорости, то величина замедления будет изменяться в некоторых пределах. Для определения энергии, времени и пути рекуперативного торможения необходимо в соответствующие расчетные формулы ввести среднее значение замедления.

Среднее время торможения при гашении скорости от V_n до V_k определяем как, с,

$$t_{cp} = \frac{(V_n^2 - V_k^2)}{a_{cp} 3,6}, \quad (13)$$

где a_{cp} - средняя величина замедления при торможении от V_n до V_k .

где 12960 – переводной коэффициент. Средняя длина тормозного пути вычисляется из формулы для равнозамедленного движения, км:

$$L_{cp} = \frac{(V_H^2 - V_K^2)}{2a_{cp} 12960}, \quad (14)$$

Результаты расчета A_p , t_{cp} , L_{cp} сведены в табл. 2.

Применение параболического вида тормозной характеристики увеличивает объем, энергии рекуперации в сравнении с торможением по ограничениям на $\frac{86,8 - 85,1}{86,8} \cdot 100 \approx 2\%$, при этом время хода и длина тормозного пути соответ-

ственно составят, $\frac{76 - 69,4}{76} \cdot 100 = 8,7\%$ и $\frac{1,5 - 1,38}{1,5} \cdot 100 = 8\%$. Для тормозной характеристики, построенной по второй зависимости, эти величины соответственно $\frac{88,32 - 85,1}{88,32} \cdot 100 = 3,6\%$, $\frac{82 - 69,4}{82} \cdot 100 = 15,4\%$ и $\frac{1,62 - 1,38}{1,62} \cdot 100 = 14,8\%$.

Таблица 1

Значения B , b , a , w_o для рассмотренных характеристик

Скорость движения, км/ч	w_o , Н/кН	Вид характеристики								
		По параболе			По второй зависимости			По ограничениям		
		B , кН	b , Н/кН	a , м/с ²	B , кН	b , Н/кН	a , м/с ²	B , кН	b , Н/кН	a , м/с ²
80	2,4	217,7	7	-0,05	200,4	6,4	-0,045	223,1	7,1	-0,051
78	2,35	225,8	7,21	-0,052	207,9	6,6	-0,046	242,6	7,8	-0,057
76	2,31	232,4	7,4	-0,053	215,6	6,9	-0,048	252,6	8,01	-0,059
74	2,26	239,1	7,7	-0,055	223,5	7,2	-0,05	256,7	8,2	-0,06
72	2,21	245,4	7,9	-0,056	231,6	7,4	-0,052	260,8	8,3	-0,061
70	2,17	251	8	-0,058	240	7,7	-0,054	264,8	8,5	-0,062
68	2,13	257	8,2	-0,059	248,5	8	-0,056	269	8,6	-0,062
65	2,06	264,4	8,5	-0,06	261,6	8,4	-0,06	275	8,8	-0,064

Таблица 2

Результаты расчета A_p , t , L для исследуемых видов тормозных характеристик

Вид характеристики	Расчетная величина			
	a_{cp} , м/с ²	A'_p , кВт·ч	t_{cp} , с	L_{cp} , км
По параболе	-0,055	86,8	76	1,5
По второй зависимости	-0,051	88,32	82	1,62
По ограничениям	-0,06	85,1	69,4	1,38

Исследования показали, что с точки зрения увеличения объема энергии, отдаваемой в контактную сеть, целесообразно рекуперировать не по ограничениям тормозных характеристик, а по искусственно созданным с помощью систем управления характеристикам вида параболы, гиперболы.

Список литературы

1. Трахтман Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1965. – 201с.
2. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983. – 408с.
3. Сулима С.Д. Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока: Автореферат диссертации на получение научной степени кандидата технических наук. Днепропетровск, 2001. – 20с.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы./ Под ред. Н.П. Киселева – М.: Транспорт, 1985. – 287с.
5. Эффективность и надежность рекуперации на электрифицированных дорогах постоянного тока.//Труды ВНИИЖТа. – М.: Транспорт, 1965. Вып. 291. – 142с.