

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ДОПУСТИМЫХ УПРАВЛЕНИЙ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ПОЕЗДА

Наведена методика визначення координат граничної тягової характеристики пасажирських електровозів для виконання тягових розрахунків у задачах оптимізації параметрів номінального режиму тягового рухомого складу.

Представлена методика определения координат предельной тяговой характеристики пассажирских электровозов для производства тяговых расчетов в задачах оптимизации параметров номинального режима тягового подвижного состава.

The paper suggests a technique of determination of coordinates of passenger electric locomotives marginal tractive characteristic for carrying out traction calculations in solving the problems of parameters optimization of tractive rolling stock's nominal mode.

Основная задача транспорта – полное и своевременное удовлетворение потребностей народного хозяйства и населения в перевозках.

В связи с тем, что большая часть электроподвижного состава железных дорог Украины физически и морально устарела, необходимо обновление подвижного состава, а это требует больших капитальных вложений. Чтобы избежать приобретения малоэффективного подвижного состава, необходима разработка методик, позволяющих определять оптимальные значения основных параметров электровозов, для заданных условий работы железнодорожного направления.

Такие методики базируются на результатах оптимизации тяговых расчетов [1] и требуют установления ограничений области допустимых управлений – силы тяги и торможения или, иначе говоря, решения задачи по определению координат так называемой предельной тяговой характеристики [2] и ограничения тормозной силы поезда на заданном интервале скорости.

При решении этой задачи на перспективу ее особенность заключается в том, что параметры электровоза (пусковая скорость и пусковая сила тяги) неизвестны. В настоящей статье задача определения области ограничений допустимых управлений решается применительно к пассажирским электровозам.

Рассматривая поезд как твердое тело с массой, сосредоточенной в центре его тяжести и используя регламентированные правилами тяговых расчетов [3] единицы измерения физических величин, уравнение движения можно представить в виде

$$v \frac{dv}{ds} = \xi [v - b_t(v) - w_o(v) - i(s)], \quad (1)$$

где ξ – размерный коэффициент, значение которого зависит от принятых единиц измерения физических величин; w_o – удельное основное сопротивление движению поезда; f_k – удельная сила тяги электровоза; b_t – удельная тормозная сила поезда; $i(s)$ – продольный профиль железнодорожной линии.

Далее будем считать заданными:

- пусковую скорость $v_{п}$;
- значение ускорения при достижении пусковой скорости и движении поезда на площадке ($a_{п}$);
- значение ускорения при достижении максимальной скорости и движении поезда на площадке ($a_{о,зад} = 0,05 \text{ м/с}^2$);
- массу состава Q и продольный профиль железнодорожной линии.

Как видно из формулы (1), при заданном $i(s)$ для производства тяговых расчетов необходимо установить область определения управляющих параметров $\bar{b}_k(v)$, $\bar{f}_k(v)$ и $w_o(v)$.

Тормозная сила поезда может принимать следующие значения:

$$0 \leq b_k \leq \bar{b}_k, \quad (2)$$

где \bar{b}_k – предельное значение тормозной силы, определим как [3]:

$$\bar{b}_k = 1000 \vartheta_p \varphi_{к,р}, \quad (3)$$

где ϑ_p – расчетный тормозной коэффициент, определяемый действующими тормозными

нормативами; $\varphi_{к.р}$ – расчетный коэффициент трения тормозных колодок.

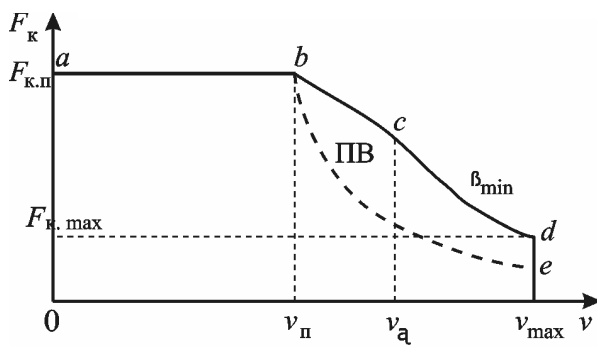
Сила тяги электровоза удовлетворяет условию

$$0 \leq f_k(v) \leq \bar{f}_k(v), \quad (4)$$

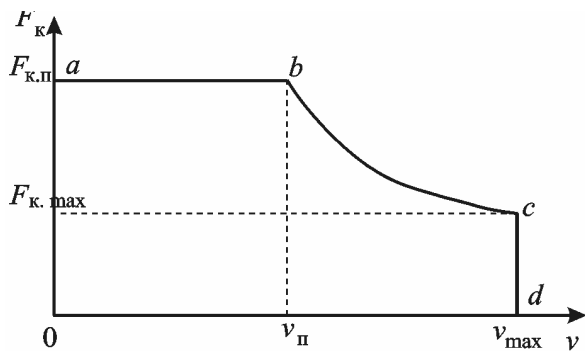
где $\bar{f}_k(v)$ – представляет собой предельную тяговую характеристику электровоза в удельных единицах.

Рассмотрим возможный порядок определения координат предельной тяговой характеристики пассажирского электровоза.

Предельные тяговые характеристики пассажирских электровозов с тяговыми двигателями постоянного тока и с асинхронным тяговым приводом, с двухзонным регулированием мощности, показаны на рис. 1.



а)



б)

Рис 1. Предельная тяговая характеристика пассажирского электровоза:

а) с ТЭД постоянного тока; б) с асинхронными ТЭД

На интервале скорости $[0; v_п]$ сила тяги ограничена максимальным допустимым током тяговых двигателей (отрезок ab).

Интервал $[v_п; v_а]$ (рис. 1, а, линия bc) или $[v_п; v_{max}]$ (рис. 1, б, линия bc) соответствует реализации постоянной мощности, равной мощности при пусковой скорости $v_п$. При использовании коллекторных тяговых двигателей участок bc обеспечивается за счет регулирова-

ния возбуждения. Предельная сила тяги на участке cd интервала $[v_п; v_а]$ (рис. 1, а) определяется степенью ослабления возбуждения и насыщения магнитной цепи машины. Для тяговых двигателей постоянного тока отношение $\alpha = v_а/v_п$ составляет 1,25...1,5, а для наиболее современных двигателей с ослаблением магнитного потока до 25...30 % от его значения при полном возбуждении достигает 1,6 [4; 5]. Для электровозов, эксплуатируемых на железных дорогах стран СНГ, этот показатель составляет 1,36...1,46 (табл. 1).

Участок cd (рис. 1, а) тяговой характеристики определяется допустимой по коммутации степенью ослабления возбуждения.

Силу тяги электровоза в период пуска ($0 \leq v \leq v_п$) определим из условия реализации на горизонтальном участке пути ($i = 0$ %) заданной величины пускового ускорения $a_п$ в виде

$$F_{к.п} = (P + Q) [w_{о.п} + i + 102a_п(1 + \gamma)], \quad (5)$$

где P, Q – масса электровоза и состава; $w_{о.п}$ – основное удельное сопротивление движению поезда при скорости равной пусковой; $a_п$ – пусковое ускорение при скорости равной пусковой, реализуемое на площадке (согласно [4–7] $a_п = 0,4...0,6$ м/с²); $1 + \gamma$ – коэффициент инерции вращающихся частей.

Таблица 1

Значения коэффициента $\alpha = v_а/v_п$

Электровоз	Параметр		
	$v_п$, км/ч	$v_а$, км/ч	α
ЧС2	80,3	115,3	1,436
ЧС3	65,5	89,0	1,359
ЧС7	77,0	104,8	1,361
ЧС200	128,0	182,0	1,422
ЧС4	86,5	126,5	1,462
ЧС8	84,5	121,8	1,441

В выражении (5) фигурирует масса электровоза P . Ее целесообразно определить из условия реализации $F_{к.п}$, ограниченной максимально допустимой силой сцепления, то есть из равенства

$$F_{к.п} = F_{сц.п}, \quad (6)$$

где $F_{сц.п}$ – максимально допустимая сила сцепления при пусковой скорости.

Так как сила сцепления

$$F_{\text{сц.п}} = 1000P\psi_{\text{к.п}}, \quad (7)$$

где $\psi_{\text{к.п}}$ – расчетный коэффициент сцепления при пусковой скорости, то необходимая для реализации заданного значения $a_{\text{п}}$ масса электровоза

$$P = F_{\text{к.п}}/1000\psi_{\text{к.п}} \quad (8)$$

или с учетом (5)

$$P = \frac{Q[w''_{\text{о.п}} + w_{\text{п.г.п}} + i + 102a_{\text{п}}(1 + \gamma)]}{1000\psi_{\text{к.п}} - [w'_{\text{о.п}} + i + 102a_{\text{п}}(1 + \gamma)]}, \quad (9)$$

где $w''_{\text{о.п}}$, $w'_{\text{о.п}}$ – основное удельное сопротивление движению при пусковой скорости соответственно состава и электровоза в режиме тяги; $w_{\text{п.г.п}}$ – удельное сопротивление движению от подвагонных генераторов при пусковой скорости.

В расчетах удобно выразить массу электровоза через массу состава в виде

$$P = k_p Q. \quad (10)$$

Коэффициент k_p в последнем выражении, как можно видеть из (9) и (10), равен

$$k_p = \frac{[w''_{\text{о.п}} + w_{\text{п.г.п}} + i + 102a_{\text{п}}(1 + \gamma)]}{1000\psi_{\text{к.п}} - [w'_{\text{о.п}} + i + 102a_{\text{п}}(1 + \gamma)]}. \quad (11)$$

Сила тяги на участке ab с учетом (10) может быть определена по формуле

$$F_{\text{к.п}} = [w_{\text{о.п}} + i + 102a_{\text{п}}(1 + \gamma)](1 + k_p)Q. \quad (12)$$

Участок bc предельной тяговой характеристики определяется, исходя из условия реализации на интервале $[v_{\text{п}}; v_{\alpha}]$ или $[v_{\text{п}}; v_{\text{max}}]$ (для электровоза с асинхронными тяговыми двигателями) постоянной мощности, и описывается выражением

$$F_{\text{к}(bc)}(v) = F_{\text{к.п}} \frac{v_{\text{п}}}{v}. \quad (13)$$

В области ограничения силы тяги условия коммутации тяговых двигателей координаты предельной тяговой характеристики можно определить с помощью универсальных характеристик $F_{\text{к}}^*(v^*)$ [2], которые представляют собой зависимости максимальной допустимой силы тяги в области cd (см. рис. 1, а) от скорости движения, сила тяги и скорость выражены

соответственно в единицах силы тяги $F_{\text{к}\infty}$ и скорости v_{∞} длительного режима.

Как показал анализ, предельные тяговые характеристики могут быть представлены одним из следующих выражений:

$$F_{\text{к}}^* = \frac{1}{a_0 + a_1 v^* + a_2 v^{*2}}, \quad (14)$$

$$F_{\text{к}}^* = a_0 + \frac{a_1}{v^*} + \frac{a_2}{v^{*2}}, \quad (15)$$

$$F_{\text{к}}^* = \frac{1}{a_0 + a_1 v^*}, \quad (16)$$

$$F_{\text{к}}^* = \frac{a_0}{v^* - a_1} - a_2. \quad (17)$$

Таблица 2

Значения коэффициентов в формулах (14)–(17)

Тип ЭПС	Номер формулы	a_0	a_1	a_2	Объясняемый разброс
Постоянного тока	(14)	0,036	-1,420	2,353	99,6
	(15)	1,686	-4,990	4,350	99,3
	(16)	-2,230	3,235	–	98,7
	(17)	0,439	0,638	0,190	99,5
Переменного тока	(14)	1,852	-4,560	3,703	99,7
	(15)	0,068	-0,833	1,763	99,6
	(16)	-1,560	2,610	–	97,1
	(17)	0,943	0,400	0,573	99,5

Значения коэффициентов в формулах (14)–(17) приведены в табл. 2. Они получены в результате аппроксимации тяговых характеристик электровозов ЧС2, ЧС4, ЧС7, ЧС8 в диапазоне скоростей движения $v^* = 0,6 \dots 1,82$. Как видно из данных табл. 2, каждому выражению соответствует высокая доля объясняемого разброса.

Необходимо также подчеркнуть, что зависимости (14)–(17) допустимо использовать только на том интервале относительной скорости, которому соответствуют исходные данные, используемые при аппроксимации.

Таким образом, воспользовавшись одним из выражений для определения универсальной тяговой характеристики, координаты предельной тяговой характеристики в области ограничения по коммутации (см. рис. 1, а) определим как

$$F_{\text{к}(cd)} = F_{\text{к}}^*(v^*) \frac{F_{\text{к}\infty}}{\beta_{\text{min}}}, \quad (18)$$

где $F_{к\infty}$ – сила тяги длительного режима; β_{\min} – наибольшая степень ослабления возбуждения тяговых двигателей.

Для определения координат предельной тяговой характеристики на участке cd введем в рассмотрение коэффициенты

$$k_f = \frac{F_{к.п}}{F_{к\infty}} \quad \text{и} \quad k_v = \frac{v_{п}}{v_{\infty}}, \quad (19)$$

которые определяют соответственно степень перегрузки электровоза в период пуска по силе тяги и отношение пусковой скорости к скорости номинального режима. На основании анализа тяговых характеристик электровозов с двигателями постоянного тока (табл. 3) коэффициент k_f может быть принят равным 1,6...1,7, а коэффициент k_v – 0,8...0,9.

Таблица 3

Значения коэффициентов k_f и k_v		
Электровоз	k_f	k_v
ЧС2	1,985	0,832
ЧС2т	1,731	0,863
ЧС3	1,588	0,879
ЧС200	1,429	0,934
ЧС7	1,783	0,877
ВЛ60пк	1,858	0,781
ЧС4	1,646	0,812
ЧС8	1,733	0,815

С учетом (19) выражение (18) можно преобразовать к виду

$$F_{к(cd)} = F_{к}^* \left(k_v \frac{v}{v_{п}} \right) \frac{F_{к.п}}{k_f \beta_{\min}}. \quad (20)$$

Чтобы установить выражения, для определения отдельных участков предельной тяговой характеристики в удельных единицах, разделим правую часть (5) на $(P+Q)$. Получим зависимость $\bar{f}_{к}(v)$ для участка ab в виде

$$\bar{f}_{к.п} = w_{o.п} + i + 102a_{п}(1 + \gamma). \quad (21)$$

Далее на основании (13) и (20) имеем:

$$\bar{f}_{к(bc)}(v) = f_{к.п} \frac{v_{п}}{v}, \quad (22)$$

$$\bar{f}_{к(cd)}(v) = F_{к}^* \left(k_v \frac{v}{v_{п}} \right) \frac{f_{к.п}}{k_f \beta_{\min}}. \quad (23)$$

Из выражений (21)–(23) следует, что предельная тяговая характеристика в удельных единицах $\bar{f}_{к}(v)$ является функцией скорости и двух параметров $a_{п}$ и $v_{п}$.

Тяговый подвижной состав для скоростного движения должен обеспечивать возможность достижения максимальной скорости движения v_{\max} . Для этого необходимо, чтобы в зоне высоких скоростей обеспечивалось остаточное ускорение. На основании опыта эксплуатации электропоезда ЭР200 [7] его можно принять равным 0,05 м/с². Кроме того, определяя координаты предельной тяговой характеристики с исходными $a_{п}$ и $v_{п}$, необходимо обеспечить выполнение условия

$$a_o \geq 0,05, \quad (24)$$

где a_o – остаточное ускорение поезда при максимальной скорости на $i=0$ ‰.

Значение a_o определяется выражением

$$a_o = \frac{F_{к}^* \left(k_v \frac{v_{\max}}{v_{п}} \right) \frac{f_{к.п}}{k_f \beta_{\min}} - w_{o.\max}}{102(1 + \gamma)}, \quad (25)$$

где $w_{o.\max}$ – основное сопротивление движению поезда при скорости равной v_{\max} .

В случае, когда условие (24) не выполняется, следует определить координаты предельной тяговой характеристики электровоза при другом значении $v_{п}$ или $a_{п}$.

Основное сопротивление движению определим как:

- для режима тяги

$$w_o(v) = \frac{k_p w'_o(v) + [w''_o(v) + w_{п.г}(v)]}{1 + k_p}; \quad (26)$$

- для режима выбега

$$w_x(v) = \frac{k_p w'_x(v) + [w''_o(v) + w_{п.г}(v)]}{1 + k_p}, \quad (27)$$

где $w'_o(v)$ и $w'_x(v)$ – удельное основное сопротивление движению электровоза в режиме тяги и выбега соответственно; $w''_o(v)$ – удельное основное сопротивление движению состава; а $w_{п.г}(v)$ – удельное сопротивление движению состава от подвагонных генераторов.

Входящий в (26) и (27) коэффициент k_p можно определить с помощью предложенного выше выражения (11). Анализ данного выраже-

ния показал, что определяющими величину k_p параметрами являются пусковая скорость v_n и ускорение при пуске a_n (рис. 2). Значение k_p не зависит от величины уклона, так как задача решается исходя из условия реализации заданного пускового ускорения на площадке.

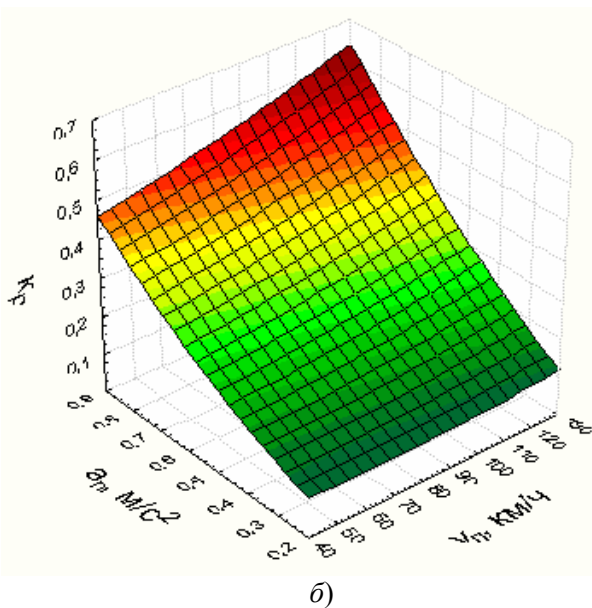
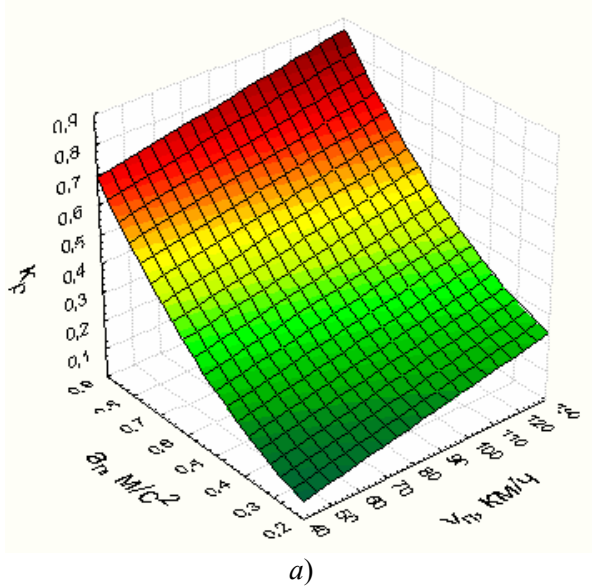


Рис. 2. Зависимость $k_p(v_n, a_n)$:

а) для электровозов переменного тока с коллекторными ТЭД; б) для электровозов с асинхронными тяговыми двигателями

Таким образом, k_p является функцией двух переменных – v_n , a_n . Характер этой функции иллюстрирует рис. 2.

О степени влияния каждого аргумента можно судить по данным рис. 3. Из этих рисунков

видно, что k_p зависит от v_n линейно, а от a_n k_p зависит в большей степени.

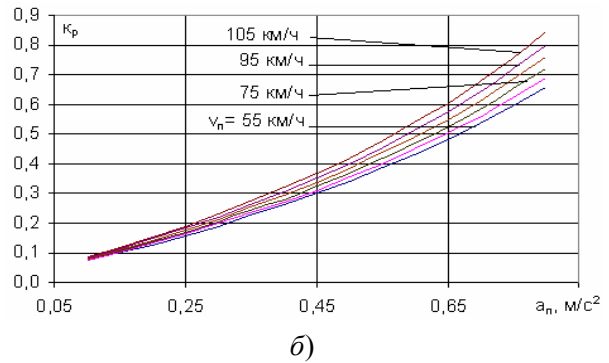
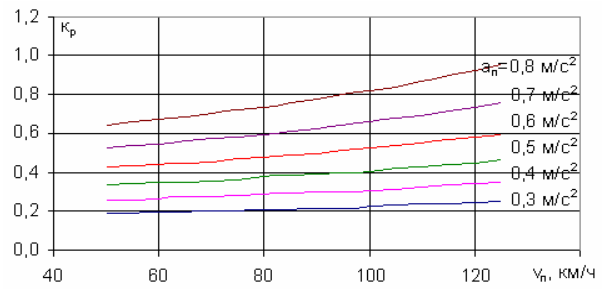


Рис. 3. Анализ зависимости $k_p(v_n, a_n)$

для ЭПС постоянного тока:

а) зависимость $k_p(v_n)$; б) зависимость $k_p(a_n)$.

Анализ показал, что с достаточной для практических расчетов точностью зависимость $k_p(v_n, a_n)$, определенную по выражению (11), можно аппроксимировать трехчленом вида

$$k_p = b_0 + b_1 v_n + b_2 a_n^2. \quad (28)$$

Значения коэффициентов b_0 , b_1 и b_2 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов формулы (28)

Тип ЭПС	b_0	b_1	b_2	Объясняемый разброс
Постоянного тока	-0,061	0,0022	1,0146	98,2
Переменного тока	-0,044	0,0019	0,8171	98,1
С асинхронными ТЭД	0,009	0,0011	0,5704	98,7

В заключение отметим, что при принятом выше подходе к определению массы тягового средства она, как и масса состава не фигурирует в уравнении движения как параметр, по-

этому для конкретной железнодорожной линии, т. е. при заданной зависимости $i(s)$, в рассматриваемой задаче при производстве тяговых расчетов кривая скорости $v(s)$ определяется только режимом ведения поезда и принятой величиной пусковой скорости и пускового ускорения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гетьман Г. К. Определение оптимальной по минимуму расхода энергии на движение поезда мощности локомотива // Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту: Зб. наук. пр. – Д.: Січ, 1999. – С. 177–182.
2. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
4. Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах) / Под ред. Н. В. Колодяжного – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.
5. Бещева Н. И. Местное пассажирское движение на электрифицированных линиях. – М.: Транспорт, 1965. – 224 с.
6. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / Под ред. А. И. Тищенко. Т. 1. – М.: Транспорт, 1976. – 432 с.
7. Исследование высокоскоростного электропоезда ЭР200 / Под ред. В. Г. Иноземцева. Сб. науч. тр. – М.: Транспорт, 1985. – 83 с.

Поступила в редколлегию 13.02.04.