

УДК 625.032.3

## Математическое моделирование внешних сил в режимах тяги и торможения, действующих на тяговый агрегат

Т. Л. Риполь–Сарагоси, Л. Ф. Риполь–Сарагоси, И. А. Яицков

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

**Для цитирования:** Риполь-Сарагоси Т. Л., Риполь-Сарагоси Л. Ф., Яицков И. А. Математическое моделирование внешних сил в режимах тяги и торможения, действующих на тяговый агрегат // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 625–630. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-625-630

### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы моделирования управления силой тяги при различных режимах для тягового агрегата ПЭ-2М, а также различных режимов торможения с целью недопущения аварий и крушений тягового подвижного состава. **Цель:** Продолжение анализа предпосылок для создания математической модели, позволяющей определить условия обеспечения безопасности перевозочного процесса в части недопущения разрыва автосцепок груженых тяговых агрегатов, думпкаров, а также возможного эффекта «набегания» (выдавливания вагонов), описанных в [1]. **Методика:** В настоящей статье предлагается рассмотреть моделирование воздействия внешних сил на тяговый агрегат и моторные думпкары. **Методы:** При решении этих задач предлагается смоделировать и описать воздействие сил тяги и сил торможения, возникающих при различных режимах ведения тягового агрегата. **Практическая значимость:** Обоснована необходимость расчета возникающих сил при управлении гружеными тяговыми агрегатами с целью недопущения крушений.

**Ключевые слова:** Силы тяги, силы торможения, аппроксимирование, колодка, реостатное торможение.

### 1. Силы тяги

В отличие от алгоритмов, предложенных в [2], с целью более точного описания процесса изменения силы тяги при переходных и установившихся режимах движения в работе моделируются тяговые характеристики подвижных единиц управления (электровоза и моторных думпкаров), которые на каждой позиции контроллера могут быть с достаточной точностью аппроксимированы аналитическими функциями вида [3, 4] (рисунки):

$$F_i^{(z)}(V_{2i}) = \sum_{k=0}^2 a_{kz} V_{2i}^k / \sum_{k=0}^2 b_{kz} V_{2i}^k, \quad (1)$$

где  $a_{kz}, b_{kz}$  — коэффициенты полинома числителя и знаменателя, соответствующего  $z$ -ой позиции контроллера.

Низшие позиции рукоятки контроллера (2, 3, 4) легко аппроксимируются функцией вида:  $F_i^{(z)}(V_{2i}) = a_z / (b_z + c_z V_{2i})$ , а первая позиция — линейной зависимостью:  $F_i^{(1)}(V_{2i}) = a_1 - b_1 V_{2i}$ .

Алгоритм управления тягой состоит в описании переключения контроллера, в интервале позиций  $[Z_{\min i}, Z_{\max i}]$  с какой-либо скоростью изменения позиций  $V_{KTi} > 0$  (при наборе позиций) и  $V_{KTi} < 0$  (при сбросе позиций). В первом приближении функцию изменения позиций контроллера принимаем линейной. Скорость набора позиций может меняться в процессе переключе-

чения позиций. Таким способом удается максимально приблизить процесс изменения силы тяги в модели к реальному.

Функция нарастания позиций контроллера записывается в виде:

$V_{KTi} > 0$  (набор позиций)

$$Z_i = \begin{cases} Z_{\min i}; & t \leq t_{KTi}; \\ Z_{\min i} + V_{KTi}(t - t_{KTi}); & t > t_{KTi}; \\ Z_{\max i}; & Z_i \geq Z_{\max i}. \end{cases}$$

$V_{KTi} < 0$ ; (сброс позиций) (2)

$$Z_i = \begin{cases} Z_{\min i}; & t \leq t_{KTi}; \\ Z_{\min i} + V_{KTi}(t - t_{KTi}); & t > t_{KTi}; \\ Z_{\max i}; & Z_i \leq Z_{\min i}, \end{cases}$$

где  $t_{KTi}$  — время начала переключения позиций контроллера.

Ограничение силы тяги по сцеплению учитывается в процессе движения [5–7] в виде:

$$F_{\text{сц}i}^{\max} = G_i \left( 0,01 + \frac{54}{250 + 75,6V_i} \right) \times \begin{cases} \frac{250 + 1,5R_i}{500 + 1,1R_i}; & R_i \leq 500 \text{ м}; \\ 1; & R_i > 500 \text{ м}. \end{cases} \quad (3)$$

## 2. Тормозные силы

Полная тормозная сила подвижной единицы карьерного поезда определяется по формуле:

$$B_i = K_i' \cdot \psi_{Ki}' \cdot m_i' + K_i'' \cdot \psi_{Ki}'' \cdot m_i'' + B'_{\text{ЭМРТ}i} \cdot m_i''' + B_{Pi}, \quad (4)$$

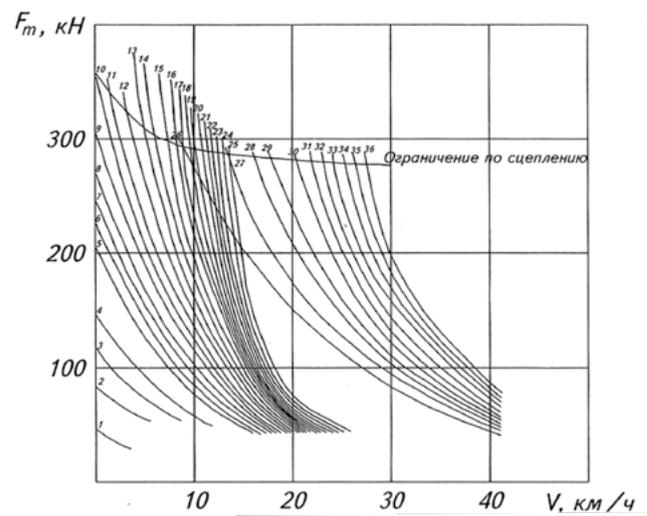
где  $K_i', K_i''$  — силы нажатия тормозных колодок для крайних и средних осей тележки;

$\psi_i', \psi_i''$  — коэффициенты трения колодок о бандаж для крайних средних осей тележки;

$m_i', m_i''$  — число колодок на крайних и средних осях экипажа;

$B'_{\text{ЭМРТ}i}, m_i'''$  — тормозная сила одного башмака ЭМРТ и число башмаков на одном экипаже;

$B_{Pi}$  — тормозная сила реостатного тормоза.



Тяговые характеристики тягового агрегата ПЭ-2М

Действительные коэффициенты трения колодок о бандаж рассчитывают по формулам:

– для чугунных стандартных колодок:

$$\psi_{Ki} = \frac{127,4 \cdot K_i + 7800}{(8,15 \cdot K_i + 100) \cdot (11,45 \cdot V_{2i} + 100)};$$

– для композиционных колодок:

$$\psi_{Ki} = \frac{30,75 \cdot K_i + 6030}{(2,04 \cdot K_i + 100) \cdot (5,06 \cdot V_{2i} + 100)}.$$

Здесь  $V_{2i}$  — измеряется в м/с,  $K_i$  — в кН.

Сила нажатия тормозных колодок на бандаж может быть вычислена [8, 9] по формуле:

$$K_i = A_i P_{\text{Ц}i},$$

где  $A_i$  — передаточный коэффициент рычажной передачи тормоза;

$P_{\text{Ц}i}$  — давление в тормозном цилиндре подвижной единицы.

Процесс наполнения и выпуска воздуха из тормозных цилиндров может быть описан следующим образом:

– при наполнении:

$$P_{\text{Ц}i} = \begin{cases} P'_{\min i}; & t \leq t_{Ti}; \\ P'_{\max i} (t - t_{Ti}) / \tau'_i; & t_{Ti} < t \leq \tau'_i + t_{Ti}; \\ P'_{\max i}; & t > \tau'_i + t_{Ti}. \end{cases} \quad (5)$$

– при отпуске тормозов:

$$P_{Цi} = \begin{cases} P''_{\max i}; & t \leq t_{O_i}; \\ P''_{\max i} (t_{O_i} + \tau''_i - t) / \tau''_i, & t_{O_i} < t \leq \tau''_i + t_{O_i}; \\ P''_{\min i}; & t > \tau''_i + t_{O_i}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $P'_{\min i}, P''_{\min i}$  — давление в тормозном цилиндре до начала торможения и после отпуска;  
 $P'_{\max i}, P''_{\max i}$  — давление в тормозном цилиндре после торможения и перед отпуском;  
 $t_{Ti}, t_{O_i}$  — время начала торможения и отпуска  $i$ -го вагона;  
 $\tau'_i, \tau''_i$  — время наполнения тормозного цилиндра с давления  $P'_{\min i}$  до давления  $P'_{\max i}$  и время разрядки тормозного цилиндра на величину  $(P''_{\max i} - P''_{\min i})$ .

Введение в алгоритм величин  $P'_{\min i}, P''_{\min i}$ , которые в общем случае могут быть неравными нулю, позволяет моделировать процессы ступенчатого торможения и отпуска тормозов поезда.

Так как карьерный поезд является короткооставным, то не представляет труда для каждого режима торможения или отпуска задать в качестве исходных данных величины для каждой подвижной единицы:

$$P'_{\min i}, P''_{\min i}, P'_{\max i}, P''_{\max i}, t_{Ti}, t_{O_i}, \tau'_i, \tau''_i; i = \overline{1, N}.$$

Числовые значения этих величин определены из анализа реальных диаграмм наполнения и разрядки тормозных цилиндров на модели тормозной сети карьерного поезда, смонтированной на тормозной станции РГУПС. Это позволило получить довольно высокую сходимость результатов расчета с экспериментальными данными. Предложенный метод определения констант, входящих в уравнения (5) и (6), позволяет учесть некоторые нетипичные особенности тормозной системы (например, неисправности и плохую работу тормозных приборов в конкретном опыте).

Тяговые агрегаты ПЭ2М оборудованы электромагнитным рельсовым тормозом (ЭМРТ). Приемлемым является введение в расчет фор-

мулы для действительной тормозной силы ЭМРТ, полученной в натуральных испытаниях подвижного состава:

$$B'_{ЭМРТi} = 18,934 \cdot \exp(-0,05472 \cdot V_{2i}), \text{ кН.}$$

Одним из основных тормозных режимов при эксплуатации карьерных поездов, наряду с пневматическим торможением, является торможение реостатное. Алгоритм вычисления тормозной силы при реостатном торможении аналогичен алгоритму вычисления силы тяги. Тормозные характеристики тягового агрегата ПЭ2М аппроксимированы полиномами 5-й степени на каждой тормозной позиции контроллера:

$$B_{Pi}^{(Z)} = \sum_{k=0}^5 C_{iZ} \cdot V_{2i}^k.$$

Функция позиционного регулирования тормозной силы тягового агрегата реализуется уравнениями (2).

На тормозную силу реостатного тормоза наложены следующие ограничения:

1. Ограничение по наибольшей скорости:

$$V_{2i} \leq 18 \text{ м/с.}$$

2. Ограничение по наибольшему напряжению на тяговых двигателях:

$$B_{Hi}^{\max} = b_1 + b_2 \cdot V_{2i} + b_3 \cdot V_{2i}^2.$$

3. Ограничение по сцеплению, аналогичное ограничениям для силы тяги.

Таким образом, тормозная сила реостатного тормоза  $i$ -ой подвижной единицы может быть вычислена следующим образом [10]:

$$B_{Pi}^{(Z)} = \begin{cases} B_{Pi}^{(Z)}(V_{2i}, Z_i); & B_{Pi}^{(Z)} \leq B_{Hi}^{\max}; B_{Pi}^{(Z)} \leq B_{ЦЦi}^{\max}; \\ B_{Hi}^{\max}; & B_{Pi}^{(Z)} > B_{Hi}^{\max}; B_{Pi}^{(Z)} \leq B_{ЦЦi}^{\max}; \\ B_{ЦЦi}^{\max}; & B_{Pi}^{(Z)} \leq B_{Hi}^{\max}; B_{Pi}^{(Z)} > B_{ЦЦi}^{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

## Выводы

1. Актуальность предлагаемой темы научного исследования представляет интерес и является востребованной.

2. Предполагаемые результаты, полученные путем математического моделирования, дадут возможность значительно повысить безопасность движения подвижного состава.

3. Предложены методы расчета сил тяги и сил торможения при различных режимах ведения тягового агрегата.

4. Аппроксимированы аналитическими функциями тяговые характеристики подвижных единиц управления (электровоза и моторных думпкаров).

5. Предложены методы моделирования процессов режимов торможения и отпуска.

6. Определен и обоснован предпочтительный режим торможения исходя из условий ограничения и эксплуатации.

## Список источников

1. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Анализ предпосылок создания математической модели функционирования автосцепок груженых тяговых агрегатов / Л. Ф. Риполь-Сарагоси, Т. Л. Риполь-Сарагоси, И. А. Яицков // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — № 4. — С. 902–908. — DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908.

2. Риполь-Сарагоси Т. Л. Исследование влияния температурного режима катушки на время включения электромагнитного рельсового тормоза (ЭМРТ) / Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 3(87). — С. 35–43.

3. Патент RU 2361761 Российская Федерация. Электромагнитный рельсовый тормоз: заявл. 07.02.2008; опубл. 20.07.2009 / Л. В. Балон, В. А. Соломин, Л. Ф. Риполь-Сарагоси. МПК В61Н7/08.

4. Савушкин Р. А. Автосцепка СА-3Т для вагонов тяжеловесного движения: особенности конструкции и

технологии изготовления / Р. А. Савушкин, А. М. Орлова, Р. А. Кудрявцев, С. А. Пономарев и др. // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2018. — № 1(53). — С. 30–32.

5. Правила тяговых расчетов для поездной работы промышленных электровозов и тяговых агрегатов переменного тока. — 2-е изд. — М.: ПромтрансНИИпроект, 1977. — Вып. 4323.

6. Правила тяговых расчетов для тепловозов на промышленном транспорте. — 2-е изд. — М.: ПромтрансНИИпроект, 1977. — Вып. 4324.

7. Кравчук В. В. Повышение безопасности движения поездов повышенной массы и длины / В. В. Кравчук, И. И. Доронина, Е. А. Харин. — Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщений, 2005.

8. Гребенюк П. Т. Сопротивление движению подвижного состава в S-образных кривых / П. Т. Гребенюк // Вестник ВНИИЖТ. — 1987. — № 1.

9. Потапов М. Г. Карьерный транспорт. — М.: Недра, 1985.

10. Ромен Ю. С. Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагонов в зависимости от их загрузки / Ю. С. Ромен, Л. А. Мугинштейн, Л. И. Неверова // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 3(46). — С. 64–68.

Дата поступления: 09.06.2025

Решение о публикации: 07.07.2025

## Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — д-р техн. наук, проф. кафедры «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте»;

ripol-saragosi@mail.ru

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Леонид Францискович — канд. техн. наук., доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; el.siete.07@mail.ru

ЯИЦКОВ Иван Анатольевич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; yia@rgups.ru

## A Mathematical Model of External Forces Acting on the Train Traction System in Both Traction and Brake Modes

T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi, I. A. Yaitskov

Rostov State Transport University, 2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

**For citation:** Ripol-Saragosi T. L., Ripol-Saragosi L. F., Yaitskov I. A. A Mathematical Model of External Forces Acting on the Train Traction System in Both Traction and Brake Modes // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 625–630. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-625-630

### Summary

The paper touches upon the issues of modelling the traction force control of the “PE-2M” industrial electric locomotive in various brake modes to ensure freight train safety and to avoid train accidents. **Purpose:** To analyse the prerequisites for creating a mathematical model determining the conditions for ensuring the safety of the transportation process in terms of preventing the uncoupling of automatically coupled traction units and dump cars and avoiding the car “crowding” (a car being squeezed out) described in [1]. **Methodology:** A mathematical model was proposed that describes the external forces have an impact on the traction units and motor dump cars. **Methods:** It is proposed to simulate and describe how traction and braking forces work in different motion modes. **Practical significance:** Calculating the arising forces when operating heavy-duty traction units is a valid method for preventing crashes.

**Keywords:** Traction force, brake force, approximation, brake shoe, rheostatic braking.

### References

1. Ripol'-Saragosi L. F., Ripol'-Saragosi T. L., Yaitskov I. A. Analiz predposylok sozdaniya matematicheskoy modeli funktsionirovaniya avtoscepok gruzhenykh tyagovykh agregatov [Analysis of prerequisites for creating a mathematical model of the operation of couplers of loaded traction units]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2024, vol. 21, Iss. 4, pp. 902–908. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908. (In Russian)
2. Ripol'-Saragosi T. L., Ripol'-Saragosi L. F. Issledovanie vliyaniya temperaturnogo rezhima katushki na vremya vklyucheniya elektromagnitnogo rel'sovogo tormoza (EMRT) [Research on the influence of the coil temperature regime on the switching time of the electromagnetic rail brake (EMRB)]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov Transport University]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2022, Iss. 3(87), pp. 35–43. (In Russian)
3. Balon L. V., Solomin V. A., Ripol'-Saragosi L. F. *Elektromagnitnyy rel'sovyy tormoz* [Electromagnetic rail brake]. Patent RF, no. 2361761, 2009. (In Russian)
4. Savushkin R. A., Orlova A. M., Kudryavtsev R. A., Ponomarev S. A. et al. Avtosyepka SA-3T dlya vagonov tyazhelovesnogo dvizheniya: osobennosti konstruktssii i tekhnologii izgotovleniya [SA-3T coupler for heavy-load cars: design features and manufacturing technology]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Cars and car service]. 2018, Iss. 1(53), pp. 30–32. (In Russian)
5. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty promyshlennykh elektrovozov i tyagovykh agregatov peremennogo toka* [Rules for traction calculations for train operations of industrial electric locomotives and alternating

current traction units]. Moscow: PromtransNIIproekt Publ., 1977, Iss. 4323. (In Russian)

6. *Pravila tyagovykh raschetov dlya teplovozov na promyshlennom transporte* [Rules for traction calculations for diesel locomotives in industrial transport]. Moscow: PromtransNIIproekt Publ., 1977, Iss. 4324. (In Russian)

7. Kravchuk V. V., Doronina I. I., Kharin E. A. *Povyshenie bezopasnosti dvizheniya poezdov povyshennoy massy i dliny* [Improving the safety of movement of trains of increased weight and length]. Khabarovsk: Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniy Publ., 2005. (In Russian)

8. Grebenyuk P. T. *Soprotivlenie dvizheniyu podvizhnogo sostava v S-obraznykh krivykh* [Resistance to movement of rolling stock in S-shaped curves]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 1987, Iss. 1. (In Russian)

9. Potapov M. G. *Kar'ernyy transport* [Kar'ernyy transport]. Moscow: Nedra Publ., 1985. (In Russian)

10. Romen Yu. S., Muginshtein L. A., Neverova L. I. *Vliyanie prodol'nykh sil v poezdakh na opasnost' skhoda*

*vagonov v zavisimosti ot ikh zagruzki* [The influence of long-distance trains on the danger of wagon transportation depending on their loading]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2013, Iss. 3(46), pp. 64–68. (In Russian)

Received: June 09, 2025

Accepted: July 07, 2025

**Author's information:**

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department “Heat Engineering at Railway Transport”; ripol-saragosi@mail.ru

Leonid F. RIPOL-SARAGOSI — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Cars and Car Maintenance”; el.siete.07@mail.ru

Ivan A. YAITSKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department “Cars and Car Maintenance”; yia@rgups.ru