

УДК 629.4.015

## Анализ изменения нагрузок, передаваемых от колесных пар двухосной тележки локомотива на рельсы при развитии вращающего момента тяговыми электродвигателями

А. Н. Савоськин<sup>1</sup>, А. А. Чучин<sup>1</sup>, А. Н. Калякулин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

<sup>2</sup>Приволжский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 443066, г. Самара, ул. Свободы, 2 В.

**Для цитирования:** Савоськин А. Н., Чучин А. А., Калякулин А. Н. Анализ изменения нагрузок, передаваемых от колесных пар двухосной тележки локомотива на рельсы при развитии вращающего момента тяговыми электродвигателями // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 112–120. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-112-120

### Аннотация

**Цель:** Определение изменения вертикальных нагрузок, передаваемых от колесных пар двухосной тележки локомотива на рельсы из-за развития вращающего момента тяговых электродвигателей, что ухудшает условия сцепления колес с рельсами. Для достижения поставленной цели выполнены: разработка расчетной схемы и определение моментов, возникающих в тяговой передаче при включении в работу тяговых электродвигателей; эти моменты выражены через силы взаимодействия элементов тяговой передачи, которые перенесены на раму тележки и на оси колесных пар; определение изменения вертикальных сил, передаваемых от каждой колесной пары на рельсы из-за действия вращающих моментов тяговых электродвигателей. **Методы:** Применение законов теоретической механики; составление и решение уравнений равновесия. **Результаты:** В двухосной тележке локомотивов первая по ходу движения колесная пара разгружается, а вторая догружается на такую же величину. В частности, для электровозов 2(3)ЭС5К такое перераспределение вертикальных нагрузок составит 3,1 % от нагрузки на ось. **Практическая значимость:** Результаты работы представляют интерес для разработки систем автоматического управления сцеплением колесных пар локомотивов с рельсами.

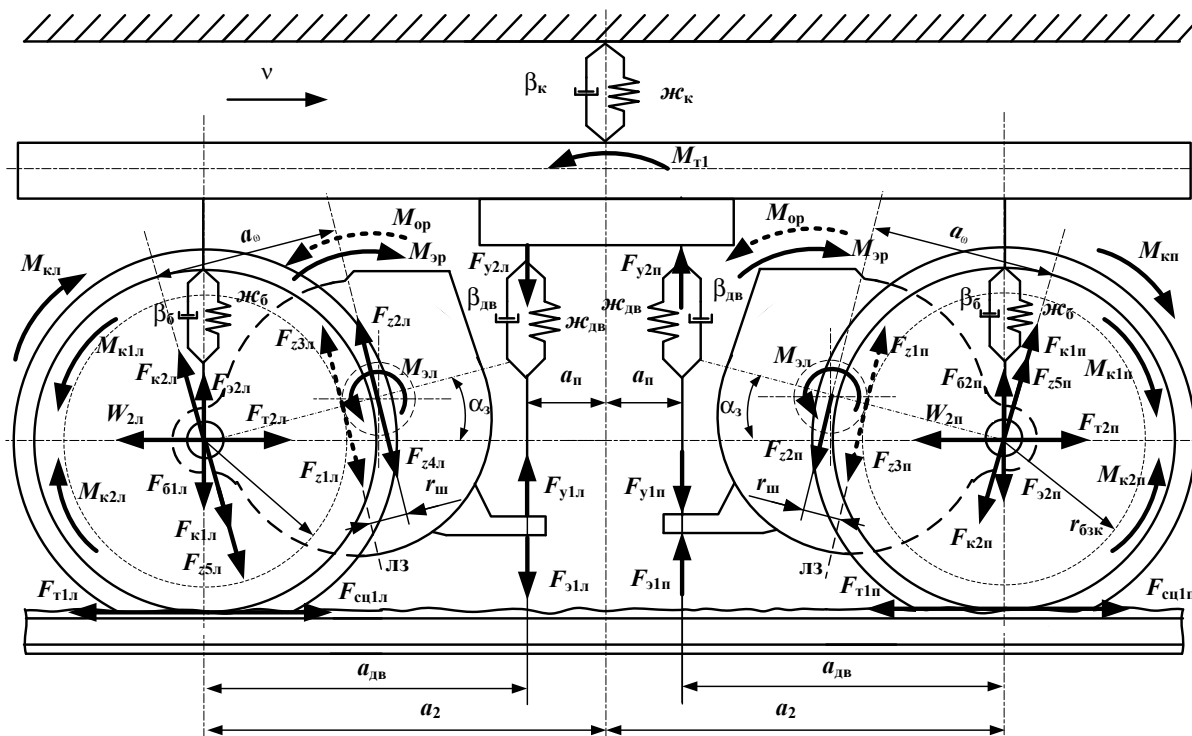
**Ключевые слова:** Электровоз, колесная пара, нагрузка от колесной пары на рельсы, буксование, вращающий момент тягового электродвигателя.

### Введение

В соответствии с общими техническими требованиями, предъявляемыми к локомотивам, эксплуатирующимся в Российской Федерации, расчетная нагрузка от колесной пары локомотива должна обеспечивать соответствие показателей, характеризующих допустимое его воздействие на железнодорожный путь. В частности, относительная разность нагрузок по колесам колес-

ных пар локомотива должна быть не более 4 %, а относительная разность нагрузок по осям в одной тележке и по сторонам локомотива или его секции должна быть не более 3 % [1, 2].

В статическом состоянии локомотива эти требования выполняются путем регулировки рессорного подвешивания, однако при трогании локомотива с места возникает изменение нагрузок, передаваемых от колесных пар на рельсы.



Силы и моменты, действующие на двухстороннюю тяговую передачу двухосной тележки

Экспериментальное исследование данного явления показало, что наибольшая величина изменений нагрузок зависит от величины реализуемой силы тяги и может достигать 20 %. Изменение нагрузок в первую очередь обусловлено реализацией вращающего момента тяговыми электродвигателями (ТЭД), а также тем, что сила тяги локомотива  $F_k$  передается на поезд через автосцепки, расположенные ниже центра масс кузова, что приводит к появлению момента, вызывающего поворот кузова, сопровождающийся разгрузкой передней и догрузкой задней тележек. Все это вместе взятое приводит в конечном итоге к разгрузке передних осей тележек и догрузке задних, что вызывает ухудшение условий сцепления передних колесных пар с рельсами.

В настоящее время проводится большое количество научных исследований, направленных на предотвращение буксования путем разработки способов его обнаружения и разработке устройств защиты [3–10], а также совершенство-

вания систем пескоподачи локомотивов [11–13]. Однако являются неисследованными процессы изменения вертикальных нагрузок, передаваемых от колесных пар локомотива на рельсы при развитии вращающего момента тяговыми электродвигателями, а также при развитии силы тяги с учетом различных схем продольных связей тележек с кузовом.

**Определение моментов и сил, действующих в расчетной схеме двухосной тележки при реализации вращающего момента тяговыми электродвигателями**

В настоящей статье ограничимся рассмотрением явлений, возникающих при реализации вращающего момента тяговыми двигателями двухосной тележки электровоза. Для этого рассмотрим силы и моменты, действующие на элементы тягового привода (рисунок) в режиме трогания электровоза с места. На валах ТЭД при этом создаются электромагнитные моменты  $M_{\rho 1} = M_{\rho 2} = M_{\rho}$ ,

направленные против часовой стрелки. Их появление сопровождается возникновением реактивного момента  $M_{эп}$ , приложенного к остову каждого ТЭД и направленного по часовой стрелке.

Моменты передаются на шестерни (Ш) редукторов соответствующих ТЭД и далее через большие зубчатые колеса (БЗК) на оси колесных пар. Заменим эти моменты парами сил, которые равны:

$$\frac{|F_{z1п,л}| = |F_{z2п,л}| = M_{э}}{2r_{ш}}, \quad (1)$$

где  $r_{ш}$  — радиус шестерни, а цифра «2» учитывает, что ТЭД электровоза имеют двухстороннюю тяговую передачу.

При этом силы  $F_{z1п,л}$ , приложенные от зубьев Ш к зубьям БЗК, направлены по линии зацепления ЛЗ, имеют разные знаки:  $F_{z1п} = -F_{z1л}$ . Силы  $F_{z2п,л}$  приложены от шестерен к корпусу редуктора через подшипники этих шестерен так, что  $F_{z2л} = -F_{z2п}$ .

При действии сил  $F_{z1}$  от Ш на зубья БЗК в последних возникают силы реакции  $F_{z3п,л}$ , приложенные от зубьев БЗК к зубьям Ш и также направленные в разные стороны на правой и левой колесных парах:  $F_{z3л} = -F_{z3п}$ .

Реактивный момент  $M_{эп} = -M_{э}$  заменим парами сил  $-F_{э1л}$  и  $F_{э2л}$ , а также  $F_{э1п}$  и  $-F_{э2п}$ . Силы  $-F_{э1л}$  и  $F_{э1п}$  приложены от кронштейнов ТЭД к пружинам подвески двигателей, и при этом сила  $F_{э1п}$  направлена вверх, а сила  $-F_{э1л}$  направлена вниз. В отличие от этого, силы  $F_{э2л}$  и  $-F_{э2п}$ , приложенные от остовов ТЭД к осям колесных пар, направлены противоположно:

$$-F_{э1л} = F_{э1п} = F_{э2л} = -F_{э2п} = \frac{M_{э}}{a_{дв}}. \quad (2)$$

Под действием силы  $F_{э1п}$  пружина подвески правого ТЭД к раме тележки сжимается и передает реакцию  $-F_{y1п}$  на кронштейн подвески,

направленную вниз, и реакцию  $F_{y2п}$  на раму тележки, направленную вверх. В отличие от этого, пружина подвески левого ТЭД растягивается и образует аналогичные реакции с противоположными знаками:  $F_{y1л}$  и  $-F_{y2л}$ .

Силы  $F_{э1п}$  и  $-F_{y1п}$ , а также  $-F_{э2п}$  и  $F_{y1л}$  компенсируются, а силы  $F_{y2п}$  и  $-F_{y2л}$  образуют пару сил с моментом:

$$M_{т1} = 2F_{y2п,л}a_{п} = \frac{2M_{э}a_{п}}{a_{дв}}. \quad (3)$$

Этот момент стремится повернуть раму тележки против часовой стрелки и вызывает изменение прогиба пружин буксового подвешивания. Правая буксовая пружина распрямляется, а левая — сжимается, и возникают реакции этих пружин  $-F_{б1л}$  и  $F_{б2п}$ :

$$-F_{б1п} = F_{б2п} = \frac{M_{т1} M_{э} a_{п}}{2a_2 = a_2 a_{дв}}. \quad (4)$$

При этом сила  $F_{б2п}$ , направленная вверх, приложена от пружины к оси колесной пары и вызывает разгрузку первой оси на величину, определяемую формулой (3), а сила  $-F_{б1л}$ , направленная вниз, вызывает догрузку второй оси на эту же величину.

### Определение сил, действующих на правую и левую колесные пары тележки

Пользуясь принципами теоретической механики, перенесем силы  $F_{z3п,л}$  на оси колесных пар, обозначив их  $F_{к2п,л}$ . Эти силы будут равны:

$$-F_{к2п} = F_{к2л} = F_{z3п,л} = \frac{M_{э}}{2r_{ш}}. \quad (5)$$

Прибавим моменты  $M_{к1п,л} = F_{z3п,л}r_{бзк}$  от сил  $F_{z3}$ :

$$M_{к1п,л} = F_{z3п,л}r_{бзк} = 0,5\mu M_{э}, \quad (6)$$

где  $r_{бзк}$  — радиус большого зубчатого колеса;

$\mu$  — передаточное отношение редуктора:

$$\mu = \frac{r_{\text{бзк}}}{r_{\text{ш}}}.$$

Силы  $F_{\text{к2п, л}}$  приложены от больших зубчатых колес к оси колесной пары и уравновешиваются реактивными силами  $F_{\text{к1п, л}} = -F_{\text{к2п, л}}$ , приложенными от оси к большим зубчатым колесам. С учетом (1) и (3) силы  $F_{\text{к1п, л}}$  будут равны:

$$F_{\text{к2п, л}} = -F_{\text{к1п, л}} = F_{\text{з3п, л}} = \frac{M_{\text{э}}}{2} r_{\text{ш}}. \quad (7)$$

Пары сил  $F_{\text{к2п, л}}$  и  $F_{\text{з1п, л}}$  создают моменты

$$M_{\text{к2п, л}} = -M_{\text{к1п, л}} = F_{\text{з3п, л}} r_{\text{бзк}} = -0,5\mu M_{\text{э}}. \quad (8)$$

Поскольку моменты  $M_{\text{к2п, л}}$  создаются в каждом редукторе, то общий момент  $M_{\text{кп, л}}$ , вращающий колесные пары по часовой стрелке, будет равен:

$$M_{\text{кп, л}} = 2M_{\text{к2п, л}} = \mu M_{\text{э}}. \quad (9)$$

Так как силы  $F_{\text{к2п, л}}$  приложены от больших зубчатых колес каждого редуктора к оси колесной пары, то в сумме на каждую ось будут действовать силы:

$$|F_{\text{о1п, л}}| = 2|F_{\text{к2п, л}}| = \frac{M_{\text{э}}}{r_{\text{ш}}}. \quad (10)$$

При этом сила  $F_{\text{о1п}}$  имеет знак минус и направлена вниз, следовательно, она догружает правую колесную пару. Вместе с тем сила  $F_{\text{о1л}}$  имеет знак плюс и направлена вверх, следовательно, она разгружает левую колесную пару.

Момент  $M_{\text{кп, л}}$  заменим парой горизонтальных сил  $F_{\text{т1п, л}}$  и  $F_{\text{т2п, л}}$ , приложенных к каждому колесу колесной пары:

$$F_{\text{т2п, л}} = -F_{\text{т1п, л}} = \frac{M_{\text{к}}}{r_{\text{кп}}} = \frac{M_{\text{э}}\mu}{r_{\text{кп}}}, \quad (11)$$

где  $r_{\text{кп}}$  — радиус колесной пары по кругу катания.

При этом силы  $-F_{\text{т1п, л}} = -\frac{M_{\text{э}}\mu}{r_{\text{кп}}}$  приложены

от колес к рельсам в точках их контакта и направлены назад по ходу движения, а силы

$$F_{\text{т2п, л}} = \frac{M_{\text{э}}\mu}{r_{\text{кп}}} \text{ — в точках крепления оси колес-$$

ной пары к раме тележки и направлены по ходу движения.

Силы  $F_{\text{т1п, л}}$  уравновешиваются реакциями рельсов на колесо — силами сцепления  $F_{\text{сч1п, л}}$ , которые называют касательными силами тяги. Силы  $F_{\text{т2п, л}}$  уравновешиваются сопротивлениями движения поезда  $W_{\text{о2п, л}}$ , приведенными к одному колесу колесной пары локомотива.

Силы  $F_{\text{з2п, л}}$ , приложенные через подшипники от шестерен левого и правого редукторов к корпусу редуктора, уравновешиваются силами  $F_{\text{з4п, л}}$ , приложенными от корпуса редуктора к оси ТЭД. Перенесем силы  $F_{\text{з4п, л}}$  на ось колесной пары, обозначив их через  $-F_{\text{з5п, л}}$ , и добавим реактивный момент  $M_{\text{оп}}$ , направленный против часовой стрелки:

$$M_{\text{оп}} = F_{\text{з5п, л}} a_{\omega} = \frac{M_{\text{э}} a_{\omega}}{2r_{\text{ш}}}. \quad (12)$$

Силы  $F_{\text{з5п, л}}$ , приложенные от корпуса редуктора к оси колесной пары, в соответствии с (1) будут равны:

$$F_{\text{з5п}} = -F_{\text{з5л}} = F_{\text{з2п, л}} = \frac{M_{\text{э}}}{2r_{\text{ш}}}. \quad (13)$$

Таким образом, силы  $F_{\text{з5п}}$  разгружают правую колесную пару, а поскольку на оси имеются два редуктора, то эта разгрузка составит:

$$F_{\text{о2п}} = 2F_{\text{з5п}} = \frac{M_{\text{э}}}{r_{\text{ш}}}. \quad (14)$$

В то же время силы  $F_{\text{з5л}}$  догружают левую колесную пару на такую же величину:

$$-F_{o2л} = -2F_{z5л} = -\frac{M_э}{r_{ш}}. \quad (15)$$

Таким образом, в соответствии с (2), (4), (8), (10) и (11) на колесные пары тележки действуют следующие силы, с учетом изменения (2, 3, 4) формул (вместо  $a_{\omega}$ , в знаменателе  $a_{дв}$ ):

– на правую:

$$-F_{э2п} = -\frac{M_э}{a_{дв}}, \quad (16)$$

$$F_{62п} = \frac{M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}}, \quad (17)$$

$$-F_{o1п} = \frac{-M_э}{r_{ш}}, \quad (18)$$

$$F_{o2п} = \frac{M_{эл}}{r_{ш}}; \quad (19)$$

– на левую:

$$F_{э2л} = \frac{M_э}{a_{дв}}, \quad (20)$$

$$-F_{61л} = \frac{-M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}}, \quad (21)$$

$$F_{o1л} = \frac{M_э}{r_{ш}}, \quad (22)$$

$$-F_{o2л} = \frac{-M_{эл}}{r_{ш}}. \quad (23)$$

Определение нагрузок, передаваемых от каждой колесной пары на рельсы

Найдем проекции на ось  $z$  сил, приложенных к осям колесных пар. Равнодействующие этих сил соответствуют изменениям нагрузок  $2П$ , передаваемых от каждой колесной пары на рельсы. Обозначим эти изменения нагрузок  $\Delta П_{п1}$  для правой колесной пары и  $\Delta П_{л1}$  для левой.

Параметры механической части электровоза 2(3) ЭС5К

	Обозначение	Значение	Размерность
Справочные значения из инструкции по эксплуатации	$\mu$	88/21 = 4,19	—
	$r_{кп}$	0,625	м
	$2a$	2,9	м
Вычисленные с чертежей тележки и колесной пары	$\alpha_{\omega}$	0,604	м
	$a_{дв}$	~ 1,160	м
	$r_{бзк}$	~ 0,49	м
	$r_{ш}$	~ 0,117	м
	$a_{п}$	~ 0,29	м
	$\alpha_3$	~ 30	град.
	$\cos \alpha_3$	0,866	—

Тогда изменение нагрузки оси левой колесной пары будет равно:

$$\Delta П_{л1} = \frac{M_э}{a_{дв}} - \frac{M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}} + \left( \frac{M_э}{r_{ш} - \frac{M_э}{r_{ш}}} \right) \cos \alpha_3 =$$

$$= \frac{M_э}{a_{дв}} - \frac{M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}}. \quad (24)$$

$$\Delta П_{п1} = -\frac{M_э}{a_{дв}} + \frac{M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}}. \quad (25)$$

Таким образом, выполняется условие:

$$\Delta П_{п1} = -\Delta П_{л1}. \quad (26)$$

Это означает, что величина разгрузки правой колесной пары равна величине догрузки левой и эти величины можно обозначить как  $\pm \Delta П_{\Sigma}$ , где знак «плюс» относится к левой колесной паре, а знак «минус» — к правой.

Примем, что при трогании с места максимальное значение момента  $M_э$  определяется моментом  $M_{снб}$  от максимальной силы сцепления колес локомотива с рельсами, где  $\psi_6$  — максимальное значение коэффициента сцепления, которое принимается равным  $\psi_6 = 0,3$ .

Приравнивая значения моментов с учетом передаточного отношения  $\mu = \frac{r_{\text{бзк}}}{r_{\text{ш}}}$ , запишем:

$M_3 \mu = \psi_6 2\Pi r_{\text{кп}}$ . Отсюда:

$$M_3 = \psi_6 2\Pi \frac{r_{\text{кп}}}{\mu} = \psi_6 2\Pi \frac{r_{\text{кп}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{бзк}}}. \quad (27)$$

Подставим это выражение  $M_3$  в формулы (26) и (27):

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_{\Sigma} &= \pm\psi_6 2\Pi \frac{r_{\text{кп}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{бзк}}} \times \\ &\times \left[ \frac{1}{2a_{\omega}} - \frac{a_{\text{п}}}{a_2 a_{\omega}} + \left( \frac{r_{\text{бзк}}}{r_{\text{ш}}} - \frac{1}{r_{\text{ш}}} \right) \cos \alpha_3 \right] = \\ &= \pm\psi_6 2\Pi \frac{r_{\text{кп}}}{r_{\text{бзк}}} \times \\ &\times \frac{a_2 r_{\text{ш}} - 2r_{\text{ш}} a_{\text{п}} + 2a_2 a_{\omega} (r_{\text{бзк}} - 1) \cos \alpha_3}{2a_2 a_{\omega}} = \\ &= \pm\psi_6 2\Pi \times \\ &\times \frac{r_{\text{кп}}}{r_{\text{бзк}}} \frac{-2r_{\text{ш}} a_{\text{п}} + a_2 [r_{\text{ш}} + 2a_{\omega} (r_{\text{бзк}} - 1) \cos \alpha_3]}{2a_2 a_{\omega}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Разделим эту формулу на  $2\Pi$  и запишем выражения для изменения нагрузок колесных пар в процентах:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\Pi_{\Sigma}}{2\Pi} 100\% &= \pm \frac{\psi_6 r_{\text{кп}}}{r_{\text{бзк}}} \times \\ &\times \frac{-r_{\text{ш}} a_{\text{п}} + a_2 [r_{\text{ш}} + 2a_{\omega} (r_{\text{бзк}} - 1) \alpha_3]}{2a_2 a_{\omega}} 100\%. \end{aligned} \quad (29)$$

Определим величины изменения нагрузок колесных пар по формуле (29) для электровоза 2(3) ЭС5К, параметры которого приведены в таблице.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\Pi_{\Sigma}}{2\Pi} 100\% &= \pm\psi_6 \frac{r_{\text{кп}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{бзк}}} \left( \frac{1}{a_{\text{дв}}} - \frac{a_{\text{п}}}{a_2 a_{\text{дв}}} \right) 100\% = \\ &= \pm\psi_6 \frac{r_{\text{кп}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{бзк}}} \left( \frac{a_2 - a_{\text{п}}}{a_2 a_{\text{дв}}} \right) 100\% = \\ &= \pm 0,045 \left( \frac{1,45 - 0,29}{1,45 \cdot 1,16} \right) 100\% = \pm 3,1\%. \end{aligned}$$

## Выводы

1. При развитии силы тяги тяговыми электродвигателями локомотивов происходит перераспределение вертикальных нагрузок, передаваемых от колес на рельсы.

2. Если принять, что при трогании развивается максимальная сила тяги, соответствующая значению коэффициента сцепления колес с рельсами, равному 0,3, то в двухосной тележке первая по ходу движения колесная пара разгружается на 3,1%, а вторая догружается на такую же величину.

3. Аналогичные расчеты по перераспределению вертикальных нагрузок от колес на рельсы необходимо выполнить и для трехосных тележек локомотивов, а также для учета влияния поворота кузова при передаче силы тяги от локомотива к поезду.

## Список источников

1. ГОСТ Р 55364—2012. Электровозы. Общие технические требования.
2. ГОСТ Р 55050—2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний.
3. Грачев В. В. Интеллектуальная система обнаружения боксования колесных пар в тяговом приводе постоянного тока / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, В. А. Кручек и др. // Электротехника. — 2019. — № 10. — С. 17–23.
4. Патент на полезную модель № 40278 U1 Российская Федерация, МПК В61С 15/12, В60L 3/10. Электронная система защиты от боксования и юза электровоза с плав-

ным зонно-фазовым регулированием напряжения: № 2004111157/22: заявл. 13.04.2004: опубл. 10.09.2004 / В. Н. Лисунов, Н. В. Есин; заявитель Омский государственный университет путей сообщения.

5. Колпахчян П. Г. Совершенствование системы защиты от юза пассажирского электровоза / П. Г. Колпахчян, В. Е. Андреев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — № 2. — С. 100–113. — DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-100-113.

6. Патент № 2811618 С1 Российская Федерация, МПК В60L 3/10, В60L 15/20, В61С 15/08. Способ защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2022130451: заявл. 23.11.2022: опубл. 15.01.2024 / И. Р. Харисов, Д. Э. Лимонов, К. Р. Коробицын; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Уральские локомотивы».

7. Литовченко А. Г. Противобоксовочная защита тягового подвижного состава / А. Г. Литовченко, В. В. Литовченко // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 24–25 марта 2020 года / Под редакцией И. К. Лакина. — Красноярск: Акционерное общество «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», 2020. — С. 208–215.

8. Космодамианский А. С. Разработка устройств предотвращения боксования локомотива на основе объектного моделирования технических решений / А. С. Космодамианский, С. И. Баташов, Е. В. Николаев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. — 2022. — № 4(18). — С. 79–86. — DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-79-86.

9. Воробьев В. И. Анализ способов обнаружения боксования локомотива / В. И. Воробьев, С. Н. Злобин, О. В. Измеров и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2022. — № 6(356). — С. 14–22. — DOI: 10.33979/2073-7408-2022-356-6-14-22.

10. Патент № 2702549 С1 Российская Федерация, МПК В60L 3/10, В61С 15/08, В60L 15/20. Способ обна-

ружения боксования и юза колес транспортного средства с электрической передачей: № 2018144759: заявл. 17.12.2018: опубл. 08.10.2019 / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава».

11. Круглов С. П. Адаптивная подсыпка песка на локомотиве / С. П. Круглов, С. В. Ковыршин, П. Ю. Иванов и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2021. — № 2(70). — С. 104–112. — DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112.

12. Патент № 2780751 С1 Российская Федерация, МПК В61С 15/10, В60В 39/04. Способ адаптивного управления автоматической подачей песка под колеса локомотива: №2022104845: заявл. 22.02.2022: опубл. 30.09.2022 / С. П. Круглов, С. А. Исупов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения.

13. Коновалов П. Ю. Совершенствование пневматической системы пескоподачи электровозов внедрением дросселирующих устройств с сервоприводом / П. Ю. Коновалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 1(77). — С. 25–33.

Дата поступления: 30.12.2024

Решение о публикации: 31.01.2025

#### **Контактная информация:**

САВОСЬКИН Анатолий Николаевич — д-р техн. наук, проф.; [elmechtrans@mail.ru](mailto:elmechtrans@mail.ru)

ЧУЧИН Антон Александрович — канд. техн. наук, доц.; [chuchin\\_anton@mail.ru](mailto:chuchin_anton@mail.ru)

КАЛЯКУЛИН Алексей Николаевич — канд. техн. наук; [alexeiruz@yandex.ru](mailto:alexeiruz@yandex.ru)

## Analysis of the Load Transmission from the Locomotive Two-Axle Bogie Wheels to the Rails at the Torque Development in a Traction Motor

A. N. Savoskin<sup>1</sup>, A. A. Chuchin<sup>1</sup>, A. N. Kalyakulin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

<sup>2</sup>Volga State University of Railway Engineering, 2V, Svobody str., Samara, 443066, Russian Federation

**For citation:** Savoskin A. N., Chuchin A. A., Kalyakulin A. N. Analysis of the Load Transmission from the Locomotive Two-Axle Bogie Wheels to the Rails at the Torque Development in a Traction Motor // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 112–120. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-112-120

### Summary

**Purpose:** To determine vertical load changes transmitted from two-axle locomotive bogie wheel-sets to the rails at the torque development in traction electric motors that deteriorate the wheel-rail adhesion. To achieve the set goal, a design model have been performed and the starting torque developing during the electric motor traction transmission have been defined. This torque is expressed through the interaction forces of the traction elements transferred to the bogie frame and to the wheelset axles. To determine the vertical force changes from each wheelset to the rails due to the action of the traction motor torque. **Methods:** Application of the theoretical mechanics laws; formulation and solution of equilibrium equations. **Results:** In a locomotive two-axle bogie, consecutive wheels bear contrarily directed loads of the same magnitude. Particularly, for 2(3) *ES5K* electric locomotives, such redistribution of vertical loads will amount to 3.1% of the axle load. **Practical significance:** The research results can be used for the development of automatic control systems for wheel-rail adhesion.

**Keywords:** Electric locomotive, wheelset, wheelset-rail load, slipping, traction motor torque.

### References

1. *GOST R 55364—2012. Elektrovozy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [GOST R 55364—2012. Electric locomotives. General technical requirements]. (In Russian)
2. *GOST R 55050—2012. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' i metody ispytaniy* [GOST R 55050—2012. Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods]. (In Russian)
3. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Kruchek V. A. et al. Intellektual'naya sistema obnaruzheniya boksovaniya kolesnykh par v tyagovom privode postoyannogo toka [Intelligent system for detecting wheel pair skidding in a DC traction drive]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2019, Iss. 10, pp. 17–23. (In Russian)
4. Lisunov V. N., Esin N. V. *Elektronnaya sistema zashchity ot boksovaniya i yuza elektrovoza s pлавным zonnofazovym regulirovaniem napryazheniya* [Electronic anti-skidding and anti-slip protection system for electric locomotives with smooth zone-phase voltage regulation]. Patent RF, no. 40278, 2004. (In Russian)
5. Kolpakhch'yan P. G., Andreev V. E. Sovershenstvovanie sistemy zashchity ot yuza passazhirskogo elektrovoza [Improving the anti-skidding protection system for passenger electric locomotives]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2024, Iss. 2, pp. 100–113. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-100-113. (In Russian)
6. Kharisov I. R., Limonov D. E., Korobitsyn K. R. *Sposob zashchity ot boksovaniya kolesnykh par elektrovoza* [Method of anti-skidding protection of electric locomotive wheel pairs]. (In Russian)



*podvizhnogo sostava s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami* [Method for preventing skidding of wheelsets of electric rolling stock with asynchronous traction motors]. Patent RF, no. 2811618, 2024. (In Russian)

7. Litovchenko A. G., Litovchenko V. V. Protivoboksovochnaya zashchita tyagovogo podvizhnogo sostava [Anti-skid protection of traction rolling stock]. *Eksploatatsiya i obsluzhivanie elektronnoy i mikroprotsessornoy oborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava: trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Krasnoyarsk, 24–25 marta 2020 goda. Pod redaktsiyey I. K. Lakin* [Operation and maintenance of electronic and microprocessor equipment of traction rolling stock: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, Krasnoyarsk, March 24–25, 2020. Edited by I. K. Lakin]. Krasnoyarsk: Aktsionernoe obshchestvo “Dorozhnyy tsentr vnedreniya Krasnoyarskoy zheleznoy dorogi” Publ., 2020, pp. 208–215. (In Russian)

8. Kosmodamianskiy A. S., Batashov S. I., Nikolaev E. V. Razrabotka ustroystv predotvrashcheniya boksovaniya lokomotiva na osnove ob’ektnogo modelirovaniya tekhnicheskikh resheniy [Development of devices to prevent locomotive skidding based on object modeling of technical solutions]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management]. 2022, Iss. 4(18), pp. 79–86. DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-79-86. (In Russian)

9. Vorob’ev V. I., Zlobin S. N., Izmerov O. V. et al. Analiz sposobov obnaruzheniya boksovaniya lokomotiva [Analysis of methods for detecting locomotive skidding]. *Fundamental’nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology]. 2022, Iss. 6(356), pp. 14–22. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-356-6-14-22. (In Russian)

10. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevskiy F. Yu. et al. *Sposob obnaruzheniya boksovaniya i yuza koles*

*transportnogo sredstva s elektricheskoy peredachey* [Method for detecting wheel spin and skidding of a vehicle with an electric transmission]. Patent RF, no. 2702549, 2019. (In Russian)

11. Kruglov S. P., Kovyrshin S. V., Ivanov P. Yu. et al. Adaptivnaya podsypka peska na lokomotive [Adaptive sand adding on a locomotive]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling]. 2021, Iss. 2(70), pp. 104–112. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112. (In Russian)

12. Kruglov S. P., Isupov S. A. *Sposob adaptivnogo upravleniya avtomaticheskoy podachey peska pod kolesa lokomotiva* [Method for adaptive control of automatic sand supply under locomotive wheels]. Patent RF, no. 2780751, 2022. (In Russian)

13. Konovalov P. Yu. Sovershenstvovanie pnevmaticheskoy sistemy peskopodachi elektrovozov vnedreniem drosseliruyushchikh ustroystv s servoprivodom [Improvement of the pneumatic sand delivery system of electric locomotives by introducing throttling devices with a servo drive]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2020, Iss. 1(77), pp. 25–33. (In Russian)

Received: December 30, 2024

Accepted: January 31, 2025

#### Author’s information:

Anatoly N. SAVOSKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; elmechtrans@mail.ru

Anton A. CHUCHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; chuchin\_anton@mail.ru

Alexey N. KALYAKULIN — PhD in Engineering; alexeiruz@yandex.ru