

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.021

doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-52-62

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ ЛОКОМОТИВОВ

Александр Анатольевич Пугачев^{1✉}, Владимир Иванович Воробьев², Олег Васильевич Измеров³, Евгений Владимирович Николаев⁴

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

⁴ Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

² vladimvorobiev@yandex.ru

³ izmerov@yandex.ru

⁴ work-omc@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрен вопрос поиска новых решений для улучшения сцепления колес локомотива с рельсами для повышения их тяговых свойств. В результате проведенного анализа установлена возможность повышения коэффициента сцепления за счет улучшения динамических свойств экипажной части, использования явления автоколебаний колесных пар и воздействия на поверхность контакта колеса и рельса магнитного поля. Для локомотивов с двухосными тележками с диаметром колес 1250

мм предложено использовать тяговый привод с асинхронным тяговым электродвигателем, подвешенным к раме тележки, и осевым редуктором, который позволяет реализовать указанные способы при существующей базе тележек. Для локомотивов с диаметром колес 1050 мм предложены новые конструкции тяговых приводов.

Ключевые слова: тяга, сцепление, колесо, рельс, противобуксовочные устройства, привод, локомотив.

Ссылка для цитирования:

Пугачев А.А. Анализ и разработка конструктивных решений экипажной части для повышения тяговых свойств локомотивов / А.А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 6. – С. 52-62. doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-52-62.

Original article

Open Access Article

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF CREW PARTS TO IMPROVE LOCOMOTIVE TRACTION PROPERTIES

Aleksandr Anatolyevich Pugachev^{1✉}, Vladimir Ivanovich Vorobyov², Oleg Vasilyevich Izmerov³, Evgeny Vladimirovich Nikolaev⁴

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

⁴ Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

² vladimvorobiev@yandex.ru

³ izmerov@yandex.ru

⁴ work-omc@yandex.ru

Abstract

The problem is considered in order to find new solutions to improve the grip of locomotive wheels with rails to increase their traction properties. As a re-

sult of the analysis, the possibility is found to increase the traction coefficient by improving the dynamic properties of the carriage part, using the phenomenon

of self-oscillation of wheel pairs and the impact of a magnetic field on the contact surface of the wheel and rail. For locomotives with two-axle bogies with a wheel diameter of 1250 mm, it is proposed to use a traction drive with an asynchronous traction motor attached to the bogie frame and an axial gearbox, which

Reference for citing:

Pugachev AA, Vorobyov VI, Izmerov OV, Nikolaev EV. Analysis and development of constructive solutions of crew parts to improve locomotive traction properties. *Transport Engineering*. 2023; 6:52-62. doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-52-62.

Введение

В настоящее время коэффициент тяги ψ для отечественных локомотивов с асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД) достиг предела (примерно 0,27), что близко к ранее реализованному на тепловозах с гидropередачей.

Предел тяговых свойств определяется коэффициентом сцепления колеса с рельсом, имеющим значительный разброс в эксплуатации [1] и, для локомотивов с мономоторным приводом, меняющимся от 0,17 до 0,4 при среднем значении около 0,3. Лабораторные исследования компании *Electro-Motive Division* (США) показали, что для пары трения «сталь по стали» достижимы значения коэффициента сцепле-

Анализ проблемы

Для повышения коэффициента сцепления колеса с рельсом необходимо либо уменьшить число внешних факторов, снижающих сцепление колеса с рельсом, либо воздействовать на зону контакта колеса с рельсом. Факторы, влияющие на сцепление, можно разделить на внутренние, обусловленные особенностями конструкции подвижного состава, и внешние, на которых влиять затруднительно. К наиболее значимым внутренним факторам можно отнести следующие: поверхностная твердость контактирующих поверхностей, величина контактного давления, изменение нагрузки на контактирующие поверхности, наличие поперечной составляющей упругого скольжения и динамической продольной составляющей упругого скольжения.

Меры по снижению влияния первых трех факторов достаточно освещены в отечественной и зарубежной технической литературе. Снижение поперечной составляющей скольжения колеса по рельсу теоре-

allows these methods to be implemented with the existing base of bogies. New traction drive designs are proposed for locomotives with a wheel diameter of 1050 mm.

Keywords: traction, grip, wheel, rail, anti-traction devices, drive, locomotive.

ния, равные 0,6...0,7, что говорит о значительных резервах повышения тяговых свойств локомотивов.

Попытки предотвратить ухудшение сцепных свойств за счет различных способов удаления загрязнений с поверхности рельсов или нанесения веществ, повышающих коэффициент сцепления, ранее описанные авторами в [2], к настоящему времени не нашли широкого распространения, кроме применения песка. Таким образом, существует проблема поиска новых способов повышения коэффициента сцепления колеса с рельсом. Предлагаемая статья представляет собой попытку решения этой проблемы.

тически может быть достигнуто за счет повышения устойчивости движения экипажа по прямым участкам пути и снижения угла набегания колесной пары на рельс в кривых. При движении в прямых участках пути в оси колесной пары крутящий момент меняется случайным образом. При реализации сил тяги, близких к предельным по условиям сцепления, за счет общего увеличения упругого скольжения колес, усилия на правом и левом колесе начинают выравниваться, соответственно, выравнивается и величина скольжения. Ухудшение сцепных свойств в кривых участках пути общеизвестно. Снижение поперечной составляющей скольжения путем уменьшения угла набегания направляющего колеса на рельс за счет применения тележек с радиальной установкой колесных пар, как в отечественной, так и в зарубежной практике, нашли ограниченное применение. Можно сделать вывод, что на отечественных железных дорогах в маги-

стральном движении снижение поперечной составляющей скольжения колесных пар не может рассматриваться как возможность существенного повышения тяговых свойств магистральных локомотивов. Что же касается динамической составляющей продольного скольжения, то для локомотива, имеющего привод с частичным опиранием ТЭД на ось, движущегося со скоростью 25 км/ч, она на 12 % ниже, чем для привода с опиранием ТЭД на раму тележки. Известно, что в приводе тепловоза 2ТЭ10Л с жесткой зубчатой передачей динамический момент мог составлять 186 % от максимального статического по условиям сцепления, что и могло повлиять на увеличение скольжения.

В настоящее время на грузовых электровозах с асинхронными ТЭД были использованы тяговые приводы с высокоскоростными ТЭД с опорой на ось и жесткой тяговой передачей. При этом увеличение передаточного числа с 3,44 в приводе электровоза 2ЭС6 с двусторонней зубчатой передачей до 6,29 в приводе электровоза 2ЭС10 означает увеличение приведенного момента инерции при прочих равных условиях в 3,35 раза. Рассматривая в первом приближении ротор ТЭД 1ТВ2822 электровоза 2ЭС10 с муфтой, как стальной цилиндр диаметром 0,5 м и длиной 0,3 м, получим значение момента инерции ротора асинхронного ТЭД $I_{ра}$:

$$I_{ра} = \frac{\rho \pi h D^4}{32}; \quad (1)$$

где $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ – плотность железа, $h = 0,3 \text{ м}$ – длина ротора, $D = 0,5 \text{ м}$ – диаметр ротора. При указанных данных $I_{ра} = 14,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Исходя из типичных для коллекторных ТЭД значений $I_{рк} = 75 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, получаем значения моментов, приведенных к оси колесной пары: для асинхронного ТЭД $I_{рао} = 574 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; для коллекторного ТЭД $I_{рко} = 888 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, т.е. приведенный момент инерции снижается в 1,55 раза. Однако для электровоза 2ЭС6 непродессоренная масса, приходящаяся на одну ось, составляет 7038 кг, для электровоза 2ЭС10 – 5588 кг [3], т.е. ниже в 1,26 раза. Таким образом, динамический момент, приведенный к оси колесной пары, за счет использования привода с высокооборотным асин-

хронным ТЭД снизится всего лишь в 1,23 раза, из чего следует необходимость введения упругого звена в привод для повышения коэффициента сцепления.

Рассмотрим вкратце другие варианты повышения коэффициента сцепления.

1. Самоочищение колес и рельс. Как указано в [4], увеличение упругого скольжения колеса по рельсу способно увеличить коэффициент трения при сухих рельсах на 35 %, мокрых – на 47 % и замасленных – на 50 %, за счет самоочищения колес и рельсов. При этом можно использовать увеличение коэффициента трения при наличии фрикционных автоколебаний боксующей оси. Для тепловоза 2ТЭ121-003Б с осевой нагрузкой 255 кН, привод которого был склонен к развитию автоколебаний колесной пары, на кольце ВНИИЖТ в замерах коэффициент сцепления мало менялся в зависимости от скорости скольжения колеса по рельсу в диапазоне до величины скольжения, равного 0,14 [1] и доходил до величин 0,3...0,32.

2. Безынерционное регулирование коэффициента сцепления за счет внешнего воздействия. Повышение сцепления под воздействием электрического тока и магнитного поля на поверхность контакта было обнаружено в конце 19 века Элиасом Е. Райесом на моделях рельсового экипажа. Далее, в нашей стране в 60-х годах наблюдалось повышение коэффициента сцепления до 0,5 за счет тягового тока. В [5] в результате лабораторных исследований было достигнуто увеличение коэффициента трения в контакте пары «сталь по стали» до 0,512. В порядке дальнейших исследований был создан натурный стенд [6], который позволил установить, что при воздействии тока величиной 3000 А при наличии в контакте «сталь по стали» масла коэффициент сцепления возрастает с 0,1 до 0,25, при наличии воды – с 0,28 до 0,45 и при сухом контакте – с 0,38 до 0,57. Были проведены натурные испытания на тепловозе 2ТЭ10У, в результате которых было установлено, что при воздействии тока величиной 1000 А на контакт колес с рельсом одной оси сила тяги возрастает на 10...15 % на чистых рельсах и на 20...25 % – на загрязненных машинным маслом [7]. Результаты стендовых и натурных экспериментов дают основания полагать, что при воздействии на пятно

контакта колеса с рельсом тока величиной 3000 А увеличение касательной силы тяги составит при наличии масла на контактирующих поверхностях – 100...150 %, при наличии воды – 65...80 %, и при сухих рельсах – 55...65 %.. Теоретически увеличение коэффициента сцепления объясняется увеличением адгезионной составляющей трения вследствие электропластического эффекта [5]. К недостатку данного способа относится прежде всего необходимость наличия независимой замкнутой цепи тока для каждого контакта колеса и рельса. Прежде всего, конструкция букс и тягового привода должна предусматривать изоляцию колесной пары от рамы тележки и силовых электрических цепей, включая режимы торможения с помощью колодочного тормоза. Для электровозов необходимо обеспечить пропускание через колесные пары тягового тока, что технически осуществимо, например, коммутацией тягового и управляющего тока так, чтобы цепь тягового тока не оставалась в какой-то момент разомкнутой, но это несколько снижает эффективность устройства. Наконец, проблемой является использование устройства в момент прохождения изолирующих вставок, которые разрывают контакт между соседними колесами или между колесом и токосъемным устройством на рельсе.

Техническим преимуществом усилителей сцепления, основанных на использовании магнитного поля, является то, что электрическая цепь индуктора полностью изолирована от деталей экипажной части, независима от цепей тягового тока электровозов и на нее не влияет прохождение изолирующих вставок. В 1951 году паровоз СО17-2877 был оборудован электромагнитными усилителями сцепления с индукторами на ведущих осях, были проведены его производственные испытания, экспериментальные исследования во ВНИИЖТ и с поездом весом 3500 т на Октябрьской ж.д. Несмотря на то, что, согласно расчетам, применение электромагнитов увеличивало сцепной вес лишь на 2...3 %, в экспериментальных поездках локомотива СО17-2877 был получен коэффициент сцепления, равный 0,42...0,44, что в то время не было объяснено. В 1966 году при подмагничивании колес на моде-

ли шахтного электровоза 1:5 увеличение силы тяги достигало 50 %, а также было установлено, что для семитонного рудничного электровоза с подмагничивающими катушками, расположенными внутри колес и индукции поля 1,9 Тл максимальное приращение силы тяги, составляет 59 %.

В конце 70-х годов попытка создания догрузателей с тангенциально расположенным индуктором на тепловозе ТЭМ2УС-001 не выявила какого-либо заметного эффекта от использования устройств [8, 9], поскольку при поиске оптимальных параметров догрузателей основным критерием было принято увеличение нагрузки от колеса на рельс и попытки увеличения магнитного потока было прекращены после достижения магнитного насыщения и прекращения роста силы дополнительного притяжения колеса к рельсу, оказавшейся незначительной из-за малой площадки контакта. В дальнейшем было обнаружено, что воздействие магнитного поля приводит к изменению коэффициента трения [5, 10]. Так, Л.Г. Делюсто [10] при исследовании эффекта магнитопластичности лабораторными экспериментами было установлено, что при трении «сталь по стали» и индукции магнитного поля 0,45 Тл коэффициент трения увеличивается с 0,2...0,22 до 0,49...0,57. В [5] лабораторными экспериментами установлено увеличение коэффициента сцепления с 0,176 до 0,22 при напряженности магнитного поля 7,4 кА/мм, что объяснялось эффектом магнитопластичности. В исследовании [11] на лабораторной установке было определено, что существенное увеличение коэффициента сцепления наблюдается именно в режимах, соответствующих насыщению бандажной стали, при этом влияние вихревых токов на сопротивление перемещению колеса было исключено за счет того, что исследовался процесс пуска из состояния покоя. Наконец, в ходе натурного эксперимента, проведенного на тепловозе ЧМЭЗ [12], удалось добиться повышения коэффициента сцепления на 9...11 % на рельсах, смоченных водой и мазутом, при индукции в местах контакта, равной 1 Тл. На основании указанных выше данных можно предполагать, что применение магнитных уси-

лителей позволило бы повысить коэффициент тяги локомотивов до 0,33.

К недостаткам магнитных усилителей сцепления можно отнести следующие:

– электромагнитные индукторы имеют значительные габариты и вес, вследствие чего возникает проблема размещения на экипажной части индуктора, созда-

ющего индукцию магнитного поля требуемой величины (до 1,5...2 Тл);

– при движении электровоза со скоростью длительного режима (около 50...55 км/ч) необходимо исключить притягивание к намагниченным деталям экипажной части случайных металлических предметов на пути.

Предлагаемые решения

В данной статье предлагается к использованию два варианта решения поставленной задачи – применение опорно-рамного привода с осевым редуктором и применение магнитных усилителей сцепления.

В первом случае амортизацию динамических моментов можно реализовать путем использования опорно-рамного привода с осевым редуктором, аналогичного ранее созданным в нашей стране. Диаметр оси колесной пары, по аналогии с построенным тепловозом 2ТЭ121 с нагрузкой на ось 250 кН, может быть принят равным 215 мм.

Примем среднюю нагрузку на ось равной 249 кН, как у электровоза 2ЭС10. Тогда при коэффициенте тяги в продолжительном режиме, равном 0,35, сила тяги, приходящаяся на одну ось, должна составить $F_d = 87$ кН. Допустим, что применяемый асинхронный ТЭД аналогичен по конструкции и параметрам двигателям СТА-1200У1 или АД-914У1, имеющим крутящий момент на валу в продолжительном режиме $M_p = 10400$ Нм. Тогда требуемое передаточное отношение осевого редуктора должно составить:

$$u = \frac{1000 F_d D_k}{2 M_p \eta}; \quad (2)$$

где $D_k = 1,25$ м – диаметр колеса, $\eta = 0,98$ – к.п.д. зубчатой передачи при моторно-осевых подшипниках качения. При указанных параметрах получаем значение $u = 5,34$. Принимаем близкое значение передаточного отношения $u = Z/z = 95/18 = 5,27$, тогда величина централи зубчатой передачи составит:

$$\Pi = \frac{m(Z + z)}{2} + 0,5m; \quad (3)$$

где $Z = 95$ – число зубьев большого зубчатого колеса, $z = 18$ – число зубьев малого зубчатого колеса, $m = 10$ – величина модуля.

При указанных параметрах $\Pi = 570$ мм. расстояние от оси ротора до наружного габарита корпуса у ТЭД СТА-1200У1 равно 394 мм, радиус оси колесной пары 107,5 мм, таким образом, зазор между корпусом ТЭД и осью составит 68,5 мм, что значительно больше, чем на тепловозе 2ТЭ121 (19 мм). Максимальная частота вращения ТЭД при максимальной скорости $V_k = 120$ км/ч составит

$$n_{\max} = \frac{60 u V_k}{3,6 \pi D_k}; \quad (4)$$

При указанных выше значениях $n_{\max} = 2684$ мин⁻¹, что меньше предельной частоты вращения ротора ТЭД СТА-1200У1, равной 2900 мин⁻¹.

В зарубежных тяговых приводах нашли применения косозубые передачи с малым углом наклона зубьев (4° в приводе 2ЭС10), однако они требуют увеличения осевых габаритов редуктора для размещения упорного подшипника. В связи с этим целесообразно применение в редукторе арочных зубчатых колес. Данный вопрос ставился АО ВНИКТИ еще в 80-х годах; созданные и применяемые в последнее время отечественные технологии производства арочных зубчатых колес, где зубонарезание выполняется на многих видах четырехкоординатных станков с ЧПУ, одна из координат которых является круговой [13, 14, 15], позволяют реализовать данное решение.

По вопросу применения магнитных усилителей сцепления ранее авторами было установлено, что требованиям, предъявляемым к узлам экипажной части, в наиболь-

шей степени соответствует расположение обмотки индуктора вокруг оси колесной пары [16, 17]. В опорно-рамном приводе с осевым редуктором и диаметром колеса 1250 мм при использовании промежуточного зубчатого колеса имеется возможность размещения катушки индуктора на оси колесной пары, при этом катушка может не опираться на ось. База двухосных тележек отечественных грузовых электровозов составляет 2900...3000 мм, что позволяет при опорно-рамном приводе с осевым редуктором разместить ТЭД ближе к раме, при этом может быть использован передаточный механизм с двумя зубчатыми муфтами, поскольку для магнитных усилителей сцепления не требуется электрической изоляции колесной пары. На рис. 1 изображено возможное расположение на двухосной тележке с базой 2900 мм тягового электродвигателя с габаритами указанного выше СТА-1200У1 и подвешиванием индуктора к раме тележки.

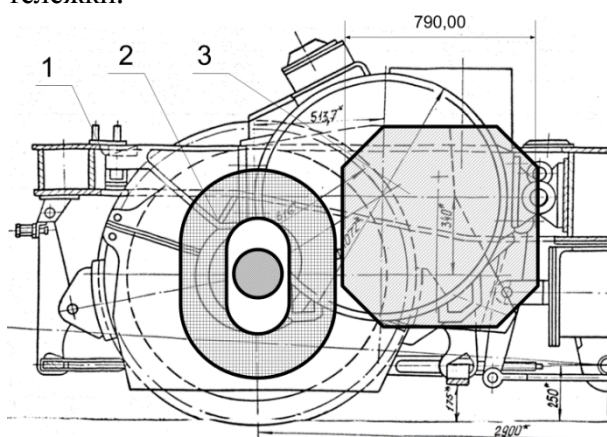


Рис. 1. К возможности размещения электромагнитного усилителя сцепления на тележке электровоза с базой 2900 мм:

1 – тележка; 2 – индуктор; 3 – асинхронный ТЭД

Fig. 1. On possibility of mounting of electromagnetic amplifier upon the bogie of electric locomotive with base of 2900 mm:

1 – bogie, 2 – inducer, 3 – induction traction electric motor

Гораздо сложнее разместить магнитные усилители сцепления на тепловозах с диаметром колеса 1050 мм и трехосной тележкой, где двигатели расположены близко к поперечным балкам. В качестве решения, позволяющего разместить индуктор при опорно-осевом приводе для промышленных тепловозов небольшой

мощности, авторами предложен тяговый привод с двусторонней тяговой передачей и коленчатой осью (рис. 2).

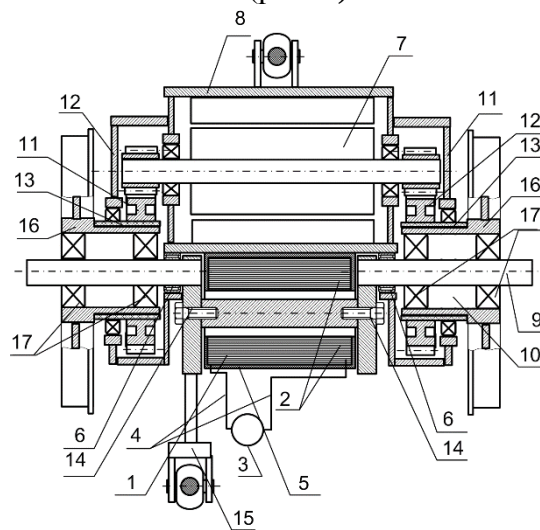


Рис. 2. Тяговый привод с коленчатой осью:

1 – намагничивающая обмотка; 2 – катушка; 3 – источник питания; 4 – провода; 5 – каркас; 6 – моторно-осевые подшипники; 7 – ТЭД; 8 – корпус ТЭД; 9 – ось колесной пары; 10 – колесная пара; 11 – зубчатое колесо; 12 – кожух редуктора; 13 – немагнитная втулка; 14 – резьбовое соединение; 15 – кронштейн с подвеской; 16 – ступицы колес; 17 – подшипники

Fig. 2. Traction drive with elbow axle:
1 – magnetizing winding; 2 – coil; 3 – power supply; 4 – wires; 5 – frame; 6 – motor-axial bearings; 7 – traction electric motor; 8 – traction electric motor housing; 9 – axle of wheelset; 10 – wheel pair; 11 – gear wheel; 12 – reduction gear box casing; 13 – non-magnetic bushing; 14 – a threaded joint; 15 – bracket with suspension; 16 – wheel hubs; 17 – bearing)

Для того, чтобы разместить катушку индуктора значительных размеров, ось колесной пары выполнена неподвижной, коленчатой и разъемной для возможности ремонта индуктора, при этом катушка индуктора связана с рамой с помощью отдельного кронштейна и тяги для предотвращения падения на путь. При перемещении экипажа по неровностям пути ТЭД и катушка индуктора поворачиваются в противоположные стороны. Для передачи крутящего момента на независимо вращающиеся колеса зубчатая передача выполнена двусторонней.

В связи со сложностью привода с коленчатой осью, авторами предложены конструкции тягового привода, использующие дугостаторные асинхронные электродвигатели (ДАД), в которых статор не представ-

ляет собой замкнутого кольца. Как показано в [18], ДАД могут быть применены в качестве тяговых для локомотива. Предлагаемые варианты приводов представлены на рис. 3 а, б и 4 а, б.

В приводе на рис. 3 а, б для регулирования силы тока, протекающего через

индуктор, использована подчиненная система регулирования, использующая в качестве параметра, свидетельствующего о начале боксования, продольные ускорения ТЭД с частотой, равной частоте автоколебаний колесной пары в режиме боксования.

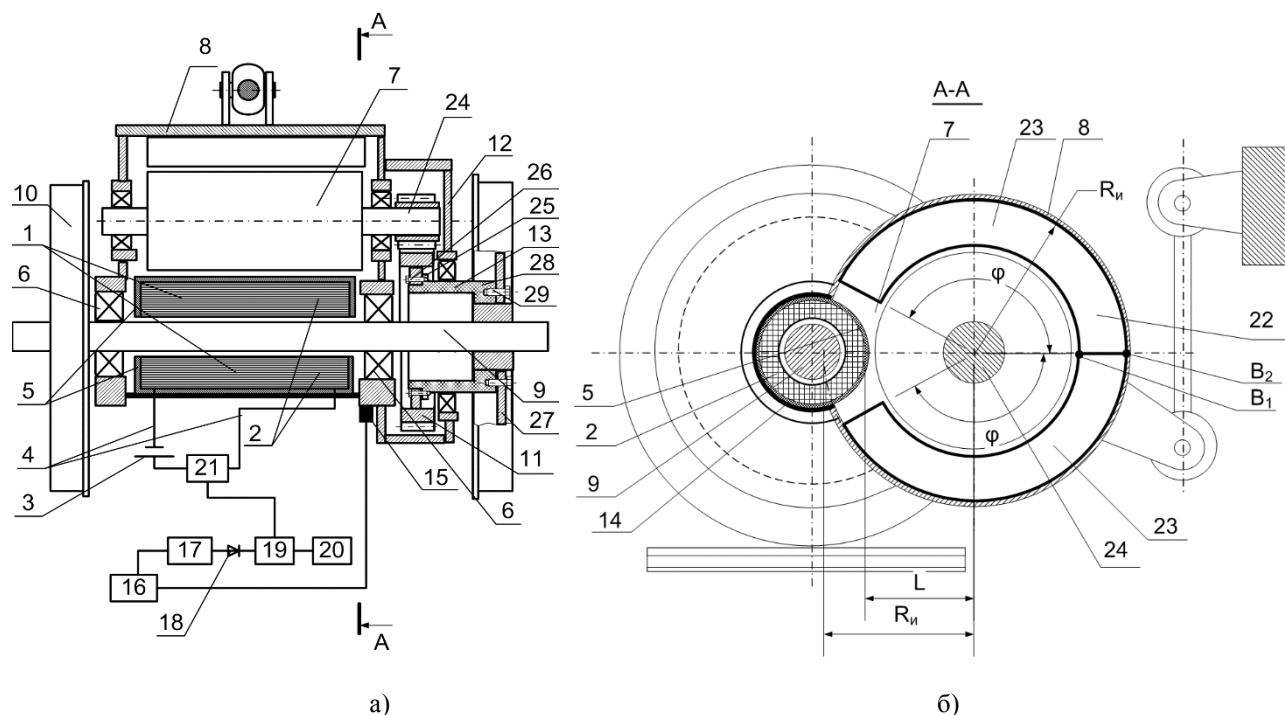


Рис. 3. Предлагаемый опорно-осевой тяговый привод с магнитным усилителем сцепления и ДАД:

а) общий вид; б) разрез по оси А-А:

1 – намагничивающая обмотка; 2 – катушка; 3 – источник питания; 4 – провода; 5 – каркас; 6 – моторно-осевые подшипники; 7 – ТЭД; 8 – корпус ТЭД; 9 – ось; 10 – колесная пара; 11 – зубчатое колесо; 12 – кожух редуктора; 13 – немагнитная втулка; 14 – кожух; 15 – датчик продольных ускорений; 16 – блок измерения сигналов; 17 – полосовой фильтр; 18 – выпрямитель; 19 – блок сравнения; 20 – блок установки; 21 – ключ; 22 – статор ТЭД; 23 – дугообразные индукторы; 24 – вал ТЭД; 25 – цилиндр с фланцем; 26, 29 – болтовые соединения; 27 – колесо; 28 – ступица

Fig. 3. Proposed support-axial traction drive with magnetic clutch amplifier and arcing induction motor:

а) – general view; б) section along axis A-A:

1 – magnetizing winding; 2 – coil; 3 – power supply; 4 – wires; 5 – frame; 6 – motor-axial bearings; 7 – traction electric motor; 8 – traction electric motor housing; 9 – axis; 10 – wheel pair; 11 – gear wheel; 12 – reduction gear box casing; 13 – non-magnetic bushing; 14 – casing; 15 – longitudinal acceleration sensor; 16 – signal measurement unit; 17 – bandpass filter; 18 – rectifier; 19 – comparison unit; 20 – installation unit; 21 – power switch; 22 – traction electric motor stator; 23 – arcing inducers; 24 – traction electric motor shaft; 25 – cylinder with flange; 26, 29 – bolted connections; 27 – wheel; 28 – hub

В приводе на рис. 4 а, б, использована интегрированная компоновка для снижения общего веса привода и упругое подвешивание ТЭД на плоских резинокордных элементах. Для защиты от ложных срабатываний предложена более сложная система управления устройством, содержащая два датчика продольных ускорений, что позволяет компенсировать сигнал от случайных угловых ускорений корпуса

ТЭД. Кроме того, в схему введен анализатор, который определяет момент начала боксования по изменению дисперсии сигнала датчиков продольных ускорений.

Для защиты от внезапного боксования в схеме управления предусмотрено выделение сигнала с частотой автоколебаний при боксовании колесной пары и сравнение его с пороговым значением, определенным экспериментальным путем.

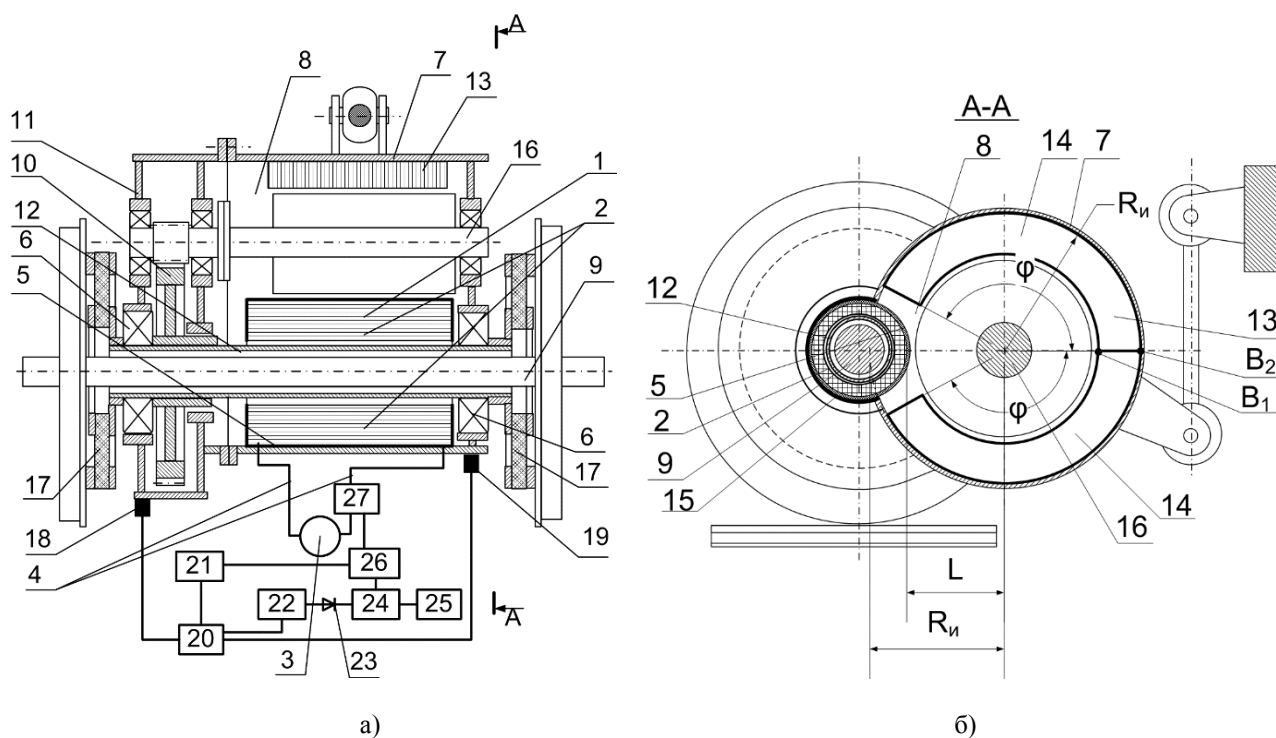


Рис. 4. Предлагаемый тяговый привод с магнитным усилителем сцепления и ДАД при упругом опирании на ось:

а) общий вид; б) разрез по оси А-А:

1 – намагничивающая обмотка; 2 – катушка; 3 – источник питания; 4 – провода; 5 – каркас; 6 – осевые подшипники; 7 – корпус ТЭД; 8 – ТЭД; 9 – ось колесной пары; 10 – зубчатое колесо; 11 – кожух редуктора; 12 – немагнитная втулка; 13 – статор ТЭД; 14 – индукторы; 15 – кожух; 16 – вал ТЭД; 17 – упругие элементы; 18,19 – датчики продольных ускорений; 20 – блок измерения разности сигналов; 21 – статистический анализатор сигналов; 21 – полосовой фильтр; 23 – выпрямитель; 24 – блок сравнения; 25 – блок установки 26 – логический элемент «ИЛИ»; 27 – ключ

Fig. 4. Proposed traction drive with magnetic clutch amplifier and arcing induction motor with elastic bearing on axle:

a) general view; b) section along axis A-A:

1 – magnetizing winding; 2 – coil; 3 – power supply; 4 – wires; 5 – frame; 6 – axial bearings; 7 – traction electric motor housing; 8 – traction electric motor; 9 – axle of wheelset; 10 – gear wheel; 11 – reduction gear box casing; 12 – non-magnetic bushing; 13 – traction electric motor stator; 14 – inducers; 15 – casing; 16 – traction electric motor shaft; 17 – elastic elements; 18,19 – longitudinal acceleration sensors; 20 – a signal difference measuring unit; 21 – statistical signal analyzer; 21 – bandpass filter; 23 – rectifier; 24 – comparison unit; 25 – installation unit; 26 – «OR» gate; 27 – power switch

Выводы

1. Применение устройств намагничивания колесных пар локомотива приводило к повышению коэффициента сцепления колеса с рельсом до 0,42...0,44, что, предположительно, позволит увеличить силу тяги в продолжительном режиме до 0,33 от сцепного веса локомотива.

2. Для локомотивов с двухосными тележками с диаметром колес 1250 мм предлагается использовать опорно-рамный тяговый привод с осевым редуктором, в котором обеспечивается амортизация динамических нагрузок при прохождении неровностей пути и который склонен к

развитию автоколебаний колесной пары при боксовании. Данный тип привода при использовании промежуточного зубчатого колеса позволяет разместить на оси колесной пары обмотку индуктора значительных габаритов, при подвешивании ее к раме тележки.

3. Для локомотивов с диаметром колес 1050 мм предложены приводы с колечной осью, а также с применением дугостаторного асинхронного ТЭД при жестком и упругом опирании последнего на ось колесной пары, позволяющие разместить обмотку индуктора на оси колесной пары.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Проблема воспроизводимости результатов натурных экспериментальных исследований трибологических свойств системы "колесо-рельс" в условиях глобализации рынка рельсовых транспортных средств. / О.В.Измеров, А.В.Кошелев, А.Н. Чвала. "Мир транспорта и технологических машин", № 3(34) 2011, июль-сентябрь. Госуниверситет-УНПК. с.С. 28-34.
2. Концепция развития энергосберегающих электромеханических систем: монография / А.С. Космодамианский [и др.]; под ред. академика Академии электротехн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2014. – 244 с.
3. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности (утв. Распоряжением ОАО "РЖД" от 22.12.2017 N 2706р).
4. Лонгстон мл., Итами. Исследования явления трения-крипа для локомотива [Текст] / Лонгстон мл., Итами. // Труды Амер. Общ. инж.-мех.: Конструирование и технология машиностроения. 1980, №3, том 102, С. 241-248.
5. Тихомиров, В.П. Моделирование сцепления колеса с рельсом: монография / В.П. Тихомиров, В.И. Воробьев, Д.В. Воробьев, Г.В. Багров, М.И. Борзенков, И.А. Бутрин. Орел: Орел ГТУ, 2007. – 127 с.: ил.
6. Ивахин, А.И. Стенд для исследования тяговых свойств в системе колесо-рельс железнодорожных транспортных средств / А.И. Ивахин, В.И. Травиничев, Д.И. Петраков // Тяжелое машиностроение. 2011. №4. С. 2-5.
7. Оценка тяговых качеств тепловозов с электропередачей с учетом воздействия электрического тока на зоны контакта колес с рельсами: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д.И.Петраков // Брянск, БГТУ, 2013 – 18 с.
8. Исследования по повышению тяговых свойств маневровых тепловозов путем применения электромагнитного увеличения сцепления и более оптимальных схем соединения тяговых электродвигателей / Е.А. Ситников, И.Н. Родионов, В.П. Гриневич // Заключительный отчет по теме «Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по повышению эксплуатационных качеств, надежности и долговечности тепловоза» № И-108-82. Коломна, ВНИКТИ, 1982. – 83 с.
9. Испытание эффективности системы электромагнитного увеличения сцепления на тепловозе ТЭМ2УС-001 / Е.А. Ситников, И.Н. Родионов, В.П. Гриневич // Заключительный отчет по теме «Создание маневрового тепловоза с повышенными на 15-20% тяговыми качествами по сравнению с тепловозом ТЭМ2» № И-74-79, Коломна, ВНИКТИ, 1979. – 142 с.
10. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях / Л.Г. Делюсто – М: Машиностроение, 2005. - 272 с. – Текст : непосредственный.
11. Увеличение сцепления колес локомотива с рельсами воздействием постоянных магнитных полей на зону контакта / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, В.О. Корчагин // Наука и техника транспорта, №2. 2017. С. 8...15.
12. Улучшение тяговых качеств локомотивов с помощью магнитных усилителей сцепления: монография / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, В.О. Корчагин, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев. Брянск, БГТУ, 2018- 232 с. – Текст : непосредственный.
13. Виноградов, А.Н. Эвольвентные арочные передачи. Инновационная технология высокопроизводительного изготовления / А.Н.Виноградов, А.П.Давыдов, С.И.Липатов, Р.Б. Марголит, И.Г.Панков, А.Н.Паршин // Альманах «Деловая слава России». 2011. №3 (31). С.42-45.
14. Виноградов А.Н., Липатов С.И., Марголит Р.Б. Точность нарезания колёс с арочными зубьями // Технология машиностроения. 2013. № 9. С. 23-27.
15. Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Золотова С.А. Обработка круговых зубьев цилиндрических колес с локализованной зоной касания // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5. Тула, 2020, - С. 344-349.
16. Классификация магнитных усилителей сцепления и поиск новых решений тягового привода / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, А. А. Пугачев, В. О. Корчагин, Е. В. Николаев // Транспорт Урала, № 2 (73), Екатеринбург, УрГУПС, 2022. С. 50-58.
17. 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.
18. Варианты реализации и динамические свойства асинхронного тягового привода локомотивов с дугостаторными электродвигателями / А.И. Ивахин. – Текст: непосредственный // «Тяжелое машиностроение», 2012, № 10. С. 17-21.

REFERENCES

1. Izmerov OV, Koshelev AV, Chvala AN. The problem of reproducing the results of field experimental studies of tribological properties of the wheel-rail system in the conditions of globalization of the rail vehicle market. Transport and Technological Cars. 2011;3(34): 28-34.
2. Kosmodamiansky AS. The concept of developing energy-saving electromechanical systems: mono-

- graph. Orel: Gosuniversitet – UNPK; 2014.
3. Methods for assessing the impact of rolling stock on the track under the conditions of ensuring reliability. [place unknown]: Russian Railways; 2017.
 4. Longston Jr, Itami. Studies of the phenomenon of friction-creep for a locomotive. Papers of American Society of Mechanical Engineers: Design and Technology of Mechanical Engineering. 1980;3(102):241-248.
 5. Tikhomirov VP, Vorobyov VI, Vorobyov DV, Bagrov GV, Borzenkov MI, Butrin IA. Modeling of wheel-rail coupling: monograph. Orel: Orel GTU; 2007.
 6. Ivakhin AI, Travinichev VI, Petrakov DI. Stand for the study of traction properties in the wheel-rail system of railway vehicles. Tyazheloe Mashinostroenie. 2011;4:2-5.
 7. Petrakov DI. Evaluation of traction qualities of locomotives with electric transmission taking into account the effect of electric current on the contact zones of wheels with rails [abstract of dissertation]. [Bryansk (RF)]; Bryansk State Technical University; 2013.
 8. Sitnikov EA, Rodionov IN, Grinevich VP. Research on improving the traction properties of shunting locomotives by using electromagnetic coupling increase and more optimal connection schemes of traction motors. Final report on Research and Development to Improve the Performance, Reliability and Durability of the Locomotive. Kolomna: VNIKTI; 1982.
 9. Sitnikov EA, Rodionov IN, Grinevich VP. Testing the efficiency of the electromagnetic coupling increase system on TEM2US-001 locomotive. Final report on Developing a Shunting Locomotive with 15-20% Increased Traction Qualities Compared to TEM2 Locomotive. Kolomna: VNIKTI; 1979.
 10. Delusto LG. Fundamentals of rolling metals in permanent magnetic fields. Moscow: Mashinostroenie; 2005.
 11. Kosmodamiansky AS, Vorobyov VI, Korchagin VO. Increasing the coupling of locomotive wheels with rails by the influence of permanent magnetic fields on the contact zone. Science and Technology in Transport. 2017;2:8-15.
 12. Antipin DY, Vorobyov VI, Izmerov OV, Korchagin VO, Kosmodamiansky AS, Pugachev AA. Improving the traction qualities of locomotives using magnetic coupling amplifiers: monograph. Bryansk: BSTU; 2018.
 13. Vinogradov AN, Davydov AP, Lipatov SI, Margolit RB, Pankov IG, Parshin AN. Involute arched transmission. Innovative technology of high-performance manufacturing. Delovaya Slava Rossii. 2011;3(31):42-45.
 14. Vinogradov A.N., Lipatov S.I., Margolit R.B. Precision of cutting wheels with arched teeth // Technology of mechanical engineering. 2013. № 9. С. 23-27.
 15. Bochkova DE, Bobkov MN, Zolotova SA. Processing of circular teeth of a pair of cylindrical wheels with localized touch zone. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020;5:344-349.
 16. Kosmodamiansky AS, Vorobyev VI, Izmerov OV, Pugachev AA, Korchagin VO, Nikolaev EV. Classification of magnetic adhesion boosters and search for new decisions for traction drive. Transport of the Urals. 2022;2(73):50-58.
 17. Kosmodamiansky AS, Batashov SI, Nikolaev EV. Development of locomotive skid prevention devices based on object modeling of technical solutions. Automation and modeling in design and management. 2022;4(18):79-86.
 18. Ivakhin AI. Implementation options and dynamic properties of asynchronous traction drive of locomotives with arc-type stator electric motors. Tyazheloe Mashinostroenie. 2012;10:17-21.

Информация об авторах:

Пугачев Александр Анатольевич – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru, orcid: 0000-0002-1836-0923.

Воробьев Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail:

vladimvorobiev@yandex.ru.

Измаеров Олег Васильевич – соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, email: izmerov@yandex.ru.

Николаев Евгений Владимирович – старший преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта, e-mail: work-omc@yandex.ru.

Aleksandr Anatolyevich Pugachev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Electrical Engineering and Electronics at Bryansk State Technical University; e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru, orcid: 0000-0002-1836-0923.

Vladimir Ivanovich Vorobyov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department

of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.

Oleg Vasilyevich Izmerov – Competitor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; email: izmerov@yandex.ru.

Evgeny Vladimirovich Nikolaev – Senior Lecturer of the Department Traction Rolling Stock at the Russian University of Transport; e-mail: work-omc@yandex.ru.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 03.05.2023; принята к публикации 26.05.2023. Рецензент – Космодамианский А.С., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 22.03.2022; approved after review on 03.05.2023; accepted for publication on 26.05.2023. The reviewer is Kosmodamiansky A.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Traction Rolling Stock at the Russian University of Transport, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.