Транспортное машиностроение. 2023. № 3(15). С. 45-58. ISSN 2782-5957 (print)
Transport Engineering. 2023. no. 3(15). P. 45-58. ISSN 2782-5957 (print)

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 629.4.027.4: 656.2
doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-45-58

РАЗРАБОТКА ОПОРНО-ОСЕВОГО ПРИВОДА ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Александр Анатольевич Пугачев[1]✉, Владимир Иванович Воробьев[2], Олег Васильевич Измеров[3], Евгений Владимирович Николаев[4]
[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

Рассмотрена задача импортозамещения комплектующих для опорно-осевого тягового привода городского электропоезда с диаметром колеса 950 мм. В результате проведенного анализа выявлены недостатки привода с использованием иностранных комплектующих изделий: высокая неподрессоренная масса, ухудшающая воздействие экипажа на путь, сложность обеспечения требуемых динамических свойств при упругом опирании моторно-редукторного блока на ось, сложность изготовления и сборки привода. Установлена нецелесообразность копирования зарубежных решений для создания отечественного аналога тягового привода. Рассмотрены варианты возможных технических решений тягового привода, адаптированных для производства на отечественной технологической базе и более простых в изготовлении. Предложено использовать тяговый привод с высокомоментным опорно - рамным тяговым электродвигателем, с увеличенным наружным диаметром и той же окружной скоростью ротора и осевым редуктором. Доказано, что в этом случае вследствие снижения частоты вращения ведущего вала упрощается конструкция редуктора, который можно выполнить одноступенчатым, и появляется возможность применения созданных и исследованных отечественных плоских резинокордных муфт. Предложена новая конструкция резинокордной муфты поперечной компенсации. Для случая использования в приводе уже освоенного отечественным производством высооборотного тягового электродвигателя предложено использовать компоновку тягового привода агрегатного типа. На предложенные технические решения получены два патента на полезные модели и подана заявка на получение патента.

Ключевые слова: привод, электропоезд, надежность, конструирование, импортозамещение.

Ссылка для цитирования:
Пугачев А.А. Разработка опорно-осевого привода пассажирских электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями / А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, Е.В. Николаев // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 03. – С. 45 – 58. doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-45-58.

Original article
Open Access Article

DEVELOPMENT OF A SUPPORT-AXIAL DRIVE OF PASSENGER ELECTRIC TRAINS WITH ASYNCHRONOUS TRACTION ENGINES

Aleksandr Anatolyevich Pugachev[1]✉, Vladimir Ivanovich Vorobyov[2], Oleg Vasilyevich Izmerov[3], Evgeny Vladimirovich Nikolaev[4]
[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

©Пугачев А.А., Воробьев В.И., Измеров О.В., Николаев Е.В., 2023

Abstract

The problem of import-substituting components for the support-axial traction drive of an electric train with a wheel diameter of 950 mm is considered. As a result of the analysis, the disadvantages of the drive using foreign components are revealed: a high unsprung mass, which worsens the impact of the crew on the track, the difficulty of providing the required dynamic properties with elastic support of the motor-gear unit on the axle, the complexity of manufacturing and assembling the drive. The inexpediency of copying foreign solutions to create a domestic analogue of a traction drive is established. Variants of technically possible traction drive adapted for domestic production and easier to manufacture are considered. It is proposed to use a traction drive with a high-torque support - frame traction engine, with an increased outer diameter and the same circumferential speed of the rotor and an axial gearbox. It is proved that in this case, due to a decrease in the speed of the drive shaft, the design of the gearbox is simplified, which can be made single-reduction, and it becomes possible to use the developed and studied domestic flat rubber-cord couplings. A new design of the transverse rubber-cord coupling is proposed. For the case of using a domestic high-speed traction electric motor in the drive, it is proposed to use an aggregate-type traction drive. Two utility model patents are obtained for the proposed technical solutions and a patent application is filed.

Keywords: drive, electric train, reliability, design, import substitution.

Reference for citing:
Pugachev AA, Vorobyev VI, Izmerov OV, Nikolaev EV. Development of a support-axial drive of passenger electric trains with asynchronous traction engines. Transport Engineering. 2023; 3:45-58. doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-45-58.

Введение

При создании моторной тележки электропоезда пригородного следования городского типа ЭГ2Тв «Иволга» модель 62-4496, выпускаемом ОАО «Тверской вагоностроительный завод», были использованы импортные комплектующие, в частности, редуктор *GMK* 2-66-495*E* производства фирмы *TSA* (Австрия). Необходимость замещения данных комплектующих узлами отечественного производства ставит проблему выбора способа замещения: является ли в отечественных условиях целесообразным создавать конструктивный аналог данного привода, сохраняя конструктивную схему и свойства элементов привода, или же будет более целесообразным поиск нового решения, базирующегося на исследованных в отечественной практике элементах, для изготовления которых имеется технологическая база.

Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

Объект исследования

Электропоезд ЭГ2Тв «Иволга» предназначен для осуществления пассажирских перевозок в транспортных системах городов с расстоянием между остановочными пунктами примерно 1-2 километра, что требует относительно высокого ускорения (0,9 м/с^2 при разгоне до скорости 60 км/ч) при максимальной скорости движения всего 120 км/ч. Высокое ускорение при разгоне требует максимального снижения веса тары на одно пассажиро-место, вследствие чего на моторных тележках диаметр колес снижен до 950 мм.

Тяговый привод по конструкции аналогичен приводу австрийской фирмы *TSA* для электропоездов *Stadler*. Как видно из рис. 1 и 2, привод согласно классификации [1] можно отнести к приводам с частично обрессоренными массами, что достигнуто путем разделения точки подвеса (опорно-осевой привод), интегрированного конструктивного исполнения. При этом привод опирается на раму тележки в двух точках (пакеты клиновидных резинометаллических элементов на корпусе тягового электродвигателя (ТЭД) и корпуса редуктора), а на ось – в одной точке, при этом опорой служит резинометаллическая муфта брускового типа *KPK* D460.7-1/6 с пакетами плоских элементов (рис. 2). Подобные муфты выпускаются зарубежными фирмами (например, муфты *CENTAFLEX* [2]) и используются как в варианте привода с полым валом, 50 в виде упругой опоры.

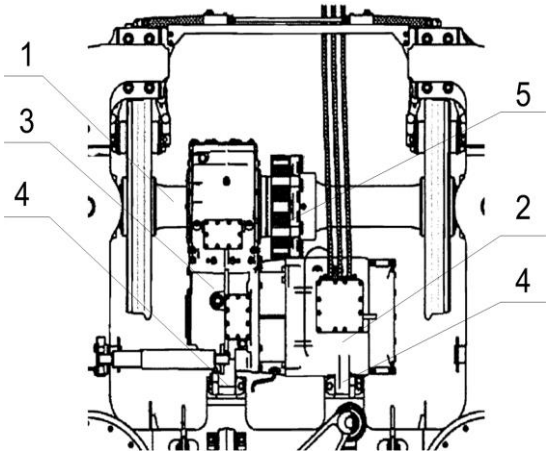
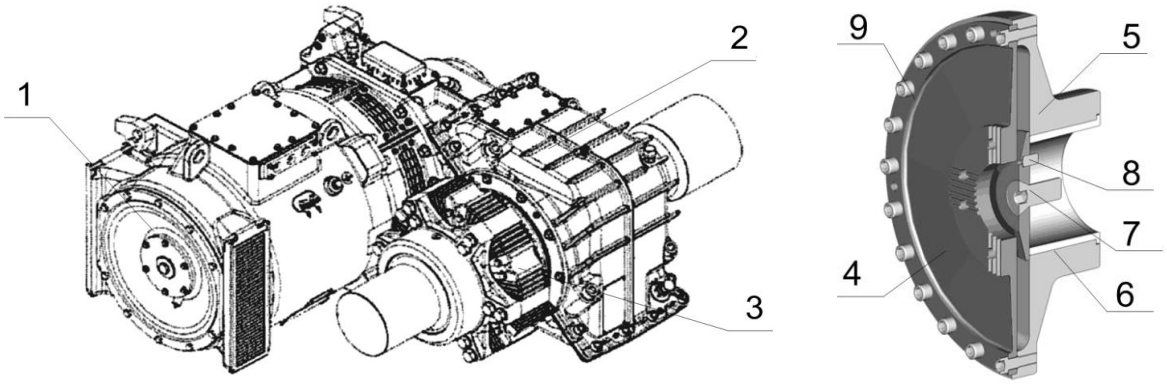


Рис. 1. Тяговый привод ЭГ2Тв:
1 - колесная пара; 2 – ТЭД; 3 – редуктор; 4 – резинометаллические опоры; 5 – упругая брусковая муфта
Fig. 1. Traction drive of EG2Tv: 1– wheelset; 2 – TED; 3 – reducer; 4 – rubber-metal supports; 5 – elastic bar coupling



а) б)

Рис. 2. Вид КМБ со стороны упругой муфты (а) и мембранная муфта (б):
1 – ТЭД; 2 – редуктор; 3 – упругая муфта; 4 - мембрана; 5 – жесткий фланец; 6 – фрикционная втулка; 7 – прижимной винт; 8 – штифт
Fig. 2. View at wheel-motor unit from elastic coupling (a) and membrane coupling (b): 1 – TED; 2 – reducer; 3 – elastic coupling; 4 – membrane; 5 – rigid flange; 6 – friction bushing; 7 – pressure screw; 8 – pin

Выбор компоновочного решения продиктован стремлением фирмы *TSA* минимизировать высоту привода, поскольку его варианты используются для подвижного состава с диаметром колес 800 мм. Расстояние от головки рельса до нижнего габарита ТЭД в этом приводе составляет примерно 240 мм, в то время как для моторных тележек отечественного электропоезда ЭД4М это расстояние равно 155 мм.

В интегрированном приводе использован тяговый электродвигатель *TME* 46-32-4 фирмы *TSA* (Австрия), в настоящее время заменяемый на отечественный аналог ДАТЭ-1У1. В продолжительном режиме мощность ТЭД – 300 кВт, момент на валу – 1211 Н·м. Масса двигателя – 700 кг, максимальная частота вращения – 4774 мин$^{-1}$. Удельная масса ТЭД составляет 0,58-0,6 кг/Нм, что существенно хуже, чем у самовентилирующегося ТЭД 1*TB*2216-0*GC*03, устанавливаемого на электропоездах ЭС2Г «Ласточка» производства ООО «Уральские локомотивы» (табл.). Как видно из таблицы, для самовентилируемых ТЭД удельная масса ТЭД может колебаться в широких пределах и может быть существенно снижена (как минимум, вдвое) при применении принудительной вентиляции.

Таблица

Характеристики тяговых электродвигателей

Table

Characteristics of traction motors

	TME 46-32-4	ДАТЭ-1У1	*HTA*-350	1*TB*2216-0*GC*03	1*TB*2019-1*G*02
Вентиляция	Самовентиляция	Самовентиляция	Самовентиляция	Самовентиляция	Принудительная
Мощность, кВт	300	305 (продолж.)	300 (продолж.)	330	500
Момент, Н·м.	1211	1215	1990	3400	2840
Масса, кг	700	725	1420	820	790
Максимальная частота вращения мин$^{-1}$	4774	4800	2560	4901	4100
Удельная масса, кг/Н·м	0,578	0,597	0,713	0,241	0,28

Ротор тягового электродвигателя с одной стороны опирается на подшипник в подшипниковом щите, а с другой – на подшипники ведущего вала осевого редуктора через жесткую дисковую муфту, конструктивно подобную той, что применяется в тяговых приводах электровозов 2ЭС10 производства ООО «Уральские локомотивы» и ЭП20 производства АО ТМХ.

Осевой редуктор производства *GMK* 2-66-495*E* производства фирмы *TSA* (Австрия) – двухступенчатый, передаточное число i = 6,599, масса с муфтой 630 кг, что выше веса редуктора с муфтой на электропоездах ЭС2Г «Ласточка» (около 450 кг) с i = 48484. Разница в весе редуктора обусловлена более высоким передаточным числом из-за меньшей конструкционной скорости. Корпуса обоих редукторов изготовлены из чугуна с шаровидным графитом.

Устройство упругой муфты *KPK D*460.7-1/6 показано на рис. 2 а. Конструктивно она представляет собой описанную в справочной литературе брусковую муфту. Основное отличие данной муфты от применяемых в общемашиностроительных конструкциях состоит в том, что бруски выполнены в виде пакетов плоских резинометаллических элементов, в которых резиновый слой привулканизован к металлу. Предварительная деформация резины обеспечивается при монтаже муфты.

Мембранная муфта *MEM* 300-*R*5 (рис. 2 б) фирмы *KWD* (Германия) соединена с валом ТЭД с возможностью проскальзывания муфты по валу при возникновении ударных моментов во время опрокидывания инвертора (режим короткого замыкания).

Таким образом, конструкция тягового привода базируется на использовании ранее известных и освоенных производством конструктивных элементов. Опорно-осевое исполнение продиктовано в первую очередь необходимостью использовать унифицированную конструкцию привода на возможно большем числе образцов моторвагонного подвижного состава и не преследует цель поиска рациональной конструкции именно для электропоезда ЭГ2Тв «Иволга».

Свойства рассматриваемого привода и анализ конструкции методами «know-why»

В результате исследований, проведенных ВНИИЖТ [2] установлено, что применение опорно-осевого привода, несмотря на применение асинхронных ТЭД и уменьшение диаметра колес на моторных тележках с 1050 мм до 950 мм привело к увеличению неподрессоренной массы, приходящуюся на одну ось, до 3,2 т, по сравнению с 2,58 т для тележки электропоезда ЭД4М. В результате, несмотря на

снижение статической нагрузки моторного вагона на ось с 21,9 т до 20,8 т, снижение массы тележки с 15,2 т. до 10 т, а также увеличение суммарного статического прогиба брутто с 213 мм до 271 мм при незначительном уменьшении статического прогиба брутто первой ступени (56 мм против 63 мм), воздействие на путь тележки электропоезда ЭГ2Тв ухудшилось по сравнению с тележкой электропоезда ЭД4М. Как было отмечено в [2], «в связи со значительно большей массой неподрессоренных частей средние вертикальные нагрузки колес на рельсы при движении в круговых кривых под воздействием головного вагона ЭГ2Тв № 002 на 12…16 кН превышали нагрузки от головного вагона ЭД4М № 0500». Отметим, что моторная тележка электровоза ЭД4М использует коллекторные ТЭД массой 2300 кг, а сама тележка является модернизированным вариантом тележки, созданной в середине 50-х годов прошлого века для электропоезда ЭР1.

Найти результаты исследований динамических качеств самого тягового привода авторам на момент написания данной статьи не удалось, в связи с чем оценка производится на основании результатов ранее проведенных исследований. Как было установлено в [3], при диаметре колес 1050 мм было затруднительно создать эффективное упругое опирание ТЭД на колесную пару из-за недостаточного пространства для размещения упругих элементов. Исходим из того, что частота колебаний неподрессоренной массы при прохождении стыковой неровности на пути одной и той же жесткости обратно пропорциональна корню квадратному из величины неподрессоренной массы. Известно, что для тепловоза 2ТЭ121 неподрессоренная масса для одной оси составляла $m_{н1}$ = 4,2 т, а частота колебаний неподрессоренной массы на упругом основании пути при прохождении неровностей пути на участке Ряжск-Отрожка Московской ж.д. составляла $f_{н1}$ = 22…40 Гц. Разброс частоты колебаний обусловлен различием жесткости пути в районе стыка и середине рельсового звена, а также изменением состояния пути. Исходя из этого, примем минимальную частоту колебаний сравниваемого аналога $f_{н1}$ = 22 Гц. При неподрессоренной массе электропоезда ЭС2Г $m_{н2}$ = 3,2 т частота колебаний должна составить

$$f_{н2} = f_{н1}\sqrt{\frac{m_{н1}}{m_{н2}}}\,. \qquad (1)$$

При вышеуказанных величинах $f_{н2}$ = 25 Гц. Для защиты от колебаний такой частоты массы привода, опирающейся на ось, которую в первом приближении оценим, как сумму массы редуктора и половины массы ТЭД, т.е. $m_{обр}$ = 800 кг, частота колебаний этой массы должна составить, исходя из практики постройки отечественных тяговых приводов, примерно $f_{нобр}$= $f_{н2}/2$ = 12 Гц. При амортизируемой массе в 800 кг жесткость вертикальной связи привода и оси должна составлять

$$k_{в} = 4\pi^2 f_{нобр}^2 m_{обр}\,. \qquad (2)$$

При вышеуказанных величинах $k_{в}$ = $4{,}5\cdot10^6$ Н/м. Для упрощения будем считать, что вертикальную нагрузку полностью воспринимают два параллельно работающих пакета муфты, расположенные горизонтально, тогда каждый из пакетов муфты будет иметь жесткость $k_{в1}$ = $2{,}25\cdot10^6$ Н/м.

При максимальном вращающем моменте на валу редуктора 2702 Н·м и передаточном числе i = 6,599 момент на муфте составит около 17830 Н·м. Радиус приложения усилия на пакетах муфты равен примерно 0,2 м, следовательно, тангенциальное усилие на муфте составит около 90000 Н, на каждом из 6 пакетов составит 15000 Н, а деформация сжатия составит 0,007 м или 7 мм. Исходя из того, что для обеспечения длительного срока службы резиновых элементов желательно, чтобы деформация не превышала 10 % высоты резинового элемента [4], получаем, что требуемая суммарная высота резиновых элементов должна быть не менее 70 мм, при наружном диаметре муфты порядка 400…500 мм.

Из рассмотренного можно сделать вывод, что использование брусковой муфты для эффективной амортизации динамических нагрузок в данном приводе теоретически возможно, но при максимальной скорости 120 км/ч и использовании асинхронного ТЭД не дает существенного

улучшения динамических свойств привода, поскольку величина неподрессоренной массы в данном случае в основном определяется массой колесной пары с тормозными дисками, расположенными на колесах. Можно предположить, что основной целью применения брусковой муфты в данном случае является снижение шума от зубчатой передачи.

Вследствие небольшого числа пар резинометаллических пакетов муфты (шесть пар), ее радиальная жесткость при вращении будет изменяться с частотой, кратной числу пар пакетов, что, при воздействии на муфту радиальной нагрузки от веса привода и нагрузок при реализации тягового усилия, будет создавать параметрическое возмущение, которое, при совпадении частоты возмущения с частотами собственных колебаний привода (массы ротора ТЭД на упругой муфте, массы ТЭД и редуктора на упругих опорах) будет приводить к резонансному усилению колебаний. Данное явление также требует дальнейшего изучения, как и возможность совпадения частот собственных колебаний привода с частотами периодических возмущений, источником которых могут быть неровности пути или другие детали самого привода.

Таким образом, при попытке повторения конструктивной схемы опорно-осевого привода с упругим опиранием при небольшой массе ТЭД моторвагонного подвижного состава для отечественных конструкций нельзя рассматривать, как рациональное, в связи с тем, что данный привод требует значительного объема исследований динамических явлений методами натурных испытаний. Кроме того, исследований потребуют конструкции муфты с резинометаллическими пакетами и диафрагменной муфты, которые сейчас не освоены отечественной промышленностью, и методики по их проектированию, расчету и особенностям технологии изготовления не могут быть разработаны только исходя из имеющихся для других машиностроительных конструкций.

Основным недостатком интегрированной схемы привода, как ранее упоминалось в [5, 6], являются низкая технологичность изготовления и ремонта из-за повышенных требований к точности обработки соединения ТЭД и редуктора и невозможности испытания ТЭД на стенде отдельно от редуктора. Возможность использования диафрагменной муфты в качестве предохранительной реализована за счет сил трения в цилиндрической посадке с гарантированным натягом, и небольшим диаметром, близким к диаметру вала. Поскольку усилие прижима поверхностей обеспечивается контактными деформациями втулки и фланца, а также деформациями ступицы фланца, для обеспечения стабильности предельного момента, при котором начинается проворот муфты, требуется высокая точность обработки сопрягаемых деталей. Кроме того, на величину предельного момента будут влиять различные эксплуатационные факторы, например, фреттинг-коррозия при микропроскальзываниях, если на муфту действуют крутящие моменты, близкие к предельным.

Выбор интегральной схемы привода в данном случае продиктован использованием высокооборотного ТЭД с максимальной частотой вращения, приближающейся к 5000 мин$^{-1}$, поскольку в этом случае расположение ведущего зубчатого колеса на валу ТЭД не позволяет обеспечить достаточный ресурс роторных подшипников. Использование же высокооборотного ТЭД при отсутствии ограничения по габаритам продиктовано желанием разместить муфты в качестве передаточного механизма или опоры в пространстве между ТЭД и осью, что, в свою очередь, необходимо для максимального уменьшения габаритов привода в осевом направлении. Это, в свою очередь, позволяет применять привод на подвижном составе с различной шириной колеи и, для фирмы стран ЕС, означает повышение серийности привода и снижение издержек на сложную технологическую оснастку. Таким образом, необходимость делать привод универсальным, для подвижного состава с разной шириной колеи, фактически загнала конструкторов в тупик, когда приходится выбирать не рациональное техническое решение, а единственно возможное. Кроме того, выбор

технологически сложных решений фактически привязывает потребителя к фирме, владеющей данной технологией.

Из перечисленного выше следует, что воспроизведение технических решений данного привода для российских ж.д. с шириной колеи 1520 мм нецелесообразно, как по причине недостаточной изученности опорно-осевого привода с упругим подвешиванием применительно к условиям эксплуатации на электропоездах, так и по причине неоправданной технологической сложности данного привода. Рассмотрим возможности создания вариантов данного привода, которые возможно освоить на отечественной технологической базе.

Полностью подрессоренный привод

В 2000 году в России был построен электропоезд ЭД6 с диаметром колес моторной тележки 950 мм и максимальной скоростью в пригородном варианте 130 км/ч. На электропоезде был применен опорно-рамный привод с полым карданным валом (рис. 3).

В приводе применен отечественный ТЭД типа ДТА 400-6 УХЛ2 мощностью 400 кВт и массой 998 кг. Если предположить, что соотношение скоростей продолжительного режима и максимальной для электропоездов ЭГ2Тв и ЭД6 близкое, то удельная мощность ДТА 400-6 УХЛ2 всего лишь на 7 % ниже, чем ТМЕ 46-32-4. ТЭД соединен с редуктором через конический фланец, передача мощности осуществляется с помощью упруго-компенсирующей муфты. Передача момента на колесную пару осуществляется с помощью полого карданного вала на оси и двух шарнирно-поводковых муфт, размещенных между осью колесной пары и корпусом ТЭД.

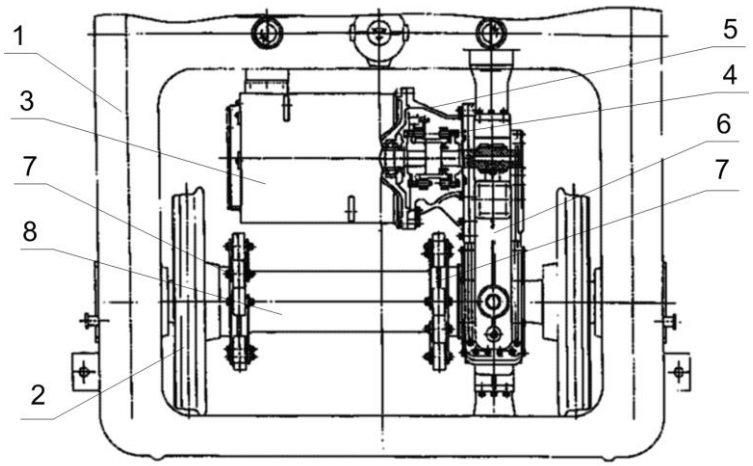


Рис. 3. Опорно-рамный привод электропоезда ЭД6:
1 - рама тележки; 2 – колесная пара; 3 – ТЭД; 4 – упруго-компенсирующая муфта;
5 – фланцевое соединение; 6 – редуктор; 7 – шарнирно-поводковая муфта; 8 – полый вал
Fig. 3. Support-frame drive of electric train ED6:
1 – bogie frame; 2 – wheel pair; 3 – TED; 4 – elastic-compensating coupling; 5 – flange connection; 6 – reducer;
7 – hinge-link coupling; 8 – hollow shaft

Таким образом, привод ЭД6 доказывает техническую возможность создания отечественного опорно-рамного тягового привода для городского электропоезда с диаметром колес 950 мм и конструкционной скоростью 120 км/ч.

При этом серьезным конструктивным недостатком тягового привода ЭД6 является наличие избыточных связей в узлах крепления ТЭД и осевого редуктора друг к другу, что в эксплуатации может приводить к возникновению нерасчетных нагрузок на узлы крепления и приводить к обрыву болтов, прежде всего, в узле фланца крепления.

Для устранения недостатка необходимо перепроектировать узел крепления, либо сделав раздельное крепление ТЭД и редуктора к раме, без крепления редуктора к корпусу ТЭД, либо трехточечное шарнирное крепление соединенных вместе редуктора и ТЭД, как показано на рис. 4.

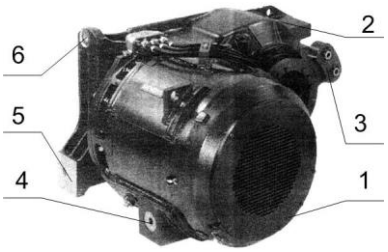


Рис. 4. Моторно-редукторный блок завода KWD (Германия): 1 - ТЭД; 2 – редуктор; 3 – фланец поводковой муфты; 4 – опора ТЭД на раму; 5 – опора редуктора на раму; 6 – кронштейн амортизатора связи редуктора с рамой

Fig. 4. Motor gearbox KWD plant (Germany): 1 – TED; 2 – reducer; 3 – flange of the lead muf; 4 – support of TED on the frame; 5 – gearbox support on the frame; 6 – bracket of shock-absorber for connection of rearward duct with frame

В последнем случае фланец крепления для увеличения прочности желательно выполнять, как одно целое с подшипниковым щитом ТЭД, и увеличить диаметр кольцевой поверхности, сопрягаемой с корпусом редуктора, до величины наружного диаметра ТЭД. Для соединения валов может быть использована двойная зубчатая муфта.

Для шарнирно-поводковой муфты, вследствие работы ее в ограниченных габаритах, необходима разработка отечественных сферических резинометаллических шарниров для требуемых нагрузок и углов поворота и перекоса. Опыт разработки подобных шарниров для отечественного подвижного состава имеет АО «ВНИКТИ». Следует отметить, что в приводе электропоезда ЭТ2Тв

Привод рассмотренной схемы при двухступенчатом редукторе требует увеличения осевых габаритов по сравнению с примененным на электропоезде ЭГ2Тв, в связи с размещением между ТЭД и редуктором упруго-компенсирующей муфты, что может стать препятствием для применения данной конструктивной схемы для тележки электропоезда ЭГ2Тв.

Частично подрессоренный привод с разделением точек подвеса

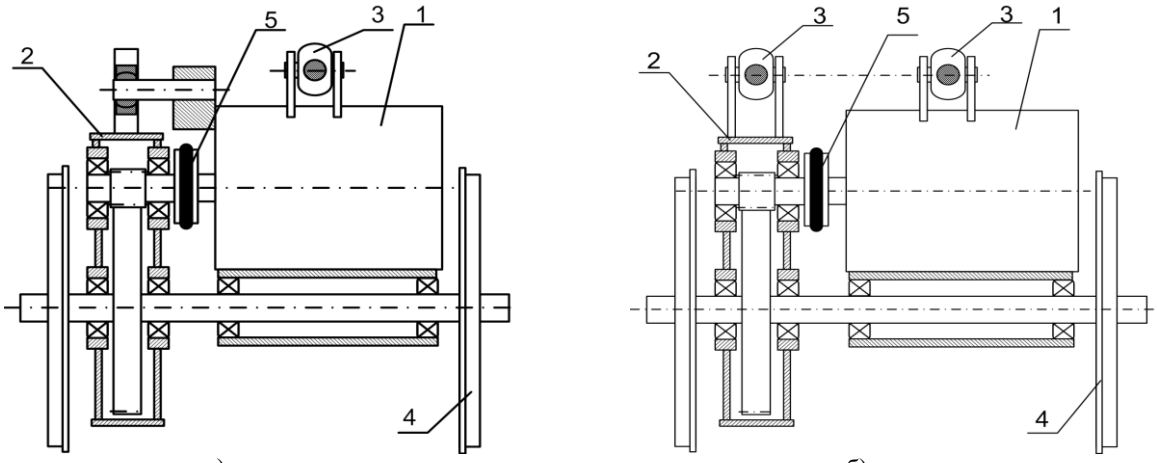
Технологически упростить конструкцию опорно-осевого привода при использовании высокооборотного ТЭД возможно, применив предложенную авторами агрегатную схему привода вместо интегрированной (рис. 5).

При агрегатной схеме привода осевой редуктор и ТЭД связаны друг с другом не жестким фланцевым, а шарнирным соединением (непосредственно или через раму тележки) и раздельно опираются на ось колесной пары. Таким образом, резко снижаются требования к точности обрабатываемых деталей ТЭД и осевого редуктора. Несоосность вала ротора ТЭД и ведущего вала осевого редуктора оказывается значительно меньше, чем при опорно-рамном ТЭД и осевом редукторе (на уровне погрешностей монтажа), что упрощает создание высокооборотной одинарной упругой муфты. При этом упругая муфта амортизирует удары в передаче при проезде неровностей пути. Крутильная жесткость муфты может быть выбрана в широких пределах, что позволяет как обеспечить эффективное гашение ударных нагрузок, так и отсутсвие совпадения собственных частот крутильных колебаний привода по низшей форме с частотой галопирования тележки. При этом упругая муфта может быть объединена с предохранительной, поверхности трения которой расположены на диаметре, близком к наружному диаметру муфты, что обеспечивает стабильность предельного момента и отсутствие задиров при провороте.

Недостатком агрегатного привода является увеличение числа подшипниковых узлов. Однако, как видно из рис. 1, между ТЭД и колесной парой имеется значительное пространство для размещения узлов моторно-осевых подшипников (МОП), что, в совокупности с небольшим весом ТЭД позволяет обеспечить достаточную надежность и долговечность подшипниковых узлов за счет применения двух отечественных радиальные подшипники с цилиндрическими роликами и од-

ного шарикового в качестве упорного. Такая комбинация подшипников применялась в буксовых узлах и осевых редукторах отечественного подвижного состава и показала надежность работы.

Основной сложностью при конструировании агрегатного привода является создание упругой муфты, работающей при частоте вращения до 5000 мин$^{-1}$. В связи с этим авторы рекомендуют использовать компоновку привода, в которой осевой редуктор шарнирно соединен с ТЭД (рис. 5 а), поскольку колебания боковой качки в этом случае не будут вызывать дополнительной несоосности валов ТЭД и осевого редуктора.



а) б)

Рис. 5. Схемы агрегатного тягового привода:
а – с шарнирным соединением редуктора и двигателя; б – с подвесками, имеющими шарниры на одной оси: 1 – двигатель; 2 – осевой редуктор; 3 – подвеска; 4 – колесная пара; 5 – упругая муфта
Fig. 5. Unit traction drive diagrams:
a – with hinge connection of reduction gear box and engine; b – with suspensions having hinges on one axis. 1 – motor; 2 – axial reducer; 3 – suspension; 4 – wheel pair; 5 – elastic coupling

Частично подрессоренный привод с разделением масс ТЭД и редуктора

Данный тип привода десятилетиями применяется на отечественных серийных электропоездах, его динамические свойства хорошо исследованы. В большинстве случаев это привод с ТЭД, имеющими частоту вращения ниже 3000 мин$^{-1}$, с одноступенчатыми редукторами и внешней двойной упругой муфтой.

На электропоездах ЭС2Г «Ласточка» (*Siemens Desiro RUS*) производства ООО «Уральские локомотивы» применяется привод с осевым редуктором и ТЭД с максимальной частотой вращения около 5000 мин$^{-1}$ (рис. 6).

Из-за применения быстроходного ТЭД редуктор выполнен двухступенчатым, а также использована сложная в изготовлении двойная зубчатая муфта. Привод не содержит элементов, амортизирующих ударные нагрузки при прохождении неровностей пути, вследствие чего требуется дальнейшее изучение его динамики. В связи с тем, что на электропоезде ЭГ2Тв из-за высокого передаточного числа i = 6,599 редуктор не может быть выполнен двухступенчатым, возможность применить вместо зубчатой упругую муфту в данном случае ограничена.

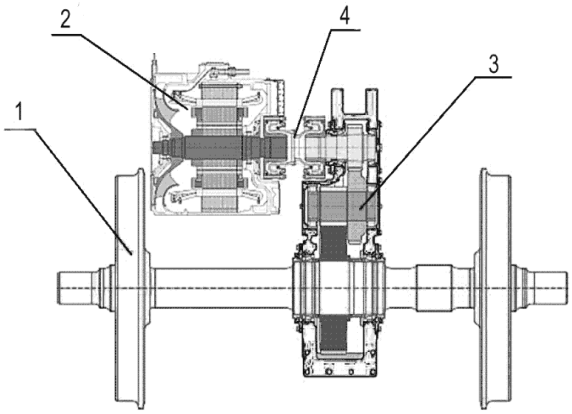


Рис. 6. Опорно-рамный привод электропоезда ЭС2Г:
1 - колесная пара; 2 – ТЭД; 3 – редуктор; 4 – двойная зубчатая муфта
Fig. 6. Support-frame drive of electric train ES2G:
1 – wheelset; 2 – TED; 3 – reducer;
4 – double gear coupling

Принципиальным достоинством привода с осевым редуктором применительно к специфике городских электропоездов является то, что между колесной парой и редуктором нет упруго-компенсирующих муфт. Это позволяет передавать на колесные пары ограниченного диаметра высокий крутящий момент, который позволяет развивать продольные ускорения вагона, близкие к предельным по условиям комфорта пассажиров.

Как видно из рис. 1, между корпусом ТЭД и поперечной балкой имеется расстояние примерно 250 мм, между корпусом ТЭД и осью – примерно 150 мм, при диаметре корпуса ТЭД примерно 550 мм. Таким образом, наружный диаметр ТЭД может быть увеличен примерно в 1,5 раза (до 850 мм), при этом суммарный зазор между наружной поверхностью корпуса ТЭД и остальными частями тележки составит порядка 100 мм, что вполне достаточно для крепления ТЭД.

Исходя из того, что мощность ТЭД при прочих равных условиях определяется площадью поверхности электротехнической стали ротора и его окружной скоростью, можно сделать вывод, что ТЭД с увеличенным примерно в 1,5 раза диаметром ротора и уменьшенной соответственно в 1,5 раза шириной пакета электротехнической стали будет иметь примерно тот же вес, что и исходный вариант и развивать ту же мощность. Максимальная частота вращения ТЭД и передаточное число редуктора соответственно уменьшатся до n = 3200 мин$^{-1}$ и i = 4,4. При данной величине передаточного числа тяговый привод может быть выполнен одноступенчатым, что позволяет увеличить расстояние между ТЭД и редуктором и разместить в этом пространстве двойную упруго-компенсационную муфту, обеспечивающую амортизацию динамических нагрузок в приводе.

Основным недостатком существующих торовых резинокордных муфт, применяемых на отечественных электропоездах, является то, что гофр резинокордного элемента расположен на периферии муфты. Вследствие этого при вращении муфты на гофр действуют наибольшие центробежные силы, что ограничивает частоту вращения муфты. В связи с этим ОАО «ВНИКТИ» для тягового привода метрополитена была разработана двойная резинокордная муфта, состоящая из плоских элементов в виде дисков (рис.7а). Дисковые резинокордные муфты более пригодны для соединения быстроходных валов, чем торовые с выпуклым тором, так как при монтаже муфты происходит вытягивание корда, жесткость муфты в радиальном направлении повышается, что необходимо для центрирования вала, соединяюшего муфты. Другим возможным вариантом является предложенная авторами двухгофровая муфта поперечной компенсации с обратным тором, которая имеет крепления только по наружному периметру резинокордного элемента (рис. 7 б).

Дополнительные пояса корда 5 расположенные во впадинах гофров, препятствуют растяжению внутренней части резинокордного упругого элемента 4. Кордные нити участков резинокордного упругого элемента 4 между гофрами и наружными краями резинокордного упругого элемента 4 натягиваются, тем самым препятствуя выползанию краев резинокордного упругого элемента 4 наружу при воздействии центробежных сил во время вращения компенсационной муфты. На конструкцию муфты подана заявка на получение патента.

Поскольку надежность и долговечность двойной муфты в этом случае определяется возможностью увеличить расстояние между ТЭД и редуктором, при проектировании ТЭД необходимо исходить из необходимости сокращения его осевых габаритов. В частности, это возможно при использовании вентильно-индукторного ТЭД вместо асинхронного, поскольку в вентильно-индукторном ТЭД сокращается длина лобовых частей обмотки статора [9]. Преимуществом вентильно-индукторных ТЭД, существенном для тяговых электрических машин, является более высокий к.п.д. при снижении мощности. Вентильно-индукторные ТЭД конструктивно просты и технологичны, в нашей стране имеется опыт их создания, например, это двигатель НТИ-350 производства ООО «ПК

НЭВЗ». Другим способом сокращения длины ТЭД, а также его массы является переход с самовентиляции на принудительную вентиляцию. Длина ТЭД при этом может быть уменьшена как за счет исключения вентилятора в корпусе ТЭД, так и за счет повышения теплонапряженности конструкции, поскольку интенсивное охлаждение обмоток производится независимо от частоты вращения якоря.

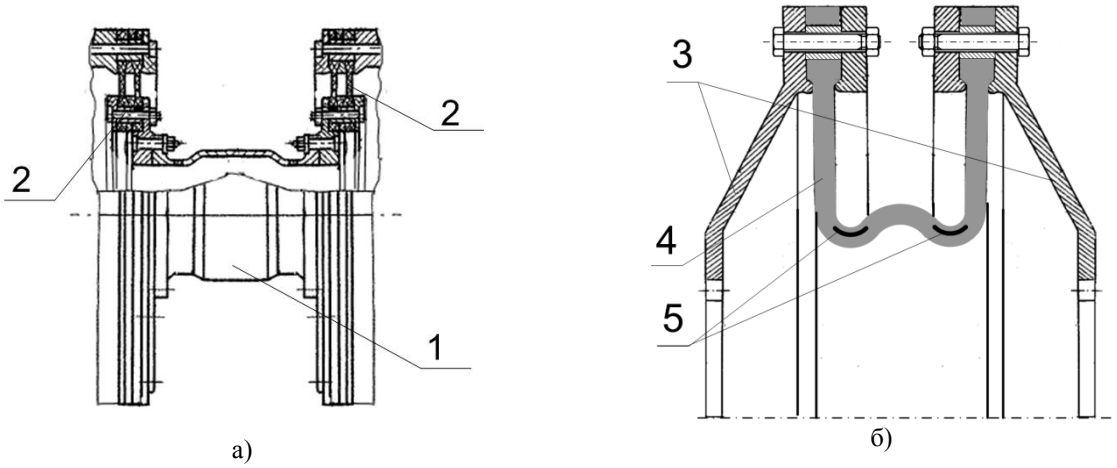


Рис. 7. Резинокордные муфты (а – двойная дисковая; б – двухгофровая с внутренними гофрами)
1 – промежуточный вал; 2 – дисковые муфты; 3 – фланцы; 4 – резинокордный упругий элемент;
5 – дополнительные пояса корда

Fig. 7. Rubber cord couplings (a - double disk; b - two-profile with internal corrugations)
1 – intermediate shaft; 2 – disk couplings; 3 – flanges; 4 is a rubber cord elastic member;
5 – additional cord belts

Проведенный анализ показывает, что критерии рациональности каждого из узлов привода в отдельности противоречат критериям рациональности привода в целом. Так, применение оптимальной с точки зрения массогабаритных показателей конструкции ТЭД приводит к снижению технологичности изготовления и обслуживания тяговой передачи и компенсирующих муфт, необходимости применения комплектующих определенных производителей. Открытым остается вопрос, в какой мере выбор технических решений проектировщиками зарубежных фирм связан с заинтересованностью в использовании технологий, недоступных другим производителям, для предотвращения возможной конкуренции.

Исходя из общей задачи возможности освоения производством в России всех компонентов механической части привода, на основании вышеизложенных результатов анализа, можно сделать вывод, что наиболее рациональным путем создания отечественного тягового привода городского электропоезда с диаметром колес 950 мм является разработка ТЭД требуемой мощности с окружной скоростью ротора, близкой к скорости прототипа, но с диаметром, максимально использующим пространство между осью колесной пары и рамы тележки. Это позволит снизить максимальную частоту вращения ТЭД до 3200 мин$^{-1}$ и передаточное число до 4,4, позволив тем самым сделать редуктор одноступенчатым и использовать схему с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором. При этом муфта, соединяющая валы ТЭД и редуктора, может быть выполнена в виде упруго-компенсирующей, что позволяет снизить динамические нагрузки в валопроводах привода. Осевой редуктор, выполненный в виде отдельного узла, более технологичен и прост в изготовлении, чем при существующей интегрированной конструкции. Компоновка привода с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором также позволяет снизить неподрессоренную массу тележки и улучшить ее динамические свойства. Динамика привода с осевым редуктором хорошо изучена в нашей стране, что сократит сроки проектирования и доводки изделия.

Поскольку отечественным производством уже освоен выпуск тягового электродвигателя ДАТЭ-1У1, авторы предлагают в качестве компромиссного варианта, позволяющего повысить технологичность изготовления остальных компонентов привода и упростить освоение их производством на отечественных предприятиях, применить агрегатную схему привода, с подвижным соединением ТЭД и осевого редуктора и опорой ТЭД на ось колесной пары с помощью МОП. Основной задачей при проектировании такого привода является создание высокооборотной одинарной упруго-компенсирующей муфты, рассчитанной на технологическую погрешность монтажа узлов ТЭД и осевого редуктора.

Выводы и рекомендации

1. В результате проведенного анализа опорно-осевого тягового привода электропоезда ЭГ2Тв «Иволга», состоящего из импортных комплектующих, выявлены следующие его недостатки:

– применение опорно-осевой схемы привело к увеличению неподрессоренной массы тележки электропоезда ЭГ2Тв и ухудшило ее динамические качества по сравнению с аналогами, использующими тяговый привод отечественного производства, несмотря на снижение массы тележки;

– динамика опорно-осевых приводов электропоездов с упругим подвешиванием недостаточно изучена и создание привода такой схемы требует значительных объемов исследований в условиях отечественных железных дорог методами натурных испытаний;

– конструкция интегрированного тягового привода технологически более сложна в изготовлении и ремонте по сравнению с тяговыми приводами электропоездов отечественных конструкций вследствие жесткого соединения ТЭД и редуктора при опоре ротора ТЭД одной стороной на подшипники редуктора;

– конструкция упругой муфты с пакетами плоских резиновых элементов не освоена отечественным производством и требует исследований;

– при использовании мембранной муфты в качестве предохранительной возникают технологические сложности обеспечения заданной величины предельного момента, в связи с размещением контактирующих поверхностей на небольшом диаметре и высокой жесткости деталей, деформация которых обеспечивает контактное давление.

Таким образом, создание отечественного аналога тягового привода электропоезда ЭГ2Тв с использованием тех же конструктивных решений нецелесообразно, поскольку приведет к длительным доводочным работам.

2. Имеется опыт создания отечественного тягового привода для электропоезда ЭД6 с диаметром колес 950 мм и полным подрессориванием ТЭД и редуктора. Недостатком тягового привода электропоезда ЭД6 является статическая неопределимость узлов крепления ТЭД и редуктора к раме тележки, что необходимо учесть при проектировании подобных приводов. При использовании данной схемы привода необходима разработка отечественных сферических резинометаллических шарниров для шарнирно-поводковых муфт. Возможным препятствием для использования привода данной схемы в тележке электропоезда ЭГ2Тв может стать увеличение осевого габарита привода из-за применения двухступенчатого редуктора.

3. Использованию хорошо изученной в отечественной практике конструктивной схемы с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором при использовании ТЭД ДАТЭ-1У1 препятствует большая частота вращения ТЭД (около 5000 мин$^{-1}$). В связи с этим авторы считают целесообразным создание ТЭД с увеличенными примерно в 1,5 раза радиальными габаритами и той же окружной скоростью ротора, чтобы снизить максимальную частоту вращения до до 3200 мин$^{-1}$ и передаточного числа до 4,4 и использовать одноступенчатый редуктор и двойную дисковую резинокордную муфту. Авторами также предложена конструкция двухгофровой резинокордной муфты по-

перечной компенсации с тором обратной кривизны.

4. Для варианта с использованием высокооборотного ТЭД ДАТЭ-1У1 авторы предлагают использовать агрегатную схему привода с подвижной связью редуктора и ТЭД. Основной проблемой при создании такого привода является создание высокооборотной одинарной упругой муфты, компенсирующей погрешности монтажа.

5. На предложенные авторами решения по теме статьи получены два патента на полезные модели, подана заявка на получение патента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Воробьев В.И., Дорофеев О.В., Измеров О.В., Злобин С.Н., Пугачев А.А., Николаев Е.В. Развитие классификации механической части тяговых приводов железнодорожных локомотивов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 1 (351). С. 130-138.
2. Воздействие на путь электропоездов пригородного следования. / А.М. Бржезовский. // Вестник ВНИИЖТ, 2018. т.77, № 4. С. 191-199.
3. Повышение надёжности экипажной части тепловозов / А.И. Беляев, Б.Б. Бунин и др. Под ред. Л.К. Добрынина. – М.: Транспорт, 1984.-248с.
4. Потураев В.Н. Резиновые и резинометаллические детали машин / В.Н. Потураев. – М., Машиностроение, 1966 – 299 с.
5. В.И. Воробьев, А.Г. Стриженок, О.В. Измеров. Поиск новых конструктивных схем редукторного и безредукторного тягового привода локомотива с частичным обрессориванием масс // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 1 (49). С. 16-21.
6. Воробьев В.И., Пугачев А.А., Измеров О.В., Николаев Е.В. Поиск рациональных технических решений тепловоза для Восточного полигона. // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 10 (107). С. 53-63.
7. Патент на полезную модель № 164797, Российская Федерация, МПК B61C 9/48. Тяговый привод локомотива [Текст] / Воробьев В.И., Измеров О.В., Новиков В.Г., Вдовин А.В., Бондаренко Д.А., Новиков А.С., Воробьев Д.В. Опубл. 20.09.2016, бюл. № 26.
8. Патент на полезную модель № 176845, Российская Федерация, МПК B61C 9/48, B61C 15/00, B60L 9/02. Тяговый привод локомотива. / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Новиков А.С., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Шорохов С.Г. Опубл. 30.01.2018, бюл. № 4.

REFERENCES

1. Vorobyev VI, Dorofeev OV, Izmerov OV, Zlobin SN, Pugachev AA, Nikolaev EV. Development of classification of the mechanical part of traction drives of locomotives. Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology. 2022;1(351):130-138.
2. Brzezovskiy AM. Impact on the track from EMU commuter train. The Russian Railway Science Journal. Moscow; 2018;77(4):191-199.
3. Belyaev AI, Bunin BB. Improving the reliability of the crew part of locomotives. Moscow: Transport; 1984.
4. Poturaev VN. Rubber and rubber–metal parts of machines. Moscow: Mashinostroenie; 1966.
5. Vorobyov VI, Strizhenok AG, Izmerov OV. Search of new design schemes of geared and direct-drive traction mechanism of locomotive with mass partial springing. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016;1(49):16-21.
6. Vorobyev VI, Pugachev AA, Izmerov OV, Nikolaev E.V. Search of rational engineeringsolutions of a diesel locomotive for Eastern Polygon. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2021;10(107):53-63.
7. Vorobyov VI, Izmerov OV, Novikov VG, Vdovin AV, Bondarenko DA, Novikov AS, Vorobyov DV. Utility Model Patent No. 164797, Russian Federation, МПК B61C 9/48. Traction drive of a locomotive. 2016 Sep 20.
8. Vorobyev VI, Antipin DYa, Izmerov OV, Novikov AS, Pugachev AA, Bondarenko DA, Shorokhov SG. Utility Model Patent No. 176845, Russian Federation, МПК B61C 9/48, B61C 15/00, B60L 9/02. Traction drive of the locomotive. 2018 Jan 30.

Информация об авторах:

Пугачев Александр Анатольевич, д.т.н., 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, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.

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

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

Pugachev Aleksandr Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Electronics and Electrical Engineering at Bryansk State Technical University, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru , orcid: 0000-0002-1836-0923.
Vorobyov Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railways Rolling Stock at Bryansk State Technical University, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru .
Izmerov Oleg Vasilyevich – Competitor of the Department of Railways Rolling Stock at Bryansk State Technical University, email: izmerov@yandex.ru.
Nikolaev Evgeny Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Traction Rolling Stock at 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 17.01.2023; одобрена после рецензирования 25.01.2023; принята к публикации 27.02.2023. Рецензент – Волохов Г.М., доктор технических наук, заведующий отделением динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры Акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 17.01.2023; approved after review on 25.01.2023; accepted for publication on 27.02.2023. The reviewer is Volokhov G.M., Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Dynamics and Strength of Rolling Stock and Infrastructure of the Joint Stock Company "Research, Design and Technological Institute of Rolling Stock, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.