

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.021

doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-48-62

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ ЛОКОМОТИВОВ

Владимир Иванович Воробьев^{1✉}, Александр Анатольевич Пугачев², Андрей Анатольевич Фатеев³

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

³ Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ vladimvorobiev@yandex.ru

² alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

³ fateev_70@list.ru

Аннотация

Рассмотрена проблема критериев выбора тягового привода для перспективных грузовых локомотивов. В результате анализа конструкций тяговых приводов, обеспечивающих максимальную реализацию тяговых свойств и снижение проскальзывания колес по рельсу установлено, что указанным требованиям соответствуют конструкции приводов с опиранием большого зубчатого колеса на ось колесной пары и наличием в валопроводах упругого звена, а именно приводы с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором, с опорно-осевым подвешиванием ТЭД агрегатной компоновки и с опорно-осевым подвешива-

нием ТЭД интегрированной компоновки с упругими элементами на быстроходной или тихоходной стороне тяговой передачи. Предложен привод агрегатной компоновки с уменьшенным числом осевых подшипников и увеличенным местом для их размещения, привод интегрированной компоновки с торсионом в полом якоре и привод интегрированной компоновки с упругим звеном в виде дисковых резинокордных муфт.

Ключевые слова: привод, локомотив, сцепление, колесо, рельс, динамика, надежность, конструирование.

Ссылка для цитирования:

Воробьев В.И. Анализ возможных конструктивных решений тяговых приводов локомотивов / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, А.А. Фатеев // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 11. – С.48-62. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-48-62.

Original article

Open Access Article

ANALYSIS OF POSSIBLE DESIGN SOLUTIONS OF LOCOMOTIVE TRACTION DRIVES

Vladimir Ivanovich Vorobyov^{1✉}, Aleksandr Anatolyevich Pugachev², Andrey Anatolyevich Fateev³

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

³ Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ vladimvorobiev@yandex.ru

² alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

³ fateev_70@list.ru

Abstract

The problem of criteria for choosing a traction drive for promising freight locomotives is considered. As a result of the analysis of traction drive designs that maximize traction properties and reduce wheel slippage on the rail, it is found that the specified requirements

are met by the design of drives with the support of a large gear wheel on the axle of the wheelset and the presence of an elastic link in the shaft lines, namely drives with a support frame suspension TED and an axial gearbox with an axial suspension TED of an ag-

gregate layout and with axial suspension TED of an integrated layout with elastic elements on the high-speed or slow-speed side of the traction transmission. An aggregate drive with a reduced number of axial bearings and an increased space for their placement, an

Reference for citing:

Vorobyov VI, Pugachev AA, Fateev AA. Analysis of possible design solutions of locomotive traction drives. Transport Engineering. 2025;11:48-62. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-48-62.

Введение

Повышение тяговых свойств отечественных грузовых локомотивов, что, в первую очередь, обусловлено необходимостью повышения веса грузовых составов на Восточном полигоне, сопровождается следующими тенденциями развития тяговых приводов локомотивов, в частности, их механической части:

- применение бесколлекторных тяговых электродвигателей (ТЭД);
- повышение осевой нагрузки для улучшения сцепных свойств;
- унификация экипажной части тепловозов и электровозов, и, в частности, тягового привода.

Последняя тенденция связана как с необходимостью повышения осевой нагрузки при сохранении допустимых величин напряжений в контакте «колесо-рельс», так и ростом стоимости локомотивов с бесколлекторными ТЭД, что вызывает необходимость сократить издержки производства за счет унификации – в частности, применения колес диаметром 1250 мм.

В настоящее время на современных отечественных грузовых локомотивах с диаметром колес 1250 мм применяются опорно-осевые тяговые приводы двух типов:

- тяговый привод простой схемы по [1] с двусторонней тяговой передачей, представляющий собой модернизированный вариант тяговых приводов, ранее применявшихся на электровозах серий ВЛ80 с разными индексами;
- тяговый привод интегрированной схемы по [1], применявшийся, например, на электровозах 2ЭС10.

Конструкция приводов обоих типов достаточно рассмотрена в отечественной технической литературе [2, 3], в связи с

integrated drive with a torsion bar in a hollow armature, and an integrated drive with an elastic link in the form of disc rubber-cord couplings are proposed.

Keywords: drive, locomotive, coupling, wheel, rail, dynamics, reliability, design.

чем нет необходимости описания их в настоящей статье.

При использовании бесколлекторных ТЭД (и моторно-осевых подшипников качения в приводе простого типа) оба типа привода способны обеспечить уровень надежности и долговечности, соответствующую требованиям заказчика в лице ОАО «РЖД». К недостаткам указанных приводов относится отсутствие упругого звена в валопроводах, что ведет к увеличению динамической неподрессоренной массы, т.е. определенной с учетом моментов инерции вращающихся масс, которая значительно превышает статическую. При отсутствии точных данных о моментах инерции ротора и статора ТЭД, исходя из того, что динамический момент, создаваемый в тяговой зубчатой передаче при проезде стыковых неровностей пути, препятствует повороту статора ТЭД, ввиду того, что это требует преодоления инерции ротора ТЭД, проворачиваемого при перемещении большого зубчатого колеса относительно малого, в первом приближении можно принять, что к динамической неподрессоренной массе будет относиться вся масса ТЭД, а не ее часть. Согласно исследованиям [4], отсутствие упругой связи в валопроводах опорно-осевого тягового привода может приводить к увеличению неподрессоренной массы, воздействующей на путь при проезде вертикальных неровностей, примерно на 30% по сравнению со значениями неподрессоренной массы, используемыми в расчетах по воздействию экипажа на путь (например, в [5]). Увеличение неподрессоренной массы ведет к снижению реализуемого коэффициента сцепления колес с рельсами за счет динамической разгрузки колес при прохождении неровностей пути [6]; кроме того, сцепные свой-

ства локомотива ухудшаются из-за возникновения высоких динамических моментов в тяговом приводе с жесткой зубчатой передачей, что отмечалось еще в [7] и было одной из причин начала разработки и внедрения упругих зубчатых колес (УЗК) для отечественных локомотивов. Так, в [8] констатируется, что при использовании жесткого зубчатого колеса коэффициент сцепления тепловоза 2ТЭ10Л при прохождении участков пути с волнообразным износом уменьшался на 20 % и более; соответственно, данное явление может быть одной из причин развития волнообразного износа.

Следует отметить, что для североамериканских железных дорог данная проблема будет менее актуальной вследствие низкой интенсивности движения и использования тепловозной тяги с низкой скоростью на руководящем подъеме (15...20 км/ч) и, соответственно, меньшими ускорениями неподрессоренных масс при прохождении стыков; кроме того, влияние неподрессоренной массы локомотива на состояние пути на североамериканских ж.д. будет менее заметным из-за более высокой нагрузки на ось (300 кН и более). На железных дорогах стран ЕС, вследствие более высокой доли пассажирского движения по сравнению с грузовым (в т.ч. скоростного и высокоскоростного), и меньших весов грузовых составов (за исключением отдельных специализированных линий для грузового движения, вроде Кируна-Нарвик) следует ожидать меньшей высоты неровностей пути, в связи с чем применение жесткой зубчатой передачи на этих дорогах создает меньше наблюдаемых проблем. В КНР, где специфика же-

лезных дорог ближе к российским, в последнее время проводятся исследования проблемы полигонального износа колес локомотивов, предположительные причины которого исследователи видят в динамических процессах при взаимодействии колеса с рельсом [9].

Применение электротокковых и электромагнитных усилителей сцепления, несмотря на обнадеживающие результаты испытаний АО «ВНИКТИ» макетного образца локомотива [10, 11], не снимает проблему влияния жесткой зубчатой передачи на коэффициент сцепления, потому что, как показано в [11], при использовании усилителей сцепления коэффициент сцепления зависит от скорости движения, а, значит, и от динамических нагрузок в тяговом приводе.

Можно сделать вывод, что необходим поиск новых технических решений механической части тягового привода, позволяющих снизить влияние вращающихся масс ротора ТЭД на усилия в приводе и воздействие неподрессоренных масс на путь. Основной проблемой при этом является большое разнообразие известных конструкций, а также отсутствие единых критериев для их выбора. Например, если в [7] в качестве наиболее перспективного типа привода предлагается считать привод с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и редуктора на оси, то в настоящее время железные дороги продолжают заказывать грузовые локомотивы с опорно-осевым приводом, который в [7] рассматривается, как динамически несовершенный. Предлагаемая статья представляет собой попытку решения данной проблемы.

Анализ возможных вариантов снижения влияния вращающихся масс ротора ТЭД на усилия в приводе и воздействия неподрессоренных масс на путь

Для анализа проблемы воспользуемся методами технической инноватики [12]. Основным противоречием требований к тяговому приводу является противоречие между требованием уменьшить инерцию вращающихся масс тягового привода, приведенную к колесной паре, и условием невозможности уменьшить величину этой инерции по требованиям

обеспечения крутящего момента и мощности ТЭД. Используя предложенные О.В. Измеровым классификацию тяговых приводов [13] и матрицу уровней средств управления при решении задачи создания машины [12], рассмотрим возможные варианты решений (рис. 1). В число рассматриваемых включены те из вариантов, которые будут иметь невысокий уровень

униформации, т.е. либо реализованные на различных серийных локомотивах, или создаваемые на основе элементов, большин-

ство которых уже освоены производством и эксплуатацией.

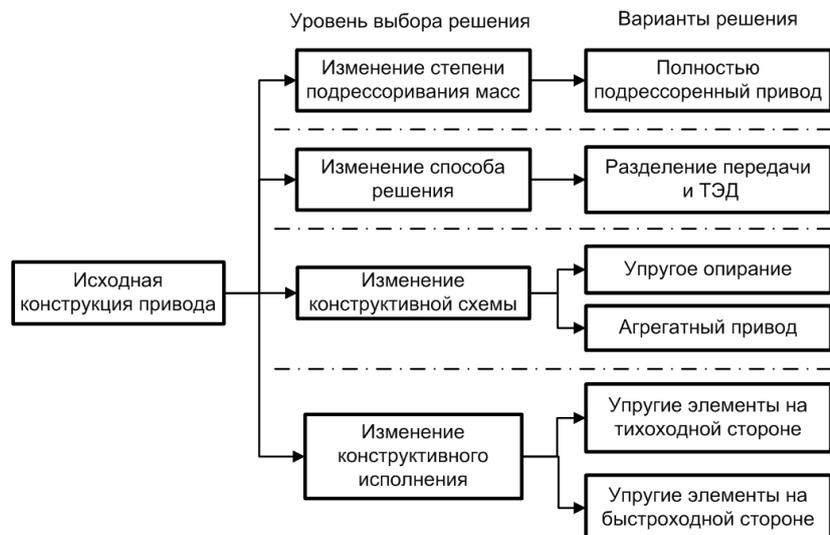


Рис. 1. Схема возможных вариантов разрешения противоречий к тяговому приводу.
 Fig. 1. Scheme of possible options for resolving contradictions to the traction drive

Как видно из рис. 1, в настоящее время имеет смысл рассматривать шесть возможных вариантов решения.

1. Полностью поддресоренный привод, или привод с опорно-рамным ТЭД, имеющий компенсирующий механизм на тихоходной стороне тяговой передачи, благодаря чему к поддресоренным массам относятся как ТЭД, так и тяговая передача, в настоящее время применяется на пассажирском тепловозе ТЭП70, пассажирских электровозах ЭП2 и ЭП20. На грузовых отечественных локомотивах данный тип привода применялся на опытных электровозах ВЛ81 и ВЛ84, а также на серии тепловозов 2ТЭ70 из 12 машин. Устройство привода данного типа подробно описано в отечественной литературе, например, [4, 7, 13, 14].

Основным достоинством привода с компенсирующим механизмом на тихоходной стороне является отмеченное в [7] кинематическое совершенство: при проезде вертикальных неровностей пути в валопроводах привода возникают наименьшие относительно других схем привода динамические моменты, обусловленные только колебаниями галоупирования тележки ($0 \dots 0,5M_{расч}$, где $M_{расч}$ – статический крутящий момент в расчетном режиме тяги).

Одновременно данный привод не создает вертикальных усилий в раме тележки, приводящих к перераспределению статической нагрузки по осям тележки [4], поскольку на колесную пару передается только крутящий момент. Данные обстоятельства были одной из причин, по которым полностью поддресоренный привод в 70-х годах прошлого века рассматривался, как перспективный для грузовых электровозов; ожидалось, что данный привод позволит повысить в коэффициент тяги на 12...15 %.

Основные недостатки полностью поддресоренного привода являются следствием расположения компенсирующего механизма на тихоходной части привода. Для отечественного грузового локомотива с бесколлекторными ТЭД осевая сила тяги превышает 70 кН, что вынуждает применять муфты угловой компенсации и полый вал между осью и корпусом ТЭД, требующий, в свою очередь, увеличивать расстояние между корпусом ТЭД и осью колесной пары. При этом необходимо увеличить зазор от нижнего габарита редуктора до уровня головки рельса (УГР) по сравнению с опорно-осевым приводом, в связи с тем, что редуктор относится к поддресоренным массам; при диаметре колеса 1250

мм это приводит к сокращению зубьев большого зубчатого колеса примерно на 15 %, и к соответствующему уменьшению централи, что, соответственно, ведет к уменьшению расстояния между корпусом ТЭД и осью колесной пары. Ранее авторами было предложено снять указанный антагонизм свойств двумя способами: путем применения ТЭД с осевым магнитным потоком (дисковых) [15], развитие которых было предложено еще в 70-х годах [16], и которые позволили бы существенно увеличить крутящий момент на валу ТЭД и увеличить централь зубчатой передачи за счет уменьшения передаточного числа, и путем применения дугостаторных асинхронных ТЭД с незамкнутым статором [17], которые позволяют уменьшить централь тяговой передачи.

Таким образом, полностью подрессоренный привод можно рассматривать в качестве перспективного типа для грузового локомотива в случае освоения выпуска новых конструкций ТЭД, решающих проблему размещения полого вала.

2. Привод с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором относится к приводам с частичным подрессориванием масс привода путем разделения ТЭД и передачи. Компенсирующий механизм расположен на быстроходной стороне тяговой передачи, что позволяет использовать привод одной и той же конструкции для грузовых и пассажирских локомотивов путем изменения передаточного числа редуктора. В настоящее время на отечественных дорогах широко применяется на пассажирских электровозах: ЭП1 и оставшихся в эксплуатации электровозах постройки предприятий ЧССР. На грузовых отечественных локомотивах применялся на серийном тепловозе 2ТЭ121, опытных тепловозах ТЭ136, 2ТЭ126, ТЭ137, опытном электровозе ВЛ83 (мономоторный). Устройство привода данного типа и особенности его динамических свойств также подробно описано в отечественной литературе, например, [4, 7, 13].

Основным достоинством привода с размещением компенсирующего механизма на быстроходной стороне передачи является его универсальность и возможность

использовать на локомотивах с конструкционной скоростью от 100 до 200 км/ч, поскольку статические нагрузки на передаточный механизм остаются постоянными, а динамические можно считать близкими к постоянным, поскольку при увеличении скорости движения вследствие уменьшения передаточного числа редуктора снижается момент инерции ротора, приведенный к оси колесной пары. Поскольку редуктор расположен на оси колесной пары, данный привод практически не имеет ограничений осевой силы тяги.

Для привода с осевым редуктором в настоящее время нет принципиальных трудностей при конструировании и освоении производством, он может быть изготовлен с применением только отечественных комплектующих. Наиболее ответственным узлом привода является передаточный механизм, в котором целесообразно использовать дисковые резинокордные и зубчатые муфты.

Как показали результаты натурных испытаний тепловоза 2ТЭ121 (рис.2), экстремальные значения динамического момента на быстроходном валу осевого редуктора за период замера в 30-40 секунд в приводе с осевым редуктором при скоростях расчетного режима 50 км/ч, типичной для грузовых электровозов, в среднем для разных замеров равны 2,5 кНм. Это означает, что, при том же передаточном числе редуктора и коэффициенте тяги $\psi = 0,28$, характерном для электровозов с бесколлекторными ТЭД, среднемаксимальные величины динамической составляющей крутящего момента составят лишь 0,24 $M_{расч}$. Из этого можно сделать вывод, что для привода с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором возможности повышения коэффициента тяги за счет уменьшения динамической составляющей крутящего момента приближаются к полностью подрессоренному тяговому приводу.

Основным недостатком привода с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором, проявившимся после начала внедрения бесколлекторных ТЭД с повышенным числом оборотов, является необходимость увеличения диаметра вала ротора ТЭД, и, соответственно, диаметра роторных под-

шипников, вследствие размещения торсионного вала внутри вала ротора, с необходимостью обеспечить свободное верти-

кальное перемещение торсионного вала при смещении быстроходного вала осевого редуктора относительно вала ротора.

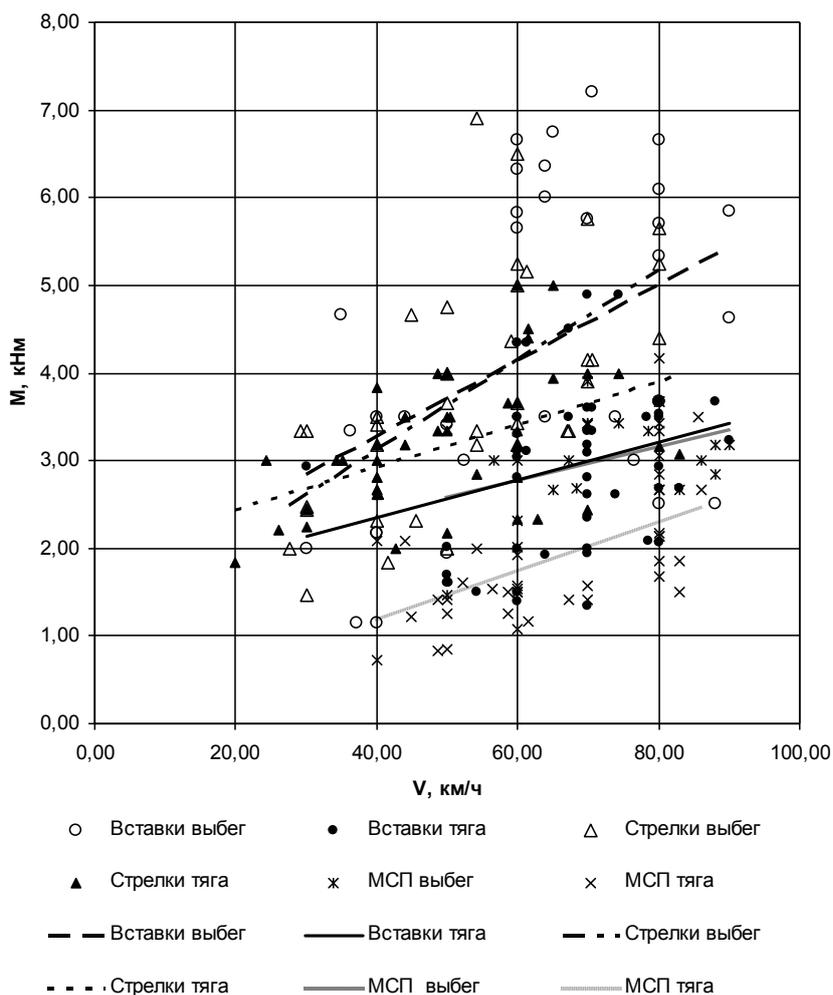


Рис. 2. Зависимость абсолютного экстремума реализации динамического момента в валопроводах тягового привода тепловоза 2ТЭ121 от скорости движения по различным неровностям пути участка Голутвин-Рязжск (МСП-межстыковые участки пути)

Fig. 2. The dependence of the absolute extremum of the dynamic moment in the shaft-wires of the traction drive of the diesel locomotive 2TE121 on the speed of movement along various irregularities of the Golutvin-Ryazhsk section (MSP-inter-joint sections of the track)

Если в осевом редукторе электровоза 2ЭС10 с опорно-осевым приводом интегрированного типа диаметр ведущего вала под радиальные подшипники *NU226 ECML/C4HVR* компании *SKF* составляет 130 мм, то в электровозе ДСЗ с опорно-рамным приводом и осевым редуктором диаметр вала ТЭД СТА-1200У1 или АД-914У1 равен 188 мм [18], что почти на 45 % больше. Максимальная частота вращения подшипников *NU 226 ECML* составляет 5300 мин⁻¹, в то время как подшипников *NJ 1038 ML* той же фирмы с

внутренним диаметром 190 мм – только 3800 мин⁻¹. Это является одной из причин, по которой максимальная частота вращения вышеуказанных ТЭД электровоза ДСЗ составляет 2900 мин⁻¹, а для ТЭД 1ТВ2822 электровоза 2ЭС10 – 3425 мин⁻¹. Таким образом, возможности уменьшения массы ТЭД за счет повышения числа его оборотов для опорно-рамного привода с осевым редуктором меньше, чем в опорно-осевых приводах. Вместе с тем, при использовании бесколлекторных ТЭД и колес диаметром 1250 мм, трудностей с размещени-

ем ТЭД достаточной мощности не возникает.

Другим недостатком данного типа приводов является наибольшее из рассматриваемых конструкций влияние на перераспределение нагрузок по осям при реализации силы тяги, из-за необходимости приближать вертикальную тягу подвески редуктора к оси вала редуктора (для уменьшения расцентровки последнего с валом ТЭД и повышения долговечности передаточного механизма). В связи с этим при применении данного привода на грузовых локомотивах целесообразно при

двухступенчатом рессорном подвешивании использовать наклонные тяги для передачи тяговых усилий с тележки на кузов, а при одноступенчатом – сбалансированное рессорное подвешивание при минимальном вертикальном статическом прогибе опор кузова на тележку.

3. Опорно-осевой привод интегральной компоновки с упругим опиранием на колесную пару, конструкция которого ранее была предложена и запатентована авторами статьи [19], принципиально аналогичен опорно-центровым тяговым приводам, описанным в [4, 7, 13] (рис. 3).

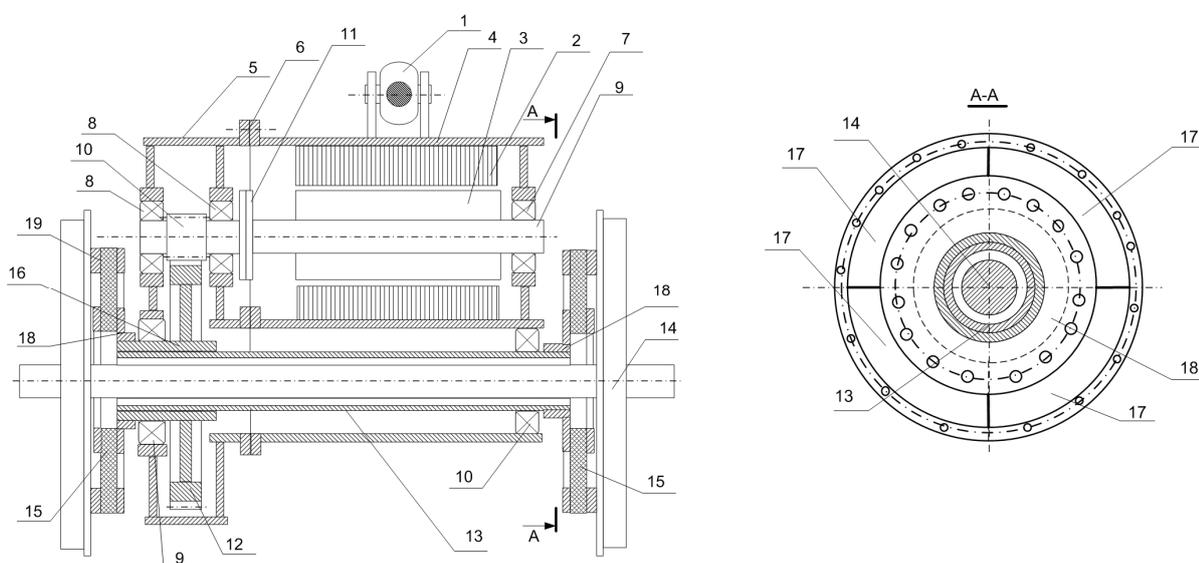


Рис. 3. Тяговый привод интегрированной компоновки с упругим опиранием на ось:

1 – подвеска; 2 – ТЭД; 3 – статор ТЭД; 4 – ротор ТЭД; 5 – осевой редуктор; 6 – разъемное соединение; 7 – подшипник ротора; 8 – подшипники вала осевого редуктора; 9, 10 – осевые подшипники; 11 – мембранная муфта; 12 – большое зубчатое колесо; 13 – полый вал; 14 – колесная пара; 15 – упругие элементы; 16 – ступица; 17 – сектор; 18 – фланец; 19 – кольцевой выступ

Fig. 3. The traction drive of the integrated layout with elastic support on the axis:

1 - suspension; 2 - TED; 3 - TED stator; 4 - TED rotor; 5 - axial reduction gear; 6 - detachable connection; 7 - rotor bearing; 8 - bearings of axial reduction gear box shaft; 9, 10 - axial bearings; 11 - membrane coupling; 12 - large gear wheel; 13 - hollow shaft; 14 - wheelset; 15 - elastic elements; 16 - hub; 17 - sector; 18 - flange; 19 - annular projection

Основным достоинством привода с упругим опиранием на ось является расположение упругих элементов снаружи, что делает их доступными для осмотра и ремонта. В отличие от полностью подрессоренных приводов с полым карданным валом, наружный диаметр полого вала здесь меньше, поскольку собственная частота колебаний ТЭД на упругом подвешивании может быть примерно вдвое выше, чем собственная частота колебаний буксовой ступени при двухступенчатом рессорном

подвешивании (8...10 Гц против 4...5 Гц), соответственно, статический прогиб упругого подвешивания ТЭД и зазор между полым валом и осью может быть также в разы ниже.

Основным недостатком привода с упругим опиранием на ось колесной пары является противоречие требований к упругим элементам. Для ограничения радиальной деформации при воздействии реакции от ТЭД при создании тягового усилия, радиальную жесткость элемента необходимо

увеличивать, а для того, чтобы уменьшить воздействие массы ТЭД на путь – снижать. В странах Европы такой привод получил распространение на электровозах переменного тока частотой 16 Гц, где применялись коллекторные ТЭД переменного тока, имевшие более высокую массу по сравнению с коллекторными ТЭД постоянного тока. Примером может служить электровоз серии E11 (позднее 109) производства *LEW Hennigsdorf* (б. ГДР), имевший диаметр колес 1350 мм, благодаря чему удалось разместить упругие элементы, обеспечивавшие собственную частоту колебаний ТЭД, равную 8,5 Гц. Как показали исследования ВНИКТИ [20], уже для коллекторных ТЭД тепловозов с помощью упругого подвешивания не удавалось достичь эффективного снижения величины вертикальных ускорений ТЭД при прохождении

неровностей пути. При использовании же асинхронных ТЭД, имеющих меньший вес, использование упругого подвешивания для снижения величины вертикальных ускорений теряет смысл, а использованию его в качестве средства для снижения динамического момента в приводе мешает необходимость увеличивать жесткость упругих элементов из-за необходимости восприятия радиальных нагрузок (пути решения данной проблемы будут рассмотрены в настоящей статье ниже).

4. Агрегатный привод, как альтернатива приводу интегрированной схемы, ранее был предложен и рассмотрен авторами в [21, 22]. На рис.4. представлена схема одного из вариантов такого привода, предложенного и запатентованного авторами [23].

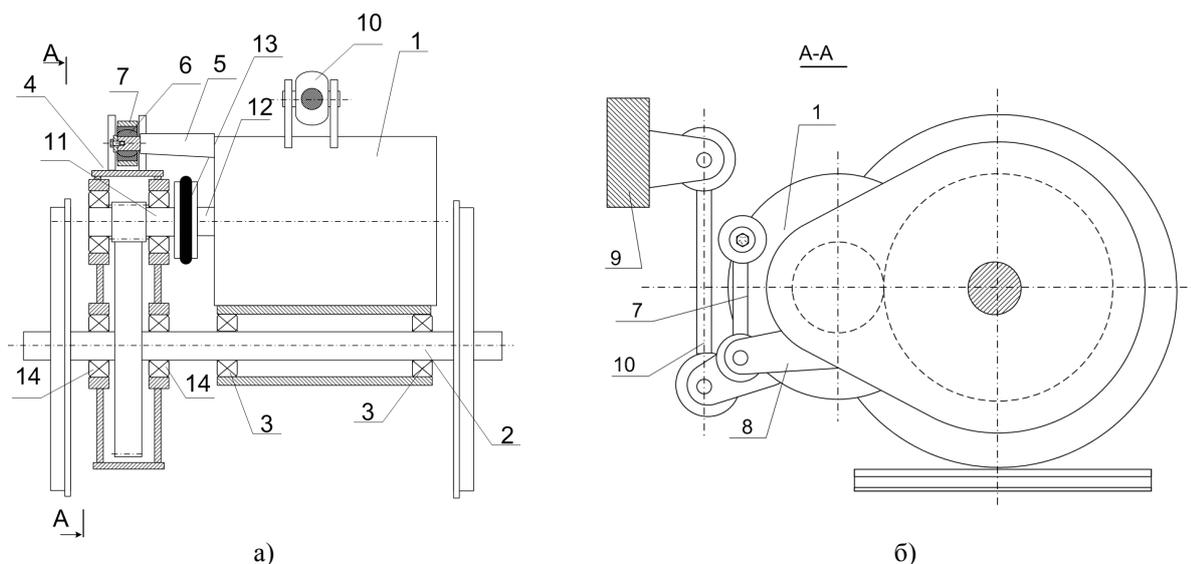


Рис. 4. Агрегатная компоновка опорно-осевого привода:

а – общий вид; б – вид со стороны осевого редуктора;

1 – ТЭД; 2 – колесная пара; 3,14 – подшипники; 4 – осевой редуктор; 5 – кронштейн с пальцем; 6 – сферический шарнир; 7 – подвеска; 8 – кронштейн осевого редуктора; 9 – рама тележки; 10 – подвеска ТЭД; 11 – вал ТЭД; 12 – вал осевого редуктора; 13 – упруго-компенсационная муфта

Fig. 4. Axial drive assembly:

a) general view; b) view from the side of axial reduction gear box;

1 - TED; 2 - wheelset; 3,14 - bearings; 4 - axial reduction gear; 5 - bracket with pin; 6 - spherical hinge; 7 - suspension; 8 - bracket of axial reduction gear box; 9 - trolley frame; 10 - TED suspension; 11 - TED shaft; 12 - shaft of axial reduction gear box; 13 - elastic-compensating coupling

Достоинством агрегатного привода является технологическая простота его изготовления, сопоставимая с опорно-рамным приводом с осевым редуктором; при этом сохраняется возможность ис-

пользования быстроходных асинхронных ТЭД, поскольку вал ТЭД можно сделать малого диаметра. Взаимный перекося зубчатых колес вследствие изгиба оси исключен, поскольку осевые подшипники распо-

ложены на расстоянии, равном ширине редуктора. По сравнению с приводом интегрированной компоновки, агрегатный привод требует увеличения габаритов в осевом направлении, однако, как показано в [22], благодаря более широкой колее отечественных железных дорог по сравнению с большинством зарубежных, это не создает препятствий для его создания.

Одинарная упругая муфта, с одной стороны, компенсирует только монтажные несоосности и перекосы, что облегчает ее создание по сравнению с компенсационным механизмом опорно-рамного привода с осевым редуктором, где расцентровка валов достигает 10 мм и более. С другой стороны, упругая муфта в приводе агрегатного типа должна быть рассчитана на максимальную частоту вращения $3500...3700 \text{ мин}^{-1}$, что требует проведения исследований и опытно-конструкторских разработок.

Недостатком привода агрегатной компоновки, изображенного на рис. 4, является увеличение числа осевых подшипников по сравнению с приводом интегрированной компоновки.

5. Опорно-осевой тяговый привод интегрированного типа с упругими элементами на тихоходной стороне. К настоящему времени в опорно-осевых тяговых приводах упругие элементы на тихоходной стороне размещались в виде упругих зубчатых колес (УЗК) [4, 7, 14, 24].

Достоинством УЗК является технологическая простота изготовления, воз-

можность ремонта без расформирования колесной пары и возможность применения в тяговых приводах разных конструкций, в результате чего такое решение использовалось в прямозубых односторонних тяговых передачах серийных тепловозов 2ТЭ10В, 2ТЭ10М, 2ТЭ116.

К недостаткам УЗК относится износ элементов узла и размещение упругих элементов внутри кожуха зубчатой передачи. Как констатируется в [24], после перехода на МОП качения, УЗК стали лимитировать величину безремонтного пробега колесно-моторного блока, что привело к отказу от применения УЗК как в отечественных, так и в зарубежных конструкциях опорно-осевых приводов.

6. Опорно-осевой тяговый привод интегрированного типа с упругими элементами на быстроходной стороне. Такой привод был в опытном порядке создан во ВНИТИ и представлял собой привод с многопоточной зубчатой передачей [24], в полом вала тягового электродвигателя располагался торсионный вал.

К недостаткам такого привода применительно к рассматриваемой проблеме относится то, что ротор ТЭД опирался на корпус моторно-редукторного блока с обоих концов, вследствие чего торсионный вал, проходящий в полом вале ротора ТЭД, требовал увеличения диаметра роторного подшипника со стороны редуктора, что, соответственно, снижало максимальную частоту оборотов ТЭД.

Результаты анализа возможных вариантов

Из проведенного анализа следуют два вывода.

1. Для локомотивов, реализующих высокие значения тяговых усилий, целесообразно применение колес диаметром 1250 мм, что упрощает реализацию рассмотренных выше конструктивных схем, позволяет унифицировать экипажную часть перспективных электровозов и тепловозов, а также дает больше возможностей для увеличения нагрузки на ось.

2. В условиях, когда новые перспективные типы тяговых электрических машин (с осевым магнитным потоком и ду-

гостаторные) еще не доведены до состояния промышленных образцов, для грузовых локомотивов к рациональным конструктивным схемам привода можно отнести те, в которых ведомое зубчатое колесо тяговой передачи тем или иным способом неупруго опирается на колесную пару; это позволяет реализовать высокие тяговые усилия без необходимости размещения передаточного механизма между статором ТЭД и осью колесной пары, либо разрешать противоречие между податливостью и несущей способностью упругих опор ТЭД на колесную пару. При этом для при-

водов рациональных конструктивных схем необходимо решить следующие задачи:

– для опорно-осевого привода агрегатной компоновки – поиск вариантов, позволяющих уменьшить число осевых подшипников;

– для опорно-осевого привода интегрированной компоновки – поиск решений, позволяющих разместить упругие

Предлагаемые решения

Для тягового привода агрегатной конструктивной схемы находим решение с использованием методов технической инновационики, т.е. уменьшение числа подшипников производится за счет того, что функции исключенных подшипниковых узлов принимают на себя другие подшип-

элементы, амортизирующие динамический момент, на быстроходной или тихоходной стороне привода.

Для опорно-рамного привода с осевым редуктором требуется только согласование его применения с заказчиком.

Рассмотрим возможные пути решения указанных выше задач.

никовые узлы, а дополнительное пространство для увеличения габаритов подшипников создается при использовании ресурса в виде свободного пространства вне существующих деталей. Предложенный авторами вариант показан на рис. 5.

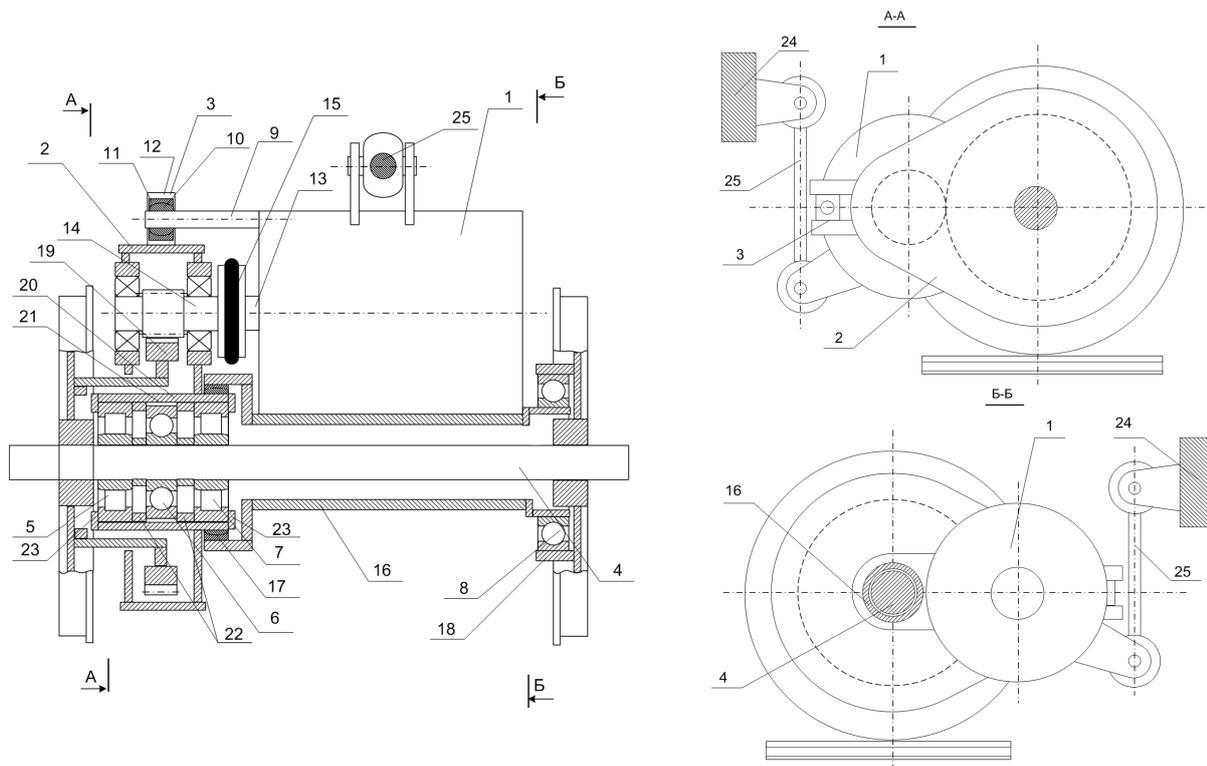


Рис. 5. Вариант тягового привода локомотива агрегатной компоновки:

1 – ТЭД; 2 – осевой редуктор; 3 – разъемное соединение; 4 – ось колесной пары; 5-8 – подшипники; 9 – палец; 10 – сферический шарнир; 11 – ползун; 12 – кронштейн; 13 – вал ТЭД; 14 – вал осевого редуктора; 15 – упругокомпенсационная муфта; 16 – неподвижный полый вал; 17 – сферическая опора; 18 – корпус подшипника; 19 – большое зубчатое колесо; 20 – стакан; 21 – зазор; 22 – дистанционные втулки; 23 – бурты; 24 рама тележки; 25 – подвеска

Fig. 5: Version of the traction drive of the locomotive aggregate layout:

1 - TED; 2 - axial reduction gear; 3 - detachable connection; 4 - wheelset axle; 5-8 - sub-studs; 9 - finger; 10 - spherical hinge; 11 - slider; 12 - bracket; 13 - TED shaft; 14 - shaft of axial reduction gear box; 15 - elastic-compensating coupling; 16 - fixed hollow shaft; 17 - spherical support; 18 - bearing housing; 19 - large toothed colo-so; 20 - glass; 21 - clearance; 22 - remote bushings; 23 - shoulders; 24 bogie frame; 25 - suspension

В предложенном варианте корпус ТЭД опирается на неподвижный полый вал, на одном конце которого расположен осевой роликовый подшипник, наружное кольцо которого смонтировано в корпусе, жестко соединенном с колесным центром. Конец неподвижного полого вала со стороны осевого редуктора опирается на корпус осевого редуктора через шарнирное соединение, при этом подшипники осевого редуктора (два радиальных роликовых и один шариковый, используемый в качестве упорного) смонтированы в корпусе, расположенном внутри цапфы большого зубчатого колеса, смонтированного на ближнем к редуктору колесном центре. Такая компоновка позволяет не только сократить число подшипников, но и увеличить их размеры для повышения долговечности. На предложенную конструкцию получен патент на полезную модель [24].

Для интегральной компоновки опорно-осевого привода авторами предложены решения размещения упругих элементов как на быстроходной, так и на тихоходной части.

При размещении упругого элемента в виде торсионного вала внутри полого вала ротора ТЭД возникает противоречие требований: для увеличения максимальной частоты вращения подшипников вала ТЭД диаметр вала ротора должен быть меньше, а для обеспечения прочности торсиона на кручение – больше. Данное противоречие требований можно разрешить в случае, если торсионный вал не компенсирует поперечных перемещений вала ТЭД относительно вала редуктора. В этом случае торсионный вал может входить в несквозную полость вала ротора, при этом хвостовик вала ротора может иметь небольшой диаметр. Соответственно, противоположный конец вала ротора ТЭД может опираться на вал малого зубчатого колеса редуктора через тонкослойный резинометаллический элемент (ТРМЭ), который имеет высокую радиальную жесткость (приближающуюся к жесткости стальной опоры), зато практически не препятствует повороту вала ротора относительно вала зубчатого колеса; таким образом, крутящий момент переда-

ется через торсионный вал. Предложенный вариант конструкции привода изображен на рис. 6.

Как видно из рис. 6, размещение торсионного вала не требует увеличения габаритов и массы привода и не препятствует размещению дисковых тормозов на колесных центрах, при возникновении такой необходимости. На данную конструкцию подана заявка на получение патента.

Для размещения упругого элемента на тихоходной части опорно-осевого привода с интегрированной компоновкой рассмотрим противоречия привода с упругим опиранием на ось (рис. 3). Поскольку при асинхронном ТЭД, обладающем более высокой надежностью при воздействии вибраций, и имеющем меньший вес, амортизация вертикальных ускорений колесной пары не требуется, пересмотрим систему частных функций привода, убрав функцию упругих элементов деформироваться в радиальном направлении. В варианте привода, предложенного авторами (рис.7), деформация упругих элементов в радиальном направлении предотвращается тем, что полый вал опирается по краям на ТРМЭ, имеющий большую жесткость в радиальном направлении, но не препятствующий повороту полого вала относительно оси колесной пары при деформации упругих элементов под действием крутящего момента.

При размещении упругих элементов на тихоходной стороне привода упрощается их осмотр и замена. При этом полый вал, в отличие от привода с упругим опиранием, размещен на меньшем расстоянии от оси колесной пары, что упрощает компоновку привода.

Предложенные конструктивные решения свидетельствуют о том, что, с точки зрения использования сцепных свойств локомотива и снижения проскальзывания колес по рельсу, к перспективным решениям можно отнести не только опорно-рамный привод с осевым редуктором и опорно-осевой привод агрегатной компоновки, но и опорно-осевой привод интегрированной компоновки с упругими звеньями.

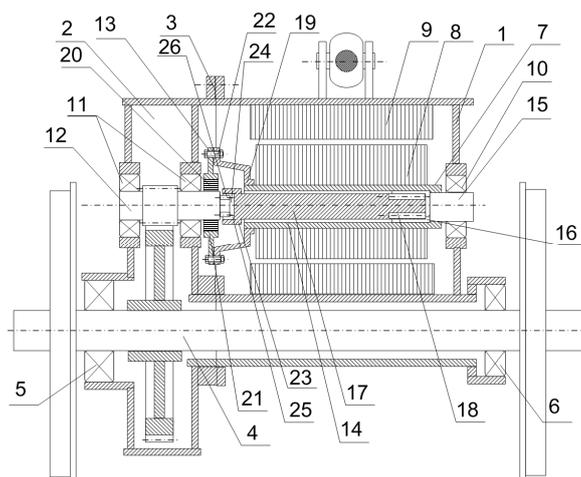


Рис. 6. Тяговый привод интегрированной компоновки с торсионным валом в полном валу ротора: 1 – ТЭД; 2 – осевой редуктор; 3 – разъемное соединение; 4 – ось колесной пары; 5,6 – осевые подшипники; 7 – вал ТЭД; 8 – ротор ТЭД; 9 – статор ТЭД; 10 – роторный подшипник; 11 – подшипники осевого редуктора; 12 – вал осевого редуктора; 13 – мембранная муфта; 14 – гильза; 15 – хвостовик; 16 – шлицы гильзы; 17 – торсионный вал; 18 – наружные шлицы торсионного вала; 19 – цилиндрический выступ; 20 – цилиндрический тонкослойный резино-металлический элемент; 21 – стакан; 22 – болтовое соединение; 23 – утолщение; 24 – цилиндрическая выемка; 25 – внутренние шлицы; 26 – наружные шлицы вала редуктора

Fig. 6. Traction drive of integrated arrangement with torsion shaft in hollow shaft of rotor: 1 - TED; 2 - axial reduction gear; 3 - detachable connection; 4 - wheelset axle; 5,6 - axial bearings; 7 - TED shaft; 8 - TED rotor; 9 - TED stator; 10 - rotor bearing; 11 - axial reduction gear bearings; 12 - shaft of axial reduction gear box; 13 - membrane coupling; 14 - sleeve; 15 - shank; 16 - sleeve splines; 17 - torsion shaft; 18 - external splines of torsion shaft; 19 - cylindrical projection; 20 - cylindrical thin-layer re-zinometallic member; 21 - cup; 22 - bolted connection; 23 - thickening; 24 - cylindrical recess; 25 - internal splines; 26 - outer splines of reduction gear shaft

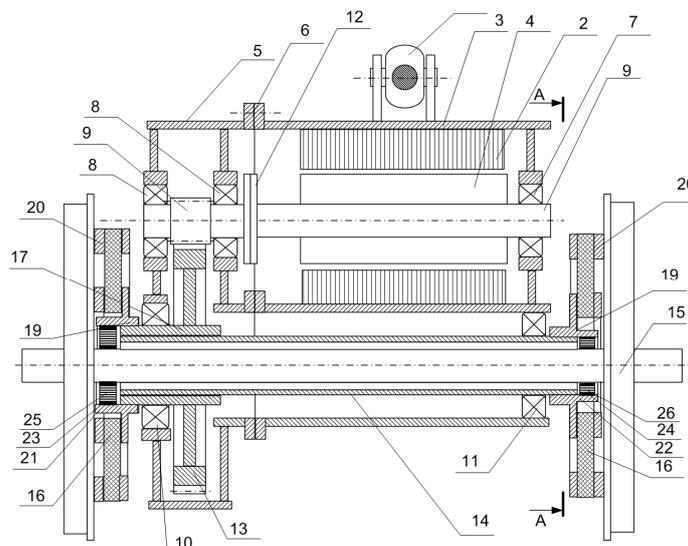


Рис. 7. Тяговый привод интегрированной компоновки с упругими элементами на тихоходной стороне тяговой передачи:

1 – подвеска ТЭД; 2 – ТЭД; 3 – статор ТЭД; 4 – ротор ТЭД; 5 – осевой редуктор; 6 – разъемное соединение; 7 – подшипник ротора; 8 – подшипники вала осевого редуктора; 9 – вал осевого редуктора; 10,11 – осевые подшипники; 12 – мембранная муфта; 13 – большое зубчатое колесо; 14 – полый вал; 15 – колесная пара; 16 – упругие элементы; 17 – ступица большого зубчатого колеса; 18 – сектор упругого элемента; 19 – фланец на полном валу; 20, 21, 22 – кольцевые выступы; 23,24 – дополнительные опоры; 25,26 – тонкослойные резинометаллические элементы

Fig. 7: Traction drive of integrated layout with elastic elements on the low-speed side of the traction transmission 1 - TED suspension; 2 - TED; 3 - TED stator; 4 - TED rotor; 5 - axial reduction gear; 6 - differential connection; 7 - rotor bearing; 8 - bearings of axial reduction gear box shaft; 9 - shaft of axial reduction gear box; 10,11 - axial bearings; 12 - membrane coupling; 13 - large tooth-chatty wheel; 14 - hollow shaft; 15 - wheelset; 16 - elastic elements; 17 - hub of a large gear wheel; 18 is a sector of the elastic member; 19 - flange on hollow shaft; 20, 21, 22 - annular projections; 23,24 - additional supports; 25,26 - thin-layer rubber-metal elements

Выводы

1. В результате проведенного анализа логики конструкторских решений установлено отсутствие единых рациональных и теоретически обоснованных критериев выбора тягового привода для перспективных грузовых локомотивов.

2. На основании проведенного анализа методами технической инноватики установлено, что к рациональным конструктивным решениям механической части тягового привода перспективных грузовых локомотивов, обеспечивающим максимальную реализацию тяговых свойств и снижение проскальзывания колес по рельсу, относятся те типы тяговых приводов, у которых большое зубчатое колесо опирается на ось колесной пары, а валопроводы тягового привода содержат упругое звено для амортизации динамических моментов, возникающих при прохождении неровностей пути. В настоящее время это следующие типы тяговых приводов:

– привод с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором;

– привод с опорно-осевым подвешиванием ТЭД агрегатной компоновки;

– приводы с опорно-осевым подвешиванием ТЭД интегрированной компоновки с упругими элементами на быстросходной или тихоходной стороне тяговой передачи.

3. Авторами предложены новые технические решения тяговых приводов с опорно-осевым подвешиванием ТЭД, в частности, привод агрегатной компоновки с уменьшенным числом осевых подшипников и увеличенным местом для их размещения, привод интегрированной компоновки с торсионом в полой якоря и привод интегрированной компоновки с упругим звеном в виде дисковых резинокордных муфт.

4. На предложенные решения авторами получены три патента на полезные модели и поданы две заявки на получение патента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Расширенная классификация механической части тяговых приводов локомотивов. / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, Д.Н. Шевченко, Е.В. Николаев // Наука и техника транспорта, 2, М., Российский университет транспорта (МИИТ), 2022 – С. 60-68.
2. Повышение надежности и несущей способности зубчатых тяговых передач. / Г.И. Михайлов. – Казань: Алгоритм, 2023 – 560 с.
3. Устройство и эксплуатация электровоза 2ЭС10 / И.А. Осинцев, А.А. Логинов // М.: ОАО «Российские железные дороги», 2015. – 333 с.
4. Евстратов А. С. Экипажные части тепловозов. – М.: «Машиностроение», 1987 – 136 с.
5. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности. Утверждена Распоряжением ОАО РЖД от 22 декабря 2017 г. № 2706р // - . – М. : ОАО РЖД, 2017. – 53 с.
6. Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Измеров О.В., Николаев Е.В., Шевченко Д.Н. Повышение тягово-сцепных свойств локомотивов путем совершенствования экипажной части. Мир транспорта. 2024;22(2):47-68. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-6>.
7. Бирюков И.В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И.В. Бирюков, А.И. Беляев А.И., Е.К. Рыбников // М., Транспорт, 1986 – 256 с.
8. Развитие локомотивной тяги / [Н. А. Фурфрянский, А. Н. Долганов, А. С. Нестрахов и др.]; Под ред. Н. А. Фурфрянского, А. Н. Бевзенко. - Москва: Транспорт, 1982. - 303 с.
9. On the Polygonal Wear Evolution of Heavy-Haul Locomotive Wheels due to Wheel/Rail Flexibility and Its Mitigation Measures / Yunfan Yang, Feifan Chai, Pengfei Liu, Liang Ling, Kaiyun Wang, Wanming Zhai // Chinese Journal of Mechanical Engineering 37(16) April 2024– С. 1-22.
10. Ивахин, А. И. Испытания грузового тепловоза с макетной системой повышения тяговых качеств / А. И. Ивахин, В. И. Травиничев, Д. И. Петраков. //Тяжелое машиностроение. - 2014. - № 6. - С. 17-21. - Текст : непосредственный.
11. Котяев, Д. В. Применение макетной системы для проведения натурных экспериментальных исследований влияния электрического тока на повышение тяговых качеств тепловоза / Д. В. Котяев, А. С. Космодамианский, А. И. Ивахин. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 1. – С. 10–17. – Текст : непосредственный.
12. Техническая инноватики. Теоретические основы: монография / А.С. Космодамианский, М.И. Борзенков, В.И. Воробьев [и др.]. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024 – 323 с.: ил.
13. Шацилло А.А. Тяговый привод электроподвижного состава // М.: Трансжелдориздат. 1961. - 222с.

14. Калихович В.Н. Тяговые приводы локомотивов. (Устройство, обслуживание, ремонт) // М.: Транспорт, 1983. - 111 с.
15. Проблемы развития тяговых приводов пассажирских электровозов с бесколлекторными ТЭД / Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Капустин М.Ю., Измеров О.В., Шевченко Д.Н., Самотканов А.В. // Транспорт Урала. 2020. № 2 (65). С. 20-25.
16. Курбасов А.С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов. М., «Транспорт», 1977 – 223 с.
17. В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, О.В. Измеров, Е.В. Николаев. Поиск путей повышения тяговых свойств тепловозов и конструкция тягового привода. Вестник Брянского государственного технического университета № 12(109), Брянск, БГТУ, 2021 - С. 48-59.
18. Электровоз ДСЗ. Устройство, управление, обслуживание / Ю.Н. Соколов. Киев, Юго-Западная ж.д., Центр профессионального развития персонала, 2011 – 299 с.
19. Патент РФ на полезную модель № 207227. СПК В61С 9/38 (2021.05). Тяговый привод локомотива. / Воробьев В.И., Измеров О.В., Космодамианский А.С., Пугачев А.А., Капустин М.Ю., Стрекалов Н.Н., Самотканов А.В., Шевченко Д.Н., Николаев Е.В. Оpubл. 18.10.2021, бюл. № 29.
20. Повышение надежности экипажной части тепловозов / А.И. Беляев, Б.Б. Бунин, С.М. Голубятников и др. Под ред. Л.К. Добрынина. / М., Транспорт, 1984. - 248 с.
21. Поиск новых конструктивных схем редукторного и безредукторного тягового привода локомотива с частичным обрессориванием масс: статья / Воробьев В.И., Стриженов А.Г., Измеров О.В. // «Вестник Брянского государственного технического университета» № 1 (49) 2016, Брянск, с. 16-21.
22. Применение агрегатных тяговых приводов для локомотивов с повышенными тяговыми свойствами / Космодамианский А.С., Пугачев А.А., Воробьев В.И., Измеров О.В., Николаев Е.В. // «Транспорт Урала», № 2(77), Екатеринбург, УрГУПС, 2023, С.41-48.
23. Патент РФ на полезную модель № 223262. МПК В61С 9/50, В61F 15/16. Тяговый привод локомотива. Злобин С.Н., Воробьев В.И., Измеров О.В., Копылов С.О., Николаев Е.В. Оpubл. 9.02.2024, бюл. № 4.
24. Патент на полезную модель № 215944, Российская Федерация. Тяговый привод локомотива [Текст] / Космодамианский А.С., Измеров О.В., Копылов С.О., Воробьев В.И., Корчагин В.О., Пугачев А.А., Капустин М.Ю., Самотканов А.В., Шевченко Д.Н., Николаев Е.В., Карпов А.Е. Оpubл. 11.01.2023, бюл. № 2.

REFERENCES

1. Kosmodamiansky AS, Vorobyov VI, Izmerov OV, Shevchenko DN, Nikolaev EV. Extended classification of the mechanical part of locomotive traction drives. Science and Technology in Transport. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); 2022.
2. Mikhailov GI. Improving reliability and load-bearing capacity of toothed traction gears. Kazan: Algorithm; 2023.
3. Osintsev IA, Loginov AA. Design and operation of 2ЭС10electric locomotive. Moscow: Russian Railways; 2015.
4. Evstratov AS. Carriage parts of diesel locomotives. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
5. Russian Railways. Method for assessing the impact of rolling stock on the track according to the conditions for ensuring reliability. Moscow: Russian Railways. 2017 Dec 22.
6. Kosmodamiansky AS, Vorobyov VI, Izmerov OV, Nikolaev EV, Shevchenko DN. Improving locomotive traction and adhesion properties by improving the undercarriage. World of Transport and Transportation Journal [Internet]. 2024;22(2):47-68. Available from: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-6>.
7. Biryukov IV, Belyaev AI, Rybnikov EK. Traction transmission of electric rolling stock. Moscow: Transport; 1986.
8. Fufryansky NA, Dolganov AN, Nestrakhov AS. Development of locomotive traction. Moscow: Transport; 1982.
9. Yunfan Y, Feifan Ch, Pengfei L, Liang L, Kaiyun Wg, Wanming Zh. On the polygonal wear evolution of heavy-haul locomotive wheels due to wheel/rail flexibility and its mitigation measures. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2024;37(16):1-22.
10. Ivakhin AI, Travnichev VI, Petrakov DI. Tests of a freight locomotive with a mock-up system for improving traction qualities. Tyazheloye Mashinostroyeniye. 2014;6:17-21.
11. Kotyaev DV, Kosmodamiansky AS, Ivakhin AI. Application of a mock-up system for conducting field experimental studies of the effect of electric current on increasing the traction qualities of a diesel locomotive. Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology. 2023;1:10-17.
12. Kosmodamiansky AS, Borzenkov MI, Vorobyov VI. Technical innovation. Theoretical foundations: monograph. Orel: OSU named after I.S. Turgenev; 2024.
13. Shatsillo AA. Traction drive of an electric rolling stock. Moscow: Transzheldorizdat; 1961.
14. Kalikhovich VN. Traction drives of locomotives. (design, maintenance, repair). Moscow: Transport; 1983.
15. Kosmodamiansky AS, Vorobyov VI, Kapustin MYu, Izmerov OV, Shevchenko DN, Samotkanov AV. Problems of developing traction drives of passenger electric locomotives with brushless TED.

- Transport of the Urals. 2020;2(65):20-25.
16. Kurbasov AS. Improving the efficiency of traction electric motors. Moscow: Transport; 1977.
 17. Vorobyov VI, Pugachev AA, Izmerov OV, Nikolaev EV. Search for ways to improve the traction properties of locomotives and traction drive design. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2021;12(109):48-59.
 18. Sokolov YuN. Electric locomotive DS3. Design, control, service. Kiev: South-Western Railway, Center for Professional Development of Personnel; 2011.
 19. Vorobyov VI, Izmerov OV, Kosmodamiansky AS, Pugachev AA, Kapustin MYu, Strekalov NN, Samotkanov AV, Shevchenko DN, Nikolaev EV. RF patent for utility model No. 207227. СПК В61С 9/38 (2021.05). Traction drive of a locomotive. 2021 Nov 18.
 20. Belyaev AI, Bunin BB, Golubyatnikov SM. Improving the reliability of the diesel locomotive undercarriage. Moscow, Transport; 1984.
 21. Vorobyov VI, Strizhenok AG, Izmerov OV. Search for 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.
 22. Kosmodamiansky AS, Pugachev AA, Vorobyov VI, Izmerov OV, Nikolaev EV. Application of aggregate traction drives for locomotives with increased traction properties. Transport of the Urals. 2023;2(77):41-48.
 23. Zlobin SN, Vorobyov VI, Izmerov OV, Kopylov SO, Nikolaev EV. RF patent for utility model No. 223262. МПК В61С 9/50, В61F 15/16. Traction locomotive drive. 2024 Sep 02.
 24. Kosmodamiansky AS, Izmerov OV, Kopylov SO, Vorobyov VI, Korchagin VO, Pugachev AA, Kapustin MYu, Samotkanov AV, Shevchenko DN, Nikolaev EV, Karpov AE. RF patent for utility model No. 215944. Locomotive traction drive. 2023 Jan 11.

Информация об авторах:

Воробьев Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» Брянского государственного технического университета.

Пугачев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Высокотехно-

Vorobyov Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of High-Tech Transport Engineering at Bryansk State Technical University.

Pugachev Aleksandr Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of High-

гичное транспортное машиностроение» Брянского государственного технического университета.

Фатеев Андрей Анатольевич – соискатель кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта.

Tech Transport Engineering at Bryansk State Technical University.

Fateev Andrey Anatolyevich – Competitor of the Department of Traction Rolling Stock at Russian University of Transport.

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 06.10.2025; одобрена после рецензирования 15.10.2025; принята к публикации 27.10.2025. Рецензент – Волохов Г.М., доктор технических наук, главный научный эксперт динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры Акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 06.10.2025; approved after review on 15.10.2025; accepted for publication on 27.10.2025. The reviewer is Volokhov G.M., Doctor of Technical Sciences, Chief scientific expert of Rolling Stock and Infrastructure Dynamics and Strength of “Research and Development and Technological Institute of Rolling Stock”, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.