Транспортное машиностроение. 2023. № 9(21). С. 54-64. ISSN 2782-5957 (print)
Transport Engineering. 2023. no. 9(21). P. 54-64. ISSN 2782-5957 (print)

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 629.4.021
doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-54-64

ПОИСК НОВЫХ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА НИЗКОПОЛЬНЫХ ЭКИПАЖЕЙ

Владимир Иванович Воробьев[1]✉, Александр Анатольевич Пугачев[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] vladimvorobiev@yandex.ru
[2] alexander-pugachev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-1836-0923
[3] izmerov@yandex.ru
[4] work-omc@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены возможность повышения тяговых свойств тепловозов без использования тяговых приводов с асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД) и широтно-импульсной модуляцией. Доказано, что коллекторные ТЭД позволяют реализовать силу тяги в продолжительном режиме 63,75 кН на ось при диаметре колес 1250 мм, при этом целесообразно применение привода с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором. В связи со значительной массой коллекторных ТЭД предложено выполнить перспективный тепловоз в виде двух секций на трех двухосных тележках и бустера на двух двухосных тележках. В связи с тем, что дугостаторные асинхронные двигатели (ДАД) позволяют упростить преобразовательную часть привода за счет отказа от широтно-импульсной модуляции, предложена конструкция тягового привода для ДАД с размещением полого вала в выемке, образованной дугообразными индукторами, что позволяет реализовать крутящий момент ДАД и силу тяги тепловоза за счет увеличения диаметра ротора ДАД.

Ключевые слова: привод, локомотив, машины, двигатель, динамика, фрикционные автоколебания, надежность, конструирование.

Ссылка для цитирования:
Воробьев В.И. Поиск новых вариантов конструкции тягового привода низкопольных экипажей / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, О.В. Измеров, Е.В. Николаев // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 09. – С. 54-64. doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-54-64.

Original article
Open Access Article

SEARCH FOR NEW DESIGN OPTIONS OF TRACTION DRIVES OF LOW-FLOOR CARRIAGES

Vladimir Ivanovich Vorobyov[1]✉, Aleksandr Anatolyevich Pugachev[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] vladimvorobiev@yandex.ru
[2] alexander-pugachev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-1836-0923
[3] izmerov@yandex.ru
[4] work-omc@yandex.ru

Abstract

The possibility of increasing locomotive traction properties without using drives with asynchronous traction electric motors (TED) and pulse width modulation is considered. It is proved that collector TED allows realizing the traction force in a continuous mode of 63.75 kN per axle with a wheel diameter of 1250 mm,

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

while it is advisable to use a drive with a support frame suspension of TED and an axial gearbox. Due to the significant mass of collector TED, it is proposed to make a promising diesel locomotive in the form of two sections on three two-axle bogies and a booster on two two-axle bogies. Taking into account that electric arc asynchronous motors (EAAM) simplify the converter part of the drive by eliminating pulse width modulation, a design of a traction drive for EAAM with a hollow shaft in the recess formed by arc-shaped inductors is proposed, which makes it possible to realize EAAM torque and locomotive traction force by increasing the diameter of EAAM rotor.

Keywords: drive, locomotive, machines, motor, dynamics, frictional self-oscillations, reliability, design.

Reference for citing:
Vorobyov VI, Pugachev AA, Izmerov OV, Nikolaev EV. Search for new design options of traction drives of low-floor carriages. Transport Engineering. 2023;9:54-64. doi: 10.30987/2782-5957-2023-9-54-64.

Объект исследования и характеристика проблемы

В ближайшей перспективе низкопольный подвижной состав получит не только широкое распространение на отечественном городском рельсовом транспорте, но и начнет применяться на железных дорогах общего назначения, на городских и пригородных электропоездах. В частности, отечественной фирмой «Трансмашхолдинг» планируется создание электропоезда ЭП5ДА для пригородных перевозок в регионах, который, судя по опубликованным в СМИ фотографиям макета, будет представлять собой электропоезд с полом, пониженным в межтележечном пространстве. Достоинством такой компоновочной схемы является возможность использования тележек, унифицированных с применяемыми для высокопольного подвижного состава, что упрощает освоение их производством. Аналогичная схема широко используется и за рубежом, при этом для увеличения доли низкопольной части используют секции из сочлененных вагонов. Например, в поезде *FLIRT* фирмы «*Stadler»* соседние вагоны опираются на необмоторенные тележки с колесами диаметром 750 мм.

Общим недостатком подобных систем является то, что железнодорожные пути общего назначения зачастую бывают удалены от наиболее важных для пассажира городских объектов, что вызывает необходимость пересадок. Внедрение же систем типа «tram-train» при которых поезд может двигаться как по путям рельсового городского транспорта, так и по железнодорожным путям общего назначения, сопряжено с рядом технических проблем. В частности, до настоящего время информация о проектировании тяговых приводов, обеспечивающих проход пассажиров вдоль кузова над обмоторенной тележкой, слабо систематизирована. Кроме того, рельсовые пути городского транспорта могут иметь значительно большие уклоны, чем пути общего назначения, и требуется поиск новых технических решений, позволяющих увеличивать сцепные свойства обмоторенных осей. Предлагаемая статья является попыткой решения данных проблем.

Анализ известных конструкций и их систематизация

Ранее авторами была предложена универсальная классификация тяговых приводов подвижного состава, в первую очередь, реализующих базовые функции тягового привода локомотива [1, 2, 3]. Однако для механической части привода низкопольного транспорта набор базовых функций отличается от привода локомотива, в первую очередь, необходимостью наличия свободного пространства между колесами. Отсюда возникает новое противоречие требований к приводу – между требованием снижения объема, занимаемого приводом и его узлами, что ведет к интегрированной компоновке, и требованием снижения неподрессоренной массы для снижения воздействия на путь не только по условиям сокращения расходов на содержание и ремонт пути, но и для снижения сейсмического воздействия на здания и сооружения на тех участках линии, которые проходят по городским улицам.

В связи с этим авторами предложена дополнительная классификация подгруппы тяговых приводов для низкопольного транспорта, построенная по тем же принципам, что и описанные в [1, 2, 3]. Это означает, что классифицируемые объекты рассматриваются не как природные, существующие независимо от человека, а как сознательно создаваемые проектировщиком в результате рационального выбора вариантов решения, на основании предложенного О.В. Измеровым схематизированного алгоритма перехода от базовых свойств привода в составе рельсового экипажа к конкретным конструкциям, который, в свою очередь, основан на матрице уровней средств управления при решении задачи создания машины, описанной в [4]. Общий вид классификации представлен на рис.1.

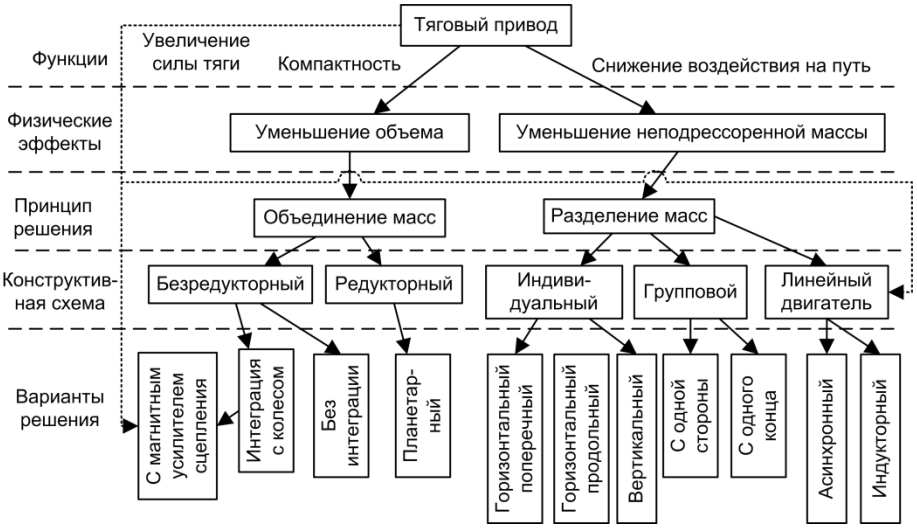


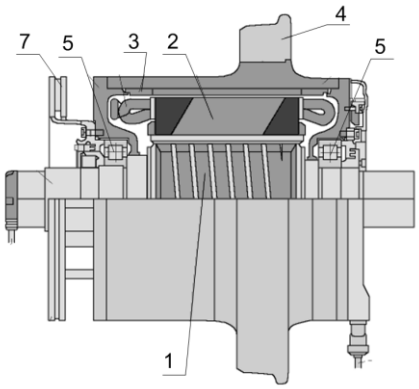
Рис.1. Классификация подгруппы тяговых приводов низкопольного транспорта
Fig. 1. Classification of low-floor transport traction drives

На уровне функций в классификации отражено противоречие между требованием делать привод более компактным и требованием снижать воздействие на путь. Соответственно, на уровне физических явлений и свойств (в таблице для упрощения – «физические эффекты») для группировки приняты критерии уменьшения объема и уменьшения неподрессоренной массы, а на уровне принципа решения – соответственно, объединение масс деталей и узлов, выполняющих разные частные функции привода и разделение масс этих деталей и узлов.

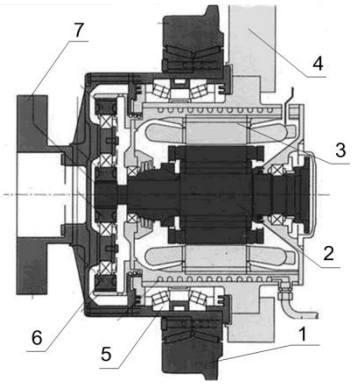
На уровне конструктивных схем для группы приводов, построенных на принципе объединения масс, возможна группировка по признаку наличия или отсутствия редуктора при передаче момента. При этом редукторные и безредукторные приводы могут иметь внешнее сходство и подобные геометрические соотношения, отличаясь наличием и отсутствием конструктивного элемента в виде редуктора, что можно видеть на рис. 2а, б.

На рис. 2а представлен непосредственный тяговый привод для трамвая *Variobahn* с низким полом, предложенный австрийским отделением фирмы «*Bombardier*» [5]. Характерной особенностью привода является то, что тяговый электродвигатель (ТЭД) мощностью 45 кВт выполнен обращенным, т.е. якорь ТЭД размещен на неподвижной оси, а внешний ротор является колесным центром, на прилив которого напрессован бандаж. Колесо опирается через подшипниковые щиты на неподвижную ось через роликовые цилиндрические подшипники. Обращенное исполнение ТЭД позволяет увеличить диаметр статора и тем самым повысить крутящий момент. С этой же целью ТЭД выполнен асинхронным с жидкостным охлаждением, которое реализовано с помощью змеевика, расположенного на утолщенной части оси, на которую напрессован пакет неподвижного статора. Таким образом, от-

вод тепла производится в неподвижную ось. Тормозной диск прифланцован к вращающемуся подшиниковому щиту. По заявлениям разработчиков, данный привод отличается меньшим уровнем шума несмотря на то, что колесо, в отличие от большинства конструкций, распространенных в настоящее время, не содержит упругих элементов. Вместе с тем испытания образцов трамвая в Граце выявили повышенный уровень шума и вибраций по сравнению с ранее эксплуатировавшимся подвижным составом. Увеличение необрессоренной массы ведет к усилению сейсмического воздействия трамвая на почву.



а)



б)

Рис. 2. Примеры безредукторного и редукторного тягового привода при расположении электродвигателя с радиальным магнитным потоком внутри колеса: а) – привод в мотор-колесе трамвая *Variobahn*: 1 – ось; 2 – внутренний статор; 3 – внешний ротор; 4 – обод колеса; 5 – подшипники; 6 – диск тормоза; б) – мотор-колесо с планетарным редуктором трамвая *Cityrunner*: 1 – колесо: 2 – ротор; 3 – статор; 4 – рама тележки; 5 – подшипники; 6 – планетарная передача; 7 – тормозной диск

Fig. 2. Examples of a gearless and geared traction drive when the motor is located with radial magnetic flux inside the wheel: a) – drive in the motor wheel of the Variobahn tram: 1 – axle; 2 – internal stator; 3 – external rotor; 4 – wheel rim; 5 – bearings; 6 – brake disc; b) – motor-wheel with planetary gearbox of Cityrunner tram: 1 – wheel: 2 – rotor; 3 – stator; 4 – trolley frame; 5 – bearings; 6 – planetary gear; 7 – brake disc

На рис. 2б показана конструкция тягового привода трамвая *Cityrunner* фирмы «*Bombardier*» [6], в которой для снижения веса тягового электродвигателя применен планетарный редуктор. Как и в варианте (рис. 2а), вращение колес независимое. Двигатель мощностью 45 кВт выполнен с неподвижным статором и имеет жидкостное охлаждение. За счет повышения частоты вращения удалось достичь снижения габаритов самого ТЭД и разместить между ободом колеса и колесным центром упругие вставки, которые снижают шум. При этом, из-за уменьшения осевого расстояния между подшипниковыми опорами пришлось использовать конические подшипники. В итоге, несмотря на уменьшение габаритов и массы самого ТЭД, при существенном увеличении сложности конструкции и трудоемкости ее ремонта необрессоренная масса оказалась высокой (для вагонов для Граца (Австрия) – 1410 кг на колесо), вследствие чего трамваи с указанным приводом не были допущены в эксплуатацию в Брюсселе по причине высокого сейсмического воздействия на окружающие здания. Таким образом, в данном случае с помощью планетарного редуктора не удалось разрешить противоречие между требуемым моментом мотор-колеса и его массой. Одной из причин является то, что корпус планетарного редуктора в данном варианте компоновки (рис. 2б) является также частью колесного центра и должен быть рассчитан на восприятие осевой и поперечной нагрузок, что увеличивает массу корпуса.

Учитывая, что в отечественных низкопольных трамваях применяются ТЭД с близкой мощностью (трамвай 71-648 производства АО УКВЗ - 72 кВт или 36 кВт на одно колесо), можно сделать вывод, что для возможного отечественного подвижного состава «*tram-train*» создание мотор-колес с электрическими машинами с радиальным магнитным потоком будет связано

со значительными техническими трудностями.

Разрешение противоречия между требованием достаточного крутящего момента мотор-колеса и требованиями к его массе может быть осуществлено также за счет того, что функции частей ТЭД выполняют сами элементы колеса, при этом форма этих элементов близка к рациональным с точки зрения прочностных характеристик, т.е. колесный центр должен иметь форму не цилиндра, а диска. Это становится возможным, если выполнить ТЭД в виде машины не с радиальным, а с осевым магнитным потоком, при этом ротор также имеет форму диска. Одна из таких конструкций, запатентованных в России и описанная в [7], показана на рис. 3.

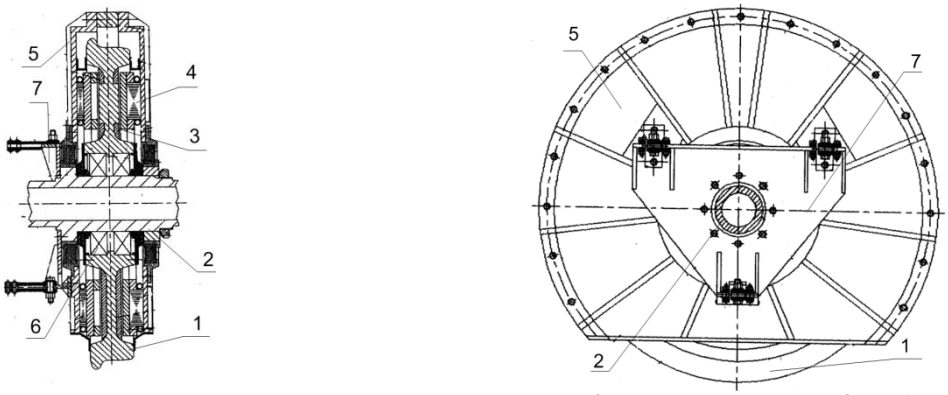


Рис. 3. Мотор-колесо с торцовым двигателем: 1 – колесо; 2 – неподвижная ось; 3 – обмотка ротора; 4 – статор; 5 – кожух; 6 – подшипники; 7 – траверса крепления трубок водяного охлаждения

Fig. 3. Motor-wheel with end motor: 1 – wheel; 2 – fixed axle; 3 – rotor winding; 4 – stator; 5 – casing; 6 – bearings; 7 – cross-arm of water cooling tubes attachment

Особенность данной конструкции состоит в том, что корпус двигателя охватывает колесо снаружи, при этом в корпусе имеется вырез в форме сегмента, благодаря чему обеспечивается контакт колеса с рельсом. Обмотки статора снабжены водяным охлаждением. Электромотор-колесо расположено на неподвижной оси, а магнитопроводом ротора служит сам диск колеса.

Основным преимуществом такой конструкции, помимо снижения веса, является обеспечение минимальных осевых габаритов мотор-колеса. Данный привод, согласно [7], был предназначен для высокоскоростных поездов с независимым вращением колес, однако описанные выше особенности делают его весьма привлекательным для системы «*tram-train*». В то же время в виде, представленном на рис. 3, мотор-колесо имеет целый ряд недостатков, препятствующих его практической реализации:

– повышенные потери в роторе из-за монолитности диска колеса;

– сложность обеспечения пылевлагозащиты обмоток;

– высокие радиальные нагрузки на подшипники при воздействии на колесо боковых сил из-за близкого расположения подшипников;

– отсутствие возможности оборудования мотор-колеса дисковым тормозом.

Предлагаемый вариант мотор-колеса с вращающейся осью

Указанные недостатки устранены в варианте, предложенном авторами статьи (рис. 4).

При движении экипажа на фазные обмотки статора 1 от полупроводникового преобразователя (на рис. 4. не показан) подается переменное напряжение, которое, вызывая ток в фазных обмотках статора 1, приводит к появлению вращающегося магнитного поля. Вращающееся поле статора наводит в короткозамкнутых обмотках 2 электрический ток, который, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создает вращающий момент на колесе 3, приводя рельсовый экипаж в движение. Активные части статора 4 охлаждаются с помощью жидкости системой охлаждения 5, чтобы избежать перегрева активных ча-

стей и повреждения изоляции их обмоток. Поперечное смещение двигателя 6 относительно рамы тележки 7 при прохождении кривых участков пути и стрелочных переводов предотвращается буксовым поводком 8, который также обеспечивает перемещение двигателя 6 в вертикальном направлении при прохождении вертикальных неровностей пути. Упругий элемент 9 выполняет роль буксовой ступени рессорного подвешивания, тормозной диск 10 обеспечивает торможение железнодорожного экипажа. Благодаря тому, что полукожуха 11 охватывают колесо 3 снаружи, расстояние между подшипниками 12, находящихся на полукожухах 11, больше, чем при размещении подшипников на колесе 3. Таким образом, момент, который создается при воздействии боковых сил на колесо, в данной конструкции приводит к меньшим усилиям, воздействующим на подшипники по сравнению с ранее рассмотренной конструкцией. На предложенную конструкцию получен патент РФ на полезную модель [8].

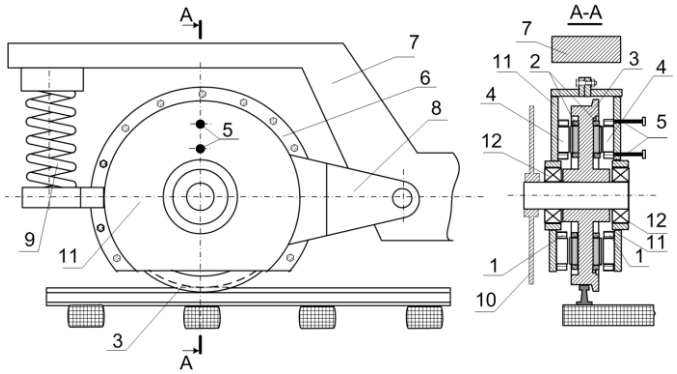


Рис. 4. Предлагаемый вариант мотор-колеса с вращающейся осью:
1 – фазные обмотки статора; 2 – короткозамкнутые обмотки; 3 – колесо; 4 – активные части статора; 5 - система охлаждения; 6 – узел электродвигателя; 7 - рама тележки; 8 – буксовый поводок; 9 – упругий элемент; 10 – тормозной диск; 11 – полукожуха; 12 – подшипники

Fig. 4. Proposed version of motor-wheel with rotating axle: 1 – stator phase windings; 2 – short-circuited windings; 3 – wheel; 4 – are active parts of the stator; 5 – cooling system; 6 I motor assembly; 7 – trolley frame; 8 – axle-box leash; 9 – elastic member; 10 – brake disc; 11 – half-jacket; 12 – bearings

Анализ тяговых приводов, использующих принцип разделения масс

В группу приводов, для которой использован отличительный признак «разделение масс» войдут три вида конструктивных решений: индивидуальные приводы, групповые приводы, а также приводы, использующие линейный электродвигатель. В последнем случае используется разделение масс между статором и ротором.

Подгруппа индивидуальных приводов делится по признаку расположения ТЭД относительно колесной пары на группы с горизонтальным расположением ТЭД, поперечным и продольным, и вертикальным расположением. Примером компоновки с горизонтальным поперечным расположением ТЭД может служить описанный в [7] привод Научно-исследовательского института вагоностроения (ВНИИВ) (рис. 5).

Крутящий момент от ТЭД 2 на колесо 1 передается через торсионный вал 3, проходящий через полый вал ТЭД 2 и полую ось колеса 1. Привод конструктивно прост, но значительные осевые габариты ТЭД препятствуют созданию прохода с низким полом в месте расположения колес.

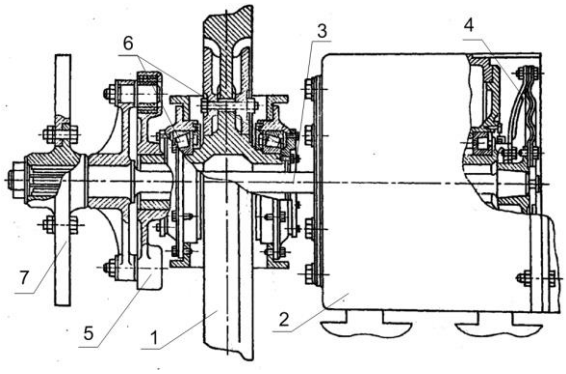


Рис. 5. Непосредственный привод (ВНИИВ):
1 – колесо; 2 – ТЭД; 3 –торсионный вал; 4, 5 – муфты; 6 – подшипники; 7 – тормозной диск

Fig. 5. Direct drive of the Russian Research Institute of Car Building: 1 – wheel; 2 – TED; 3 – torsion shaft; 4, 5 – couplings; 6 – bearings; 7 – brake disc

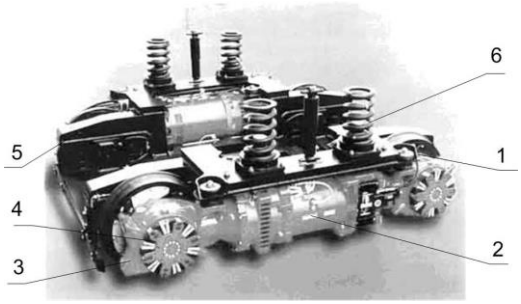


Рис. 6. Групповой привод трамвая *Combino* с ТЭД на каждой стороне: 1– колесо; 2 – ТЭД; 3 – редуктор; 4 – упругая муфта; 5 – рама тележки; 6 – рессорное подвешивание
Fig. 6. Combino tram group drive with TED on each side: 1– wheel; 2 – TED; 3 – reducer; 4 – elastic coupling; 5 – trolley frame; 6 – spring suspension

При использовании передаточных механизмов может оказаться выгодным использовать групповой привод. Так, для уменьшения значения необрессоренной массы в трамвае *Combino* (производство «*Siemens*») использован тяговый привод (рис. 6), применяющий принципиальные решения мономоторного привода Дюваг.

Конструкция тягового привода такова, что она обеспечивает взаимодействие с неровностями пути посредством первичного рессорного подвешивания. Это обеспечивается за счет продольного размещения тяговых двигателей (мощность 100 кВт каждый), которые через редукторы с коническими зубчатыми зацеплениями и упругие муфты передают крутящий момент на колесные центры. На каждой тележке применены два таких групповых привода по схеме «один двигатель на два колесных центра», что позволяет повысить расстояние между колесными центрами.

Недостатками такой реализации привода являются относительная сложность при производстве и ремонте и достаточно высокий уровень шума при эксплуатации.

В трамвае *AEG-MAN* (производство «*Voith*») применен опорно-рамный привод, в конструкции которого использована подвеска тягового двигателя к кузову, смещенная по отношению к центральному проходу (рис. 7). В приводе передача момента осуществлена двухступенчатыми осевыми редукторами, расположенными с обеих сторон тележки; связь с тяговым двигателем реализована через карданные валы. Преимуществом этого привода является унификация, т.к. в нем применяются узлы, производство которых уже осуществляется в автомобильной промышленности. Также привод может быть рекомендован к внедрению в тележках с жестким буксовым подвешиванием. К недостаткам следует отнести более высокий уровень шума.

В трамвае *ULF* (*Ultra Low Floor*) производства «*Siemens*» применен индивидуальный тяговый привод с осевыми редукторами и вертикальным расположением тяговых двигателей с обеих сторон пассажирского салона (рис. 8).

Эта компоновка в настоящее время не получила положительных отзывов из-за существенного усложнения компоновки пассажирского салона.

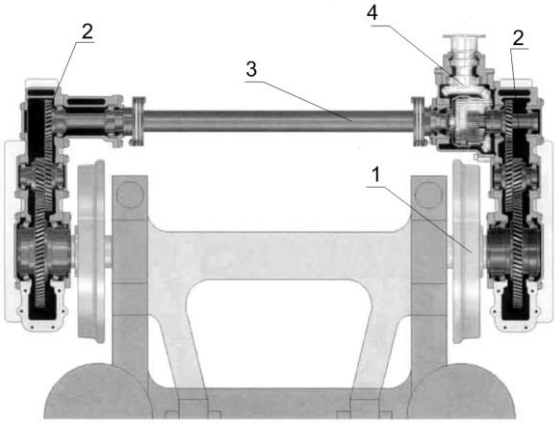
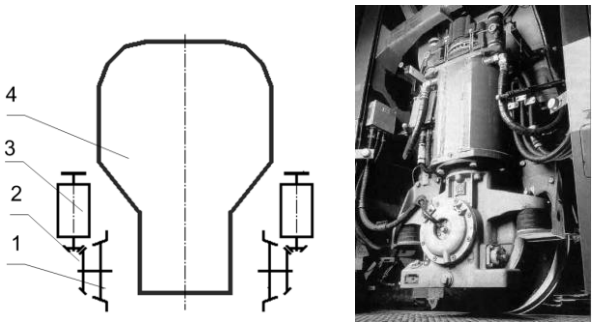


Рис. 7. Групповой привод Voith с размещением ТЭД на кузове: 1 – колесо; 2 – осевой редуктор; 3 – карданный вал; 4 – раздаточный редуктор
Fig. 7. Voith group drive with TED placed on the body: 1 - wheel; 2 - axial reducer; 3 - cardan shaft; 4 - dispensing gearbox



а) б)

Рис. 8. Привод трамвая ULF:
а) схема, б) внешний вид: 1 – колесо; 2 – осевой редуктор; 3 – ТЭД; 4 – кузов
Fig. 8. ULF tram drive: a) topology, b) appearance; 1 – wheel; 2 – axial reducer; 3 – TED; 4 – body

Для рассмотренного направления достаточно очевидно, что исходное противоречие заключалось в невозможности понизить уровень пола из-за расположения под ним тяговых электродвигателей. Данное противоречие пытались устранить двумя способами. Первый из них - это интеграция ТЭД с другими элементами экипажа, главным образом, с колесом, и основным новым противоречием, возникавшим при этом, было противоречие между требуемой и полученной необрессоренной массой экипажа. Возможной новой концепцией в данном случае могло бы быть, например, такое мотор - колесо, в котором массы колеса и ТЭД разделены, либо между статором ТЭД и ободом находятся упругие элементы. Второй способ разрешения противоречия компоновки для низкопольных экипажей – это вынос ТЭД наружу тележки, и здесь основой для создания новых концепций может быть поиск свободного места для ТЭД вне тележки, а также поиск простых и надежных конструкций тяговой передачи и передаточных механизмов привода.

Авторами также предложены моторколеса, в которых магнитное поле обмоток ТЭД способствует увеличению сцепления колеса с рельсом (рис. 9, 10) для предотвращения боксования.

При свободном движении в режиме выбега торцевые обмотки 6 отключены от источника импульсного напряжения. При переходе в режим тяги на обмотки 6 поступают однополярные прямоугольные импульсы напряжения в функции угла поворота колеса 1. Торцевое расположение фазных обмоток 6 на диске статора 4 создает магнитный поток, линии индукции которого расположены в осевом направлении; благодаря тому, что торцевые зубцы 5 размещены на колесе 1, часть магнитного потока проходит через контакт колеса 1 с рельсом 7.

Переменное магнитное поле, создаваемое многофазными торцевыми обмотками 6 статора 4, за счет геометрического распределения фаз по окружности статора обеспечивает практически постоянный по направлению магнитный поток в контакте колеса 1 с рельсом 7. При попадании в зону контакта смазочного материала, уменьшающего коэффициент сцепления, в нем всегда присутствуют ферромагнитные частицы, являющиеся по сути продуктами износа. Эти частицы вместе со смазочным материалом (маслом) образуют ферромагнитную жидкость, взаимодействие которой с магнитным полем торцевых обмоток 6 приводит к повышению коэффициента сцепления колеса 1 с рельсом 7, что предотвращает возникновение боксования колеса.

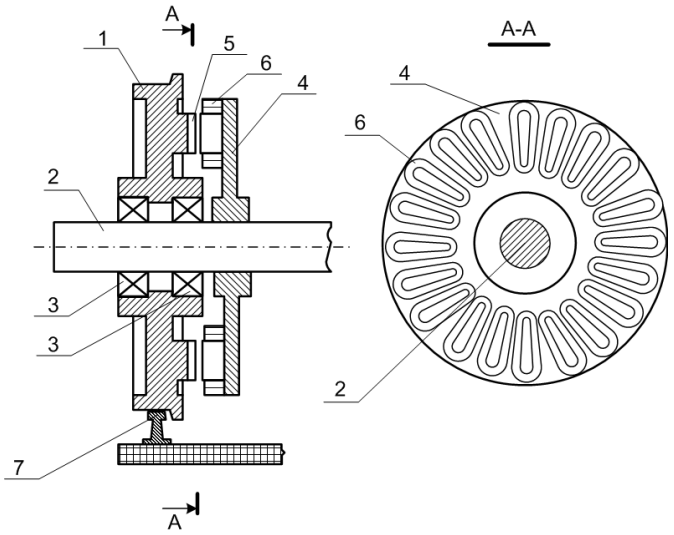


Рис. 9. Тяговый привод с использованием полей ТЭД для предотвращения боксования: 1 – колесо; 2 - неподвижная ось; 3 – подшипники; 4 – статор; 5 – торцевые зубцы; 6 - торцевые обмотки; 7 – рельс

Fig. 9. Traction drive using TED fields to prevent skidding: 1 – wheel; 2 – fixed axle; 3 – bearings; 4 – stator; 5 – end teeth; 6 – end windings; 7 – rail

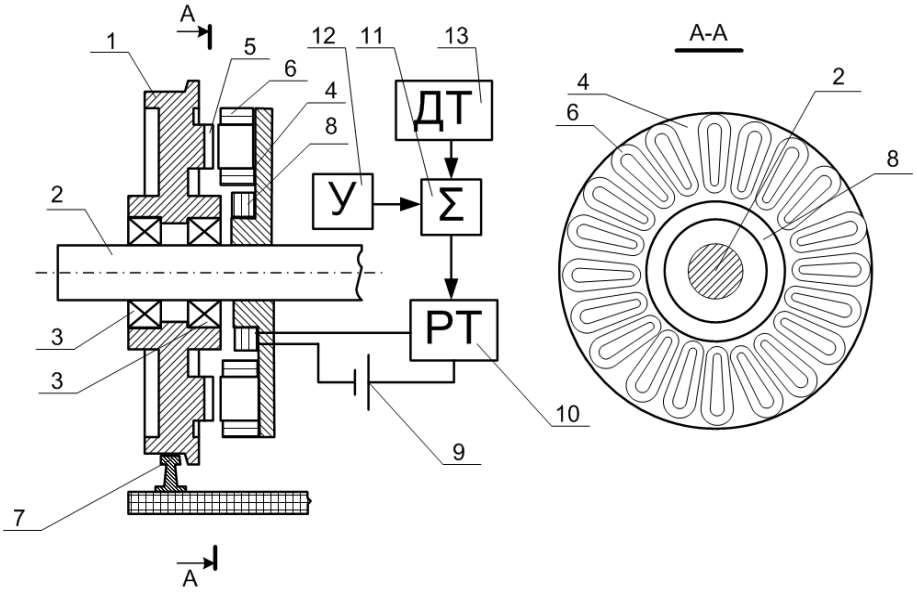


Рис. 10. Вариант тягового привода с катушкой подмагничивания: 1 – колесо; 2 - неподвижная ось; 3 – подшипники; 4 – статор; 5 – торцевые зубцы; 6 – торцевые обмотки; 7 – рельс; 8 – обмотка подмагничивания; 9 – источник тока; 10 – регулятор тока; 11 – сумматор; 12 – блок уставки; 13 – датчик тягового усилия

Fig. 10. Variant of traction drive with bias coil: 1 – wheel; 2 – fixed axle; 3 – bearings; 4 – stator; 5 – end teeth; 6 – end windings; 7 – rail; 8 – bias winding; 9 – current source; 10 – current regulator; 11 – adder; 12 – setpoint unit; 13 – traction force sensor

Вариант привода с катушкой подмагничивания (рис. 10) позволяет создать возможность дополнительного увеличения силы тяги, например, на затяжных подъемах или трогании состава с места.

В блоке уставки 12 (У) задается значение силы тяги колеса 1, необходимо для данной скорости движения. Регулятор тока 10 (РТ) по сигналу сумматора 11 (Σ) осуществляет регулирование тока, создаваемого в обмотке подмагничивания 8 источником тока 9. При отсутствии буксования тяговое усилие больше или равно силе тяги, заданной в блоке 12 (У), следовательно, сигнал от датчика тягового усилия 13 (ДТ) больше или равен выходному сигналу блока 12 (У). В этом режиме на выходе сумматора 11 (Σ) сигнал рассогласования равен нулю, регулятор тока 10 (РТ) закрывает источник тока 9, ток в обмотке подмагничивания 8 отсутствует.

При определенных условиях работы, при которых требуется реализовывать предельную силы тяги, может возникать режим буксования (проскальзывания колеса 1 по рельсу 7), когда конечное значение коэффициента сцепления не позволяет достигать требуемого значения силы тяги. Данное явление приводит к уменьшению силы тяги по отношению к установленной в блоке 12 (У), из-за чего сигнал от датчика тягового усилия 13 (ДТ) становится меньше выходного сигнала блока 12 (У), на выходе сумматора 11 (Σ) появляется сигнал, отличный от нуля, в результате чего происходит открытие источника тока 9 и в обмотке подмагничивания 8 создается ток, величина которого изменяется в функции разности выходных сигналов блоков 12 (У) и 13 (ДТ). Ток обмотки подмагничивания 8 возбуждает магнитное поле, которое складывается с магнитным полем торцевых фазных обмоток 6. Суммарный поток магнитного поля, созданного в контакте колеса 1 с рельсом 7, обеспечивает повышение коэффициента сцепления и переход из режима буксования в режим тяги.

На описанные варианты тягового привода авторами поданы заявки на получение патента на полезные модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Классификация как инструмент синтеза механической части тяговых приводов железнодорожного подвижного состава / О.В. Измеров, Г.С. Михальченко // Мир транспорта и технологических машин, 2012. №4 (39). С. 53-60.
2. Общие принципы классификации механической части тяговых приводов локомотивов. / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин. Брянск, БГТУ, 2015. С.241-247.
3. Развитие классификации механической части тяговых приводов железнодорожных локомотивов. [Текст] / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.Ю. Капустин, Д.Н. Шевченко // Наука и техника транспорта, 2021. № 2. С. 63-69.
4. Кибернетические аспекты методов синтеза электромеханических систем: монография / О.В. Измеров [и др.]; под ред. академика Академии электротехн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. Орел: Госуниверситет - УНПК, 2015. 234 с.
5. Neudorfer, H. Glasers Annalen / H. Neudorfer. 2001. № 6/7. P. 237-242.
6. Hondius, H. Metro Report / H. Hondius. 1999. P. 21-25.
7. Две базовые концепции высокоскоростных электропоездов и их сравнительная технико-экономическая оценка / И.В. Гурлов, А.П. Епифанов, М.В. Жилин, А.-Я. Ю. Пармас, В.М. Пивоваров. // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2009. №1. С. 5-22.
8. Патент на полезную модель № 196906, Российская Федерация, СПК B61C 9/48 (2019.08); B60K 7/0007 (2019.08); B60K 2007/0092 (2019.08). Электромотор-колесо. / Воробьев В.И., Измеров О.В., Пугачев А.А., Космодамианский А.С., Капустин М.Ю., Стрекалов Н.Н., Самотканов А.В., Шевченко Д.Н., Корчагин В.О. Опубл. 19.03.2020, бюл. № 8.

REFERENCES

1. Izmerov OV, Mikhalchenko GS. Classification as a synthesis tool of the mechanical part of railway rolling stock traction drives. Transport and Technological Cars. 2012;4(39):53-60.
2. Vorobyov VI, Izmerov OV, Pugachev AA, Bondarenko DA. General principles of classifying the mechanical part of locomotive traction drives. Collection of scientific papers, 2015: Improvement of Energy Machines; Bryansk: BSTU; 2015. p.241-247.
3. Kosmodamiansky AS, Vorobyov VI, Izmerov OV, Kapustin MYu, Shevchenko DN. Classification development of mechanical part of railway locomotive traction drives. Science and Technology in Transport. 2021;2:63-69.
4. Izmerov OV. Cybernetic aspects of methods of electromechanical systems synthesis: monograph. Orel: State University – UNPK; 2015.
5. Neudorfer, H. Glasers Annalen. 2001;6/7:237-242.
6. Hondius H. Metro Report. 1999.
7. Gurlov IV, Epifanov AP, Zhilin MV, Parmas A-YaYu, Pivovarov VM. Two basic concepts of high-speed electric trains and their comparative technical and economic assessment. Proceedings of Petersburg Transport University. 2009;1:5-22.
8. Vorobyov VI, Izmerov OV, Pugachev AA, Kosmodamiansky AS, Kapustin MYu, Strekalov NN, Samotkanov AV, Shevchenko DN, Korchagin VO. Utility Model Patent No. 196906, Russian Federation, SEC B61C 9/48 (2019.08); B60K 7/0007 (2019.08); B60K 2007/0092 (2019.08). Electric motor-wheel. 2020 March19.

Информация об авторах:

Воробьев Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, почтовый адрес: 241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7, Тел. +7(962)137-32-77, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

Пугачев Александр Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета, почтовый адрес: 241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7, Тел. +7(919)192-88-70, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru.

Измеров Олег Васильевич – соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, почтовый адрес: 241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7, e-mail: izmerov@yandex.ru.

Николаев Евгений Владимирович – старший преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул Образцова, д. 9, стр. 9, e-mail: work-omc@yandex.ru.

Vorobyov Vladimir Ivanovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; 7, Blv. 50-let Octyabrya, Bryansk, 241035; phone: +7(962)137-32-77; e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.

Pugachev Aleksandr Anatolyevich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Electrical Engineering and Electronics at Bryansk State Technical University; 7, Blv. 50-let Octyabrya, Bryansk, 241035; phone: +7(919)192-88-70; e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru.

Izmerov Oleg Vasilyevich – Competitor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; 7, Blv. 50-let Octyabrya, Bryansk, 241035; email: izmerov@yandex.ru.

Nikolaev Evgeny Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department Traction Rolling Stock at the Russian University of Transport; GSP-4, 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994; 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 14.07.2023; одобрена после рецензирования 18.08.2023; принята к публикации 28.08.2023. 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 14.07.2023; approved after review on 18.08.2023; accepted for publication on 28.08.2023. The reviewer is Volokhov G.M., Doctor of Technical Sciences, Head of the Department 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*.