

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.021

doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-47-57

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА

Александр Анатольевич Пугачев^{1✉}, Владимир Иванович Воробьев², Олег Васильевич Измеров³, Артем Евгеньевич Карпов⁴

^{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 akarpov576@gmail.com

Аннотация

Показана актуальность совершенствования существующих и разработки новых систем тягового привода локомотивов. Рассмотрен вопрос развития концепции энергосберегающего тягового привода. Для электротоковых усилителей сцепления предложено устройство для увеличения сцепления колеса с рельсом, в котором осуществляется бесконтактный емкостной токосъем. Предложен ряд конструкций, позволяющих разместить индуктор достаточных размеров и массы на оси колесной пары В качестве конструкции, требующей минимальных изменений в экипажной части, предложено

хордовое расположение индуктора при использовании ферромагнитного сердечника для усиления магнитного потока. Предложена конструкция опор кузова, применение которой позволит повысить коэффициент использования сцепного веса, уменьшить потери мощности и увеличить эффективности преобразования энергии и реализации тяговых свойств тягового привода.

Ключевые слова: сцепление рельс, индуктор, двигатель, энергосбережение, защита, ток, магнитное поле, электропривод.

Ссылка для цитирования:

Пугачев А.А. Развитие концепции энергосберегающего тягового привода локомотива / А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, А.Е. Карпов // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 9. – С.47-57. doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-47-57.

Original article

Open Access Article

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF ENERGY SAVING TRACTION DRIVE OF THE LOCOMOTIVE

Aleksandr Anatolyevich Pugachev^{1✉}, Vladimir Ivanovich Vorobyev², Oleg Vasilyevich Izmerov³, Artyom Evgenievich Karpov⁴

^{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 akarpov576@gmail.com

Abstract

The relevance of improving existing and developing new traction drive systems for locomotives is shown. The development of the concept of an energy-saving traction drive is considered. For electric current traction amplifiers, a device for increasing the traction of a wheel with a rail is proposed, which has a contactless capacitive current collector. Several designs are

proposed that make it possible to place an inductor of sufficient size and weight on the axis of the wheelset. As a design requiring minimal changes in the carriage, a chordal arrangement of the inductor is proposed when using a ferromagnetic core to enhance the magnetic flux. The design of the body supports is proposed, the use of which will increase the coefficient of using

traction weight, reduce power losses and increase the efficiency of energy conversion and the realization of traction properties of the drive.

Reference for citing:

Pugachev AA, Vorobyev VI, Izmerov OV, Karpov AE. Development of the concept of energy-saving traction drive of the locomotive. Transport Engineering. 2024;9:47-57. doi: 10.30987/2782-5957-2024-9-47-57.

Объект исследования и характеристика проблемы

За прошедшие 10 лет актуальность концепции энергосберегающего тягового привода [1] возросла в связи с необходимостью дальнейшего повышения тяговых свойств локомотивов, в первую очередь, для эксплуатации на Восточном полигоне, где целями первого этапа проекта развития БАМа и Транссиба предусмотрено повышение веса грузовых поездов до 7100 тонн, и уже с 2022 года осуществляются отправки сдвоенных тяжеловесных поездов массой 14200 тонн. При этом исследователи отмечают сложность реализации предельных коэффициентов сцепления колеса с рельсами в указанных условиях. Так, в [2] отмечается «понижение вплоть до нулевых значений коэффициента сцепления колеса с рельсом, из-за повышения увлажнённости точки их контакта, вследствие есте-

Keywords: rail traction, inductor, engine, energy saving, protection, current, magnetic flux, electric drive.

ственного расширения диапазона точки росы от +14 до -9,3 °С».

С другой стороны, за прошедший период времени авторами был написан ряд работ, посвященных вопросам развития устройств увеличения коэффициента сцепления между колесом и рельсом и влияния конструкции экипажной части железнодорожного подвижного состава на коэффициент сцепления (например, [3-5] и др.), в связи с чем возникает проблема, связанная с поиском информации о различных аспектах реализации данной концепции по большому числу источников в технической литературе, и систематизации данных в разных источниках. Предлагаемая статья представляет собой попытку решения этой проблемы.

Анализ проблемы

Создание концепции энергосберегающего привода было обусловлено объективными предпосылками, которые можно условно разделить на эмпирические, эмпирико-теоретические и теоретические (рис.1). К эмпирическим предпосылкам относятся результаты наблюдений аномально высоких коэффициентом сцепления и попытки создания устройств увеличения сцепления на их основе. К первой такой работе относятся исследования Элиаса Риса [6], который еще в конце 19 века обнаружил эффект увеличения коэффициента сцепления при пропускании электрического тока через контакт колеса и рельса на железной дороге «Балтимор и Хэмпден».

Экспериментом на моделях Э. Рис также доказал существенное повышение сцепления колеса с рельсом при воздействии на поверхность контакта магнитного поля, однако оба этих эффекта не получили теоретического объяснения. В 1951 году паровоз СО17-2877 по инициативе Б.П.

Микулина был оснащен магнитными усилителями сцепления, что позволило реализовать коэффициент тяги, равный 0,42...0,44. Наблюдаемое явление также не получило объяснения, поскольку увеличение сцепного веса локомотива от притяжения колес к рельсам за счет электромагнитов составляло лишь 2...3% [7]. В начале 60-х годов З.З. Рудяковым было обнаружено, увеличение коэффициента сцепления до 0,5 у электровозов при больших значениях тягового тока [8], при этом эффект объяснялся разрушением загрязнений на поверхности колес и рельсов вследствие нагрева поверхностей. В [9] показана возможность увеличения силы тяги на 50%. В то же время создание тепловоза ТЭМ2УС-001 с электромагнитными усилителями сцепления не позволило обнаружить существенного улучшения сцепных свойств при воздействии на поверхность контакта магнитного поля [10], что противоречит другим аналогичным опытам.

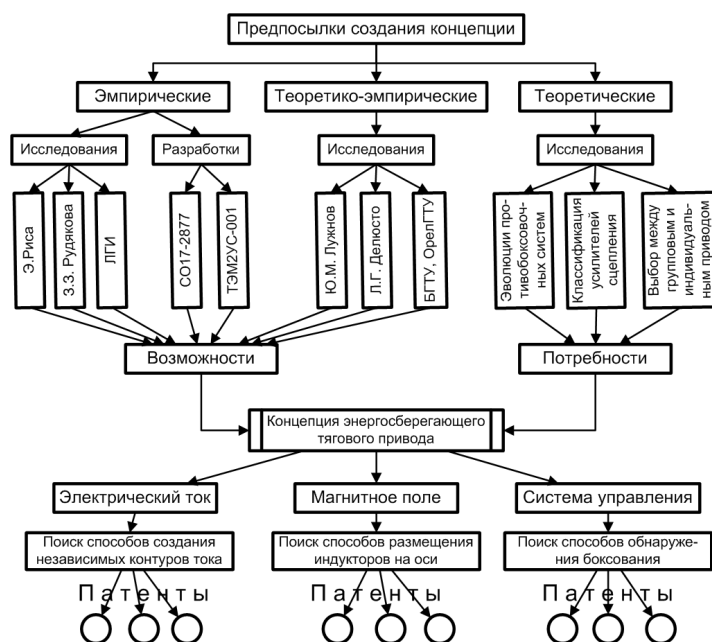


Рис. 1. Схема создания и развития концепции энергосберегающего тягового привода
 Fig. 1. Scheme of creation and development of the concept of energy-saving traction drive

Из перечисленных попыток следовало, что, с одной стороны, существуют значительные резервы для повышения сцепных свойств локомотивов, а с другой – конструкция и принцип действия усилителей сцепления имеют определяющее влияние на эффективность предложенных решений.

Ряд исследований посвящен определению закономерностей влияния электрического тока и магнитного поля на коэффициент трения. К таким исследованиям относятся работы Лужнова Ю.М. [11] и Делюсто Л.Г. [12] по исследованию влияния магнитного поля на коэффициент трения, при этом в работах Делюсто Л.Г. наблюдаемый эффект объясняется явлением магнитопластичности, применяемом при прокатке металла. В результате лабораторных исследований [13] доказано, что при воздействии электрического тока коэффициент трения может быть доведен до 0,512, при этом явление объяснялось эффектом электропластичности. В [14] установлено, что эффект от пропускания электрического тока через пятно контакта колеса с рельсом зависит от состояния поверхности контакта, в результате чего при воздействии тока силой 3 килоампера при поверхностях, загрязненных маслом, коэффициент трения увеличивается на

100...150%, для влажных поверхностей на 65...80%, и для сухих на 55...65%.

Данные результаты позволили определить рабочие гипотезы, объясняющие природу эффектов увеличения силы трения под воздействием электрического тока и магнитного поля, послужили доказательством возможностей управления коэффициентом сцепления при разных внешних условиях, а также показали возможность снижения зависимости коэффициента трения от состояния поверхностей колеса и рельса благодаря использованию указанных эффектов.

Таким образом, эмпирические и эмпирико-теоретические предпосылки выявили наличие возможностей для создания новых концепций тягового привода, в то время как теоретическими предпосылками новой концепции стали исследования, результаты которых выявили потребности в создании новой концепции. В первую очередь, это проведенный О.В. Измеровым на основе методов технической инноватики, а именно на основе матрицы развития потребностей и возможностей их удовлетворения, анализ эволюции противобоксовых систем локомотивов [1], который привел к следующим выводам:

– развитие существующих систем борьбы с боксованием привело к противо-

речию между ростом максимально возможной величиной коэффициента сцепления и случайным характером его изменения под воздействием внешних условий, в результате чего эксплуатационные нормы коэффициента сцепления существенно ниже максимально достижимых;

– для разрешения указанного противоречия противобоксовочные системы должны не ограничивать тяговые свойства локомотива при ухудшении сцепления колес с рельсами, а регулировать коэффициент сцепления для поддержания его близким к постоянному;

– необходим переход от обнаружения проскальзывания колес по рельсам к прогнозированию проскальзывания.

В качестве еще двух важных предпосылок концепции следует отметить результаты анализа рационального выбора между групповым приводом и индивидуальным и создания классификации конструктивных решений усилителей сцепления, изложенные авторами в [1], на основании которых был сделан вывод, что устройства безинерционного регулирования коэффициента сцепления окажут существенное влияние на конструкцию тяговых приводов локомотивов по причине необходимости изоляции колесных пар от других элементов экипажной части или необходимости размещения индукторов, имеющих значительные габариты и массу.

Все эти предпосылки вели к логическим выводам, которые и легли в основу концепции:

– для устранения потерь энергии при скольжении колеса по рельсу необходимо устранить возможность скольжения, а для этого надо безинерционно менять коэффициент трения;

– безинерционно менять коэффициент трения практически возможно с помощью электрического тока или магнитного поля;

– для реализации такого воздействия необходимо выбирать конструкцию тягового привода, отвечающую определенным требованиям;

– система предупреждения боксования должна изменить свои функции, то есть, поддерживать коэффициент сцепле-

ния близким к постоянному и прогнозировать снижение коэффициента сцепления заранее, а не после начала боксования.

В свою очередь, выработка концепции привела к необходимости решения трех основных проблем, препятствующих практической ее реализации.

Первая проблема заключается в необходимости создания отдельного контура тока для каждого из контактов колеса с рельсом. Если вопрос изоляции колесной пары от других элементов экипажной части технически может быть решен за счет использования бесчелюстных букс, применения опорно-рамного привода с осевым редуктором и изолирующих вставок в системе пневматического колодочного тормоза, а также путем разделения тягового тока и тока, управляющего коэффициентом сцепления, то вопрос о распределении тока между колесными парами при работе устройства остается открытым, особенно при нечетном числе колесных пар в тележке. В [1] данный вопрос предлагалось решить посредством применения двухосной тележки с групповым приводом. Недостатком этого предложения является невысокая актуальности использования группового привода, так как основным видом привода для локомотивов в магистральном движении и на маневровой работе остается индивидуальный. Использование же индивидуального токосъема для каждой колесной пары в виде роликов, контактирующих с рельсами, усложняет экипажную часть и снижает ее надежность.

В качестве возможного решения данной проблемы авторами было предложено устройство, использующее бесконтактный токосъем за счет явления резонанса в последовательном колебательном контуре в виде катушки индуктивности и пластины конденсатора, находящейся над рельсом (рис. 2).

Срабатывание устройства происходит в результате анализа статистических характеристик продольных ускорений буксы и сравнения разности окружной скорости вращения колеса локомотива и скорости поступательного движения локомотива. На предложенное устройство авторами

получен патент на полезную модель.

Вторая проблема заключалась в технической возможности размещения индуктора на оси колесной пары, т.к. это обеспечит работу индуктора с минимальными потерями мощности [1]. Основная конструктивная задача при этом – необходимость в расположении обмотки индуктора между осью и корпусом тягового электродвигателя (ТЭД), что объясняется тем, что в существующих конструкциях приводов корпус ТЭД расположен как можно ближе к оси колесной пары, что позволяет реализовать максимальную величину передаточного числа тяговой передачи, максимально высокую частоту вращения ротора ТЭД, и, тем самым, получить возможность максимально снизить массу ТЭД.

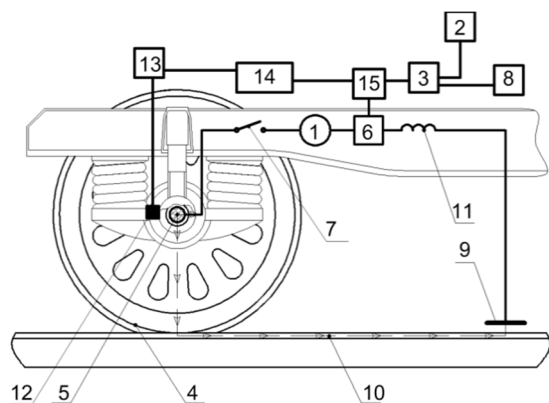


Рис. 2. Устройство для управления сцеплением колеса с рельсом: 1 – источник переменного тока высокой частоты; 2 – датчик скорости колесной пары; 3 – блок сравнения; 4 – колесная пара; 5 – скользящие контакты; 6 – регулятор тока; 7 – силовой контактор; 8 – датчик скорости локомотива; 9 – пластина конденсатора; 10 – головка рельса; 11 – катушка индуктивности; 12 – датчик продольных ускорений; 13 – измерительный блок; 14 – статистический анализатор сигналов; 15 – логический элемент «ИЛИ»

Fig. 2. Device for wheel-rail adhesion control: 1 – high frequency AC source; 2 – wheelset speed sensor; 3 – comparison unit; 4 – wheelset; 5 – sliding contacts; 6 – current regulator; 7 – power contactor; 8 – locomotive speed sensor; 9 – shows a capacitor plate; 10 – rail head; 11 – inductor; 12 – longitudinal acceleration sensor; 13 – measuring unit; 14 – shows a statistical signal analyzer; 15 – logical element OR

Как уже было отмечено выше, первоначально авторами был предложен вариант мономоторного тягового привода для двухосной тележки [1], аналогичный тяго-

вому приводу электровоза ВЛ83. В дальнейшем авторами был предложен ряд конструкций индивидуального тягового привода, позволяющих разместить на оси колесной пары индуктор достаточных габаритов (рис. 3).

Прежде всего, это опорно-рамный тяговый привод с осевым редуктором, в котором имеется промежуточное зубчатое колесо (рис. 3а). Технологически такой привод достаточно прост и освоен производством; он, применяется, к примеру, на пассажирском электровозе ЭП1, но, при увеличении передаточного числа, может быть использован и на других локомотивах с диаметром колес как 1250, так и 1050 мм. Недостатком такого привода при диаметре колес 1050 мм является то, что из-за меньшего диаметра ведущего зубчатого колеса увеличиваются нагрузки на зубья ведущего и промежуточных зубчатых колес. Для устранения этого недостатка был предложен тяговый привод с двухпоточной зубчатой передачей. Это усложнило конструкцию зубчатой передачи, поскольку в ней потребовался дополнительный механизм, выравнивающий нагрузки по обоим ветвям передачи. Несмотря на это, вариант с промежуточными зубчатыми колесами можно считать наиболее отработанным на практике.

В конце 70-х годов в СССР велись разработки асинхронных ТЭД с осевым магнитным потоком (дисковых), вследствие чего было установлено, что дисковое исполнение ТЭД позволяет существенно снизить его осевые габариты. В связи с этим авторами был предложен ряд технических решений тягового привода.

Достоинством данного варианта является то, что в осевом редукторе не требуется использование промежуточных зубчатых колес, а основным недостатком – отсутствие технологии изготовления дисковых электрических машин.

При расположении ведущей шестерни на валу ТЭД между роторными подшипниками авторы предлагают размещать индуктор в пространстве между ступицей ведомого зубчатого колеса и диском колесного центра (рис. 3в). На варианты данной конструкции авторами также были по-

лучены патенты. Недостатком данной конструкции являются небольшие габариты для размещения индуктора.

Увеличить габариты можно, сделав

ось коленчатой (рис. 3г). Технически данное предложение является наиболее сложным из рассматриваемых.

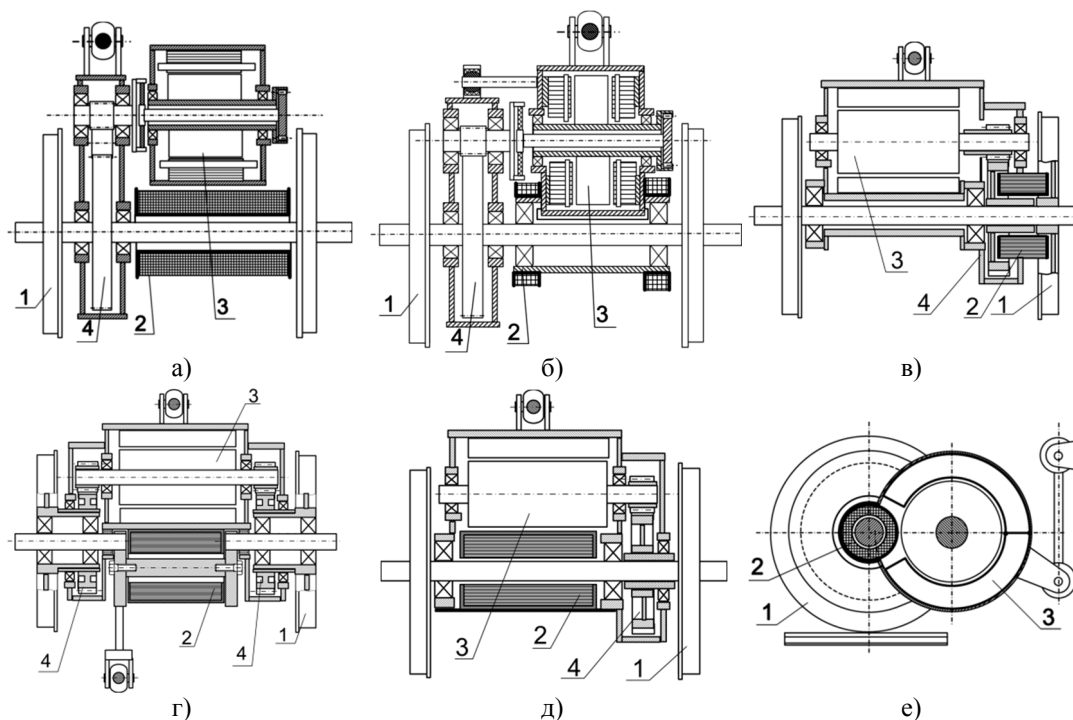


Рис. 3. Варианты размещения обмоток индуктора при индивидуальном приводе: а) опорно-рамный привод с осевым редуктором и промежуточным колесом; б) привод с тяговым электродвигателем с осевым магнитным потоком; в) привод с малым зубчатым колесом между роторными подшипниками; г) привод с коленчатой осью; д, е) привод с дугостаторным двигателем; 1 – колесная пара; 2 – обмотка индуктора; 3 – тяговый электродвигатель; 4 – редуктор (тяговая передача)

Fig. 3. Ways of location of inductor windings in separated traction drives: a) drive with support-frame having axial gear; b) drive having traction motor with axial magnetic flux; c) drive with a small gear; d) drive with special axle; e, f) drive with induction motor with special topology of stator; 1 – wheelset; 2 – inductor winding; 3 – traction motor; 4 – reduction gear box (traction gear)

Наконец, дополнительное место в тяговом приводе для размещения обмотки индуктора на оси колесной пары можно найти, используя дугостаторные асинхронные двигатели. Обмотка индуктора в данном случае размещается между незамкнутыми сегментами статора (рис. 3д и 3е). Этот вариант привода может быть применен при диаметре колеса 1050 мм. Недостаток варианта – отсутствие опыта применения дугостаторных двигателей в качестве ТЭД и влияние магнитного поля, создаваемого обмоткой индуктора, на токи в короткозамкнутой обмотке ротора.

Наконец третья проблема заключалась в необходимости поиска новых технических решений способов раннего обнаружения боксования и конструкций

устройств, в которых реализованы эти способы.

Авторами предложено устройство для обнаружения скольжения колес по рельсу (рис. 4), работа которого основана на тех же принципах, что и компьютерных оптических манипуляторов «мышь». С помощью лазеров, оптических систем и видеокамер устройство получает изображения участков рельса, по характеру изменения этих изображений с помощью цифровых сигнальных процессоров определяется скорость поступательного перемещения локомотива, в то время как с помощью импульсных датчиков определяется частота вращения колесных пар локомотива и окружная скорость поверхностей колес. При возникновении скольжения колеса по

рельсу через токосъемное устройство соответствующей колесной пары и контакт колеса с рельсом пропускается электрический ток, что приводит к увеличению коэффициента трения колеса по рельсу и прекращению скольжения. Полупроводниковые вентили предупреждают возникновение обратных токов в цепях регулирования коэффициента сцепления. На предложенное устройство авторами получен патент на изобретение.

Рассматривая предложенные выше решения, можно прийти к выводу, что системы энергосберегающего тягового при-

вода, имеющие наибольшую эффективность, как правило, требуют внесения наибольших изменений в экипажную часть (изменение типа привода, создание новых конструкций электрических машин), что затрудняет использование энергосберегающего привода в новых конструкциях локомотивов. Это является основным недостатком, не позволяющим рекомендовать энергосберегающий тяговый привод для массового использования в современных локомотивов.

Рассмотрим, какими путями может быть решена указанная проблема.

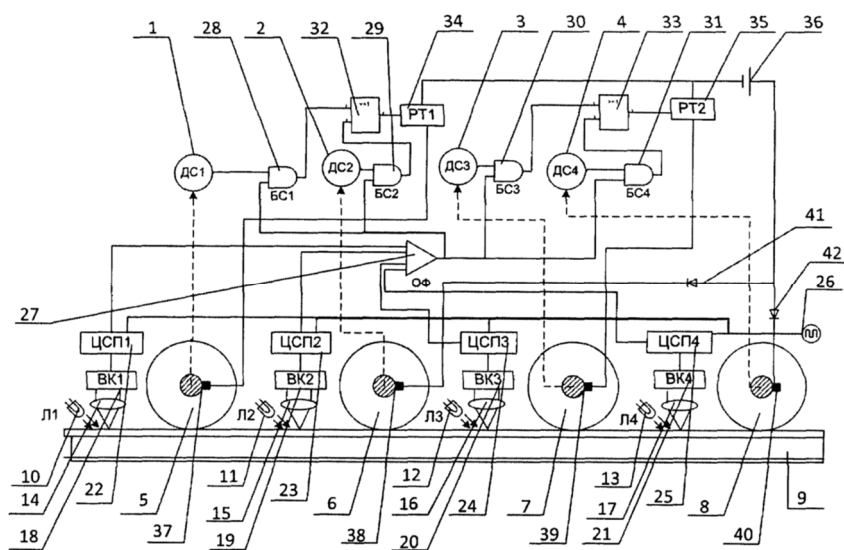


Рис. 4. Устройство для обнаружения скольжения колес по рельсу:

1-4 – импульсные датчики скорости вращения; 5-8 – колесные пары 9 – рельс; 10-13 – лазеры; 14-17 – оптические системы; 18-21 – видеокамеры; 22-25 – цифровые сигнальные процессоры; 26 – датчик времени; 27 – осредняющий фильтр; 28-31 – блоки сравнения; 32, 33 – логические элементы «ИЛИ»; 34-35 – регуляторы тока; 36 – источник питания; 37-40 – колесные пары; 41, 42 – полупроводниковые вентили

Fig. 4. Contraption for fixing of skidding and boxing: 1-4 - pulse rotation speed sensors; 5-8 - wheelsets 9 - rail; 10-13 - lasers; 14-17 - optical systems; 18-21 - video cameras; 22-25 - digital signal processors; 26 - time sensor; 27 - averaging filter; 28-31 - comparison units; 32, 33 - logic elements OR 34-35 - current regulators; 36 - power supply; 37-40 - wheelsets; 41, 42 - semiconductor valves

Предлагаемые решения

Согласно принципам технической инновационики, изложенных авторами в [15], проблема, связанная с необходимостью внесения изменений в экипажную часть локомотивов, может быть решена двумя путями. Первый путь – это поиск решения, которое можно было бы реализовать в виде реальных изделий за минимальное время, частично пожертвовав при этом характеристиками изделия. Второй путь – это поиск возможности получения

максимально возможного эффекта от внедрения энергосберегающего привода, который позволил бы окупить издержки на создания новой конструкции экипажной части.

Первый путь может быть реализован главным образом при использовании электромагнитных усилителей сцепления, поскольку у них контур управляющего тока полностью изолирован от конструктивных элементов локомотива и путевой

структуры. При этом возможности установки индукторов значительных размеров и веса на экипажную часть имеются в двух случаях:

– для промышленных тепловозов с гидропередачей (установка с обеих сторон осевого редуктора);

– при хордовом расположении индуктора на неподрессоренных элементах экипажной части, как это было сделано на тепловозе ТЭМ2УС-001.

Для вариантов конструкции, при которых индуктор подвешен к поддрессоренным элементам экипажа, но не намагничивает ось колесной пары, возникает проблема изменения зазора между полюсом электромагнита и рельсом при колебаниях наддрессорного строения, которое при одноступенчатом рессорном подвешивании может достигать 35 мм; вследствие этого зазор между полюсом электромагнита и рельсом надо увеличивать, что снижает эффективность индуктора.

Для использования индуктора с хордовым расположением необходимо проведение дополнительных исследований, в которые входит моделирование магнитных потоков и физические эксперименты на полноразмерном стенде, чтобы выяснить причину неэффективности индукторов на тепловозе ТЭМ2УС-001, которая противоречит результатам, полученным авторами при испытании тепловоза ЧМЭЗ. При этом для поиска оптимальной конструкции индуктора на стенде достаточно воспроизводить режим трогания с места, когда на результаты определения коэффициента трения по величине момента, приложенного к оси колеса, не влияют вихревые токи, возникающие в колесе при его вращении. Для повышения эффективности индуктора авторами предложено использовать сердечник из магнитомягкого материала (рис. 5), который может быть использован и при других конфигурациях индуктора. На предложенное решение авторами получен патент на полезную модель. В связи с тем, что индуктор, размещенный на неподрессоренных элементах, увеличивает неподрессоренную массу, имеет смысл применять подобную конструкцию в первую очередь на маневровых локомотивах, передвигающихся при работе, как правило, с небольшой скоростью.

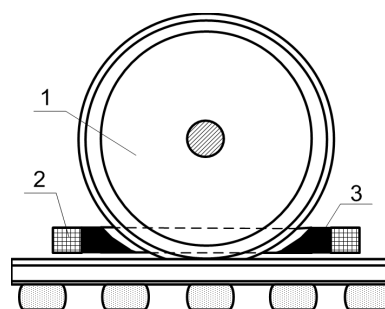


Рис. 5. Индуктор при хордовом расположении с сердечником
1 – колесо; 2 – обмотка индуктора;
3 – сердечник
Fig. 5. Inductor in chordal arrangement with core
1 – wheel;
2 – inductor winding; 3 – core

Для получения максимально возможного эффекта, то есть, для устойчивой реализации коэффициента сцепления порядка 0,4, необходимо, чтобы при выборе решений экипажной части проектировщик в первую очередь руководствовался целью достижения максимального коэффициента сцепления колеса с рельсом. Иными словами, необходимо создание концепции энергосберегающей экипажной части, как надсистемы энергосберегающего тягового привода. При этом также возможны технические решения, основанные на безинерционном управлении свойствами материала, например, предложенная авторами опора кузова (рис. 6).

При движении тепловоза со скоростью, близкой к конструкционной, когда тепловоз развивает низкую силу тяги, опоры кузова на тележку должны быть упругими, чтобы позволить тележке перемещаться в поперечном направлении и тем самым снизить воздействие на путь в прямых от колебаний виляния тележки. В предложенной управляемой опоре кузова для материала упругих резинометаллических элементов опор кузова рекомендован магнитореологический эластомер, особенностью которого является увеличение жесткости в области низких скоростей движения под действием магнитного потока, что приводит к уменьшению угла поворота рамы тележки в вертикальной плоскости; конечным эффектом этих решений является перераспределение нагрузки по осям тележки. На предложенное решение авторами получен патент на полезную модель.

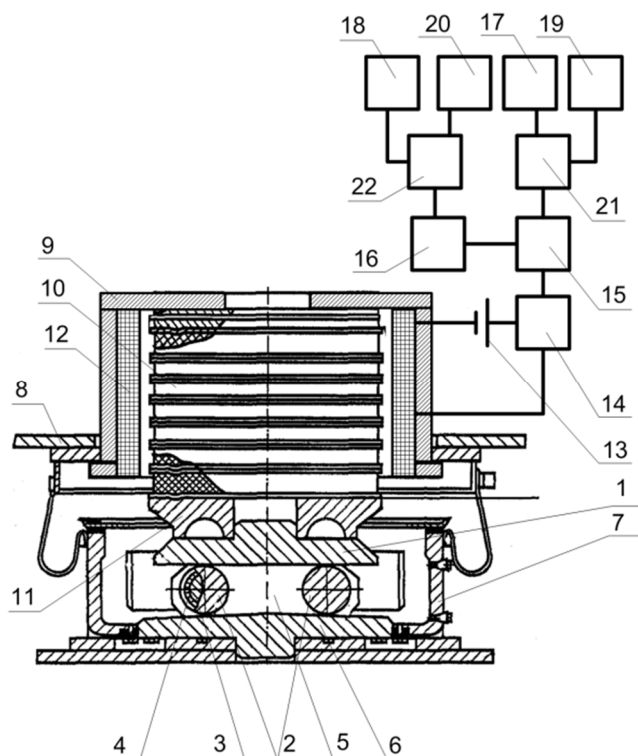


Рис. 6. Управляемая опора кузова: 1 – опорная плита; 2 - цилиндрические ролики; 3 – хвостовики роликов; 4 – отверстия обойм; 5 – обоймы; 6 – нижняя опорная плита; 7 – корпус; 8 – кузов; 9 – стакан; 10 - пакет плоских резинометаллических элементов; 11- опорное кольцо; 12 - катушка электромагнита; 13 - источник тока; 14 – ключ; 15 - логический элемент «И»; 16 - логический элемент «НЕ»; 17 – датчик силы тяги локомотива; 18 – датчик скорости движения локомотива; 19 – блок уставки силы тяги локомотива; 20 – блок уставки скорости движения локомотива; 21,22 – блоки сравнения

Fig. 6. Controlled body support: 1 – base plate; 2 – cylindrical rollers; 3 – roller shanks; 4 – race holes; 5 – clips; 6 – lower support plate; 7 – housing; 8 – body; 9 – glass; 10 – shows a stack of flat rubber-metal elements; 11 – support ring; 12 – coil of electromagnet; 13 – current source; 14 – wrench; 15 is an AND gate; 16 – logical element NOT; 17 – locomotive traction force sensor; 18 – locomotive speed sensor; 19 – locomotive traction force setting unit; 20 – loco-motive speed setting unit; 21,22 – comparison units

Выводы

1. Установлено, что, в связи с ростом актуальности концепции энергосберегающего тягового привода, возникла проблема систематизации данных, относящихся к данной концепции.

2. Для решения проблемы разделения контуров тока в электротокowych усилителях сцепления без применения контактных роликов авторами предложено устройство для увеличения сцепления колеса с рельсом, в котором осуществляется бесконтактный емкостной токосъем.

3. Для задачи размещения индуктора на оси колесной пары в электромагнитных усилителях сцепления разработаны следующие варианты решения:

- использование осевого редуктора, содержащего зубчатые колеса;
- замена радиального магнитного потока на осевой в тяговом электродвигателе, содержащем дисковый ротор;

- использование коленчатой оси;
- использование в тяговом электроприводе асинхронного двигателя дугостаторной конструкции.

4. Установлено, что основной проблемой для дальнейшей практической реализации концепции энергосберегающего привода является необходимость внесения существенных изменений в применяемые конструкции тягового привода.

5. Установлено, что наиболее рациональным с точки зрения конструктивных решений является хордовое расположение индуктора на неподрессоренных элементах экипажной части; для повышения эффективности индуктора предложено использовать сердечник из магнитомягкого материала, который может быть использован и при других конфигурациях индуктора. Предложена конструкция опор кузова, применение которой позволит повысить коэффициент использо-

вания сцепного веса, уменьшить потери мощности и увеличить эффективности преобразования энергии и реализации тяговых свойств тягового привода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Концепция развития энергосберегающих электромеханических систем: монография / А.С. Космодамианский [и др.]; под ред. академика Академии электротехн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. Орел: Госуниверситет. УНПК, 2014. 244 с.
2. Эффективность локомотивов в условиях Восточного полигона: статья / В.Н. Игин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте, сборник трудов научно-практической конференции. М.: «Российский университет транспорта», 2022, С. 41-42.
3. Улучшение тяговых качеств локомотивов с помощью магнитных усилителей сцепления [Текст]+[Электронный ресурс]: монография / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, В.О. Корчагин, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев. Брянск, БГТУ, 2018. 232 с.
4. Анализ и разработка конструктивных решений экипажной части для повышения тяговых свойств локомотивов / Пугачев А.А., Воробьев В.И., Измеров О.В., Николаев Е.В. // «Транспортное машиностроение», Том № 6 (18), Брянск, БГТУ, 2023. с. 52-62.
5. Развитие классификации магнитных усилителей сцепления колеса с рельсом / Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Измеров О.В., Пугачев А.А., Николаев Е.В., Карпов А.Е. // «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов», Москва, Москва: РУТ (МИИТ): РОАТ, 2023, с. 293-312.
6. The electric current as a means of increasing the tractive adhesion of railway motors and other rolling contacts. A full review of this important subject, with accounts of its experimental examination. / Elias E. Ries. Scientific American, Volume 24, Issue 623supp, New York, December 10, 1887 - pp. 9953-9954. – Текст : непосредственный.
7. К вопросу электромагнитного способа улучшения условий сцепления колес электровоза с рельсами / О.М. Янсон // Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного

REFERENCES

1. Kosmodamiansky AS. The concept of developing energy-saving electromechanical systems: monograph. Ore: State University. UNPC; 2014.
2. Igin VN. Efficiency of locomotives in the conditions of the Eastern polygon. Proceedings of the Scientific and Practical Conference, 2022: Innovative Technologies in Railway Transport. Moscow: Russian University of Transport; 2022.
3. Antipin DYa, Vorobyev VI, Izmerov OV, Korchagin VO, Kosmodamiansky AS, Pugachev AA. Improvement of traction qualities of locomotives with the help of magnetic traction amplifiers:

6. По теме статьи авторами получен патент на изобретение и шесть патентов на полезные модели.

- Знамени горного института им. Г.В. Плеханова, т XXXII, вып.1. Ленинград, 1954. С. 66-76.
8. Рудяков, З.З. Резервы увеличения весовых норм поездов / З.З. Рудяков // Железнодорожный транспорт. – 1962. – № 2. – С. 28 – 31.
9. Шахтный электровоз с электромагнитным тяговым органом / К.А. Ананьев, А.В. Рысьев // Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В. Плеханова, т LIII, вып.1. Ленинград, 1966. С. 62-65.
10. Исследования по повышению тяговых свойств маневровых тепловозов путем применения электромагнитного увеличения сцепления и более оптимальных схем соединения тяговых электродвигателей / Е.А. Ситников, И.Н. Родионов, В.П. Гриневиц // Заключительный отчет по теме «Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по повышению эксплуатационных качеств, надежности и долговечности тепловоза» № И-108-82. Коломна, ВНИКТИ, 1982. 83 с.
11. Лужнов, Ю.М. Влияние магнитного поля на механизм взаимодействия колес и рельсов / Ю. М. Лужнов, А.П. Прунцев // Тр. МИИТ. 1975. Вып. 480.
12. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях / Л.Г. Делюсто. М: Машиностроение, 2005. 272 с. – Текст : непосредственный.
13. Тихомиров, В.П. Моделирование сцепления колеса с рельсом: монография / В.П. Тихомиров, В.И. Воробьев, Д.В. Воробьев, Г.В. Багров, М.И. Борзенков, И.А. Бутрин. Орел: Орел ГТУ, 2007. 127 с.: ил.
14. Ивахин, А.И. Стенд для исследования тяговых свойств в системе колесо-рельс железнодорожных транспортных средств / А.И. Ивахин, В.И. Травиничев, Д.И. Петраков // Тяжелое машиностроение. 2011. №4. С. 2-5.
15. Техническая инновационика. Методы изобретательского творчества: монография./[О.В. Измеров и др.]. Орел: Госуниверситет. УНПК, 2011. -213 с.

- monograph [Internet]. Bryansk: BSTU; 2018.
4. Pugachev AA, Vorobyov VI, Izmerov OV, Nikolaev EV. Analysis and development of constructive solutions of crew parts to improve locomotive traction properties. Transport Engineering. 2023;6(18):52-62.
5. Kosmodamiansky AS, Vorobyev VI, Izmerov OV, Pugachev AA, Nikolaev EV, Karpov AE. Development of classification of magnetic wheel-rail traction amplifiers Interuniversity collection of scientific papers, 2023: Modern Problems of Improving the Work of Railway Transport. Moscow: RUT

- (МИИТ): ROAT; 2023.
6. Ries EE. The electric current as a means of increasing the tractive adhesion of railway motors and other rolling contacts. A full review of this important subject, with accounts of its experimental examination. *Scientific American*. 1887;24(623):9953-9954.
 7. Yanson OM. On the issue of an electromagnetic method for improving the conditions of traction of electric locomotive wheels with rails. *Zapiski Leningradskogo ordenov Lenina I Trudovogo Krasnogo Znameni Gornogo Instituta*. Leningrad; 1954.
 8. Rudyakov ZZ. Reserves for increasing the weight standards of trains. *Zheleznodorozhny Transport*. 1962;2:28-31.
 9. Ananyev KA, Rysyev AV. Mine electric locomotive with an electromagnetic traction body. *Zapiski Leningradskogo ordenov Lenina I Trudovogo Krasnogo Znameni Gornogo Instituta*. Leningrad; 1966.
 10. Sitnikov EA, Rodionov IN, Grinevich VP. Research on improving the traction properties of shunting locomotives by using electromagnetic traction enhancement and more optimal connection

- schemes for traction electric motors. Final report, 1982: Research and Development Work to Improve the Performance, Reliability and Durability of Locomotive. Kolomna: VNIKTI; 1982.
11. Luzhnov YuM, Pruntsev AP. Influence of the magnetic field on the mechanism of wheels and rails interaction. *Trudi MIIT*; 1975.
12. Delusto LG. Fundamentals of metal rolling in permanent magnetic fields. Moscow: Mashinostroenie; 2005.
13. Tikhomirov VP, Vorobyev VI, Vorobyev DV, Bagrov GV, Borzenkov MI, Butrin MI. Modeling of wheel-rail traction: monograph. Orel: Orel GTU; 2007.
14. Ivakhin AI, Travinichev VI, Petrakov DI. Stand for the study of traction properties in the wheel-rail system of railway vehicles. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*. 2011;4:2-5.
15. Izmerov OV. Technical innovation. Methods of inventive creativity: monograph. Orel: State University. UNPK; 2011.

Информация об авторах:

Пугачев Александр Анатольевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета, тел. +7(919)192-88-70, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru.

Воробьев Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного тех-

нического университета, тел. +7(962)137-32-77, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.

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

Карпов Артем Евгеньевич, ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта, e-mail: akarpov576@gmail.com.

Pugachev Aleksandr Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Turbine Engineering, Electrical and Thermal Power Engineering at Bryansk State Technical University, e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru.

Vorobyev Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical

University, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru .

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

Karpov Artyom Evgenievich – Assistant of the Department of Traction Rolling Stock of the Russian University of Transport, e-mail: akarpov576@gmail.com.

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 05.08.2024; одобрена после рецензирования 19.08.2024; принята к публикации 26.08.2024. 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 05.08.2024; approved after review on 19.08.2024; accepted for publication on 26.08.2024. 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 Board of the journal *Transport Engineering*.