

## Транспорт

УДК 629.4.021

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-3-25-38

Д.Я. Антипин, О.В. Измеров, П.Д. Жиров

### ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА

Целью работы является разработка методики создания энергосберегающих приводов отечественного тягового подвижного состава железных дорог. Рассмотрены вопросы повышения тяговых свойств локомотивов. Установлена необходимость устройств безынерционного регулирования коэффициента сцепления колес с рельсами, основанных на воздействии электрического тока или магнитного поля на зону контакта колеса с рельсом. Определены основные направления исследований, необходимые для практической реализации таких устройств. Установлено, что устройства, основанные на воздействии электрического тока, требуют внесения существенных изменений в узлы экипажной части для изоляции колесной пары, поисков решения проблемы разделения тягового и управляющего токов и предотвращения влияния управляющих токов на системы сигнализации. В то же время устройства, основанные на использовании

магнитного поля, могут быть смонтированы на экипажной части эксплуатируемых локомотивов, но требуют поиска оптимальных параметров и конструкции индукторов. Предложено рассматривать магнитные усилители сцепления как решение ближайшей перспективы, которые можно внедрить на существующем парке локомотивов, а использующие воздействие электрического тока – как решение для вновь разрабатываемых перспективных машин. Предложена конструкция индивидуального тягового привода, упрощающая задачу размещения устройств безынерционного регулирования коэффициента сцепления, защищенная патентом на полезную модель.

**Ключевые слова:** локомотивная тяга, тяговый привод локомотива, энергосбережение, сцепление колеса с рельсом, противобоксовочные устройства, электрический ток.

D.Ya. Antipin, O.V. Izmerov, P.D. Zhirov

### PROBLEMS IN DEVELOPMENT OF ENERGY-SAVING TRACTION DRIVE

The aim of the work is to develop a methodology for creating energy-saving drives for domestic traction rolling stock of railways. The problems of traction properties increase in locomotives are considered. The necessity in devices for instantaneous control of a friction coefficient of wheels and rails based on the impact of electric current or a magnetic field upon a wheel/rail contact area. There are defined basic fields of researches essential for the actual realization of such devices. It is defined that devices based on electric current impact require the introduction of considerable changes in the units of a crew part for wheel pair insulation and searches of problem solution in the separation of trac-

tion current and control one and the prevention of control current impact upon alarm systems. It is offered to consider magnetic amplifiers of adhesion as a solution of a short-term outlook which can be introduced in an existing locomotive fleet and those using current impact as a solution of newly-developed promising machines. There is offered a design of an individual traction drive simplifying a problem in the arrangement of devices for instantaneous control of a friction coefficient.

**Key words:** locomotive traction, locomotive traction drive, energy saving, wheel-rail adhesion, anti-boxing devices, electric current.

#### Введение

В 70-х годах прошлого века отечественными исследователями были сделаны прогнозы о том, что применение бесколлекторных тяговых электродвигателей (ТЭД) создаст возможности повышения осевой мощности магистральных электровазов до 2000-2500 кВт [1]. В то же время

осевая мощность зарубежных электровазов с бесколлекторными ТЭД пока не превышает 1400-1600 кВт (*Vectron*, *TRAXX 3*, *Prima II*). Осевая мощность электровазов с бесколлекторным приводом, эксплуатируемых на отечественных железных дорогах, еще ниже – 1050-1200 кВт, включая и те

серии электровозов, в проектировании которых участвовали ведущие зарубежные фирмы (Сименс, Альстом, Бомбардье). Вследствие этого преимущества бесколлекторного привода, основанные на повышении производительности локомотива, становятся неявными в связи с существенным ростом стоимости оборудования электровоза, и среди магистральных электровозов для ОАО «РЖД» машины с коллекторными ТЭД составляют абсолютное большинство. Такая ситуация может сохраниться и в ближайшей перспективе, поскольку мощность 1050-1200 кВт, как было также показано в [1], может быть реализована с помощью коллекторных ТЭД при опорно-рамном подвешивании последних.

Основная причина ограничения осевой мощности отечественных магистральных электровозов – это ограничение скорости для грузового движения 50 км/ч в часовом режиме по соображениям снижения энергозатрат и ограничение осевой силы тяги по условиям обеспечения стабильных сцепных свойств в различных условиях. В настоящее время потери энергии в системе «колесо-рельс», прежде всего вследствие скольжения колеса по рельсу, составляют 10–30 % расходуемых на тягу поездов топливно-энергетических ресурсов. Это подтверждается данными [2], согласно которым потери мощности при скольжении могут достигать 300 кВт на колесную пару в зависимости от относительного скольжения колесных пар и исходного фрикционного состояния рельсов, при часовой мощности на тягу для большинства эксплуатируемых электровозов порядка 600-800 кВт на колесную пару, т.е. превышать 30 % передаваемой мощности.

Первоначально предполагалось, что применение бесколлекторных ТЭД позволит значительно повысить тяговые свойства локомотивов, благодаря жесткой электромеханической характеристике. Однако, как показали исследования [3], оптимальная с точки зрения реализации силы тяги скорость при мокрых и замасленных рельсах может достигать 15 %. Это ведет к росту износа контактирующих поверхностей колес и рельс. Так, в России в начале

80-х гг. срок службы бандажей колесных пар локомотивов составлял 6–7 лет, а в 90-е гг. XX века он сократился уже до 2–3 лет [4]. В связи с этим в системах управления бесколлекторным приводом не реализуется достижение максимальной силы тяги. Так, на электровозе 2ЭС10 при возникновении избыточного скольжения колесной пары система управления снижает заданную силу тяги колесной пары, определяя боксование по несоответствию фактической активной мощности ТЭД и требуемой при отсутствии потери сцепления [5]. Такая же система может быть использована и для электровозов с коллекторными ТЭД благодаря использованию поосного регулирования силы тяги с помощью полупроводниковых импульсных регуляторов тока, более дешевых, чем преобразователи частоты тока, используемые для бесколлекторных ТЭД.

Сказанное выше можно отнести и к магистральным тепловозам. В настоящее время ОАО РЖД закупает магистральные тепловозы практически исключительно с коллекторными ТЭД, поскольку тяговые свойства определяются сцеплением колеса с рельсом. Однако для вождения составов 7100 т и более в условиях БАМа, при уклонах до 10 тысячных, требуются тепловозы с коллекторным приводом с 18 осями.

Для маневровых тепловозов особенностью работы является перемещение одиночного тепловоза или состава незначительного веса в 1...10 вагонов, при необходимости обеспечить возможность перемещения сформированного состава с пути на путь или со станции в парк [6]. Таким образом, для сокращения расхода топлива на разгон тепловоза необходимо снижение веса последнего со 126 т. до 90-92 т, т.е. сокращение числа осей с 6 до 4 (ТЭМ21, ТЭМ9). Однако, чтобы при этом сохранить тяговое усилие при трогании с места равным 320 кН, как у распространенного тепловоза ТЭМ18ДМ, необходим коэффициент сцепления  $\psi = 0,35$ , что сложно обеспечить на мокрых или замасленных рельсах. Также существует потребность замены неэкономичных промышленных тепловозов с гидropередачей

с 3-4 осями (ТГМ4, ТГМ23) на тепловозы с электропередачей с 2-3 осями, что требует увеличения сцепления колес с рельсами, причем при мокрых или замасленных рельсах подъездных путей.

Наконец, особенностью работы электровозов и тяговых агрегатов карьерных железных дорог горнодобывающей промышленности является повышенные загрязненность рабочих поверхностей и повышенные уклоны рельсовых путей до 6 %. Согласно [7], потери топливно-энергетических ресурсов на тягу на карьерном транспорте могут превышать 30 %. Кроме того, песок, оставшийся на рельсах, может создавать сопротивление движению до 12 %.

Из рассмотренного выше следует, что практически во всех областях применения тепловозов и электровозов, за ис-

ключением пассажирского движения, дальнейшее развитие локомотивной тяги в настоящее время ограничивается физическим пределом сцепления колеса с рельсом. При этом, как отмечено в [8], трибологические свойства системы «колесо-рельс» в зависимости от условий эксплуатации и внешних факторов меняются в широких пределах, в связи с чем потенциальные возможности реализации силы тяги используются в лучшем случае на 50-70 %. Таким образом, общей проблемой дальнейшего развития локомотивной тяги является поиск технических решений, позволяющих обеспечить постоянный коэффициент сцепления колеса с рельсом независимо от внешних условий, что и позволит существенно улучшить тяговые свойства локомотивов. Данная статья является попыткой решения указанной проблемы.

### **Определение энергосберегающего тягового привода и возможные способы стабилизации коэффициента сцепления**

Под энергосберегающей концепцией тягового привода локомотива будем понимать концепцию, отличающуюся от ранее известных следующими положениями:

– в качестве основного показателя прогресса технического развития тягового привода принимается сокращение потерь энергии на тягу локомотива, достигнутое за счет применения привода;

– энергосберегающий тяговый привод может быть реализован как путем модернизации известных перспективных конструкций тяговых приводов, так путем синтеза новых конструктивных схем, ориентированных на решение задачи снижения потерь энергии на тягу.

Положительный эффект от исключения скольжения колеса по рельсу заключается также в снижении износа бандажа и рельсов, повышении производительности тепловоза, уменьшение расхода песка на 25–30 %, уменьшение запесочивания балластной призмы. Последнее ухудшает дренажные свойства пути, под шпалами скапливается влага и появляются характерные «выплески», происходит сдвиг шпально-рельсовой решетки. Динамическое качество пути ухудшается на участках с «выплесками», вводится ограничение

скорости движения.

Согласно предложенной в [9] классификации способов повышения тяговых свойств подвижного состава, способы изменения физического коэффициента сцепления колеса и рельса можно разделить на две основные группы: с воздействием на контактирующие поверхности вне зоны контакта и в самой зоне контакта.

Способы, основанные на воздействии вне зоны контакта, эффективны для устранения предсказуемого ухудшения сцепления колеса с рельсом на ограниченных участках (листопад, загрязнение поверхностей рельсов маслом и топливом и т.п.) и, по мнению авторов, должны быть отнесены к работам по содержанию пути. В свою очередь, методы, основанные на воздействии на саму поверхность контакта, можно разделить на методы с использованием третьего тела и без использования последнего. Из методов, предполагающих использование третье тело, в настоящее время широко используется только применение песка, что обусловлено дешевизной расходного материала. При этом увеличивается износ колес и рельс, а также загрязняется балласт. Подача расходного материала в зону контакта плохо поддается ре-

гулированию, безынерционное регулирование не реализовано. Данный способ или его модификации, по мнению авторов, может быть использован лишь для участков небольшой протяженности с непредвиденно ухудшившимися условиями сцепления (масляное пятно).

Из способов, использующих изменения трибологических свойств в точке контакта без применения третьих тел, за счет различных физических эффектов, в настоящее время известны только два: пропус-

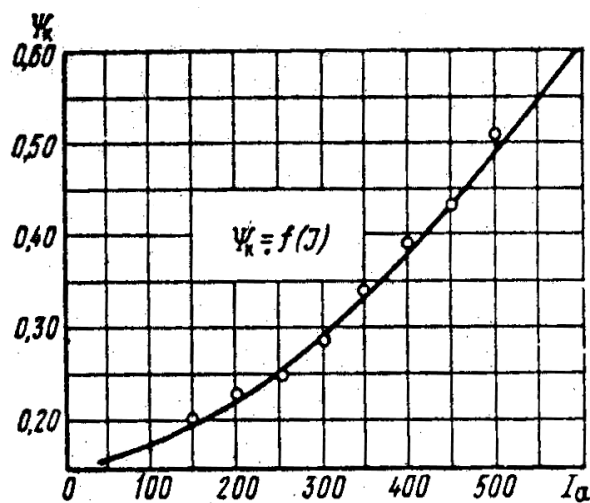
### Использование электрического тока

**Сущность способа, наблюдаемый эффект и объяснение.** Способ представляет собой воздействие на контакт колеса с рельсом путем пропускания через этот контакт регулируемого электрического тока.

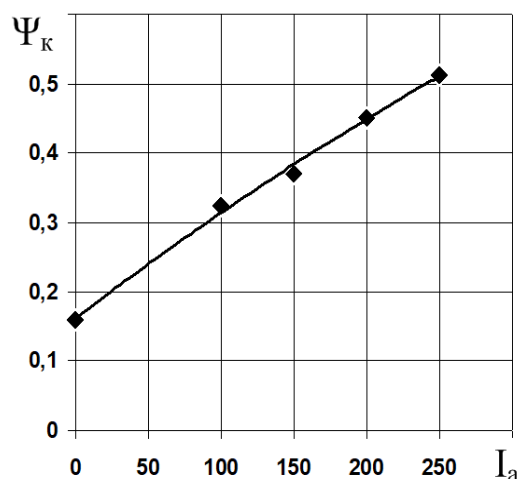
Еще в начале 60-х годов прошлого века было обнаружено [10], что при значительном тяговом токе (500 А) коэффициент сцепления электровоза с рельсами может возрастать до 0,49 (рис. 1а).

Лабораторные экспериментальные исследования [11] показали, что примене-

ние электрического тока повышает коэффициент трения примерно вдвое, и для сухих поверхностей величина коэффициента трения превышает 0,5 (рис. 1б). В настоящее время для объяснения данного явления используется гипотеза электропластического эффекта, благодаря которому увеличивается площадь поверхности межмолекулярного взаимодействия (наглядным примером использования адгезии, возникающей при межмолекулярном взаимодействии, могут служить плитки Иогансона).



а)



б)

Рис. 1. Зависимость коэффициента сцепления пары «сталь по стали» в зависимости от силы тока в контакте: а) - при трогании с места электровозов постоянного тока [10]; б) - полученная на лабораторной установке [11]

Известные на данный момент исследования влияния электрического тока на триботехнические характеристики носят прикладной характер, при этом в по-

давляющей части исследований изучалось влияние электрического тока на износ контактирующих поверхностей токосъемных устройств или металлообрабатывающего

инструмента, изменение коэффициента трения при этом не исследовалось. В [12] сделан вывод, что в результате нагружения контактного слоя сталей и металлов трением и электрическим током на поверхности трения образуется слой с измененной структурой. Наблюдается появления 40-45 ат.% кислорода, который почти полностью связан в оксид  $FeO$ , а на поверхности трения наблюдаются ГЦК- и ОЦК-железо. Однако данные результаты пока не подтверждены для случая качения колеса по рельсу с упругим скольжением.

Можно констатировать, что на данный момент отсутствует теоретическая модель, которая позволила бы прогнозировать изменение коэффициента сцепления в зависимости от пропускаемого тока для произвольных условий. Хотя данное обстоятельство не препятствует практическому созданию электротокowych усилителей сцепления на основе эмпирических экспериментальных данных, однако недостаточная изученность процессов, происходящих при использовании таких усилителей, не позволяет прогнозировать возникновение побочных негативных явлений. В связи с этим целесообразно проведение фундаментальных исследований наблюдаемого феномена роста коэффициента трения под воздействием электрического тока для установления полной картины явлений, вызывающих и сопровождающих данный феномен.

На основании совокупности имеющихся эмпирических данных можно сделать вывод, что применение электрического тока для безынерционного регулирования коэффициента сцепления позволит на 25–30 % повысить тяговые усилия на участках пути с высоким содержанием загрязнения нефтяного и масляного происхождения, осложнённых различными климатическими условиями (повышенная влажность и т.д.) или рельефом местности (крутые подъёмы и крутые малого радиуса). При этом имеющиеся данные недостаточны для вывода о целесообразности применения электрического тока для по-

вышения коэффициента сцепления в течение всей работы локомотива. Практически доказанная в течение десятков лет возможность эксплуатации электровозов постоянного тока, имеющих величину тягового тока, протекающего через контакт колеса и рельса в сотни ампер, позволяет сделать вывод о принципиальной допустимости применения электротокowych усилителей для стабилизации коэффициента сцепления в случае его снижения по сравнению с величинами, достигаемыми на сухих рельсах.

**Вопросы практической реализации.** В начальный период после обнаружения делались попытки использования тягового тока электровоза для повышения коэффициента сцепления. Однако величина тягового тока у электровозов переменного тока недостаточна для эффективного влияния на коэффициент сцепления, у тепловозов тяговый ток вообще отсутствует, а регулирование тягового тока не отражает изменения свойств сцепления колеса с рельсом. В связи с этим в настоящее время рассматривается только воздействие на поверхность контакта электрического тока до 200–250А на ось, созданного независимыми источниками тока и регулируемые независимо от регулирования тока ТЭД. Ввиду малого сопротивления поверхности контакта, энергозатраты на создание тока такой величины незначительны.

Основным достоинством применения электрического тока для повышения коэффициента сцепления является то, что пропускание электрического тока не требует установки на экипажной части оборудования большой массы. В связи с этим в начале нынешнего века работы по усилителям сцепления были сосредоточены именно на этом направлении. Был проведен натурный эксперимент на тепловозе 2ТЭ10У, на котором электротокowym усилителем была оборудована первая колесная пара, через которую пропускался тяговый ток от трех тяговых двигателей, соединенных параллельно [13]. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

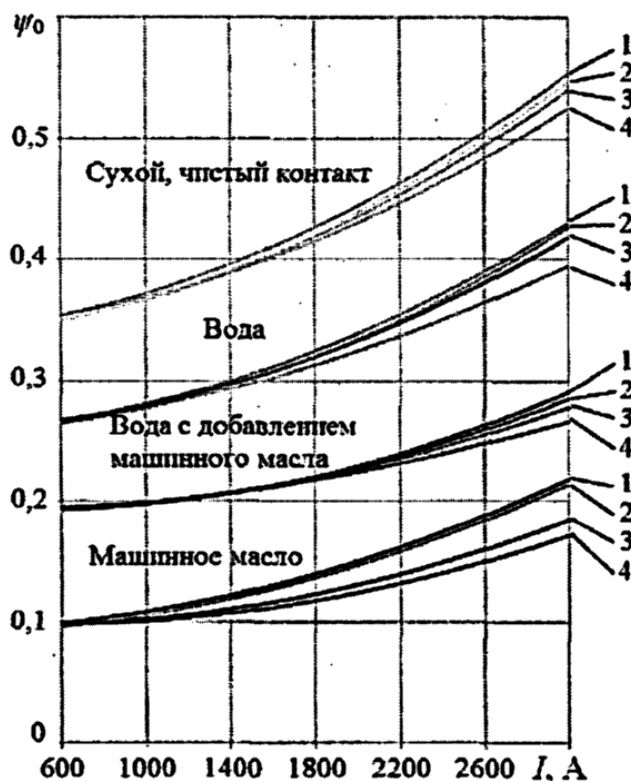


Рис. 2. Зависимость предельного коэффициента сцепления колеса с рельсом для опытного тепловоза 2ТЭ10У в зависимости от силы тока в контакте [13]:

1 — постоянный ток; 2 — переменный; 3 — двухполупериодный выпрямленный; 4 — однополупериодный выпрямленный

Как видно из рис. 2, эффект увеличения коэффициента трения мало зависит от формы тока, но зависит от условий сцепления. Из полученных результатов следует, что при очень плохих условиях сцепления (масляное пятно на рельсах) целесообразно улучшать условия сцепления также иными способами, то есть электротокосный усилитель сцепления не позволяет полностью отказаться от наличия на локомотиве песочной системы. Вместе с тем, для наиболее типичных условий снижения сцепления, встречающихся в магистральном движении (роса, изморось, влага с небольшой масляной пленкой), коэффициент сцепления может быть повышен до величин 0,3...0,4. Следует учитывать, что при электровозной тяге вероятность загрязнения рельсов ниже, что означает возможность повышения осевой мощности грузовых электровозов в продолжительном режиме с 950 до 1200 кВт и осевой силы тяги грузовых тепловозов в продолжительном режиме с 54 до 65-70 кН.

Однако после успешного подтверждения возможностей электротокосных

усилителей основной проблемой для дальнейших работ стала необходимость изоляции колесной пары от остальных частей экипажной части, чтобы при пропускании электрического тока через несколько колесных пар не допустить короткого замыкания источника тока через детали механической части. Требуется обеспечить изоляцию следующих узлов:

- буксовых узлов и буксовой ступени рессорного подвешивания;
- моторно-осевых подшипников и зубчатой передачи для опорно-осевого тягового привода;
- тормозных колодок от рычажной передачи.

Установка изоляционных вставок в зубчатую передачу, моторные осевые подшипники скольжения и буксы, как это было предложено в [11], не решает проблему по двум причинам: во-первых, это приведет к снижению точности установки большого зубчатого колеса тяговой передачи из-за введения промежуточной ступицы, во-вторых, в опорно-осевом приводе тепловоза 2ТЭ10У существует целый ряд

других поверхностей контакта (кожух тяговой передачи, электрическая проводимость масла передачи из-за накопления металлических частиц износа, шестеренчатый маслонасос осевых подшипников и т.п.).

Таким образом, для практического внедрения электротокowych устройств повышения коэффициента сцепления необходима конструктивная проработка изменений, которые должны быть внесены в конструкцию экипажной части конкретных локомотивов, в первую очередь, тягового привода, букс, рессорного подвешивания и тормозной системы. Данные изменения должны обеспечивать надежную изоляцию низковольтной цепи в условиях воздействия влаги, масла, попадания металлической пыли от изношенных колодок и защиту от случайного замыкания токопроводящими предметами (костылями, вылетевшими из дефектной шпалы и т.п.)

#### ***Возможные побочные явления.***

Можно предположить возникновение трех основных проблем при реализации электротокowych устройств усиления сцепления.

Во-первых, как уже указывалось выше, на данный момент недостаточно исследован вопрос влияния больших токов в контакте колеса и рельса на прочность и износ поверхности колес и рельс. Априори можно предположить, что при ограничении скорости скольжения с помощью устройства регулировки сцепления износ поверхностей снизится, т.к. уменьшение работы трения даст больший эффект, чем увеличение темпов износа. Однако необ-

ходима проверка этого предположения путем проведения стендовых испытаний.

Другая проблема, которая возникнет для электроподвижного состава, – это проблема разделения тягового тока и тока, пропускаемого для регулирования сцепления. Основным предполагаемым способом решения этой проблемы является импульсная коммутация токов с поочередным пропуском через контакт тягового и регулирующего тока, что требует установки на электровоз дополнительного оборудования.

Наконец, не изучено влияние регулирующих токов на цепи сигнализации и связи, в частности, с учетом случаев, когда локомотив проходит изолирующие стыки.

Таким образом, применение электрического тока в принципе позволяет добиться значительного повышения коэффициента сцепления (до 0,5 при сухих рельсах) без увеличения веса экипажной части, однако практическое создание локомотива с такой системой требует значительного объема исследовательских и проектно-конструкторских работ, связанных с решением следующих проблем:

- создания теоретической модели влияния электрического тока на коэффициент сцепления;
- изменения конструкции экипажной части локомотива для обеспечения изоляции колесной пары;
- решения проблем, связанных с влиянием электрического тока на износ колеса и рельса и работу железнодорожной сигнализации и связи.

#### **Использование магнитного поля**

***Сущность способа, наблюдаемый эффект и объяснение.*** Способ представляет собой воздействие на контакт колеса с рельсом путем пропускания через этот контакт регулируемого магнитного потока, созданного электромагнитным индуктором. Первоначально магнитное поле пытались использовать для увеличения нагрузки колеса на рельс при реализации больших тяговых усилий, что привело к противоречивым результатам. Так, в начале 50-х годов были получены обнадеживающие результаты при

испытаниях электромагнитных догрузателей на паровозе СО17-2877. В кинохронике сообщалось, что благодаря этому «поезд везет двойной груз». Однако переход на тепловозную тягу временно снял проблему повышения веса составов за счет секционирования локомотивов. В 80-х годах прошлого столетия были сделаны попытки использовать электромагнитные догрузатели на тепловозе ТЭМ2 (ТЭМ2УС), однако они не позволили добиться существенного улучшения сцепных свойств [14].

Интерес к использованию магнитного поля для повышения тяговых свойств вновь возник после того, как при прокатке металлов было обнаружено, что магнитное поле увеличивает не только силу притяжения ферромагнитных деталей, но и коэффициент трения, в том числе и деталей из немагнитных материалов. При этом коэффициент трения возрастал в 2 и более раз [15]. Лабораторные исследования этого явления в БГТУ показали возможность увеличения коэффициента сцепления на 22 % [11] (рис. 3а,б), исследования в КНР показали увеличение сцепления на 30-40 % [16].

На данный момент основной гипотезой, объясняющей изменение коэффициента трения под воздействием магнитного поля, является гипотеза о влиянии магнитопластического эффекта. В пользу этой гипотезы, в частности, свидетельствует тот факт, что рост коэффициента трения был обнаружен Л.Г. Делюсто в процессе исследований применения магнитопластического эффекта для обработки металлов

давлением. Общий объем исследований, как фундаментальных, так и прикладных, на данный момент не позволяет создать достоверную модель зависимости коэффициента трения от воздействия магнитного поля, а данные полученные разными исследователями на лабораторных установках, зачастую противоречивы. Так, в [18] в ходе эксперимента была обнаружена неоднозначная зависимость коэффициента сцепления от магнитного поля, что может быть объяснено недостаточным объемом замеров и случайным изменением различных факторов, влияющих на срыв в сцепление (последнее весьма характерно для экспериментальных исследований боксования локомотивов). Исследования на опытном маневровом локомотиве ЧМЭЗ, оборудованном макетным образцом индуктора (для удешевления опыта размещенного на путевой структуре) позволило получить увеличение силы тяги на 8...10 % [19], что значительно превышает эффект, достигнутый на тепловозе ТЭМ2УС.

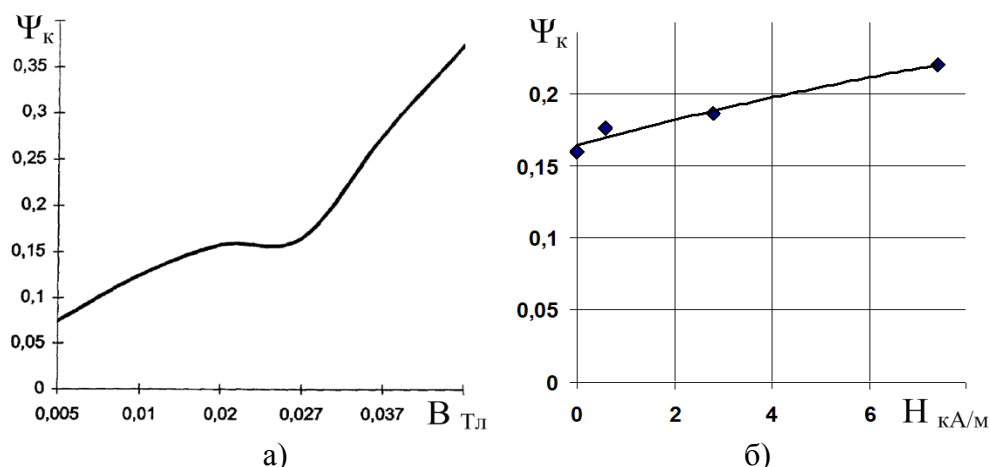


Рис. 3. Влияние магнитного поля на коэффициент сцепления пары «сталь по стали»:

а) – по Л.Г Делюсто [17]; б) – полученная в БГТУ на лабораторной установке [11].

Таким образом, необходимо проведение дальнейших исследований, направленных прежде всего на уточнение зависимости коэффициента трения колеса по рельсу от параметров магнитного поля при имитации режимов работы противобоксовочной системы в разных условиях, с увеличением объема экспериментальных данных, ввиду практической невозможности исключить влияние различных случайных

факторов даже на лабораторной установке. Основной целью таких исследований должно стать определение требуемой для достижения практически значимого эффекта напряженности магнитного поля и параметров индуктора, требуемого для создания такого поля.

Исходя из совокупности имеющихся данных, а также учитывая то обстоятельство, что с помощью магнитного поля



достигается как увеличение коэффициента сцепления, так и растет усилие взаимодействия тел, можно предположить, что магнитные усилители сцепления (МУС) позволяют увеличить силу тяги не менее чем на 20 %.

**Способ практической реализации и особенности применения на локомотиве.** Магнитный усилитель сцепления (МУС) представляет собой индуктор, который размещается на экипажной части и создает магнитный поток в зоне контакта колеса и рельса. Индуктор утяжеляет экипажную часть локомотива, однако не требует внесения в нее существенных изменений и может быть применен в качестве навесного оборудования на локомотивы уже выпускаемых серий.

Основной проблемой при создании

магнитного усилителя сцепления является поиск его рациональной конструкции, позволяющей в ограниченных габаритах экипажа локомотива создать магнитный поток, достаточный для увеличения коэффициента сцепления. В настоящее время предложен и запатентован ряд различных конструкций МУС для индивидуальных и групповых приводов [19]. Необходимы дальнейшие исследования и конструктивные проработки для определения наиболее эффективного варианта конструкции.

МУС может быть использован на локомотиве с любой экипажной частью.

**Возможные побочные явления.** При испытаниях тепловоза ТЭМ2УС [14] было обнаружено увеличение сопротивления движению локомотива более чем вдвое (рис. 4).

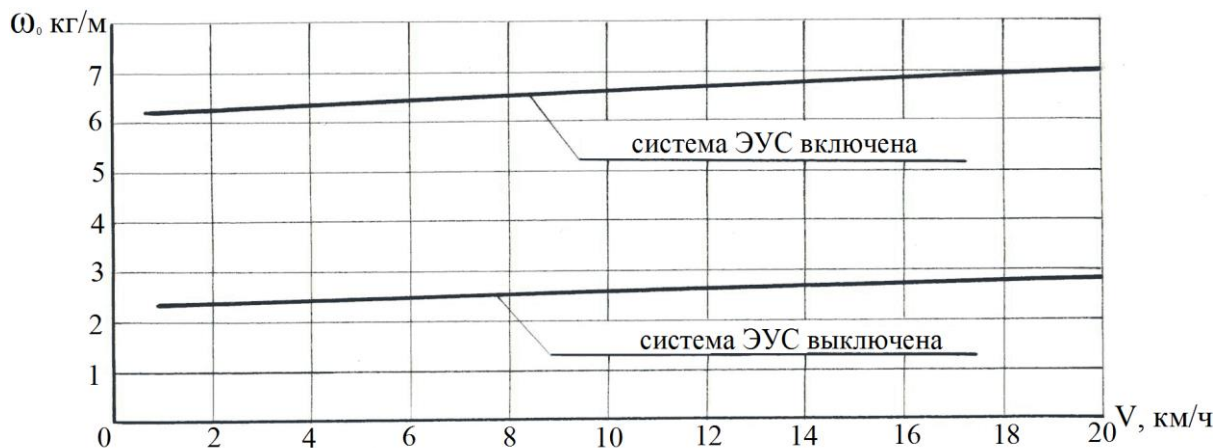


Рис. 4. Зависимость сопротивления движению тепловоза ТЭМ2УС от скорости по [14]

Как видно из рис. 4, при увеличении скорости от 2 до 20 км/ч дополнительное сопротивление движению выросло всего лишь на 0,4 кг/т (4 Н/т). Из этого следует, что составляющая, обусловленная наведением вихревых токов в колесах и иных деталях экипажной части и путевой структуры составляет незначительную часть дополнительного сопротивления. Причины, вызвавшие появления дополнительного сопротивления, в [14] не были установлены. Поскольку примененные на тепловозе ТЭМ2УС электромагнитные догружатели имели низкую эффективность и обеспечили увеличение прижатия колес к рельсу лишь на 4...5 кН, наблюдаемое дополнительное сопротивление не может быть

объяснено увеличением трения качения. В качестве предполагаемых причин роста сопротивления движению, в частности, могут выступать:

- одностороннее прижатие ТЭД к оси тепловоза под действием сил магнитного притяжения и граничном режиме трения в подшипниках скольжения;
- прижатие колодок к ободу колес за счет сил магнитного притяжения.

Необходимо проведение дальнейших исследований для установления причин появления сил, вызвавших дополнительное сопротивление движению.

О влиянии МУС на работу систем путевой сигнализации и связи при поездной работе опытного паровоза СО17-2877

данных не обнаружено, как и данных о влиянии магнитоэлектрического эффекта на общую прочность рельсов.

Таким образом, возможности варианта с магнитными усилителями сцепления

более ограничены из-за ограничений по весу и габаритам индукторов, но, вместе с тем, МУС могут быть оборудованы уже выпускаемые локомотивы и ожидается меньше трудностей при внедрении.

### Влияние усилителей сцепления на конструкцию тягового привода

В [9] был рассмотрен вопрос, какая конструкция тягового привода наилучшим образом позволяет реализовать на практике электротокковый и электромагнитный усилитель сцепления. Был предложен мономоторный привод с осевыми редукторами, аналогичный примененному на электровозе ВЛ83, который позволял разместить индукторы на осях колесных пар. Однако в настоящее время производимые в России локомотивы имеют индивидуальный тяговый привод, в связи с чем необходимо рассмотреть возможности создания новых конструкций индивидуальных тяговых приводов грузовых и маневровых локомотивов, максимально адаптированных к применению усилителей сцепления.

Как уже говорилось выше, основными

проблемами при использовании электротокковых усилителей сцепления является изоляция деталей привода, а при использовании электромагнитных – необходимость обеспечить наибольшее пространство для размещения индукторов. Будем исходить из того, что перспективные локомотивы с усилителями сцепления будут оснащаться асинхронными ТЭД, обеспечивающими повышение осевой мощности локомотивов. Еще в 70-е годы прошлого века в нашей стране были начаты работы по созданию асинхронных ТЭД с дисковым ротором [20], которые при мощности 1200-1300 кВт и наружном диаметре 0,93 м по расчетам должны были иметь осевой габарит всего 0,525-0,53 м. Это дает возможность использовать агрегатную компоновку привода (рис. 5).

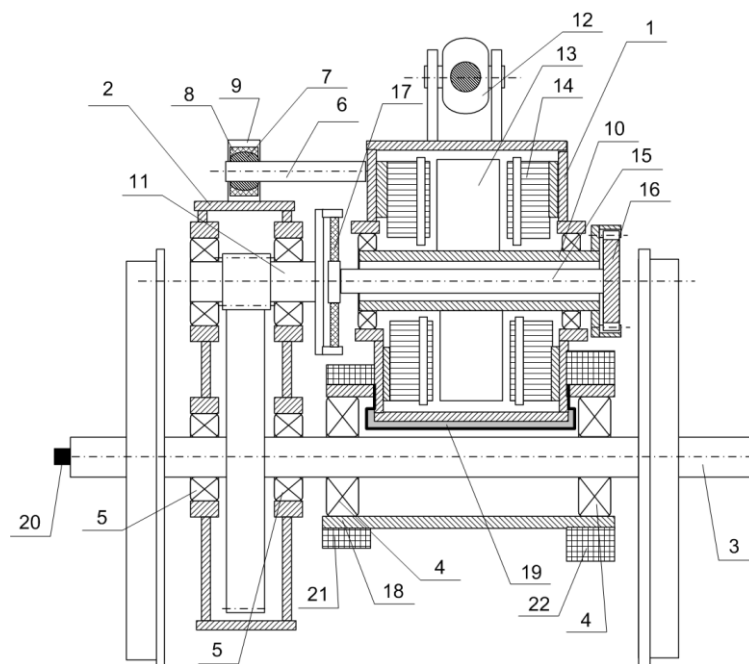


Рис. 5. Общая схема агрегатного тягового привода с асинхронным тяговым электродвигателем с дисковым ротором: 1 – тяговый двигатель; 2 – осевой редуктор; 3 – ось колесной пары; 4, 5 – осевые подшипники; 6 – палец; 7 – сферический шарнир; 8 – ползун; 9 – кронштейн; 10 – вал ТЭД; 11 – вал осевого редуктора; 12 – подвеска; 13 – ротор; 14 – статор; 15 – торсионный вал; 16 – зубчатая муфта; 17 – резинокордная муфта; 18 – труба; 19 – вырез; 20 – токосъемное устройство; 21, 22 – индукторы

Предложенная конструкция тягового привода позволяет в варианте с электротокковым усилителем сцепления изолировать

детали привода от рамы тележки (проблема изоляции букс и тормозной системы остается), а в варианте с электромагнит-

ным усилителем дает возможность разместить обмотки индуктора в свободном пространстве, полученном за счет сокращения осевого габарита двигателя. Согласно расчетным данным, приведенным в [20] для проектного варианта двигателя АД-3 и привода грузового электровоза, при передаточном отношении редуктора  $u = 4,21$  осевая сила тяги электровоза в ча-

### Выводы

1. Дальнейшее повышение тяговых свойств как магистральных грузовых, так и маневрово-промышленных локомотивов невозможно реализовать без устройств безынерционного регулирования коэффициента сцепления колес с рельсами, компенсирующих ухудшение сцепных свойств в неблагоприятных условиях. Установлено, что такие устройства могут быть основаны на воздействии электрического тока или магнитного поля на зону контакта колеса с рельсом.

2. Создание устройств безынерционного регулирования коэффициента сцепления на основе указанных принципов требует значительного объема исследований, включая исследования природы явлений увеличения коэффициента трения.

3. Использование электрического тока позволяет в перспективе добиться двукратного повышения коэффициента сцепления локомотива (до 0,5). Вместе с тем использование электрического тока требует внесения существенных изменений в узлы экипажной части для изоляции колесной пары, а также поисков решения проблемы разделения тягового и управляющего тока и предотвращения влияния управляющих токов на системы сигнализации.

4. Использование магнитного поля требует использования дополнительных

совом режиме составит 96,3 кН, т.е. шестисильный грузовой локомотив будет способен развивать в часовом режиме тягу 577 кН, что соответствует силе тяги часового режима восьмиосного грузового локомотива 2ЭС10. На предложенную конструкцию авторами подана заявка на получение патента.

устройств – индукторов, которые необходимо располагать в условиях жестких ограничений по весу и габаритам. Вместе с тем магнитные усилители сцепления можно использовать на экипажной части выпускаемых и эксплуатируемых локомотивов. Необходимы дальнейшие исследования с целью поиска оптимальных параметров и конструкции индукторов, а также поиск причины возможного увеличения сопротивления движению локомотива.

5. На основании изложенного, ввиду недостаточной изученности явлений, лежащих в основе методов увеличения сцепления и неоднозначности критериев выбора наилучшего варианта предлагается на данном этапе вести исследования по созданию усилителей сцепления обоими способами, рассматривая магнитные усилители сцепления как решение ближайшей перспективы, которые можно внедрить на существующем парке локомотивов.

6. Предложена конструкция агрегатного тягового привода с асинхронным тяговым двигателем с дисковым ротором, облегчающая задачу размещения устройств безынерционного регулирования коэффициента сцепления на экипажной части локомотива. Подана заявка на получение патента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pavlenko, T.** Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport/ T. Pavlenko, V. Shavkun, A. Petrenko// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies/ – 2017 DOI: 10.15587/1729-4061.2017.112109.
2. **Попов, В.А.** Влияние фрикционных процессов на реализацию сцепления колесных пар локомо-

тивов с рельсами: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Попов Владимир Александрович. – Москва, 1984. – 208 с.: ил РГБ ОД 61: 85 – 5/4515.

3. **Spiryagin, M.** Theoretical investigation of the effect of rail cleaning by wheels on locomotive tractive effort/ M. Spiryagin, O. Polach, C. Cole // International Journal of Vehicle Mechanics and

- Mobility/ – 2013. Vol. 51, – Issue 11, P. 1765-1783 <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.826370>.
4. **Буйносов, А.П.** Методы повышения ресурса бандажей колесных пар: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Буйносов Александр Петрович. – Екатеринбург, 2011. – 44 с. – Место защиты: УрГУПС. – Текст: непосредственный.
  5. **Электровоз грузовой постоянного тока с асинхронными электродвигателями: руководство по эксплуатации.** – Ч. 1. – ЭС10.00.000.000 РЭ, ОАО «СТМ», 2009. – 101 с.
  6. **Сокращение расхода дизельного топлива на маневрах** / В.М. Овчинников, С.А. Пожидаев, Н.Г. Швец, В.В. Скрежендевский // Транспортні системи та технології перевезень. – Днепропетровск: ДНУЗТ, 2011. – №1. – С. 62–70. –ISSN 2313-8688.
  7. **Керопян, А.М.** Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы «колесо-рельс» карьерных локомотивов в режиме тяги: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Керопян Амбарцум Мкртичевич ; Екатеринбург, 2015. – 235 с. – Место защиты: УрГУПС. – Текст: непосредственный.
  8. **Измеров, О.В.** Проблема воспроизводимости результатов натурных экспериментальных исследований трибологических свойств системы «колесо-рельс» в условиях глобализации рынка рельсовых транспортных средств / О.В. Измеров, А.В. Кошелев, А.Н. Чвала // Мир транспорта и технологических машин. - 2011. – № 3(34). – С. 28-34. - ISSN 2073-7432.
  9. **Космодамианский, А.С.** 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. - ISBN 978-5-93932-778-7.
  10. **Рудяков, З.З.** Резервы увеличения весовых норм поездов / З.З. Рудяков // Железнодорожный транспорт. – 1962. – № 2. – С. 28 – 31. – ISSN 0044-4448.
  11. **Ляпушкин, Н.Н.** Моделирование процесса сцепления колеса локомотива с рельсом / Н.Н. Ляпушкин, А.Н. Савоськин, А.А. Чучин// Транспорт российской федерации. – 2010. - № 6(31). – С. 50-53. - ISSN: 1994-831X.
  12. **Фадин, В.В.** Влияние трения и электрического тока на структурные изменения контактного слоя металлов и сталей / В.В. Фадин, М.И. Алехина, А.В. Колубаев. // Известия ВУЗов. Физика. – Томск: ТГУ, 2013. – Т.56, – № 12 – 2. – С. 213 – 217. – ISSN 0021-3411.
  13. **Петраков, Д.И.** Оценка тяговых качеств тепловозов с электропередачей с учетом воздействия электрического тока на зоны контакта колес с рельсами : автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петраков Дмитрий Иванович; БГТУ. – Брянск, 2013. – 19 с. – Место защиты: БГТУ. – Текст: непосредственный.
  14. **Антипин, Д.Я.** Системный анализ конструкций тяговых приводов и поиск новых технических решений / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев. - Брянск.: БГТУ, 2019. - 268 с. - ISBN: 978-5-907111-67-7
  15. **Делюсто, Л.Г.** Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях / Л.Г. Делюсто. – М : Машиностроение, 2005. – 272 с. – ISBN: 5-217-03307-X.
  16. **Wang, W.J.** Investigation on adhesion characteristic of wheel/rail under the magnetic field condition / W. J. Wang, H. F. Zhang, Q. Y. Liu [etc] // Proc IMechE Part J: J Engineering Tribology 0(0) 1–7 IMechE, 2015. – DOI: 10.1177/1350650115606480.
  17. **Патент № 2264873 Российская Федерация,** МПК В21В 1/28 (2000.01). Способ холодной прокатки полос : № 2004103061/02 : заявл. 05.02.2004 : опубл. 10.07.2005 / Делюсто Л. Г. ; заявитель Делюсто Л. Г. – 4 с.
  18. **Исследование фрикционного взаимодействия намагниченных тел качения** / С.В. Воронин, И.С. Грунык, В.А. Стефанов [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - Харьков: УГАЖТ, 2017. – 5/7(89). – С. 11 – 16. – ISSN 1729-4061.
  19. **Улучшение тяговых качеств локомотивов с помощью магнитных усилителей сцепления** [Текст]+[Электронный ресурс]: монография / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, О.В. Измеров [и др.]. – Брянск: БГТУ, 2018. – 232 с. – ISBN 978-5-907111-28-8.
  20. **Девликамов, Р.М.** Повышение эксплуатационной надежности коллекторно-щеточного узла тяговых двигателей электроподвижного состава железных дорог: автореферат дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Девликамов Рашид Музаферович; Рост. гос. ун-т путей сообщ. – Ростов-на-Дону, 2007. – 20 с. : ил. – Библиогр.: с. 19–20. – Место защиты: Рост. гос. ун-т путей сообщ. – Текст : непосредственный.
  1. **Pavlenko, T.** Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport / T. Pavlenko, V. Shavkun, A. Petrenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. - DOI: 10.15587 / 1729-4061.2017.112109.
  2. **Popov, V.A.** Friction Process Impact upon Realization of Locomotive Wheel Pair/Rail Adhesion: thesis for Can. Sc. Tech. degree competition / V.A. Popov. – Moscow, 1984. – pp. 208: ill RGB OD 61:85 – 5/4515.
  3. **Spiryagin, M.** Theoretical investigation of the effect of rail cleaning by wheels on locomotive tractive effort / M. Spiriyagin, O. Polach, C. Cole // In-

- ternational Journal of Vehicle Mechanics and Mobility / – 2013. Vol. 51, – Issue 11, P. 1765-1783 <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.826370>.
4. **Buinov, A.P.** Methods for increasing the resource of wheelset tires: abstract of the thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences / Buinov Alexander Petrovich. – Yekaterinburg, 2011. – 44 p. – Place of protection: UrGUPS. – Text: direct.
  5. **Electric locomotive freight direct current with asynchronous electric motors:** operation manual. - Part 1. – 2ES10.00.000.000 RE, JSC "STM", 2009. – 101 p.
  6. **Reduction of diesel fuel consumption during maneuvers** / V.M. Ovchinnikov, S.A. Pozhidaev, N.G. Shvets, V.V. Skrezhendevsky // Transport systems and technology transport. - Dnepropetrovsk: DNUZT, 2011. - No. 1. - S. 62–70. – ISSN 2313-8688.
  7. **Keropyan, A.M.** Development of the theory of interaction and substantiation of rational parameters of the "wheel-rail" system of career locomotives in traction mode: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Keropyan Ambartsum Mkrtichevich; Ekaterinburg, 2015. - 235 p. - Place of protection: UrgUPS. – Text: direct.
  8. **Izmerov, O.V.** The problem of reproducibility of the results of field experimental studies of the tribological properties of the "wheel-rail" system in the context of the globalization of the rail vehicle market. Izmerov, A.V. Koshelev, A.N. Chvala // World of Transport and Technological Machines. - 2011. - No. 3 (34). - S. 28-34. - ISSN 2073-7432.
  9. **Kosmodamiansky, A.S.** The concept of development of energy-saving electromechanical systems: monograph / A.S. Kosmodamiansky [and others]; ed. Academician of the Academy of Electrical Engineering. Sciences Ros. Federation, Dr. Sciences, prof. A.S. Kosmodamiansky. – Oryol: State University – UPPK, 2014. – 244 p. – ISBN 978-5-93932-778-7.
  10. **Rudyakov, Z.Z.** Reserves for increasing the weight norms of trains / 3.3. Rudyakov // Railway transport. – 1962. – No. 2. – P. 28-31. - ISSN 0044-4448.
  11. **Lyapushkin, N.N.** Modeling the process of adhesion of a locomotive wheel to a rail / N.N. Lyapushkin, A.N. Savoskin, A.A. Chuchin // Transport of the Russian Federation. – 2010. – No. 6 (31). – S. 50-53. – ISSN: 1994-831X.
  12. **Fadin, V.V.** The influence of friction and electric current on structural changes in the contact layer of metals and steels / V.V. Fadin and M.I. Aleutdinova, A.V. Kolubaev. // Izvestiya VUZov. Physics. - Tomsk: TSU, 2013. - T.56, – No. 12 – 2. – P. 213 – 217. – ISSN 0021-3411.
  13. **Petrakov, D.I.** Assessment of traction qualities of diesel locomotives with power transmission, taking into account the effect of electric current on the contact zones of wheels with rails: abstract of dis. for the degree of candidate of technical sciences / Petrakov Dmitry Ivanovich; BSTU. - Bryansk, 2013. -- 19 p. - Place of protection: BSTU. - Text: direct.
  14. **Antipin D.Ya.** System analysis of traction drive structures and search for new technical solutions / D.Ya. Antipin, V.I. Vorobiev, O. V. Izmerov, A.S. Kosmodamiansky, A.A. Pugachev. - Bryansk. : BSTU, 2019. - 268 p. - ISBN: 978-5-907111-67-7
  15. **Delyusteu, L.G.** Fundamentals of metal rolling in constant magnetic fields / L.G. Delyusto. - M: Mechanical Engineering, 2005. - 272 p. - ISBN: 5-217-03307-X.
  16. **Wang, W.J.** Investigation on adhesion characteristic of wheel / rail under the magnetic field condition / W.J. Wang, HF Zhang, QY Liu [etc] // Proc IMechE Part J: J Engineering Tribology 0 (0) 1–7 IMechE, 2015. – DOI: 10.1177 / 1350650115606480.
  17. **Patent No. 2264873 Russian Federation**, IPC B21B 1/28 (2000.01). Cold rolling method of strips: No. 2004103061/02: Appl. 02/05/2004: publ. 07/10/2005 / L. Delyusto; applicant Delyusto L. G. - 4 p.
  18. **Investigation of the frictional interaction of magnetized rolling bodies** / S.V. Voronin, I.S. Grunyk, V.A. Stefanov [et al.] // Eastern European Journal of Advanced Technologies. – Kharkiv: UGAZHT, 2017. – 5/7 (89). – S. 11-16. – ISSN 1729-4061.
  19. **Improving the traction qualities of locomotives using magnetic clutch boosters** [Text] + [Electronic resource]: monograph / D.Ya. Antipin, V.I. Vorobiev, O. V. Izmerov [and others]. - Bryansk: BSTU, 2018. -- 232 p. - ISBN 978-5-907111-28-8.
  20. **Devlikamov, R. M.** Increasing the operational reliability of the collector-brush assembly of traction motors of electric rolling stock of railways: abstract of dis. for the degree of Cand. tech. sciences / Devlikamov Rashit Muzaferovich; Growth. state un-t ways of communication. - Rostov-on-Don, 2007. – 20 p.: ill. – Bibliography: p. 19–20. - Place of protection: Growth. state un-t ways of communication. – Text: direct.

Ссылка цитирования:

Антипин, Д.Я. Проблемы создания энергосберегающего тягового привода \ Д.Я. Антипин, О.В. Измеров, П.Д. Жиров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 3. – С. 25-38. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-3-25-38.

*Статья поступила в редакцию 12.11.20.  
Рецензент: д.т.н., профессор, Научно-исследовательского  
и конструкторско-технологического  
института подвижного состава  
Волохов Г.М.,  
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».  
Статья принята к публикации 24.02.21.*

**Сведения об авторах:**

**Антипин Дмитрий Яковлевич**, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта, Брянский государственный технический университет, e-mail: [adya24@rambler.ru](mailto:adya24@rambler.ru).

**Измеров Олег Васильевич**, соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог», Брянский

государственный технический университет, e-mail: [izmerov@yandex.ru](mailto:izmerov@yandex.ru).

**Жилов Павел Дмитриевич**, к.т.н., доцент кафедры «Механика и динамика, и прочность машин», Брянский государственный технический университет, e-mail: [mdsm.bstu@yandex.ru](mailto:mdsm.bstu@yandex.ru).

**Antipin Dmitry Yakovlevich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Railway Rolling-Stock", Director of Education-Scientific Institute of Transport, Bryansk State Technical University, e-mail: [adya24@rambler.ru](mailto:adya24@rambler.ru).

**Izmerov Oleg Vasilievich**, Applicant of the Dep. "Railway Rolling-Stock", Bryansk State Technical University, e-mail: [izmerov@yandex.ru](mailto:izmerov@yandex.ru).

**Zhirov Pavel Dmitrievich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Mechanics and Dynamics and Machine Strength", Bryansk State Technical University, e-mail: [mdsm.bstu@yandex.ru](mailto:mdsm.bstu@yandex.ru).