

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 629.423.1:629.423.31

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156

EDN: <https://elibrary.ru/npnnoe>



ПООСНОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ТЯГИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Н. Д. Шилин✉, С. Н. Прокофьев

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение тяговых и сцепных свойств грузовых электровозов в настоящее время является актуальным вопросом для отечественного локомотивостроения. Рост массы и скорости движения поездов вынуждает искать новые пути и возможности реализации предельной силы тяги грузовых электровозов для соответствия требованиям быстроразвивающегося перевозочного процесса.

Материалы и методы. Проведен анализ существующих теоретических и практических методов управления сцеплением, а также выполнена разработка алгоритма управления сцеплением колесных пар электровоза с асинхронными тяговыми двигателями.

Результаты. На основе проведенного анализа результатов испытаний реального электровоза была разработана математическая модель движения электровоза, включающая в себя алгоритмы поосного управления силой тяги, в том числе с учетом перераспределения силы тяги между осями. Были проведены расчеты математической модели движения электровоза с поездом на участке с работающим и неработающим алгоритмом перераспределения, а также с различными настройками этого алгоритма. В модели также учтены изменение коэффициента сцепления колес с рельсами в зависимости от номера колесной пары по ходу движения, а также догружающие и разгружающие силы, возникающие в экипажной части в зависимости от реализуемой силы тяги. В результате расчетов были получены данные, имеющие хорошую сходимость с данными испытаний реального электровоза.

Обсуждение и заключение. Разработанная математическая модель позволяет оценить реализацию силы тяги электровоза, максимально приближенную к заданной контроллером машиниста, в условиях меняющегося коэффициента сцепления и его неоднородности под разными колесными парами электровоза. Полученные результаты в дальнейшем возможно применять при разработке перспективных грузовых электровозов с асинхронными тяговыми двигателями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз, асинхронный тяговый двигатель, коэффициент сцепления, проскальзывание, сила сцепления, система колесо—рельс, сила тяги

Для цитирования: Шилин Н. Д., Прокофьев С. Н. Разработка алгоритмов повышения тяговых и сцепных свойств электровозов с асинхронными тяговыми двигателями // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 148–156. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.1:629.423.31

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156

EDN: <https://elibrary.ru/npnnoe>



REDISTRIBUTION OF TRACTIVE FORCE PER AXLE FOR ELECTRIC LOCOMOTIVES WITH ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS

Nikita D. Shilin✉, Sergey N. Prokof'ev

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Improving the traction and adhesion properties of freight electric locomotives is currently an urgent issue for the domestic locomotive industry. The increase in the mass and speed of trains enables to seek new ways and possibilities for realising the maximum tractive force of freight locomotives in order to meet the requirements of the rapidly developing transportation methods.

Materials and methods. The authors carries out the analysis of existing theoretical and practical methods of adhesion control and developed the algorithm for controlling the wheelsets adhesion of a locomotive with asynchronous traction motors.

Results. The authors concerning the tests analysis of a real electric locomotive, developed a mathematical model of the locomotive movement, which included algorithms for axial control of the tractive force with the redistribution of the tractive force between the axles. Calculations of a mathematical model of the movement of a locomotive with a train on a section with the redistribution algorithm both enabled and disabled, as well as with various settings of this algorithm, were carried out. The model also took into account the change in the adhesion coefficient of the wheels with the rails depending on the numerical order of a wheelset in the direction of travel, as well as the additional loading and unloading forces that arise in the undercarriage depending on the tractive force being realised. As a result of the calculations, obtained data showed good convergence with the test data of a real electric locomotive.

Discussion and conclusion. The developed mathematical model allows evaluating the realisation of the tractive force of a locomotive as close as possible to that specified by the locomotive throttle under conditions of a changing adhesion coefficient and its heterogeneity under different wheelsets of the locomotive. The obtained results can be further applied in the development of promising freight electric locomotives with asynchronous traction motors.

KEYWORDS: electric locomotive, asynchronous traction motor, adhesion coefficient, wheel sliding, adhesion force, wheel – rail system, tractive force

For citation: Shilin N. D., Prokof'ev S. N. Redistribution of tractive force per axle for electric locomotives with asynchronous traction motors. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):148-156. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156>.

Введение. Более 90 % парка электровазов российских железных дорог составляют электровазы с коллекторными тяговыми двигателями (ТД) постоянного тока. В настоящее время промышленностью все шире осваивается выпуск современной силовой полупроводниковой техники, электровазов с отечественными асинхронными тяговыми приводами.

Несмотря на то что по стоимости производства электровазы с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) дороже, чем электровазы с коллекторными ТД, они значительно эффективнее последних, особенно при вождении поездов повышенной массы. В настоящее время для внедряемых новых электровазов с АТД весовые нормы грузовых поездов увеличивают. Как показывает практика эксплуатации, при одинаковых условиях сцепления колес с рельсами (равная сила нажатия колеса на рельс, схожие условия сцепления) восьмиосные электровазы с АТД заменяют двенадцатиосные электровазы с коллекторными ТД. То же справедливо и для двенадцатиосных электровазов с АТД в трех секциях, которые приходят на смену электровазам с коллекторными ТД, имеющими шестнадцать ведущих осей в четырех секциях (сдвоенные электровазы).

Как следствие, повышение массы грузовых поездов ведет к реализации касательной силы тяги F_k на колесах электроваза на границе или даже выше потенциальной силы сцепления $F_{сц}$ колес с рельсами. Своевременное распознавание избыточного проскальзывания колесных пар (КП) и борьба с развитием их боксования является важнейшим показателем работоспособности тягового привода электроваза при реализации тяговых свойств на пределе по сцеплению.

Ограничение скорости скольжения колес КП или полное предотвращение боксования достигается снижением силы тяги F_k до величины меньшей или равной силе сцепления $F_{сц}$. Разность этих сил $\Delta F = F_{сц} - F_k$ определяет угловое ускорение или замедление КП при возникновении боксования. Однако снижение F_k на ободе колеса у любой КП приводит к снижению результирующей силы тяги всего электроваза. Продолжительность уменьшения F_k зависит от длины участка рельсового пути с неблагоприятными условиями сцепления: если на этом участке происходит кратковременное единичное снижение F_k , то потеря силы тяги электроваза будет незаметна и не скажется на уменьшении средней скорости движения поезда. В то же время на участке рельсового пути большой протяженности проскальзывания КП уже значительно повлияют на среднюю скорость движения. Такой процесс становится критичным на подъеме, когда при неблагоприятных условиях сцепления проскальзывания КП происходят особенно часто.

Система защиты от избыточного проскальзывания КП встроена в систему защиты от боксования электроваза. Алгоритмы такой системы должны постоянно контролировать информацию о сцепных свойствах каждой КП, скоростей вращения КП и стремиться минимизировать потерю результирующей силы тяги электроваза на автосцепке. Если на одной или ряде КП величина сцепления не превышает установленных значений, то система должна перенести на эти КП часть тягового усилия, которая теряется в результате избыточного проскальзывания других КП. В первую очередь увеличение силы тяги должно возлагаться на те колесно-моторные блоки (КМБ), у которых существует наибольший запас между реализованной касательной силой тяги и потенциальной силой сцепления.

Обзор исследований. Существует множество теоретических и практических исследований (как отечественных, так и зарубежных) на тему повышения сцепных свойств электровазов [1–4]. Помимо традиционной подсыпки кварцевого песка под колеса электровазов внедряются и другие системы управления скольжением КП, позволяющие регулировать силу тяги колес с обеспечением реализации касательной силы тяги на пределе по сцеплению [5–10]. Основной принцип работы этих систем основан на управлении скоростью проскальзывания КП при возникновении боксований при различных условиях сцепления колеса с рельсом. В результате регулирования скорости проскальзывания КП результирующая сила тяги электроваза будет ограничена условиями естественного сцепления, которое возможно увеличить, используя предупредительную подачу кварцевого песка под колеса. Для повышения сцепных свойств перед использованием песка также можно перераспределить силу тяги между осями электроваза.

Наиболее эффективная защита от боксования КП была реализована на опытных электровазах 2ЭВ120 (магистральный двухсекционный грузовой электроваз двойного питания, разработан совместно ООО «ПЛК» и Bombardier Inc.). При проведении испытаний в опытной эксплуатации на участках Туапсе—Тихорецкая Северо-Кавказской железной дороги и Челябинск—Магнитогорск Южно-Уральской железной дороги специалистами АО «ВНИИЖТ» было установлено, что необходимость в экипировке электроваза песком сократилась до одного раза в месяц, что значительно реже по сравнению с регулярно эксплуатируемыми электровазами на этих участках. На рис. 1 представлена осциллограмма сил тяги четырех КП, зафиксированных в одной из опытных поездов по Южно-Уральской железной дороге.

Сила тяги каждой оси регулируется индивидуально с учетом общей заданной силы тяги и потенциальной силы сцепления каждой оси (рис. 1). О реализации

предельно допустимого коэффициента сцепления электровозом указывают сигналы признака боксования КП электровоза (поз. 6). На участке пути с 22 по 22,5 км система управления (СУ) приводом снизила силу тяги первой оси для предотвращения ее глубокого боксования, однако для поддержания общей реализуемой силы тяги электровоза близко к заданной разность между ними для первой оси была равномерно перераспределена между соседними осями (КП 2–4), имеющими более высокий запас по сцеплению. Повышенный запас по сцеплению данных осей объясняется лучшими условиями сцепления колес с рельсами, а также наличием догружающего момента тележек и кузова при реализации силы тяги ТД электровоза. Максимальное повышение силы тяги $F_{к1}$ выше заданной силы $F_{зд}$ при перераспределении сил составило 7 % для КП 3 и 4.

Тяговый привод электровоза 2ЭВ120 и его СУ были разработаны компанией Bombardier Inc. Алгоритмы управления силой тяги ТД упомянутого электровоза неизвестны, поэтому авторы выполнили собственные исследования, цель которых определить, насколько поосное перераспределение силы тяги между КМБ даст прирост силы тяги электровоза. Для проведения исследований была разработана математическая модель тягового привода для одной четырехосной секции электровоза с АТД с алгоритмами защиты от боксования. Разработанная математическая модель явилась основой для проведения теоретических исследований с оценкой эффективности от использования поосного компенсирующего перераспределения силы тяги между КМБ на тяговые свойства электровоза с последующими рекомендациями применения алгоритмов на перспективных отечественных электровозах с АТД.

Математическая модель тягового привода электровоза позволила оценить результаты работы противобоксовочной защиты с разными параметрами системы на одном мерном участке пути. Математическая модель включила в себя уравнения движения односекционного электровоза с грузовым составом, касательную силу тяги и потенциальную силу сцепления каждой КП с рельсами, формируемую на основе закона нормального распределения с заданными начальными значениями потенциального сцепления. Также в математической модели использованы законы взаимодействия колес с рельсами, в том числе и при появлении проскальзываний [1, 2, 3, 6, 7, 10, 11], учтены моменты инерции вращающихся частей КМБ. Управление проскальзыванием колес возложено на регуляторы поосного задания силы тяги, значения которых и определяют результирующую касательную силу тяги каждого колеса.

Так как коэффициент сцепления является случайной величиной и зависит от многих внешних факто-

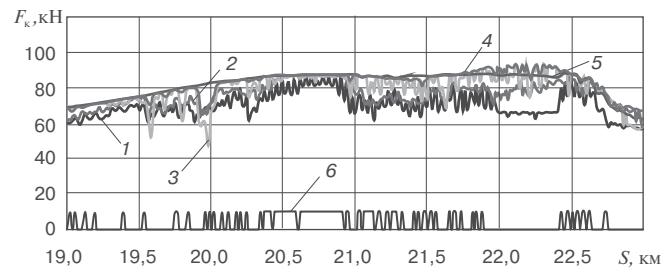


Рис. 1. Осциллограмма боксования секции Б электровоза 2ЭВ120: 1–4 — силы тяги $F_{кi}$ КП 1–4 электровоза соответственно; 5 — заданная сила тяги электровоза, приведенная к одному двигателю $F_{зд}$; 6 — сигнал наличия боксования

Fig. 1. Slippage oscillogram of section B of the 2EV120 electric locomotive: 1–4 — tractive force $F_{кi}$ of wheelsets 1–4 of the electric locomotive, respectively; 5 — given tractive force of the electric locomotive, reduced to one $F_{зд}$ motor; 6 — wheelspin alarm

ров, то было принято, что он задан как некая переменная величина относительно опорного значения с последующим усреднением фильтром первого порядка. Такое моделирование с использованием фильтра позволило формировать сглаженные процессы изменения коэффициента сцепления и в любой момент времени задавать его принудительное снижение, изменяя начальное значение, тем самым имитируя погодные условия на участке расчета. В общем виде формула задания коэффициента сцепления имеет вид

$$\psi_{сц} = \psi_{сц0} + 0,2(rand - 0,5), \quad (1)$$

где $\psi_{сц0}$ — начальное значение коэффициента сцепления; $rand$ — случайное генерируемое значение от 0 до 1.

Согласно [2, 3] коэффициент сцепления каждой КП задается разными значениями и постепенно увеличивается от одной КП к другой по ходу движения электровоза по одному участку рельсового полотна. Это связано с очищением поверхности рельса от влаги и загрязнений первыми КП за счет вертикального давления колес на рельсы и проскальзываний. Для учета данного процесса при моделировании были введены дополнительные коэффициенты: понижающий коэффициент сцепления первой оси на 10 % относительно исходного значения и повышающие коэффициенты для третьей и четвертой осей на 10 и 20 % соответственно [12].

Результаты и обсуждения. Для перераспределения моментов между ТД авторами предложен следующий алгоритм:

- при возникновении проскальзывания и фиксации системой защиты избыточной скорости скольжения в секции электровоза определяются номера тех КП, которые не подвергнуты боксованию и имеют запас по сцеплению. Определение боксующей КП осуществляется методом сравнения линейной скорости электровоза $v_{лин}$ со скоростью вращения каждой КП $v_{кПi}$, в случае

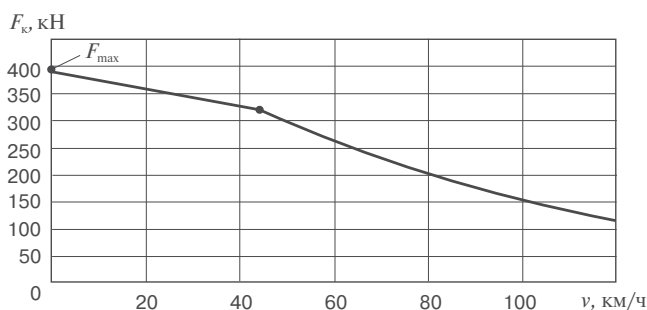


Рис. 2. Заданная тяговая характеристика секции электровоза

Fig. 2. Given traction feature of the electric locomotive section

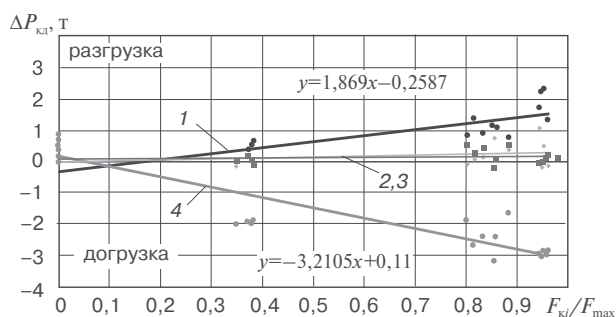


Рис. 3. Зависимости динамической составляющей силы нажатия КП на рельс $\Delta P_{\text{кл}}$ при реализации КМБ касательной силы тяги: 1–4 — КП 1–4 соответственно

Fig. 3. Dependences of the dynamic component of the wheelset pressing force on the rail $\Delta P_{\text{кл}}$ when the wheel-motor unit realises the tangential tractive force: 1–4 — wheelsets 1–4 respectively

превышения минимального порога по скольжению система определяет наличие боксования у данной КП;

- запас по сцеплению каждой КП определяется частотой срывов в критический режим проскальзывания данной КП: чем больше срывов, тем меньше запас по сцеплению и, как следствие, возможность получения дополнительной догрузки;

- если суммарная реализуемая сила тяги электровоза $F_{\text{сум}}$ ниже установленной контроллером машиниста заданной силы $F_{\text{кн}}$ на 7%, то система формирует сигнал на разрешение применения алгоритма перераспределения силы тяги между КМБ;

- плавное пропорциональное повышение тягового момента каждого из небуксующих двигателей происходит до тех пор, пока суммарная реализуемая сила тяги всеми КМБ $F_{\text{сум}}$ не достигнет значений, близких к значениям $F_{\text{кн}}$;

- повышение заданной силы для каждой оси, вращающейся без проскальзывания, происходит ступенчато, с шагом 10 кН/с. Выбор значения, являющегося

пределом превышения заданной силы на каждую ось, рассмотрен ниже.

При возникновении избыточного проскальзывания КП отключалась от перераспределения с последующим подключением блока регулирования скорости скольжения, а неиспользованная сила тяги перераспределялась между другими КМБ.

Для проверки работоспособности разработанной математической модели и алгоритмов перераспределения проведены сравнительные расчеты движения секции электровоза по участку пути с включенной и отключенной системой перераспределения силы тяги. Масса состава, начальная координата расчета и профиль пути во всех расчетах были одинаковыми. Закон изменения начального значения коэффициента сцепления колес с рельсами для каждой оси тоже во всех вариантах расчета был одинаков и задавался на 0,5% больше, чем сила тяги, приходящаяся на один КМБ. Случайная величина изменения коэффициента сцепления задавалась ранее просчитанным массивом значений по формуле (1), циклически повторяющимся в зависимости от длины пройденного пути. Движение электровоза осуществлялось в режиме тяги по тяговой характеристике, представленной для одной секции электровоза на рис. 2, в течение всего времени расчета $T = 1000$ с.

Для учета динамического перераспределения сил $P_{\text{дин}}$ между КП экипажа при реализации силы тяги в математическую модель добавлен расчет вертикальной нагрузки каждой оси на рельс с учетом догружающих и разгружающих сил в зависимости от реализуемой КМБ силы тяги. В расчете значения $P_{\text{дин}}$ выбраны согласно экспериментально полученным данным электровоза 2ЭС6 с измерением дополнительной составляющей разгружающих и догружающих сил нажатия КП на рельс $\Delta P_{\text{кл}}$ при движении вперед кабиной управления. На рис. 3 приведены зависимости динамической составляющей силы нажатия колесной пары на рельс $\Delta P_{\text{кл}}$ от действия относительной силы тяги $F_{\text{ки}}/F_{\text{max}}$ четырех осей (где $F_{\text{ки}}$ — реализуемая сила тяги оси, кН; F_{max} — максимальная сила тяги электровоза, приведенная к одной оси, кН) согласно формуле (2).

Расчетная сила нажатия КП на рельс определена по формуле

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{кл}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ст}}$ — статическое нажатие КП на рельс, кН.

На основе результатов расчетов, выполненных с помощью математического моделирования, осуществлялся качественный анализ работы алгоритмов перераспределения с различными настройками чувствительности системы перераспределения.

Результаты моделирования с отключенным алгоритмом перераспределения представлены на рис. 4 и 5.

На протяжении расчета (рис. 4) электровоз двигался в тяге с постоянным проскальзыванием КП 1. Это объясняется тем, что в расчете специально созданы условия реализации силы тяги на пределе по сцеплению. Поэтому первая ось имела сниженные сцепные свойства и не реализовывала заданную контроллером силу тяги, приходящуюся на один КМБ. Скорость проскальзывания первой оси в среднем составила около 3 %. КП 2 двигалась с периодическими проскальзываниями, так как согласно начальным условиям расчета ее сила тяги была равна средней величине силы сцепления. КП 3 и 4 двигались практически без проскальзываний с реализацией контроллером заданной силы тяги $F_{кн}$. В момент времени с 650 по 670 с (рис. 4, а) коэффициент сцепления всех колес принудительно снижался на 20 % для моделирования наезда на масляное пятно и введения всех КП в боксование, тем самым снижая реализуемую силу тяги $F_{к1-4}$.

Проскальзывания КП 1 и 2 ограничивались алгоритмом работы математической модели и регулятора скорости проскальзывания КП на уровне 3 % от линейной скорости движения (рис. 4, б). (В данной статье алгоритм работы регулятора подробно не рассматривается.)

В рассмотренном режиме движения получен набор реализуемой силы тяги $F_{сум}$ до заданной контроллером силы тяги $F_{кн}$, так как $F_{сум}$ является суммой сил $F_{кi}$. Эти силы показаны на рис. 5, где видна разница между ними примерно в 3–4 %. Таким образом, у электровоза с защитой от боксования и юза без функции перераспределения силы тяги между осями есть определенный риск недоиспользования сцепных свойств, особенно на руководящих подъемах, что приводит к уменьшению перегонной скорости движения поезда.

Далее были проведены расчеты движения электровоза по тому же участку пути с такими же условиями сцепления с включенным алгоритмом перераспределения силы тяги между осями. Эффект от перераспределения силы тяги между осями зависит от верхней границы, до которой СУ разрешено увеличивать заданную силу тяги на ось, у которой отсутствует проскальзывание. На рис. 6 представлены результаты расчета сил тяги четырех КМБ и линейных скоростей КП в зависимости от времени при включенном алгоритме перераспределения с разрешенным превышением силы тяги двигателя до 7 % относительно заданной контроллером силы тяги, приведенной к одной оси.

При включенном алгоритме перераспределения дополнительное задание силы тяги получали КП 3 и 4 (рис. 6). Лучшие условия по сцеплению с рельсами позволили реализовать этим КП дополнительную

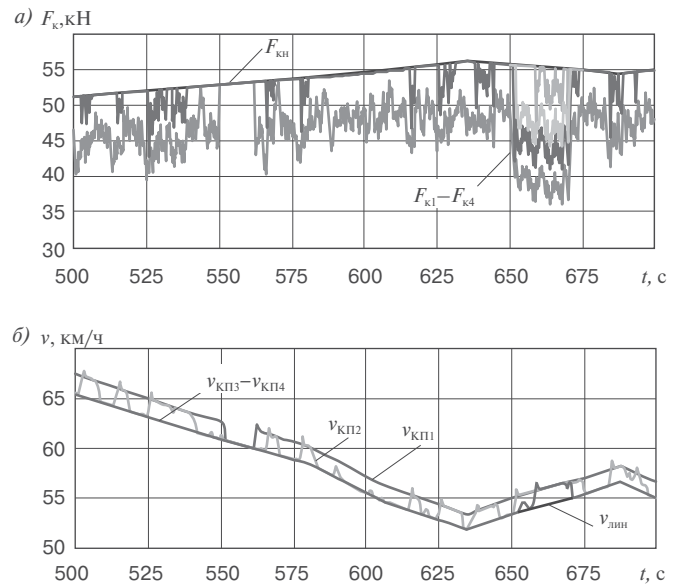


Рис. 4. Осциллограммы сил тяги $F_{кi}$ четырех осей без перераспределения и приведенной заданной силы тяги $F_{кн}$ (а), а также линейных скоростей вращения КП 1–4 электровоза $v_{кpi}$ и линейной скорости электровоза $v_{лин}$ (б)

Fig. 4. Oscillograms of tractive forces $F_{кi}$ of four axes without redistribution and the reduced given force $F_{кн}$ (а), as well as the linear spin rates of wheelsets 1–4 of the electric locomotive $v_{кpi}$ and linear speed of the electric locomotive $v_{лин}$ (б)

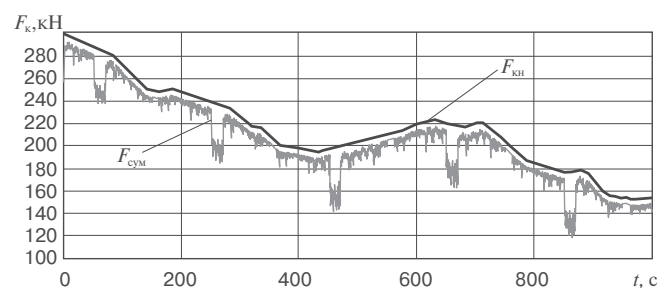


Рис. 5. Осциллограммы суммарной реализуемой $F_{сум}$ и заданной $F_{кн}$ контроллером машиниста силы тяги на секцию электровоза

Fig. 5. Oscillograms of the total realised $F_{сум}$ tractive force and $F_{кн}$ tractive force given by the locomotive throttle on the electric locomotive section

силу тяги. При этом третья и четвертая ось уже большую часть времени прошли с проскальзыванием на границе по сцеплению.

За счет работы алгоритмов регуляторов моментов АТД, примененных в математической модели, как при включенном, так и отключенном алгоритме перераспределения максимальное значение скорости скольжения находилось в диапазоне от 3 до 3,4 км/ч для всех КП вне зависимости от глубины перераспределения.

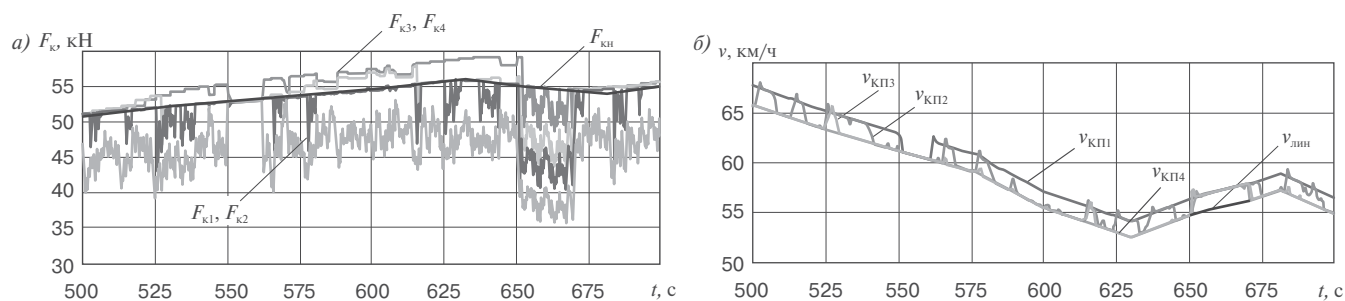


Рис. 6. Осциллограммы сил тяги F_{ki} четырех осей с учетом перераспределения до 7 % и приведенной заданной силы F_{kn} (а), а также линейных скоростей вращения КП 1–4 электровоза $v_{kпi}$ и линейной скорости электровоза $v_{лн}$ (б)

Fig. 6. Oscillograms of the F_{ki} tractive forces of four axes, considering the redistribution up to 7 % and the F_{kn} reduced given force (а), as well as the $v_{kпi}$ linear spin rates of wheelsets 1–4 of the electric locomotive and the $v_{лн}$ linear speed of the electric locomotive (б)

На рис. 7 показаны осциллограммы заданной и реализуемой силы тяги секции электровоза с включенным перераспределением между осями. При

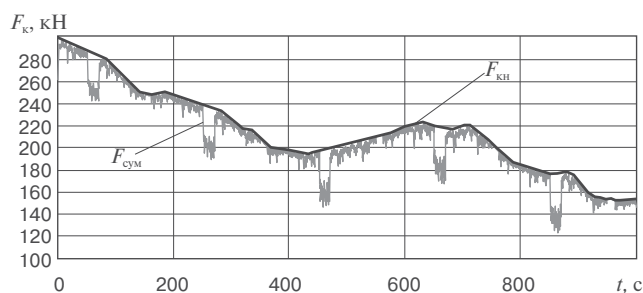


Рис. 7. Осциллограммы суммарной реализуемой $F_{сум}$ и заданной F_{kn} контроллером машиниста силы тяги на секцию электровоза с включенным перераспределением между осями

Fig. 7. Oscillograms of the $F_{сум}$ total realised tractive force and F_{kn} tractive force given by the locomotive throttle on the section of the electric locomotive with the redistribution between the axes

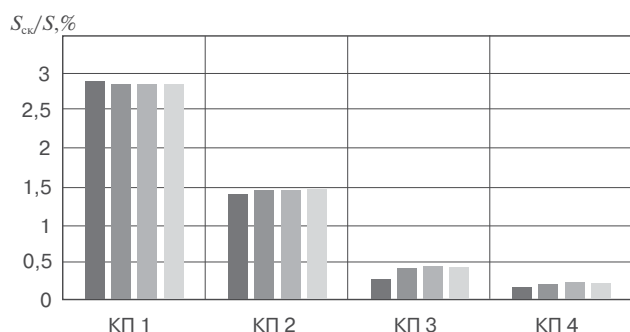


Рис. 8. Диаграмма пути, пройденного КП 1–4 в проскальзывании, приведенного к общему пройденному пути:

■ — без перераспределения; ■ — с перераспределением (5 %); ■ — с перераспределением (7 %); ■ — с перераспределением (10 %)

Fig. 8. Diagram of the distance traveled by wheelsets 1–4 during wheel sliding, reduced to the total distance traveled: ■ — without redistribution; ■ — with redistribution (5 %); ■ — with redistribution (7 %); ■ — with redistribution (10 %)

сравнении с рис. 5 можно увидеть, что результат моделирования с перераспределением силы тяги позволил приблизить реализуемую силу к заданной контроллером силе тяги с разностью примерно в 1–1,5 %.

Применение алгоритма перераспределения силы тяги между осями с повышением силы тяги осей до 7 % увеличило на участке пройденный путь и среднюю скорость движения секции электровоза с грузовым составом на 1,36 % по сравнению с движением такого же поезда при прочих одинаковых условиях, но без применения алгоритма перераспределения. Так, во втором случае пройденный путь увеличился с 15,718 до 15,936 км, а средняя скорость движения с 56,6 до 57,38 км/ч.

Дополнительно с помощью математической модели проведены расчеты при движении электровоза с допустимым порогом повышения сил тяги осей на 5, 7 и 10 % свыше заданной силы тяги F_{kn} (ΔF_{var}). Результаты расчетов представлены в таблице. (ΔF_{var} — значение превышения F_{kn} .)

Как показали расчеты, увеличение порога изменения силы тяги незначительно, но сказывается на эффективности пропускной способности движения поездов. Для более качественного сравнения результатов расчетов построены диаграммы параметров движения каждой КП (рис. 8).

Различные алгоритмы перераспределения мало влияют на те оси, которые находятся в постоянном проскальзывании, например КП 1 (рис. 8), вследствие чего КП 1 имеет такой же путь относительного проскальзывания $S_{ск}/S$ (где $S_{ск}$ — путь, пройденный КП в скольжении, м; S — общий путь, пройденный КП при расчетах, м), как при отключенном алгоритме перераспределения. Для КП 2–4 при работе алгоритма перераспределения отмечено некоторое увеличение пройденного пути, в том числе за счет проскальзывания. Это объясняется тем, что при применении алгоритма

Таблица

Эффективность применения алгоритма перераспределения
с различным порогом повышения силы тяги осей

Table

Efficiency of applying the redistribution algorithm
with different threshold for increasing the tractive force of the axles

Показатель расчета	$\Delta F_{\text{var}} \leq 5\%$	$\Delta F_{\text{var}} \leq 7\%$	$\Delta F_{\text{var}} \leq 10\%$
Увеличение пройденного пути относительно движения с отключенным перераспреде- лением, %	1,26	1,36	1,48
Увеличение средней скорости относительно движения с отключенным перераспреде- лением, %	1,26	1,36	1,48
Увеличение реализуемой силы тяги секции электровоза на участке относительно движе- ния с отключенным перерас- пределением, %	1,28	1,37	1,45

перераспределения повышается риск появления боксования на осях, которые получают повышенное задание силы тяги, вследствие чего увеличивается и время нахождения этих КП в проскальзывании.

Проведенный анализ показывает, что применение алгоритма перераспределения силы тяги между осями повышает тяговые свойства электровоза, увеличивая перегонную скорость поезда на участках. При этом чем больше допустимый порог перераспределения силы тяги между осями, не имеющими проскальзывания, тем больше повышаются тяговые свойства электровоза. Путь и время нахождения КП в проскальзывании также может увеличиваться, но незначительно (при поддержании скорости скольжения на одинаковом уровне).

Заключение. Разработанные алгоритм управления сцеплением КП и математическая модель взаимодействия силы тяги КМБ и силы сцепления в контакте колеса с рельсом позволили оценить тяговые способности односекционного электровоза в режиме работы на пределе по сцеплению, в том числе каждой оси отдельно с учетом использования алгоритма перераспределения силы тяги между КП.

Расчеты моделирования показали, что наиболее эффективный алгоритм перераспределения силы тяги должен включать в себя возможность перераспределения силы тяги с превышением выше заданной контроллером силы тяги, приведенной к одной оси, с порогом до 10 %. Повышение порога перераспределения

сил тяги не приведет к значительному увеличению средней скорости и силы тяги электровоза при боксовании, однако может привести к частым срывам в боксовании небуксующих КП, что, в свою очередь, может привести к повышенному износу бандажей этих КП и рельсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лужнов Ю. М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. М.: Интекст, 2009. 176 с.
2. Самме Г. В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. Теория и практика сцепления локомотива: монография. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. 104 с.
3. Logston C. F. Itami Locomotive Friction-creep studies // ASME Journal of Engineering for Industry. 1980. Vol. 102. P. 275–281.
4. Ляпушкин Н. Н. Прогнозирование сцепных свойств локомотивов с различными типами тяговых электродвигателей: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. М., 2013. 46 с.
5. Меншутин Н. Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00. М., 1961. 18 с.
6. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit // Wear. 2005. Vol. 258. P. 992–1000.
7. Polach O. SBB 460 Adhäsionsverhalten: Techn. Report No. 401. / SLM Winterthur. [S. l.], 1992.
8. Polach O. Optimierung modern Lok-Drehgestelle durch fahrzeug-dynamische Systemanalyse // Eisenbahningenieur. 2002. Vol. 53, no. 7. P. 50–57.
9. Бушер М. Регулирование проскальзывания колес на электровозах с асинхронным тяговым приводом // Железные дороги мира. 1994. № 4. С. 30–45.
10. Модель взаимодействия колеса и рельса с учетом дискретного строения металла контактирующих тел / Г. П. Бурчак [и др.] // Вестник машиностроения. 2019. № 2. С. 21–28.
11. Розенфельд В. И., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 328 с.
12. Шилин Н. Д., Прокофьев С. Н. Разработка алгоритмов повышения тяговых и сцепных свойств электровозов с асинхронными тяговыми двигателями / Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. докл. I Междунар. науч.-практ. конф. (Шербинка, 26–27 августа 2021 г.). М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 209–214.

REFERENCES

1. Luzhnov Yu. M. Nanotribologiya stsepleniya koles s rel'sami [Nanotribology of wheel–rail adhesion]. Moscow: Intext Publ.; 2009. 176 p. (In Russ.).
2. Samme G. V. Friksionnoe vzaimodeystvie kolesnykh par lokomotiva s rel'sami. Teoriya i praktika stsepleniya lokomotiva [Frictional interaction of wheelsets of a locomotive with rails. Theory and practice of locomotive adhesion]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Railway transport education centre] Publ.; 2014. 104 p. (In Russ.).
3. Logston C. F. Itami Locomotive Friction-creep studies. ASME Journal of Engineering for Industry. 1980;(102):275–281.
4. Lyapushkin N. N. Prognozirovaniye stsepykh svoystv lokomotivov s razlichnymi tipami tyagovykh elektrodvigatelay [Forecasting the coupling properties of locomotives with different types of traction motors]. Synopsis of Dr. of Sci. thesis: 05.22.07. Moscow; 2013. 46 p. (In Russ.).
5. Menshutin N. N. Issledovanie skol'zheniya kolesnoy pary elektrovoza pri realizatsii sily tyagi [Investigation of the sliding of an electric

locomotive wheelset in the implementation of traction force]. Synopsis of Cand. of Sci. thesis: 05.00.00. Moscow; 1961. 18 p. (In Russ.).

6. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit. *Wear*. 2005;(258):992-1000.

7. Polach O. SBB 460 Adhäsionsverhalten: Techn. Report No. 401. SLM Winterthur. [S. 1.]; 1992.

8. Polach O. Optimierung modern Lok-Drehgestelle durch fahrzeug-dynamische Systemanalyse. *Eisenbahningenieur*. 2002;53(7):50-57.

9. Busher M. Regulirovanie proskal'zyvaniya koles na elektrovozakh s asinkhronnym tyagovym privodom [Regulation of wheel slip on electric locomotives with asynchronous traction drive]. *Zheleznye dorogi mira = Railways of the World*. 1994;(4):30-45. (In Russ.).

10. Burchak G. P., Vasil'ev A. P., Lyapushkin N. N., et al. Model' vzaimodeystviya koleasa i rel'sa s uchetom diskretnogo stroeniya metalla kontaktiruyushchikh tel [Model of wheel and rail interaction taking into account the discrete structure of the metal of contacting bodies]. *Vestnik mashinostroyeniya = Russian Engineering Research*. 2019;(2):21-28. (In Russ.).

11. Rozenfel'd V. I., Isaev I. P., Sidorov N. N. Teoriya elektricheskoy tyagi: ucheb. dlya vuzov zh.-d. transporta [Theory of electric traction: textbook for railway transport universities]. 2nd ed. Moscow: Transport Publ.; 1983. 328 p. (In Russ.).

12. Shilin N. D., Prokof'ev S. N. Razrabotka algoritmov povysheniya tyagovykh i stsepykh svoystv elektrovozov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Development of algorithms for improving the traction and coupling properties of electric locomotives with asynchronous traction motors]. *Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont [Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon]*. Proc. of I Int. scientific conf. (Shcherbinka, August 26–27, 2021). Moscow: VNIIZhT Publ.; 2021. P. 209–214. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никита Дмитриевич ШИЛИН,

младший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), <https://orcid.org/0000-0002-1503-1999>

Сергей Николаевич ПРОКОФЬЕВ,

ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita D. SHILIN,

Junior Researcher, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), <https://orcid.org/0000-0002-1503-1999>

Sergey N. PROKOF'EV,

Leading Researcher, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.)

ВКЛАД АВТОРОВ

Никита Дмитриевич ШИЛИН. Обзор основных направлений исследования, описание материалов и методов, обработка и анализ результатов (50%).

Сергей Николаевич ПРОКОФЬЕВ. Формулировка целей и задач, обозначение алгоритмов исследования (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Nikita D. SHILIN. Review of the main research areas, description of materials and methods, processing and analysis of the results (50%).

Sergei N. PROKOF'EV. Formulation of goals and objectives, designation of research algorithms (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 09.03.2022, первая рецензия получена 11.03.2022, вторая рецензия получена 29.03.2022, принята к публикации 17.05.2022.

The article was submitted 09.03.2022, first review received 11.03.2022, second review received 29.03.2022, accepted for publication 17.05.2022.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

УСТРОЙСТВО ОТВОДА КОНТАКТНОЙ СЕТИ

С. А. Виноградов, М. И. Мехедов,
А. А. Крылов, А. В. Куликов, А. А. Царьков

Заявляемое решение относится к устройству, реализующему отвод действующей контактной сети в зоне погрузки/выгрузки вагонов и контейнерных (фитинговых) платформ на боковых приемоотправочных путях промежуточных (опорных) железнодорожных станций и терминально-логистических центров, и позволяет повысить надежность отвода контактной сети при одновременном обеспечении максимально требуемого габарита для работы вертикальных погрузчиков в зоне погрузки/выгрузки вагонов и контейнерных (фитинговых) платформ на железнодорожных

станциях и в терминально-логистических центрах. Это достигается тем, что освобождается надвагонное пространство от контактной сети, причем отвод контактной сети осуществляется путем ее перемещения вверх к опоре контактной сети, для чего изменяется геометрия контактной сети посредством привода, системы тяг, включающей тягу привода, консоль, поддерживающую тягу, синхронизирующую тягу и регулировочную тягу, и шарнирно-поворотных узлов, связывающих систему тяг с опорой контактной сети и переходным профилем, связанным с контактным проводом.

По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru