

УДК 629.423.2:001.81.3

Г.С. Игнатов, А.А. Сулим, В.Р. Распопин, П.А. Хозя

КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ ДВУХСИСТЕМНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА МЕЖРЕГИОНАЛЬНОГО СООБЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПАО «КВСЗ»

Приведены теоретические исследования по выбору необходимого расчетного коэффициента сцепления для электропоезда межрегионального сообщения производства ПАО «КВСЗ». Выполнены экспериментальные исследования, по результатам которых установлена зависимость коэффициента сцепления от скорости. Выполнены исследования неравномерности распределения токов по тяговым двигателям. Выведена эмпирическая зависимость по определению предельного коэффициента сцепления для электропоездов с асинхронным тяговым приводом на головных вагонах и промежуточными безмоторными вагонами.

Обоснованному выбору коэффициента сцепления уделяется большое внимание в теоретических и экспериментальных исследованиях [1]. Данный показатель является одним из критериев для выбора необходимой максимальной силы тяги и зависит от многих факторов [1–3]. При проектировании нового электроподвижного состава используется расчетный коэффициент сцепления [1, 4, 5]. В работах [1–5] приводятся расчетные коэффициенты сцепления для различных видов электроподвижного состава. При расчете максимальной силы тяги для двухсистемного электропоезда производства ПАО «КВСЗ» одним из важных вопросов является выбор расчетного коэффициента сцепления. Следует отметить, что эффективность использования тяговых свойств электропоезда, состояние его ведущих колесных пар и ходового рельса, в значительной мере, зависит от правильного выбора расчетного коэффициента сцепления. Не менее важным является и определение реальной зависимости коэффициента сцепления, получаемой в ходе экспериментальных исследований от скорости. Исходя из чего целью данной работы является выбор расчетного коэффициента сцепления и его сравнение с реальным.

Анализ литературных источников [1–5], в которых приведены рекомендуемые расчетные значения коэффициента сцепления для различных видов отечественного электроподвижного состава, не позволил остановиться ни на одном из них. Это, в свою очередь, связано с отсутствием экспериментальных исследований коэффициента сцепления для электропоездов, оборудованных асинхронным тяговым приводом с возможностью плавного регулирования силы тяги, а также наличием систем противобоксования и подачи песка. В приведенных работах [1, 4] для электропоездов пригородного сообщения с приводом постоянного тока рекомендуемое значение расчетного коэффициента сцепления составляет 0,22. В работе [6] для электропоездов коэффициент сцепления рассчитывают по эмпирической формуле:

$$\psi_1 = \frac{A}{(100 + V)} \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (1)$$

© Г.С. Игнатов, А.А. Сулим, В.Р. Распопин, П.А. Хозя, 2013

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

где A – коэффициент, характеризующий тяговые свойства электропоезда: при последовательном соединении двигателей $A = 19$, при параллельном – $A = 22$; K_1 – коэффициент, учитывающий колебания силы тяги при пуске электропоезда: при ступенчатом пуске $K_1 = 1$, при плавном – $K_1 = 1,15$; K_2 – коэффициент, учитывающий жесткость характеристик тяговых двигателей [6, 7]: при использовании коллекторных тяговых двигателей $K_2 = 1$, при асинхронном электроприводе – $K_2 = 1,1$; V – скорость движения.

Следует отметить, что данная формула позволяет учитывать плавность реализации силы тяги и жесткость характеристик тягового двигателя. Таким образом, расчетный коэффициент сцепления для электропоезда с асинхронным тяговым электроприводом приближенно можно рассчитать по формуле (1).

Разработчиками тягового оборудования и конструкторами электропоезда ПАО «КВСЗ» выполнялся анализ зарубежных исследований по данному вопросу [8, 9]. В результате анализа отечественных и зарубежных источников расчетный коэффициент сцепления принято было считать по следующей эмпирической формуле:

$$\psi_2 = \left(\frac{7,5}{(3,6 \cdot V + 4)} + 0,161 \right) \cdot K_\psi \quad (2)$$

где K_ψ – коэффициент, учитывающий неравномерность токов двигателей.

Формула (2) имеет преимущество по сравнению с (1), поскольку выведена при испытании скоростного электропоезда, оборудованного трехфазными асинхронными двигателями с головными моторными и промежуточными безмоторными вагонами.

Зависимость (2) получена при наличии на скоростном электропоезде систем противобоксования и подачи песка под колесные пары. Зависимости расчетных коэффициентов сцепления, рассчитанных по формулам (1) и (2) приведены на рис. 1.

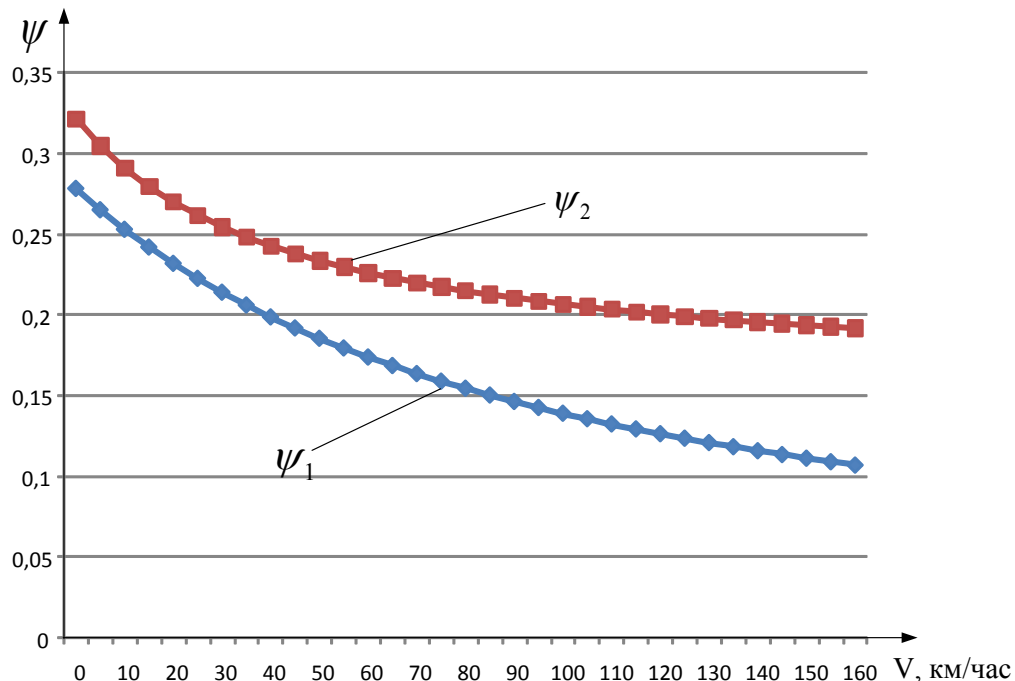


Рис. 1. Эмпирические зависимости расчетных коэффициентов сцепления для электропоездов

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таким образом, при проектировании электропоезда ПАО «КВСЗ» ограничение силы тяги учитывалось по формуле (2). После изготовления опытного образца проводились испытания с целью постановки продукции на производство, в том числе и по определению реальных значений коэффициента сцепления. При проведении испытаний определялись значения силы тяги при установке рукоятки контроллера машиниста в крайнее положение, что соответствует режиму максимальной тяги.

Испытания по определению коэффициента сцепления проводились на перегонах Новомосковск – Баловка Приднепровской дороги и Борисполь – Барышевка Юго-Западной дороги. По полученным значениям силы тяги выполнялся расчет реализованных и предельных значений коэффициентов сцепления. Под «реализованным» и «предельным» подразумеваются коэффициенты, полученные при реализации максимальной силы тяги без срыва сцепления и в момент срыва сцепления соответственно. Зависимость предельного коэффициента сцепления от скорости строилась на основании данных при реализации искусственно создаваемых условий срыва сцепления на различных скоростях. Условия по срыву сцепления колеса с рельсом создавались по методике [10].

Наибольший интерес определения коэффициента сцепления представляет режим пуска электропоезда и диапазон скоростей от 0 до 40 км/час, поскольку коэффициент сцепления и вероятность срыва сцепления колеса с рельсом именно для данных скоростей наибольшие.

На рис. 2 представлены значения коэффициента сцепления и скорости, при которых наблюдались срывы сцепления ведущих колесных пар с рельсом. По полученным данным аппроксимирована кривая в виде эмпирической зависимости для благоприятных погодных условий.

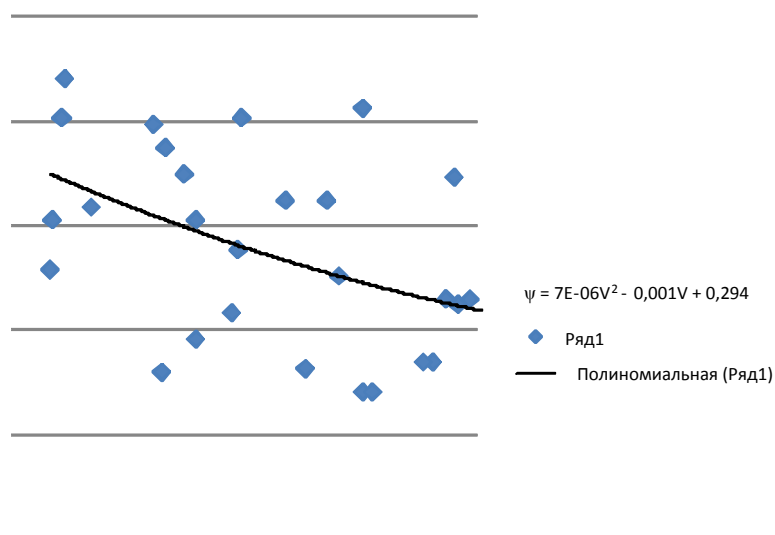


Рис. 2. Предельные коэффициенты сцепления и аппроксимированная эмпирическая зависимость на скоростях от 0 до 40 км/час

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

По многочисленным реализациям максимальной силы тяги при разгоне электропоезда построены экспериментальные зависимости реализованного и предельного коэффициентов сцепления на скоростях от 0 до 40 км/час (рис. 3). На рис. 3 также изображена зависимость расчетного коэффициента сцепления, рассчитанная по формуле (2).

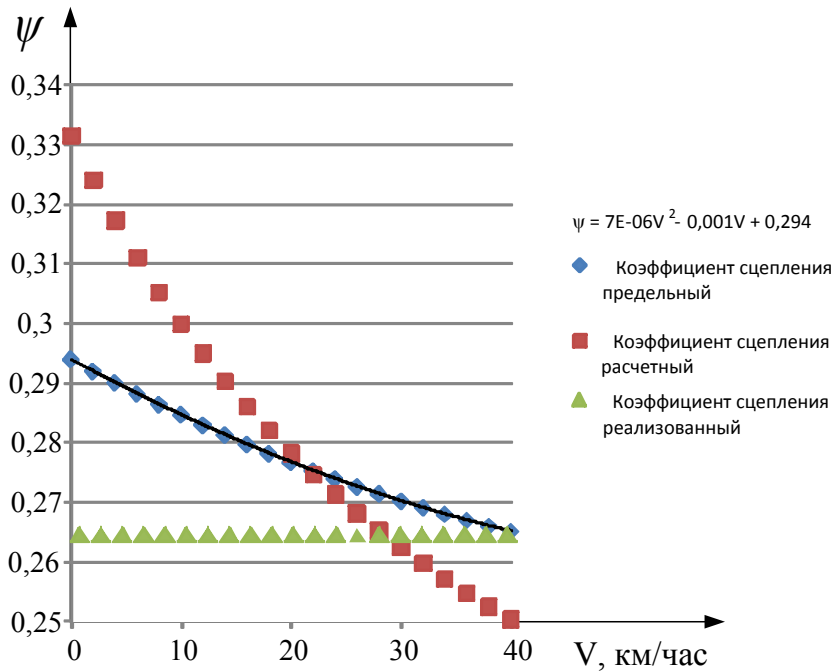


Рис. 3. Графики расчетного, реализованного и предельного коэффициентов сцепления на скоростях от 0 до 40 км/час

Анализируя графики на рис. 3 можно отметить следующее:

– зависимости реализованного и предельного коэффициента сцепления от скорости изменяется по различным законам;

– значения реализованного коэффициента сцепления незначительно отличаются от предельных значений: в начальный момент трогания разница между реализованным и предельным коэффициентом составляет 0,029, при скорости 20 км/час – 0,012, при скорости 40 км/час – 0,002;

– при скорости равной 20 км/час графики расчетного и полученного экспериментально предельного коэффициента сцепления пересекаются, при скорости менее 20 км/час график расчетного предельного коэффициента сцепления проходит выше экспериментально полученного, при скорости более 20 км/час – ниже.

Таким образом, подводя итоги анализа графиков на рис. 3 можно отметить, что для обеспечения заданной динамики движения в системе управления электропоезда задано программное ограничение силы тяги на уровне ограничивающей силы тяги по сцеплению.

Как было отмечено ранее, электропоезд оборудован системами противобуксования и подачи песка под ведущие колесные пары. Система противобуксования работает по принципу поосного определения буксования ведущих колесных пар в

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

зависимости от порогового значения ускорения оси. В случае превышения порогового значения ускорения одной или нескольких ведущих осей электронная система противобуксования генерирует электрический сигнал, в результате чего снимается напряжение с тягового двигателя (тяговых двигателей) буксующей оси (буксующих осях).

Система подачи песка в электропоезде работает следующим образом: при возникновении буксования или нажатии кнопки «Подача песка» на скоростях от 0 до 20 км/час система выдает сигнал на реле буксования, в результате чего подается сигнал на исполнительный механизм подачи песка.

Проверка работоспособности систем электропоезда, способствующих обеспечению оптимального сцепления колес с рельсом и предотвращению их повреждения, проводилась посредством измерительной системы, состоящей из датчиков тока и напряжения, аналого-цифрового преобразователя, компьютера с аттестованным программным обеспечением «ЭЛЕКТРО».

Работоспособность системы противобуксования фиксировалась с помощью датчиков тока (ДТ) типа ДСТ 500, установленных в цепях тяговых двигателей, а также штатных датчиков скорости вращения колесных пар посредством «Front-adaptera» SU02B STN 26815, производства «Knorr-Bremse», и устройства считывания сигнала с противоюзного устройства.

Работоспособность системы подачи песка проверялась с помощью датчика напряжения (ДН), установленного параллельно реле буксования (РБ), через разделяющие диоды. Схема подключения ДН к РБ представлена на рис. 4.

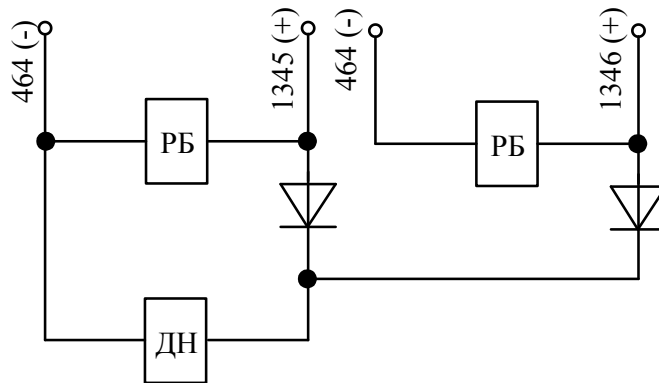


Рис. 4. Схема подключения датчика напряжения к реле буксования

При проведении испытаний также выполнялись исследования неравномерности распределения токов по тяговым двигателям (табл. 1). Регистрация токов тяговых двигателей осуществлялась с целью определения разности их электромеханических характеристик. Следует отметить, что неравномерное распределение нагрузки по осям ведущих колес и разность характеристик тяговых двигателей также влияют в условиях эксплуатации на коэффициент сцепления электропоезда с рельсом [1, 11].

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1. Неравномерность распределения токов по тяговым двигателям головного вагона в режиме реализации максимальной тяги

Номер записи	Дата записи	Средние отклонения токов тяговых двигателей, %	Максимальные отклонения токов тяговых двигателей, %
Запись 1	4.10.2012	1,00	2,77
Запись 2	4.10.2012	0,96	2,2
Запись 4	4.10.2012	0,84	2,93
Запись 5	4.10.2012	0,9	1,63
Запись 6	4.10.2012	0,84	2,63

Из табл. 1 видно, что наибольшее отклонение токов тяговых двигателей составляет 2,93 %, что не превышает рекомендуемое значение 3 % [1].

Дополнительно производилась регистрация процессов буксования с помощью штатных приборов электропоезда через CAN – интерфейс с последующей записью на компьютер. Обработка данных записей выполнялась с помощью специальной программы, разработанной представителями фирмы «MEDCOM» для диагностики тягового оборудования. На рис. 5 – 6 изображены токи тяговых двигателей головного вагона при буксовании одной колесной пары, полученные с помощью установленных датчиков и штатных приборов электропоезда. Записи, представленные на рис. 5 – 6 синхронизированы по времени.

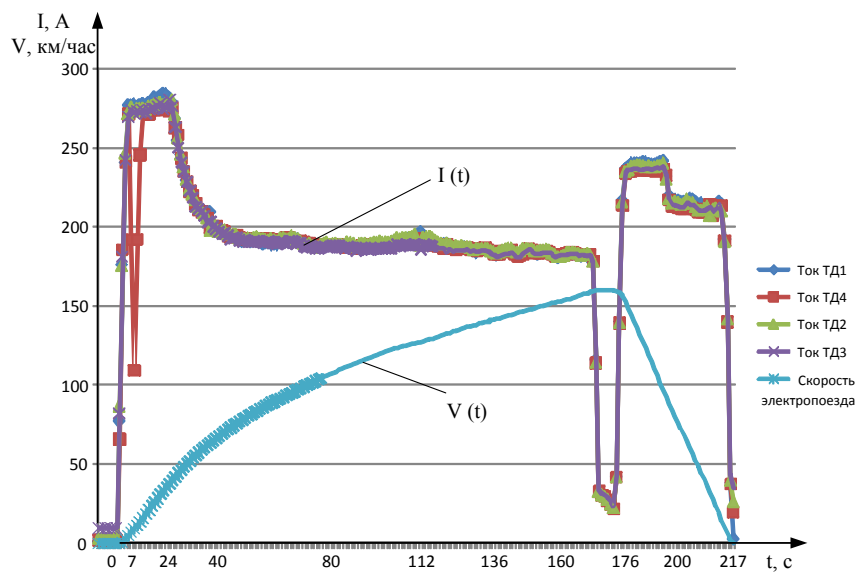


Рис. 5. Значения токов тяговых двигателей головного вагона при буксовании одной колесной пары, зарегистрированы посредством установленных датчиков и обработаны в программе «ЭЛЕКТРО»

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

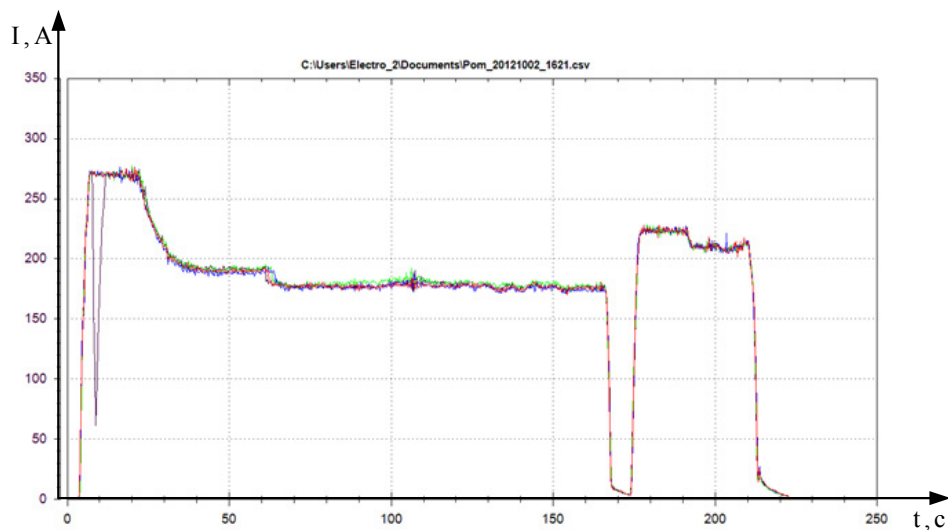


Рис. 6. Значення токів тягових двигателів головного вагона при буксованні одної колесної пари, зареєстровані за допомогою штатних датчиків і оброблені в спеціальній програмі

По результатам проверки работоспособности систем противобуксования и подачи песка установлено следующее:

- при возникновении буксования наблюдается снятие тяги с двигателей по осям, на которых выявлено буксование;
- система подачи песка под ведущие колесные пары при нажатии кнопки «Подача песка» машинистом электропоезда и автоматически при буксовании одной из колесных пар на скоростях от 0 до 20 км/час работоспособна.

В процессе проведения испытаний электропоезд совершал опытные поездки по разработанной нитке графика движения без пассажиров с имитацией максимальной загрузки по маршрутам: Харьков – Киев – Харьков, Киев – Донецк – Киев, Киев – Львов – Киев. Эксплуатация осуществлялась в зимнее время при неблагоприятных погодных условиях.

По результатам испытаний и опытных поездок конструкторами ПАО «КВСЗ» совместно с представителями фирмы «MEDCOM» выполнялись мероприятия по оптимизации силы тяги первого опытного электропоезда с учетом его коэффициента сцепления с рельсом. Среди мероприятий можно отметить следующие:

- программно реализована возможность ручной и автоматической подачи песка под ведущие колеса на скоростях превышающих 20 км/час;
- программно реализовано частичное снятие и поэтапное снижение тяги двигателя, который приводит в движение буксующую колесную пару, в отличие от ранее реализованного полного снятия тяги.

Сравнивая расчетный с экспериментально полученным предельным коэффициентом сцепления (рис. 3) можно отметить, что последний находится ниже расчетного. Одной из возможных причин этого может являться действующая отечественная инфраструктура железных дорог. Если быть точнее, то неразделенность грузовых и пассажирских перевозок. Как следствие, при отсутствии такого разделения

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

коэффициент сцепления на действующих железных дорогах хуже из-за эксплуатации грузовых поездов, которые непосредственно влияют на состояние ходового рельса.

Расчетный же предельный коэффициент, рассчитанный по формуле (2) выведен на основании многочисленных испытаний при разделенной инфраструктуре железных дорог.

В дальнейшем, при проектировании электропоездов с головными моторными и промежуточными безмоторными вагонами, предельный коэффициент сцепления можно рассчитывать по эмпирической зависимости, изображенной на рис. 2. Однако, учитывая опытные поездки при сложных метеорологических условиях, авторами рекомендуется при расчетах выполнить 15 % запас по сцеплению. Данный запас будет учитывать неравномерность нагрузки по осям, распределения токов по тяговым двигателям и разницу диаметра колесных пар [1,11]. Исходя из чего, чтобы обеспечить хорошее сцепление при сложных метеорологических условиях рекомендуется определять расчетный коэффициент сцепления для данного вида электроподвижного состава по формуле (3):

$$\psi_3 = (0,000007V^2 - 0,001V + 0,294) \cdot K_{\psi'} \quad (3)$$

где $K_{\psi'}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность нагрузки по осям, неравномерность распределения токов по тяговым двигателям, вследствие разницы их электромеханических характеристик, разницу диаметров колесных пар $K_{\psi'}=0,85$.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- в ходе анализа различных работ выполнен выбор формулы для определения расчетного коэффициента сцепления электропоезда, который необходим для расчета ограничивающей максимальной силы тяги по сцеплению;
- экспериментально получена зависимость предельного коэффициента сцепления от скорости для девятивагонного электропоезда ПАО «КВСЗ» (рис. 2);
- установлено, что в системе управления электропоездом задано программное ограничение силы тяги на уровне расчетной ограничивающей силы тяги по сцеплению;
- экспериментально определена неравномерность распределения токов между тяговыми двигателями головного вагона в режиме реализации максимальной тяги (табл. 1) и установлено, что наибольшее отклонение токов тяговых двигателей не превышает рекомендуемое значение 3 % [1];
- системы противобоксования и подачи песка под ведущие колесные пары работоспособны и функционируют без замечаний;
- в процессе испытаний выполнялись мероприятия по оптимизации силы тяги первого опытного электропоезда с учетом его коэффициента сцепления с рельсом;
- выведена эмпирическая зависимость (3) для определения расчетного коэффициента сцепления, которая может применяться при проектировании электропоездов, оборудованных асинхронным тяговым электроприводом, с наличием систем противобуксования и подачи песка.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Теория электрической тяги. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Озеров М.И.: Под ред. И.П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
- 2 Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д тр-та. – М.: УМК МПС России, 2000. – 592 с.
- 3 Основы электрического транспорта: учебник для студентов высш. учебн. заведений / [М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович и др.]: под общ. ред. М.А. Слепцова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
- 4 Байрыева Л.С., Прокопович А.В. Теория электрической тяги. Методическое пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 40 с.
- 5 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
- 6 Электропоезда. Механическая часть, тяговые двигатели и вспомогательные машины. Системы обслуживания и ремонта / В.М. Амелин, Ю.М. Иньков, М.И. Озеров, В.Н. Ротанов, А.А. Рубцов, Е.К. Рыбников, Я.И. Щур / Под общ. ред. В.М. Амелина, Ю.М. Инькова. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 200 с.: ил.
- 7 Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
- 8 J.-P. Charranne. Revue Generale des Chemins de Fer, 2006, № 149, p 44 – 51.
- 9 Высокоскоростной поезд ICE3 в международных перевозках / Железные дороги мира, Вып. № 9, 2006. – С. 30 – 38.
- 10 ТМ 6.5.00442 – 2011 Електрорухомий склад. Типова методика тягово-енергетичних випробувань.
- 11 Синчук О.Н., Мельник О.Е., Синчук И.О., Черная В.О., Ключка А.С. Влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на распределение токов тяговых двигателей системы электропривода постоянного тока рудничных электровозов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи Вип. № 3-4/2008 (4). – С. 59 – 62.