



Ефимов Денис Александрович

Совершенствование токоприемников на основе моделирования их взаимодействия с контактными подвесками

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО УрГУПС).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Галкин Александр Геннадьевич.

Официальные оппоненты:

Ли Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Дальневосточный государственный университет путей сообщения", кафедра "Системы электроснабжения", профессор;

Смердин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», доцент.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО РГУПС).

Защита состоится «18» декабря 2015 г. в 14–00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение грузо- и пассажиропотока – актуальная задача, стоящая перед железнодорожной отраслью РФ. Основным путем для ее решения – более широкое применение скоростного и тяжеловесного движения. Однако при этом повышается токовая нагрузка на системы энергоснабжения, тяговую сеть и токоприемники подвижного состава. Кроме того, при скоростном движении повышаются динамические усилия, возникающие между контактной сетью и токоприемниками. Все это приводит к увеличению износа контактных проводов и токосъемных пластин токоприемников. Развернутая длина контактных проводов в России составляет 145,5 тыс. км, из них 82 тыс. км электрифицированы на постоянном токе. При среднем сроке службы контактного провода на участках постоянного тока равном 34 года ежегодно необходимо заменять 2400 км провода. В результате ежегодные безвозвратные потери меди только на участках постоянного тока составляют 640 т. Металлокерамические контактные вставки в среднем необходимо менять через 40 тыс. км. При суточном пробеге электровоза 1000 км в год необходимо заменять контактные вставки 9 раз. Таким образом, помимо усиления систем энергоснабжения и тяговой сети встает вопрос о проектировании токоприемников для тяжеловесного и скоростного движения, обеспечивающих надежный и качественный токосъем с минимальным износом в паре трения «токоприемник – контактный провод». Наиболее экономически оправданный метод исследования качества токосъема это моделирование взаимодействия токоприемника с контактной подвеской.

Объект исследования. Взаимодействие токоприемников и контактных подвесок.

Предмет исследования. Метод оценки эффективности технических решений направленных на совершенствование характеристик и конструкций токоприемников с точки зрения влияния на износ контактного провода и токосъемных пластин.

Степень разработанности темы исследования. Работы по совершенствованию токоприемников и моделированию их взаимодействия с контактной подвеской велись: в ВНИИЖТе – Авотин Е.В., Беляев И.А., Власов И.И., Вологин В.А., Каландадзе Р.Ш., Миронос Н.В.; ДвГУПС – Ли В.Н.; МГУПСе – Брод Г.Н., Ерофеева М.М., Марквардт К.Г., Фрайфельд А.В.; ОмГУПСе – Горбань А.Н., Голубков А.С.,

Маслов Г.П., Михеев В.П., Павлов В.М., Сидоров О.А., Смердин А.Н.; ПГУПСе – Ан В.А., Плакс А.В.; РГУПСе – Семенов Ю.Г.; УКС – Кудряшов Е.В.; УрГУПСе – Веселов В.В., Галкин А.Г., Ефимов А.В., Паранин А.В. Вместе с тем, в существующих подходах к моделированию в недостаточной мере учтена возможность оценки влияния характеристик и конструкции токоприемников на их взаимодействие с контактными подвесками с точки зрения износа в паре трения «контактный провод – токосъемная пластина» (далее КППП).

Цели и задачи диссертационной работы. Целью исследования является снижение износа контактных проводов и токосъемных пластин токоприемников за счет совершенствования характеристик и конструкции токоприемников, а так же моделей токоприемников и контактных подвесок, позволяющих более полно использовать результаты моделирования в процессе проектирования токоприемника и оценивать их взаимодействие с точки зрения снижения износа контактного провода и токосъемных пластин токоприемника. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. ввести понятие «концепции обеспечения качества токосъема» и развить существующую концепцию с учетом износа контактных проводов и токосъемных пластин токоприемников;
2. разработать принцип регулирования нажатия токоприемника, позволяющий минимизировать износ контактных проводов и токосъемных пластин;
3. исследовать вольтамперные характеристики контактной пары «конечный элемент контактного провода – токосъемная пластина» с учетом времени ее существования, нажатия и протекающего через контакт тока;
4. усовершенствовать модель токоприемника с учетом влияния элементов его конструкции на взаимодействие с контактными подвесками и возможности определения износа контактных проводов и токосъемных пластин токоприемников;
5. усовершенствовать модель контактной подвески с целью обеспечения возможности определения износа контактных проводов и токосъемных пластин.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Введено понятие «концепция обеспечения качества токосъема» и существ-

вующая концепция дополнена новым показателем – коэффициентом эффективности мероприятия направленного на повышение качества токосъема.

2. Предложен принцип регулирования нажатия токоприемника, позволяющий минимизировать износ контактных проводов и токосъемных пластин токоприемников, за счет снижения рассеиваемой энергии в контактной паре.

3. Проведены эксперименты по определению вольтамперных характеристик контактной пары «конечный элемент контактного провода – токосъемная пластина», отличающиеся учетом времени ее существования.

4. Усовершенствована модель токоприемника путем представления его физическим телом с реальной кинематической схемой, несколькими степенями свободы и имеющим многоточечный контакт с контактными проводами, обеспечивающая возможность учета влияния элементов его конструкции на взаимодействие с контактной подвеской и определения распределения нажатия и рассеиваемой энергии по точкам контакта.

5. Усовершенствована модель контактной подвески путем учета изгибной жесткости проводов без увеличения размерности модели, учета влияния на форму кривой провисания контактных проводов силы Ампера и длины конечного элемента контактного провода, позволяющая определить распределение нажатия и рассеиваемой энергии по точкам контакта.

Теоретическая и практическая значимость работы. В результате исследования введено понятие «концепция обеспечения качества токосъема». Существующая концепция была дополнена новым показателем – коэффициент эффективности мероприятия направленного на повышение качества токосъема.

Был предложен метод исследования вольтамперных характеристик контактной пары «конечный элемент контактного провода – токосъемная пластина», учитывающий время ее существования.

Предложенный принцип регулирования нажатия токоприемника, позволяет обеспечить минимизацию износа контактных проводов и токосъемных пластин.

Усовершенствованные модели токоприемника и контактной подвески позволяют более полно оценить показатели качества токосъема с учетом развития кон-

цепции обеспечения качества токосъема.

Разработанные в результате исследований теоретические и методологические рекомендации были реализованы при проектировании отечественного тяжёлого двухполозного асимметричного токоприёмника ТА1-СТМ140 разработки ОАО «Синара – Транспортные Машины».

Методология и методы исследования. В ходе работы над исследованием использовались разделы теоретической механики – кинестатика, аналитическая статика, динамика механической системы. Составление модели взаимодействия токоприемников с контактными подвесками было выполнено на основе метода конечных элементов. При моделировании применен язык программирования Matlab. Для решения дифференциальных уравнений движения использовался метод Рунге – Кутты. Для нахождения электрической составляющей энергии, вносимой в контактную пару КПП, выполнено экспериментальное определение ее вольтамперных характеристик. Обработка результатов экспериментов производилась при помощи программы Microsoft Excel. В своей работе автор опирался на труды российских и иностранных ученых в области электрификации железнодорожного транспорта.

Положения, выносимые на защиту.

1. Введение понятия «концепции обеспечения качества токосъема» и дополнение существующей концепции новым показателем – коэффициентом эффективности мероприятия направленного на повышение качества токосъема.
2. Принцип регулирования нажатия токоприемника, позволяющий уменьшить износ контактных проводов и токосъемных пластин токоприемников, за счет минимизации рассеиваемой энергии в контактной паре КПП.
3. Результаты эксперимента по определению вольтамперных характеристик контактной пары «конечный элемент контактного провода – токосъемная пластина» учитывающего время ее существования.
4. Усовершенствование модели токоприемника, обеспечивающее возможность учета влияния элементов его конструкции на взаимодействие с контактной подвеской и определение распределения нажатия и рассеиваемой энергии по точкам контакта.
5. Усовершенствование модели контактной подвески путем учета изгибной

жесткости проводов без увеличения размерности модели, учета влияния на форму кривой провисания контактных проводов силы Ампера и длины конечного элемента контактного провода, позволяющее учесть распределение нажатия и рассеиваемой энергии по точкам контакта.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждена:

- обоснованным применением признанных и апробированных теорий, методов исследований, а также апробацией результатов работы на конференциях и публикацией работ в рецензируемых изданиях и полученными патентами;
- проверкой разработанных математических моделей по методике, приведенной в Европейском стандарте EN 50318;
- аргументированным использованием в математических моделях гипотез и допущений.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на конференциях: научно-практическая конференция, посвящённая Дню энергетика «Перспективы развития электроэнергетики» (УрГУПС, г. Екатеринбург 2009г.); 7-я межвузовская научно-техническая конференция «Молодые ученые – транспорту» (г. Екатеринбург 2010г.); научно-практическая конференция, посвящённая Дню энергетика «Современное оборудование и системы диагностики в электроэнергетике» (УрГУПС, г. Екатеринбург 2011г.); всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвящённая 135-летию Свердловской железной дороги «Транспорт Урала» (УрГУПС, г. Екатеринбург 2013г.).

Результаты диссертационного исследования были доложены и обсуждены на расширенном заседании кафедры «Электроснабжение транспорта» УрГУПС (протокол № 11 от 24.03.2015).

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные в результате исследований теоретические и методологические решения были использованы при проектировании отечественного тяжёлого двухполосного асимметричного токоприёмника ТА 1-СТМ 140 разработки ОАО «Синара – Транспортные Машины».

Публикации. Основные положения диссертационной работы и научные ре-

зультаты опубликованы в девяти печатных работах, в том числе семь статей опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ. В результате диссертационного исследования получен патент на изобретение, два патента на полезную модель, свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 111 источников, и трех приложений. Основной текст диссертации составляет 151 страницу, включая три таблицы и 64 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации показана актуальность темы исследования, степень ее разработанности, определены объект и область исследований, цели и задачи работы, отмечены положения, обладающие научной новизной, оценена теоретическая и практическая значимость работы, описаны методология и методы исследования, перечислены положения, выносимые на защиту. Так же в введении оценена степень достоверности результатов.

В первой главе по результатам анализа литературы сделаны выводы, что качество токосъема характеризуется тремя составляющими:

- надежностью токосъема;
- величиной износа контактных проводов и токосъемных пластин;
- влиянием на смежные линии связи.

Повышение надежности токосъема решается путем обеспечения условий, при которых элементы системы КПП не выходят за установленные габариты и усилия в них не превышают допустимых значений. Проблема снижения износа контактирующих элементов и вызванных им безвозвратных потерь материалов контактной пары, а так же проблема влияния на смежные линии связи в настоящее время решается стабилизацией контактного нажатия

$$P_T = P_0 \pm P_{mp} + P_{aэп} + m_{np} \frac{d^2 y(t)}{dt^2},$$

где P_0 – нажатие, создаваемое приводом токоприемника, Н;
 $P_{тр}$ – сила трения в шарнирах, приведенная к поверхности полоза, Н;
 $P_{аэр}$ – аэродинамическая подъемная сила токоприемника, Н;
 $m_{пр}$ – приведенная масса токоприемника, кг;
 $y(t)$ – ордината траектории точки контакта в функции времени, м.

Все используемые в настоящее время показатели качества токосъема отражают степень стабильности контактного нажатия. Их целесообразно оценивать на этапе проектирования токоприемника и контактной подвески при помощи моделирования их взаимодействия. Параметры, учитываемые при моделировании взаимодействия, приведены на семантической схеме (рисунок 1). Связи, обозначенные штриховыми линиями, исследованы в диссертационной работе.

Во второй главе автором введено понятие «концепция обеспечения качества токосъема». Концепция включает в себя совокупность критериев качества токосъема, которые определяют требования к взаимодействию контактных подвесок и токоприемников. Существующая в настоящее время концепция обеспечения качества токосъема заключается в стабилизации контактного нажатия. Предлагаемое развитие концепции обеспечения качества токосъема вытекает из условия представления износа двумя составляющими – электрической и механической, которые зависят от силы взаимодействия контактирующих элементов. Характер влияния этой силы на составляющие износа противоположный. В целом влияние нажатия на износ представляет собой в общем случае U -образную случайную функцию, зависящую от тока через контактную пару, скорости движения и нажатия – $\Delta M(I, V, P_T)$. Параметры распределения этой случайной величины могут быть получены методом определения моментов системы.

Так среднее значение износа равно

$$\begin{aligned} \overline{\Delta M}(I, V, P_T) = \Delta M(\bar{I}, \bar{V}, \bar{P}_T) + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \overline{\Delta M}}{\partial I^2} \sigma^2(I) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \overline{\Delta M}}{\partial V^2} \sigma^2(V) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \overline{\Delta M}}{\partial P_T^2} \sigma^2(P_T), \end{aligned} \quad (1)$$

где σ^2 – дисперсия соответствующей переменной.



Рисунок 1 – Параметры, учитываемые при моделировании взаимодействия контактного провода и токоприемника в статическом и динамическом режимах

Из уравнения (1) видно, что при стабильном нажатии четвертое слагаемое в правой части уравнения становится равным нулю. Ток и скорость являются для контактной пары внешними факторами, и регулировать их величину с целью уменьшения износа нельзя. Однако эти параметры являются относительно стабильными, так как зависят от профиля пути и массы поезда. Очевидно, что для каждой пары значений тока и скорости на участках стабильности их значений можно определить нажатие обеспечивающее минимум износа контактирующих элементов за счет уменьшения и первого члена формулы (1). Деструктивные процессы (износ) определяются величиной энергии, вводимой в контактную пару, которая в свою очередь зависит от протекающего тока, скорости движения и нажатия в точке контакта. Эта зависимость в существующих работах оценена только качественно и представляет собой U -образную кривую в зависимости от нажатия. Ток, протекающий через контактную пару, определяет электрическую составляющую энергии, вносимую в контакт. Скорость движения определяет механическую составляющую. Нажатие же влияет на обе составляющие рассеиваемой энергии. Поэтому концепция обеспечения каче-

ства токосъема расширена и автором предложен новый показатель качества токосъема – коэффициент эффективности мероприятия направленного на повышение качества токосъема

$$k_3 = \left(1 - \frac{W_m}{W_u}\right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где W_u – энергия, вносимая в контактную пару до введения мероприятия, Дж;
 W_m – энергия, вносимая в контактную пару после мероприятия, Дж.

Третья глава посвящена экспериментальному определению вольтамперных характеристик контактной пары КПП. Сложность процессов, происходящих в сильноточном скользящем контакте, не позволяет аналитически определить его вольтамперные характеристики при различных нажатиях в контакте, токе через него и скорости его движения, поэтому потребовалось их экспериментальное определение. Автором был предложен подход, при котором время протекания тока через контактную пару соизмеримо со временем взаимодействия конечного элемента контактного провода и токосъемной пластины во время движения. Схема экспериментальной установки изображена на рисунке 2. Полученные зависимости приведены на рисунке 3. На рисунке 2: 1 – талреп; 2 – пружина; 3 – груз; 4 – контактный провод; 5 – измерительные щупы; 6 – токосъемная пластина; G – генератор сигналов Г6-28; GB – батарея аккумуляторная 36 В; P – динамометр электронный АЦДУ-0,5 И-1; PG1, PG2 – осциллографы GDS-2102; QF – выключатель автоматический; RS – шунт измерительный 75 мВ, 300 А; VS – тиристор Т-500.

Сопротивление контактной пары аппроксимировано степенным полиномом

$$r = a_{00} + a_{10}P_T + a_{01}Q + a_{20}P_T^2 + a_{11}P_TQ + a_{02}Q^2, \quad (3)$$

где P_T – нажатие в контактной паре, Н;

Q – количество электричества, прошедшее через контактную пару, А·с;

$a_{00} \dots a_{02}$ – коэффициенты полинома.

Полученная зависимость (3) позволяет определить рассеиваемую энергию

$$W = \mu P_T S_\delta + \frac{S_\delta \left(\frac{Q}{S_\delta}\right)^2}{V} (a_{00} + a_{10}P_T + a_{01}Q + a_{20}P_T^2 + a_{11}P_TQ + a_{02}Q^2), \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения контактной пары;

S_δ – ширина токосъемной пластины, м;

V – скорость движения, м/с.

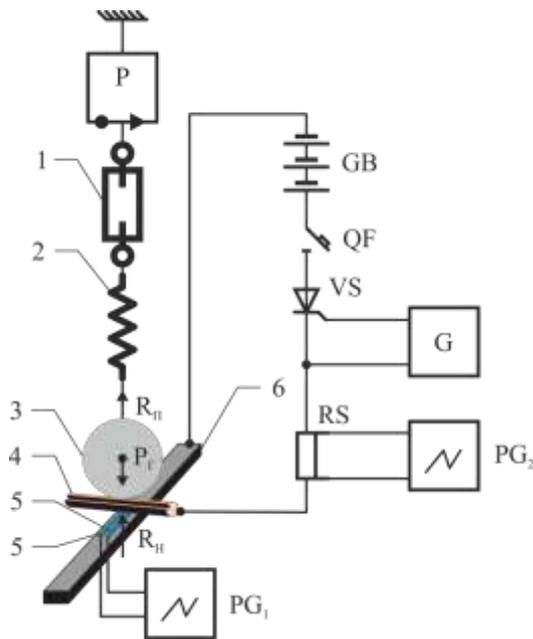


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки

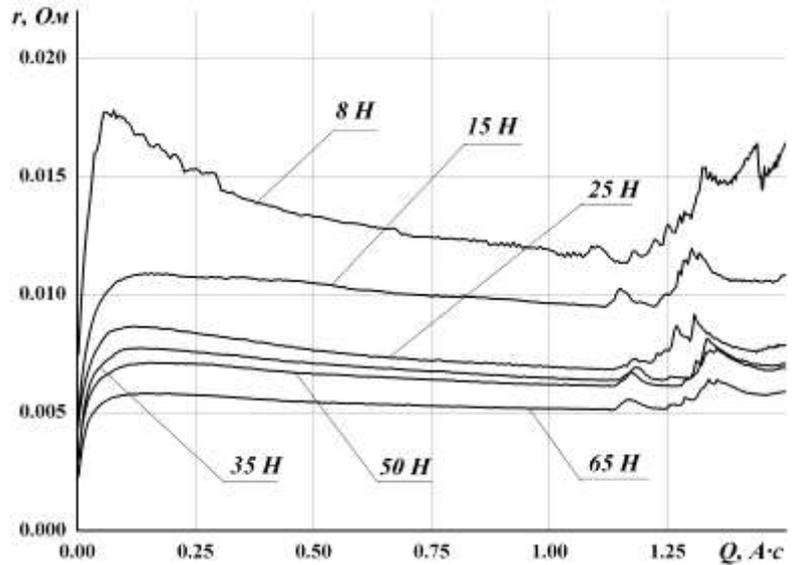


Рисунок 3 – Сопротивление контактной пары «контактный провод МФ-100 – токосъемная пластина» при различных нажатиях

Для определения оптимального нажатия в контактной паре возьмем частную производную по нажатию от рассеиваемой энергии (4) и приравняем ее к нулю

$$\frac{d_{P_T} W}{dP_T} = \mu S_\delta + \frac{Q^2 V (a_{10} + 2a_{20} P_T + a_{11} Q)}{S} = 0,$$

$$P_{opt} = -\frac{1}{2} \frac{\mu S_\delta^2 + a_{10} Q^2 V + a_{11} Q^3 V}{a_{20} Q^2 V}. \quad (5)$$

На рисунке 4 приведены графики нажатия, соответствующего минимальной рассеиваемой энергии в контактной паре КППП для различных скоростей движения. Коэффициент эффективности регулирования нажатия, рассчитанный по формуле (2), приведен на рисунке 5. В работе было определено снижение рассеиваемой энергии в контактной паре КППП при регулировании нажатия токоприемника по закону (5) с учетом результатов тяговых расчетов для тестового участка. Оно составило 25%, что позволяет говорить о соответствующем снижении износа контактного провода и токосъемных пластин.

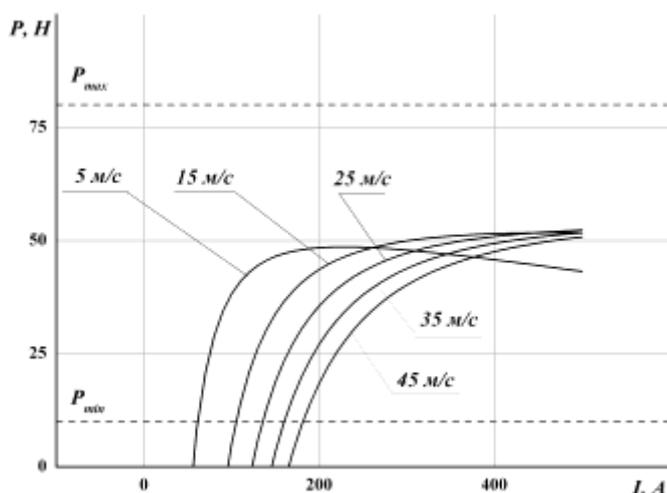


Рисунок 4 – Оптимальное нажатие токоприемника

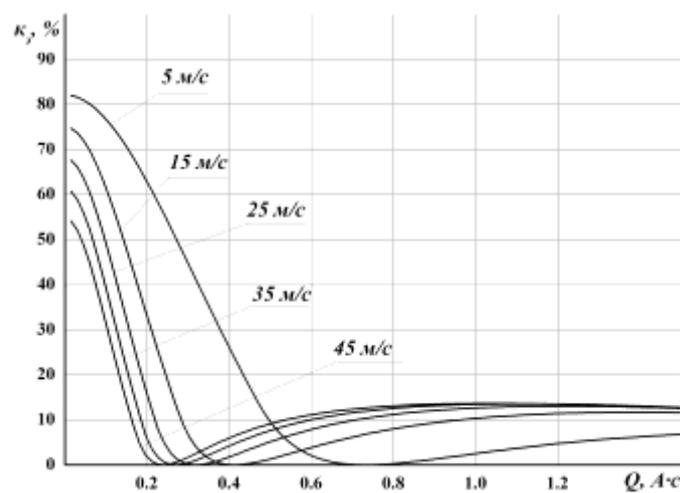


Рисунок 5 – Коэффициент эффективности регулирования нажатия токоприемника

Четвертая глава посвящена вопросам моделирования взаимодействия контактной подвески и токоприемника. Предложенная в работе методика, представления элементов конструкции токоприемника, в виде физических тел, обладающих реальными геометрическими размерами, массой, моментом инерции и несколькими степенями свободы позволяет учесть влияние их характеристик на взаимодействие токоприемника с контактной подвеской. При моделировании работы двухполозного токоприемника при его взаимодействии с контактной подвеской можно выделить три системы узлов:

- система рам с тягами и приводом;
- каретка с системой рычагов и упругими элементами (пружинами);
- полозы токоприемника с токосъемными пластинами.

Модель токосъемного устройства изображена на схеме 6, на ней приняты следующие обозначения. O – центр масс полоза, $\varphi_x(t)$ – угол поворота полоза вокруг оси « x », $\varphi_z(t)$ – угол поворота полоза вокруг оси « z », V – скорость движения токоприемника, n – номер токосъемной пластины, a_{11} – расстояние по оси « z » между центром масс полоза и первым контактным проводом, a_{12} – расстояние по оси « z » между центром масс полоза и вторым контактным проводом, b_1 – расстояние по оси « x » между токосъемными пластинами 1 и 2, b_3 – расстояние по оси « x » между токосъемными пластинами 2 и 3, S – расстояние по оси « y » между полозом и кареткой, L_n – длина полоза, M_{zi} – момент инерции полоза относительно оси « z », M_z^{mp} – момент трения

полоза относительно оси «z», M_x^u – момент инерции полоза относительно оси «x», M_x^{mp} – момент трения полоза относительно оси «x», P_{rkn} – сила реакции контактного провода, P_{rkn}^{mp} – сила трения контактного провода.

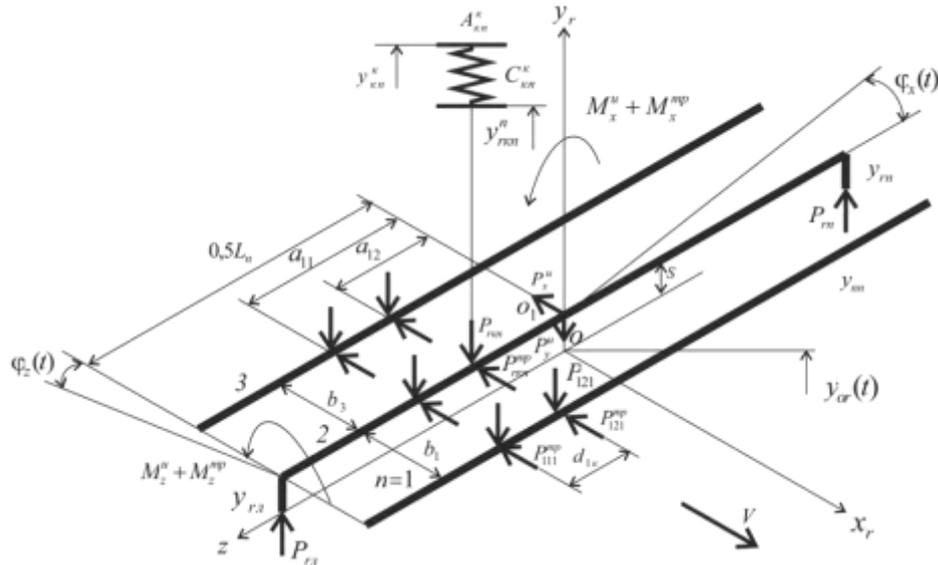


Рисунок 6 – Модель полоза с тремя токосъемными пластинами, взаимодействующего с двумя контактными проводами

В исследовании разработаны методики расчета статической характеристики рам токоприемника, статической характеристики верхнего узла, привода токоприемника с регулируемой статической характеристикой, подход к составлению модели токосъемного устройства и динамической модели токоприемника в целом.

Оценка влияния элементов конструкции токоприемника на износ в точках контакта предъявляет определенные требования и к модели контактной подвески. Для определения распределения нажатия по точкам контакта необходимо учитывать изгибную жесткость контактного провода, т.к. она оказывает существенное влияние на геометрию провода вблизи точек приложения сосредоточенных сил. Автором показано, что для этого расстояние между конечными элементами в модели должно быть не более 0,1 м. Кроме этого на расстояние между конечными элементами накладываются ограничения размеры токосъемных пластин. Расстояние между конечными элементами провода должно быть не более ширины токосъемной пластины и расстояния между токосъемными пластинами. Малое расстояние между конечными элементами приводит к увеличению числа дифференциальных уравнений, описывающих контактную подвеску. Применение в качестве конечного элемента стержня,

обладающего массой и моментом инерции, для учета изгибной жесткости приведет к еще большему увеличению размерности модели. Автором предложен способ учета изгибной жесткости проводов не изменяющий размерность модели. Он основан на добавлении перерезывающей силы, учитывающей изгибную жесткость провода. Например, уравнение равновесия третьего или более по счету от струны, фиксатора или сосредоточенной массы конечного элемента первого контактного провода при этом имеет вид

$$-y_{i-2}^{\kappa 1} A_2^{\kappa 1} + y_{i-1}^{\kappa 1} A_1^{\kappa 1} - y_i^{\kappa 1} A_0^{\kappa 1} + y_{i+1}^{\kappa 1} A_1^{\kappa 1} - y_{i+2}^{\kappa 1} A_2^{\kappa 1} = m_i^{\kappa 1} g,$$

где $A_2^{\kappa 1} = \frac{EJ}{C^3}$; $A_1^{\kappa 1} = \frac{4EJ}{C^3} + \frac{K}{C}$; $A_0^{\kappa 1} = \frac{6EJ}{C^3} + \frac{K}{C}$;

E – модуль упругости контактного провода, Па;

J – момент инерции сечения контактного провода, м⁴;

C – расстояние между конечными элементами контактного провода, м;

K – натяжение контактного провода, Н;

$y_i^{\kappa 1}$ – ордината конечного элемента в i -м вертикальном сечении, м;

$m_i^{\kappa 1}$ – масса конечного элемента в i -м вертикальном сечении, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с.

Дифференциальное уравнение движения того же конечного элемента с учетом изгибной жесткости провода запишется

$$\frac{d^2 y_i^{\kappa 1}}{dt^2} = \frac{1}{m_i} \left(M_i^c \left(y_i^{\kappa 1} \right) - N_i^c + F_{vi} + F_{ci} + F_{ai} + P_i^{111} + P_i^{112} + P_i^{113} + P_i^{211} + P_i^{212} + P_i^{213} \right),$$

где $M_i^c \left(y_i^{\kappa 1} \right)$, N_i^c – соответственно левая и правая часть уравнения равновесия;

F_{vi} – сила вязкого трения, Н;

F_{ci} – сила сухого трения, Н;

F_{ai} – сила аэродинамического сопротивления, Н.

$P_i^{111} \dots P_i^{213}$ – нажатие в точках контакта, Н.

Помимо влияния изгибной жесткости на распределение нажатия между точками контакта на участках постоянного тока с двумя контактными проводами при составлении уравнения для конечного элемента контактного провода, удерживаемо-

го фиксатором, можно учесть силы, возникающие при электромагнитном взаимодействии контактных проводов (рисунок 7). Учет силы Ампера позволит более точно определить местный износ контактного провода под фиксатором.

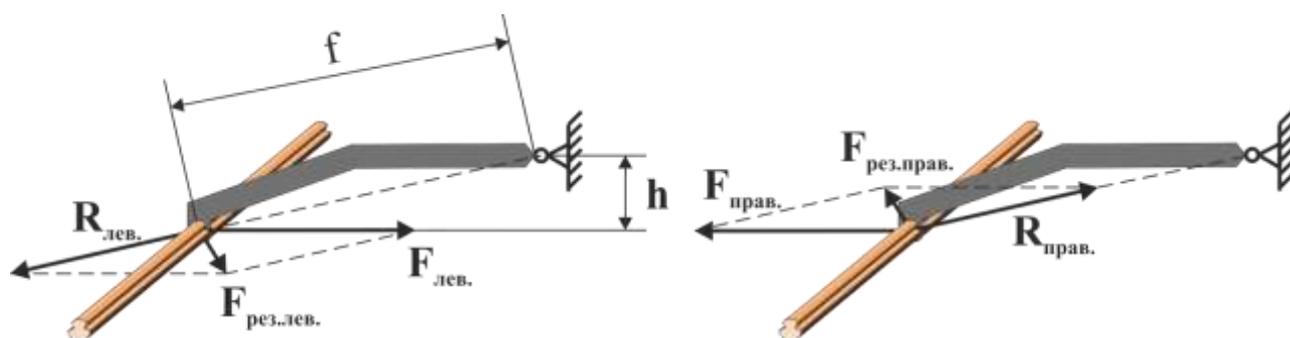


Рисунок 7 – Силы, действующие на фиксаторный узел при протекании тока по контактным проводам

Изменение величины реакции фиксатора на нажатие токоприемника можно определить по формуле

$$\Delta_I = P_\phi \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{h}{f} \right). \quad (6)$$

P_ϕ в формуле (6) – сила взаимодействия контактных проводов в точке фиксации

$$P_\phi = 2 \frac{dz(L_\phi)}{dx} K,$$

где x, z – соответственно абсцисса и аппликата траектории изгиба контактного провода в системе координат с началом в середине пролета, м;

L_ϕ – расстояние от фиксатора до точки «слипания» контактных проводов, м.

L_ϕ можно определить из формулы

$$z(x) = a_n \left(\frac{x}{D} \arctan \frac{x}{D} + 0.5 \ln \left(1 + \left(\frac{x}{D} \right)^2 \right) \right) + 0.5A,$$

где a_n – расстояние между контактными проводами, м;

A – ширина контактного провода в плане, м.

Параметр D равен

$$D = \sqrt{\frac{Aa_n K}{p}},$$

где $p = \frac{I^2 \mu_0}{8\pi}$;

I – ток по контактным проводам, А;

μ_0 – магнитная проницаемость воздуха ($\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м).

В соответствии с разработанными в диссертации решениями автором на языке программирования Matlab была написана программа взаимодействия токоприемника и контактной подвески. На рисунках 8 и 9 приведены результаты моделирования динамического взаимодействия асимметричного двухполозного токоприемника с тремя токосъемными пластинами на каждом полوزه и цепной одинарной компенсированной полукосой контактной подвески со смещёнными простыми опорными струнами. Результаты моделирования приведены для одного пролета. Скорость движения – 140 км/ч; нажатие – 120 Н. Полученное в результате моделирования распределение нажатия по точкам контакта можно использовать совместно с тяговыми расчетами для определения рассеиваемой энергии и оценки износа в контактных парах.

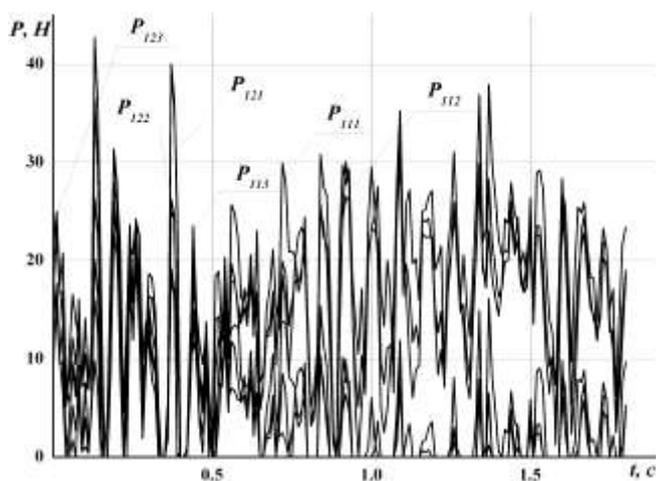


Рисунок 8 – Нажатие в точках контакта первого полюза

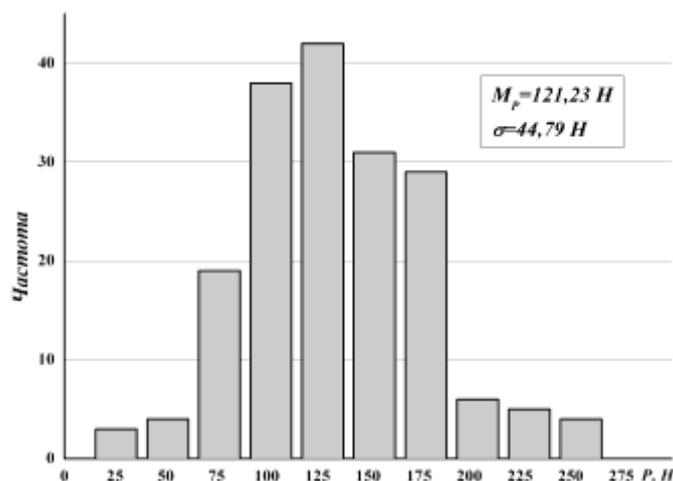


Рисунок 9 – Гистограмма частот для выборки суммарных нажатий токоприемника

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования были достигнуты поставленные цели, а именно, предложены новые подходы к моделированию взаимодействия контактной подвески и токоприемника. Их использование позволит учитывать физические процессы в паре трения «контактный провод – токосъемная пластина», физические свойства токоприемника и проводов контактной сети при моделировании. Что дает возможность более полно использовать результаты моделирования в процессе проектирования токоприемника, а так же оценивать взаимодействие токоприемника с контактной подвеской с точки зрения качества токосъема.

В ходе работы были решены следующие задачи:

1. предложено развитие концепции обеспечения качества токосъема с учетом рассеиваемой энергии в контактной паре КППП;
2. был разработан принцип регулирования нажатия токоприемника, учитывающий термодинамические процессы в паре трения КППП;
3. проведено исследование вольтамперных характеристик контактной пары КППП с учетом параметров взаимодействия;
4. усовершенствована модель токоприемника путем представления его как физическое тело с реальной кинематической схемой, несколькими степенями свободы и имеющим многоточечный контакт с контактными проводами, обеспечивающая возможность учета влияния элементов его конструкции на взаимодействие с контактной подвеской и определения рассеивания энергии в контакте, как показателя качества токосъема;
5. усовершенствована модель контактной подвески путем учета изгибной жесткости проводов, силы Ампера, определения необходимой длины и типа конечного элемента, обеспечивающего определение потерь энергии в контактной паре, как показателя качества токосъема.

Вопросы, рассмотренные в диссертации, опубликованы в ведущих российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ.

1. Ефимов, Д.А. Учет изгибной жесткости контактного провода в моделировании контактной подвески / Д.А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2009. – №1. – С. 79–82.
2. Ефимов, Д.А. Расчёт распределения тока в контактном проводе и в полوزه токоприёмника при токосъёме / А.В. Паранин, Д.А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2009. – №4. – С. 81–84.
3. Ефимов, Д.А. Исследование влияния тягового тока на работу фиксаторов / А.В. Ефимов, Д.А. Ефимов, И.Г. Дутов // Транспорт Урала. – 2012. – № 3. – С. 77–80.
4. Ефимов, Д.А. Оптимизация термодинамических процессов в паре трения «токоприемник – контактный провод» / А.В. Ефимов, Д.А. Ефимов, А.В. Паранин // Транспорт Урала. – 2013. – № 4. – С. 79–82.
5. Ефимов, Д.А. Моделирование чистого контакта между контактными прово-

дом и токосъемной пластиной в статике методом конечных элементов / А.В. Паранин, А.В. Ефимов, Д.А. Ефимов // Известия Транссиба. – 2014. – № 1. – С. 57–67.

6. Ефимов, Д.А. Определение параметров контактной пары «токоприемник – контактный провод» / Д.А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2014. – № 4. – С. 72–75.

7. Ефимов, Д.А. Двойной гибкий фиксатор контактной подвески / И.Г. Дутов, А.В. Ефимов, Д.А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2014. – № 4. – С. 63–68.

По результатам работы получены патенты и свидетельства.

1. Пат. 2485656 Российская Федерация, МПК В 60 L 5/00. Способ подогрева проводов контактной подвески / Ефимов А.В., Паранин А.В., Ефимов Д.А.; заявитель и патентообладатель Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС). – № 2012111289/07; заявл. 23.03.2012; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17 (II ч.). – 6 с: ил.

2. Пат. 124478 Российская Федерация, МПК В 60 L 5/00. Токоприемник транспортного средства / Ефимов А.В., Галкин А.Г., Ефимов Д.А., Паранин А.В.; заявитель и патентообладатель Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС). – № 2012130080/11; заявл. 16.07.2012; опубл. 27.01.2013, Бюл. № 3. – 2 с: ил.

3. Пат. 130922 Российская Федерация, МПК В 60 L 5/00. Токоприемник транспортного средства / Ефимов Д.А.; заявитель и патентообладатель Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС). – № 2013101624/11; заявл. 11.01.2013; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22. – 4 с: ил.

4. Свидетельство № 2012618529 Российская Федерация. Моделирование взаимодействия контактной подвески и токоприемника, представленного как физическое тело, с учетом изгибной жесткости проводов и распределением контактного нажатия между точками контакта: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ефимов Д. А., Ефимов А. В., Галкин А. Г., Паранин А. В; заявитель и правообладатель Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС). – № 2012616654; заявл. 06.08.2012; зарегистр. 19.09.2012. – 3 с.

ЕФИМОВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОКОПРИЕМНИКОВ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КОНТАКТНЫМИ
ПОДВЕСКАМИ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Подписано к печати 14.10.2015

Формат бумаги 60 x 84 1/16

Объем усл. печ. л. 1,1

Тираж 100 экз.

Заказ № _____