

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТОКОПРИЕМНИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

На железных дорогах мира для оценки состояния контактных подвесок и процесса взаимодействия их с токоприемниками электроподвижного состава (ЭПС) регулярно проводятся испытательные поездки с применением новейших методов исследования и анализа процесса токосъема.

Например, в Японии для выявления неисправностей путевой структуры, контактной сети, устройств сигнализации и связи или выхода их количественных показателей за пределы допустимых норм используются современные измерительные поезда серии «0». В Германии для оценки состояния контактной сети применяются измерительные токоприемники с тензометрическими и оптическими полозами.

В Российской Федерации нет специальных измерительных поездов, для оценки качества взаимодействия токоприемника с контактной сетью применяются автоматизированный диагностический комплекс контроля состояния технических объектов железнодорожной инфраструктуры АДК-И «Эра», вагоны-лаборатории контактной сети (ВИКС) и измерительные токоприемники, разработанные в Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС) [1].

Применение специального подвижного состава для испытаний устройств токосъема является экономически затратным мероприятием, особенно в случае использования высокоскоростного электропоезда «Сапсан» для испытательных поездок на линии Москва – Санкт-Петербург.

Трудности применения ВИКСа и АДК-И «Эра» связаны, прежде всего, с тем, что установленные на них токоприемники, используемые для проведения измерений, не являются типовыми для современного скоростного ЭПС. Кроме того, на железных дорогах РФ применяются различные виды контактных подвесок [2]. Тем самым исключается возможность учитывать особенности скоростных ассиметричных полупантографов, отличающихся длинами рычагов, приведенными массами, силами сухого и

вязкого трения, аэродинамическими характеристиками.

Проведение испытаний перспективных контактных подвесок на скоростных участках затруднительно и чревато возможными задержками, влияющими на график движения поездов.

С помощью универсального измерительного токоприемника (УИТ), разработанного в ОмГУПСе и позволяющего в широких пределах измерять такие основные параметры токосъема, как контактное нажатие, ускорения плоскопараллельных перемещений и крутильных колебаний полоза, снимаемый ток и температуру контактных пластин, существует возможность реализовать параметры различных высокоскоростных токоприемников путем изменения масс его элементов, сил трения, длин рычагов. Эта возможность ограничивается только заложенной в него кинематической схемой [3].

Для снижения загрузки скоростных полигонов железных дорог целесообразно применять комплексный подход для определения требуемых показателей взаимодействия токоприемников с контактными подвесками [4, 5]. Так, наряду с экспериментальными поездками, в ОмГУПСе активно используется математическое моделирование системы токосъема и ее элементов.

Модель, созданная на основе нейросетевых технологий с учетом данных экспериментальных поездок, позволяет получить статистически достоверные значения характеристик токосъема (среднеквадратичное отклонение (СКО) контактного нажатия, среднее значение и СКО высотного положения токоприемника и т.д.), а также с достаточной точностью определить максимальное, минимальное и среднее контактное нажатие.

Например, для подбора рациональных параметров скоростных токоприемников ЭПС с помощью компьютерной модели в широком диапазоне скоростей движения, на разных высотах подвеса контактного провода и т.д. достаточно обучающей выборки, полученной по специально разработанной в ОмГУПСе методике в ходе

нескольких испытательных поездок. Закладывая результаты таких выборок, определенных для разных типов токоприемников, можно получить параметры взаимодействия с перспективными контактными подвесками на реконструируемых полигонах [6]. Для верификации конечных результатов с помощью натурального эксперимента можно будет использовать УИТ с реализованными на нем параметрами и характеристиками моделируемого токоприемника.

С помощью УИТ и его модели возможна оптимизация параметров типовых токоприемников для эксплуатации на рассматриваемом перегоне.

В настоящее время в ОмГУПСе ведутся работы по созданию математической модели УИТ в программе MatLab SimMechanics.

Исходными данными для моделирования УИТ в MatLab являются:

- трехмерная модель геометрии токоприемника, выполненная в CAD-системе SolidWorks в виде сборки, т.е. системы твердых тел с заданными степенями свободы и массоинерционными характеристиками;

- параметры упругих и диссипативных элементов конструкции;

- функции времени, описывающие закон движения основания токоприемника [7].

Основные положения и допущения, принятые в модели:

1. УИТ является системой шарнирно соединенных твердых абсолютно жестких тел; инерционные характеристики гибких токопроводящих элементов учтены с помощью приведенных масс элементов модели.

2. Силы трения в шарнирах являются функциями сил реакций и скоростей элементов измерительного токоприемника.

3. Взаимодействие полза токоприемника с контактной сетью происходит в точке, принадлежащей прямой на поверхности полза.

4. В точке контакта к ползу прикладывается сила, величина которой зависит от взаимного положения полза и контактной сети.

5. Массой основания УИТ пренебрегаем; модель динамики основания задана законом движения в трехмерном пространстве:

$$X = A_{x1} \cos(\omega_{x1}t + \phi_{x1}) + A_{x2} \cos(\omega_{x2}t + \phi_{x2}) + A_{x3} \cos(\omega_{x3}t + \phi_{x3})$$

$$Y = A_{y1} \cos(\omega_{y1}t + \phi_{y1}) + A_{y2} \cos(\omega_{y2}t + \phi_{y2}) + A_{y3} \cos(\omega_{y3}t + \phi_{y3})$$

$$Z = A_{z1} \cos(\omega_{z1}t + \phi_{z1}) + A_{z2} \cos(\omega_{z2}t + \phi_{z2}) + A_{z3} \cos(\omega_{z3}t + \phi_{z3})$$

Методика создания модели УИТ основана на следующем алгоритме:

а) адаптация сборки SolidWorks для дальнейшего создания математической модели. При

этом все элементы конструкции объединены в минимально необходимое количество твердых тел, упорядочены связи между элементами, добавлены элементы, имитирующие участки контактного провода в областях контакта с ползками токоприемника;

б) экспорт подготовленной сборки из SolidWorks средствами SimMechanics Link в определенный набор файлов;

в) получение модели УИТ в виде mdl-файла, которая подвергается дальнейшей модификации и настройке. В частности, необходима коррекция связей между блоками SimMechanics, изменение типов шарниров, удаление лишних и добавление необходимых локальных систем координат (CS), а так же добавление подсистем учета сил инерции, трения в шарнирах, задания начальных условий.

Элементы УИТ в модели представлены блоками Simulink/SimMechanics типа «Body» (рис. 1, а).

Присоединения любых других блоков модели к блокам типа «Body» происходит с помощью локальных систем координат (CS), которые отображаются на графическом изображении блока и настраиваются в окне свойств. Там же настраиваются значения параметров массы и инерции, их единицы измерения.

Соединение блоков типа «Body» между собой осуществляется с помощью блоков-шарниров различных типов – «Spherical», «Revolute», «Prismatic», «Weld», обладающих различным количеством степеней свободы. Графические изображения блоков-шарниров приведены на рис. 1, б.

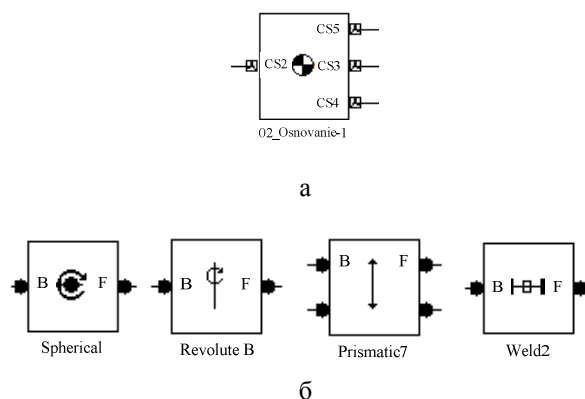


Рис. 1. Основные элементы модели в среде Matlab SimMechanics: а – графическое изображение блока типа «Body»; б – графическое изображение блоков-шарниров

Пример соединения двух элементов измерительного токоприемника с помощью сферического шарнира приведен на рис. 2. Пример

шарнира с одной степенью свободы с изменяющимся в зависимости от скорости моментом трения приведен на рис. 3.

В состав модели УИТ входят упругие элементы, жесткость которых задается в виде коэффициентов жесткости, и демпфирующие элементы, задаваемые коэффициентами демпфирования. Такие элементы реализуются с помощью блоков типа «Joint Spring & Damper» (рис. 4), подключаемых к порту соответствующего блока-шарнира.

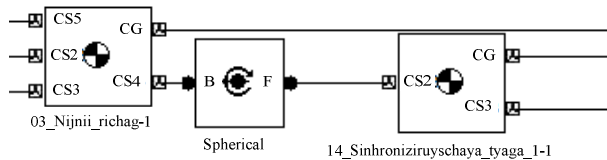


Рис. 2. Соединение с помощью сферического шарнира

Основные программные модули, реализующие методику моделирования, представлены на рис. 5.

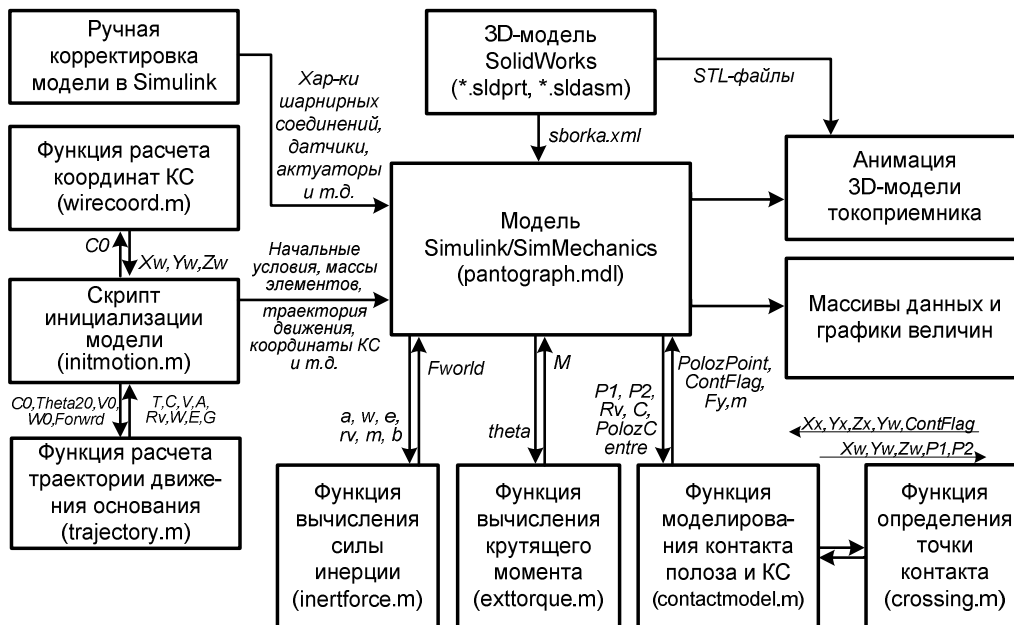


Рис. 5. Программная реализация модели

Для настройки модели УИТ под конкретный тип электрического подвижного состава существует возможность изменения внутренних и внешних параметров (рис. 6).

Результатами расчета являются определенные в каждый момент модельного времени значения координат, скоростей, ускорений элементов токоприемника, сил реакций и моментов в шарнирах (рис. 7).

Известны следующие варианты моделирования взаимодействия УИТ с контактной сетью:

1) Отдельно созданная и просчитанная модель контактной сети передает в модель УИТ, реализованную в другой программе, результаты

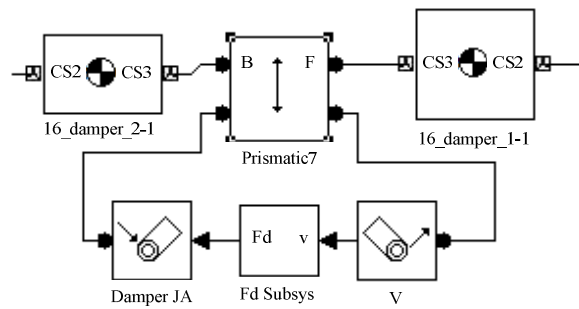


Рис. 3. Шарнир с характеристиками, изменяющимися в зависимости от скорости

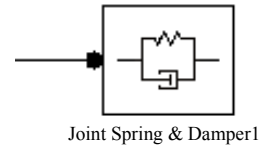


Рис. 4. Графическое изображение блока типа «Joint Spring & Damper»

расчета. В свою очередь, вслед за расчетом шага модели измерительного токоприемника характеристики передаются в модель контактной сети для ее дальнейшей работы после синхронизации времени моделей.

Данный вариант имеет ряд недостатков, в частности:

- затруднительна взаимосвязь двух моделей, выполненных в разных программных пакетах;
- существенно увеличивается время расчета;
- на этапе моделирования взаимодействия необходимо постоянно синхронизировать две отдельные модели;

2) Модель контактной сети создается в той же программной среде и рассчитывается тем же методом, что и модель УИТ. Обмен данными происходит по мере их изменения.

При моделировании контактной подвески в среде MatLab Simulink получается значитель-

ное число конечных элементов, которое несопоставимо с числом конечных элементов измерительного токоприемника, что приводит к неоправданному увеличению числа элементов контактной сети.



Рис. 6. Входные параметры модели универсального измерительного токоприемника

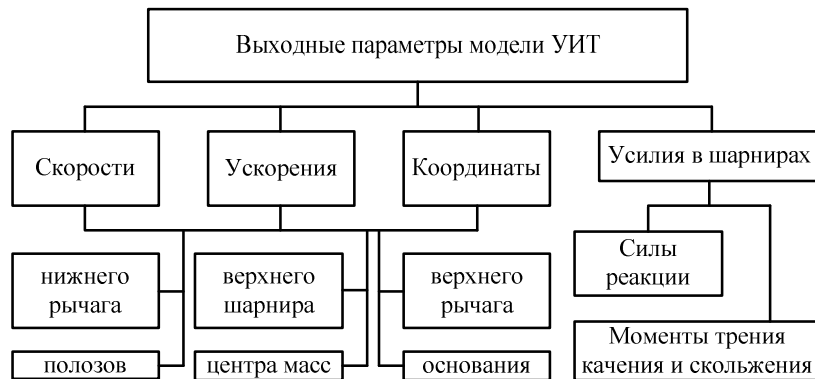


Рис. 7. Выходные параметры модели универсального измерительного токоприемника

3) Контактная подвеска представляется в виде модели на искусственной нейронной сети (ИНС) в среде математического программирования MatLab с помощью инструмента Neural Network Toolbox, а модель УИТ создается также в программе MatLab, но с помощью инструмента Simulink/SimMechanics. Полученные на каждом шаге вычисления статистически достоверные значения всех необходимых параметров контактной сети передаются в модель УИТ.

Третий вариант моделирования является наиболее быстрым, достаточно точным и, с точки зрения программирования, легко реализуемым. Появляется возможность к обобщению при интерпретации данных, позволяющая использовать «накопленный» опыт для экстра- и интерполяции данных.

Искусственная нейронная сеть является современным и гибким инструментом анализа зависимостей желаемых входных и выходных перемен-

ных и позволяет с высокой точностью описать функционирование исследуемой системы [8].

Базовой моделью нейронной сети выбран многослойный перцептрон (рис. 8,а), основными преимуществами которого является способность аппроксимировать нелинейные функции, а также высокая степень обучаемости на небольшом объеме данных из-за относительно низкого числа нейронов, синаптических связей, весовых и передаточных функций – свободно настраиваемых параметров нейронной сети.

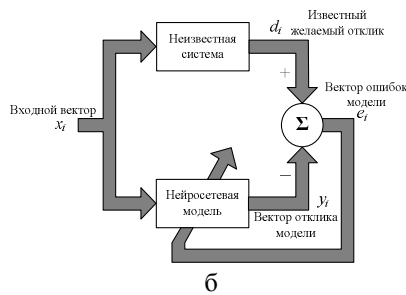
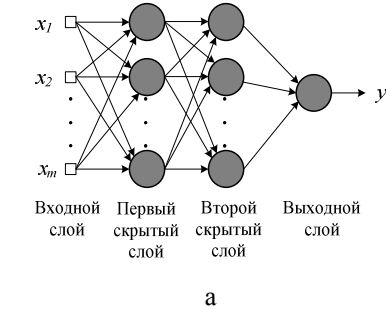


Рис. 8. Архитектура и алгоритм обучения нейронной сети: а – архитектура многослойного перцептрона; б – алгоритм обучения с обратным распространением ошибки

Обучение ИНС контактной сети происходит по величине контактного нажатия токоприемника ЭПС. На вход подается информация о скорости движения, высотном положении кон-

тактной подвески, токоприемника и расположения проводов в плане пути.

Для обучения используется универсальный алгоритм с обратным распространением ошибки (рис. 8 б).

Расчет осуществляется по следующему алгоритму (при условии, что модель контактной сети уже обучена и готова к работе):

1) Задаются исходные данные (массы и геометрические размеры элементов токоприемника, высота его подъема, скорость движения ЭПС и т.д.), и запускается модель УИТ.

2) В модель контактной сети подаются рассчитанные на первом шаге алгоритма граничные значения контактного нажатия и высотного положения токоприемника. Происходит определение текущей координаты точки контакта, а также мгновенной силы нажатия в ней.

3) Полученные данные используются для следующего шага расчета в корректировке его положения и силы нажатия на контактный провод.

После расчета динамики взаимодействия по приведенному выше алгоритму модель УИТ прошла верификацию на основе данных, полученных в 2010 году в ходе линейных испытаний процесса и качества токосъема на линии Москва – Санкт-Петербург.

На рис. 9 показан фрагмент гистограмм среднего значения контактного нажатия токоприемника ($MP_{кт}$), полученных после проведения испытаний на линии Москва – Санкт-Петербург и расчета с помощью разработанной модели взаимодействия, а на рис. 10 – среднеквадратическое отклонение (СКО) контактного нажатия ($\sigma P_{кт}$).

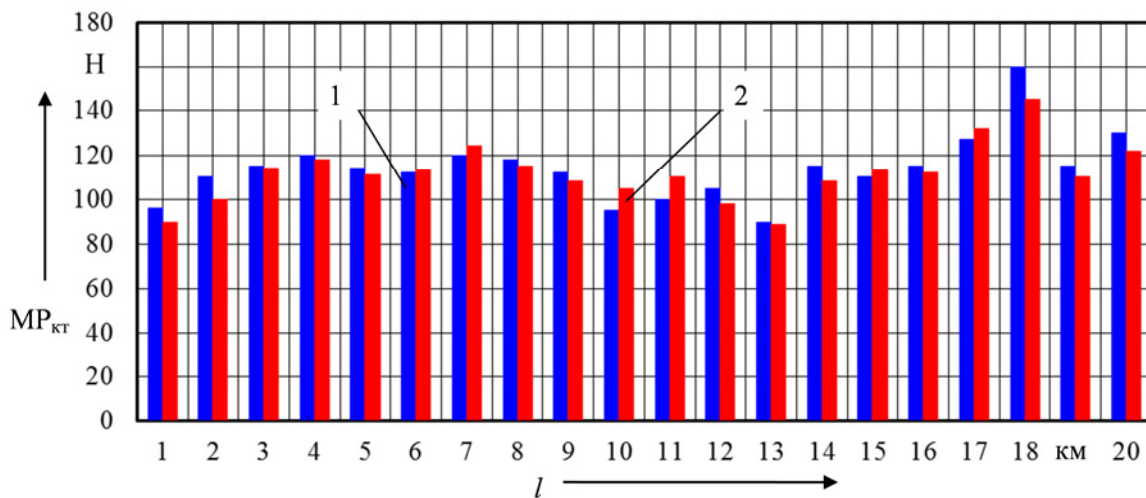


Рис. 9. Фрагмент гистограммы среднего значения контактного нажатия токоприемника на контактный провод: 1 – по данным испытательных поездок; 2 – расчет на модели взаимодействия

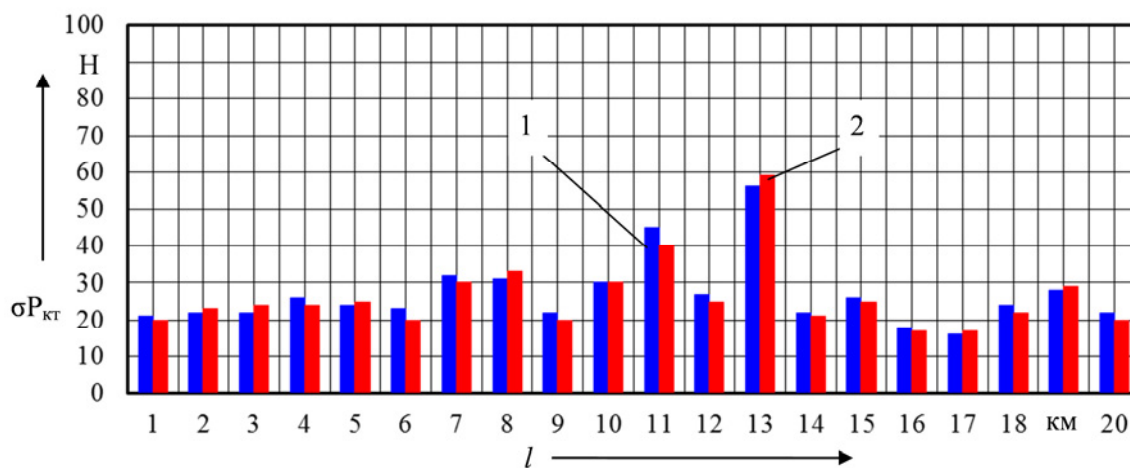


Рис. 10. Фрагмент гистограммы среднеквадратического отклонения контактного нажатия токоприемника на контактный провод: 1 – по данным испытательных поездок; 2 – расчет на модели взаимодействия

Проверка показала, что использование математической модели взаимодействия позволяет достаточно точно и адекватно исследовать процессы, реально происходящие с токоприемником и контактной сетью во время движения ЭПС, а также она является универсальным инструментом имитации любых типов токоприемников путем изменения широкого ряда заложённых в нее параметров и характеристик.

Также следует отметить, что, зная скорость движения, среднее значение контактного нажатия и его СКО, можно спрогнозировать средний покилометровый износ контактной вставки полоза, то есть оценить экономические затраты на эксплуатацию ЭПС с конкретным типом токоприемника при взаимодействии с контактной сетью данного участка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Брюханов А. С. Оценка качества токосъема по нажатию в скользящем контакте между токоприемниками и контактными проводами / А. С. Брюханов, В. М. Павлов, И. Е. Чертков // Электроснабжение железных дорог: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2007. С. 43 – 47.

2. Кудряшов Е. В. Метод расчета эластичности контактной подвески на основе простой конечно-элементной модели. / Е. В. Кудряшов, С. В. Заренков, О. А. Ходунова // Известия Транссиба. Научно-технический журнал / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 16 – 25.

3. Сидоров О. А. Особенности проектирования измерительного токоприемника для скоростных систем токосъема. / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. В. Емельянов // Транспортная инфраструктура сибирского региона. Материалы второй межвузовской научно-практической конференции. / Иркутск, 2011. С. 271-272.

4. Павлов В. М. Совершенствование токоприемников электроподвижного состава / В. М. Павлов, В. Н. Финиченко // Известия Транссиба. Научно-технический журнал / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2010. С. 32 – 38.

5. Смердин А. Н. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели. / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, В. А. Жданов // Известия Транссиба. Научно-технический журнал / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 30 – 36.

6. Дербилов Е. М. Особенности имитационного моделирования взаимодействия токоприемников и контактных подвесок на сопряжениях. / Е. М. Дербилов // Известия Транссиба. Научно-технический журнал / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 10 – 15.

7. Мещеряков В. А. Методика моделирования динамики токоприемника электроподвижного состава как механической системы. / В. А. Мещеряков, Р. А. Чертов // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / М.: Интекст, 2010. С. 109-117.

8. Сидоров О. А. Методика оценки функциональной готовности системы токосъема скоростных участков магистральных железных дорог. / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Вестник ВНИИЖТ 2012. №1. С. 27-32.

Ключевые слова: токоприемник, измерительный, контактная подвеска, взаимодействие, токосъем.

Ключові слова: струмоприймач, вимірювальний, контактна підвіска, взаємодія, струмознімання.

Keywords: pantograph, measuring, catenary, interaction, current collection.