

30 **Кропотин, О. В.** Оценка работоспособности кольцевых уплотнений из углепластиков по модифицированным критериям качества / О. В. Кропотин, Ю. К. Машков, С. В. Шилько // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2013. – № 1 (22). – С. 67–70.

*D. A. CHERNOUS*

## **THE CALCULATION METHOD OF THE STRUCTURAL COMPOSITE COMPONENTS OPTIMIZATION**

Previously developed two-tiered approach for the structural composite composite optimization was improved and generalized. The improved approach was used to determine the filler maximal allowable volume fraction which provides the strength of the arbitrary configuration detail made from the dispersion-filled short carbon fibers of polytetrafluoroethylene. The detail fragment near the cylindrical surfaces contact region was considered.

Получено 28.10.2013

---

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013**

---

УДК 629.423.33

*А. О. ШИМАНОВСКИЙ, И. И. КАПЛЮК*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПОДВИЖНЫХ РАМ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Рассматриваются технические требования, предъявляемые к механическим свойствам токоприемников рельсового подвижного состава. Предлагается алгоритм аналитического расчета токосъемника исходя из постоянной силы прижатия токосъемника к проводу.

Спецификой электрического транспорта является подвод энергии через скользящий контакт между токоприемником и контактной подвеской. Конструкции токоприемников и их характеристики определяются мощностью и скоростью электроподвижного состава (ЭПС), габаритами подвижного состава и приближения строений, расположением контактных проводов в плане и по высоте. По величине токовой нагрузки их делят на два типа: тяжелый (Т) и легкий (Л) [1]. Для обеспечения надежного контакта полозов (лыж) токоприемника с расположенными на разной высоте контактными проводами (для магистральных железных дорог эта высота составляет 5550–6900 мм относительно уровня пути) используется специальный механизм подвижных рам. Диапазон рабочих высот токоприемника определяет размеры его конструкции. Наибольшая высота подъема полоза над поверхностью кузова должна быть не менее 2100 мм [2].

В странах СНГ наиболее распространены и длительное время эксплуатируются ромбические пантографы (рисунок 1, а). Для экономии места на крыше ЭПС в Японии устанавливают Х-образные пантографы (рисунок 1, б). Асимметричные полупантографы (рисунок 1, в) обладают меньшей массой и габаритами по сравнению с симметричными. Такие токоприемники активно внедряет французская фирма «Faiveley». В России также разработаны токоприемники такого типа для электропоездов и трамваев. Они эффективны в случае применения высокопрочных материалов и точной технологии.

Токоприемники с подвижным основанием (рисунок 1, г) возникли в связи со стремлением снизить приведенную массу так, чтобы обеспечить работу при скоростях свыше 55 м/с (200 км/ч). Высота подвижного основания поддерживается специальным авторегулирующим устройством, срабатывающим, например, перед входом в тоннель со сниженными контактными проводами [3].

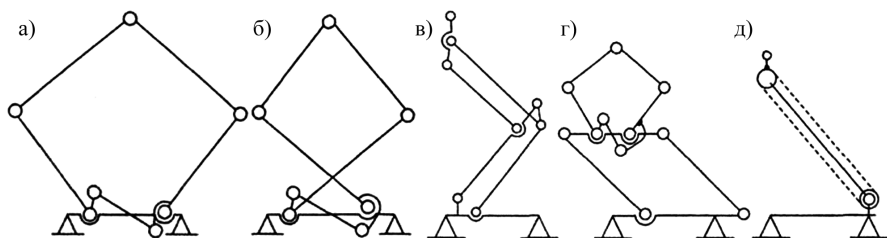


Рисунок 1 – Основные схемы систем подвижных рам токоприемников: а – ромбический пантограф; б – Х-образный пантограф; в – асимметричный полупантограф; г – асимметричный полупантограф с подвижным основанием; д – асимметричный штанговый полупантограф с тросовой или цепной передачей

Штанговые рамы токоприемников применяют для троллейбусов, трамваев, метрополитена. Они привлекли к себе внимание в связи со стремлением снизить приведенную массу токоприемника, сделать его малошумным, а рамы – статически определяемыми. К недостаткам трамвайной штанги (бугеля) относится поворот контактной вставки вокруг своей оси при изменении высоты подъема. Более рациональным является вариант с цепной или тросовой передачей (рисунок 1, д).

Параметры системы подвижных рам входят переменными составляющими (зависящими от высоты подъема рам) в целый ряд характеристик токоприемника, регламентируемых стандартом и техническими условиями: приведенную массу, характеристики опускающей и удерживающей сил, аэродинамическую подъемную силу, частотную характеристику токоприемника и др.

Конструкция системы подвижных рам полностью определяет поперечную жесткость токоприемника. Она должна быть достаточной, чтобы гарантировать надежный токосъем при прохождении воздушных стрелок, сходе провода на рог полоза, а также при поперечных колебаниях подвижного состава, т. е. в

тех случаях, когда на токоприемник действуют силы, направленные в плоскости, перпендикулярной оси пути. Согласно требованиям ГОСТ Р 54334-2011 коэффициент поперечной жесткости токоприемника должна быть не менее 17 Н/мм.

Характеристика статического нажатия рам токоприемника представляет собой зависимость вертикальной силы, с которой полз давит на контактный провод, от высоты подъема токоприемника  $P_p(H)$ . При этом стандартом регламентируется как значение силы нажатия в диапазоне рабочих высот токоприемника и разница между наибольшим и наименьшим нажатиями, так и двойная величина сухого трения в шарнирах. Сила сухого трения в механизме токоприемника, приведенная к верхнему шарниру, определяется как полуразность пассивного нажатия  $P_{2p}$  (измеренного при движении токоприемника вниз) и активного  $P_{1p}$  (измеренного при движении вверх)

$$W_p = \frac{P_{2p} - P_{1p}}{2}.$$

Значение этой силы должно быть минимальным для получения лучших динамических свойств токоприемника.

Статическое нажатие является одной из составляющих контактного нажатия токоприемника на контактный провод  $P_{кт}$ , которое, в свою очередь, определяет износ контактирующих элементов. Поэтому характеристика статического нажатия должна быть постоянной во всем диапазоне рабочих высот токоприемника. По ГОСТ Р 54334-2011 статическое нажатие токоприемника на контактный провод в диапазоне рабочих высот должно быть: активное для аппаратов типа Т не менее 90 и типа Л – 70 Н; пассивное – 130 и 110 Н соответственно. Конструкция токоприемника типа Л должна обеспечивать возможность увеличения нажатия на 30 %. Разница между наибольшим и наименьшим нажатиями при одностороннем движении  $\Delta P_p$  должна быть не более 15 Н для обоих типов токоприемников. Двойная величина силы трения в шарнирах, приведенная к контактной поверхности полоза  $2 W_p$ , не может превышать 20 Н для легких и 25 Н для тяжелых токоприемников.

Динамические качества токоприемника считаются удовлетворительными, если отсутствуют отрывы полоза от контактного провода, колеблющегося с амплитудой  $40 \pm 2$  мм и частотой 0,8 Гц. Для отбора энергии от колеблющейся системы «токоприемник – контактная подвеска», снижения амплитуд перемещений и уменьшения колебаний контактных нажатий до допустимых пределов применяют демпфирующие устройства. Гидравлическими амортизаторами, снижающими амплитуды колебаний системы подвижных рам, оборудованы скоростные токоприемники во Франции, Германии, Италии, Японии и России.

Качество контакта между контактным проводом и ползозом токоприемника имеет большое значение для оценки процесса токосъема. Плохой механи-

ческий контакт может приводить к образованию электрической дуги, при этом сильно изнашивается контактный провод. Даже в том случае, когда электрическая дуга не возникает, недостаточная сила нажатия обуславливает неравномерное прилегание угольных вставок к проводу, плотность тока в местах имеющегося локального контакта увеличивается настолько, что материал контактного провода может плавиться от нагрева и попадать на крышу вагона или на расположенную рядом вторую угольную вставку токоприемника [4]. Кроме того, ухудшившееся прилегание угольных вставок токоприемника к проводу приводит к образованию желобка на графите и омеднению прилегающих к нему зон.

Из-за инерции токоприемника его полз не может достаточно быстро следовать за резкими изменениями высоты контактного провода при его подъеме. В результате сила прижатия к контактному проводу уменьшается. При этом пружина поднимает полз вверх, который резко поднимается и вновь входит в соприкосновение с контактным проводом. Движение полза вверх прекращается, но, поскольку подъем контактного провода продолжается, происходит ухудшение контакта. Таким образом, сила прижатия постоянно колеблется между достаточным значением и слишком малым. Частота изменения сил прижатия в определенном диапазоне высот и при определенной скорости подъема или опускания зависит от инерционности токоприемника. Более легкие ползоты соударяются с контактным проводом чаще, чем тяжелые, но с меньшей силой. Нарушение контакта у токоприемников с тяжелым ползотом в результате большей инерционности длится дольше, чем у токоприемников с легким ползотом. Такие же колебания силы прижатия возникают и при снижении контактного провода, так как контактные накладки и пружины ползоты образуют со всем механизмом токоприемника и его главной пружиной сложную колебательную систему.

Компанией Deutzer Technische Kohle (ДТК) [4] проводились измерения силы нажатия в контакте. Целью исследований являлось выяснение причин ухудшения качества контакта и определение мер для его улучшения, а также выбор такой конструкции токоприемника, которая наилучшим образом подходила бы для конкретной сети.

При исследовании токоприемников определяли, как изменяется сила прижатия ползоты к контактному проводу при различной скорости изменения рабочей высоты токоприемника по отношению к контактному проводу в процессе эксплуатации. В ходе исследований, выполнявшихся на контактном проводе, определяли высоту его расположения и зигзаг, процесс соударения между контактным проводом и ползотом токоприемника, плавность скольжения угольных вставок по контактному проводу. Кроме того, в ходе исследований измеряли напряжение на токоприемнике и ток, протекающий по угольной вставке токоприемника, фиксировали его направление. На одном из этапов исследований система ДТК устанавливалась на находящийся

в регулярной эксплуатации подвижной состав, который обращался на линии в обычном для нее диапазоне скорости. При измерении напряжений определяли его падение и потенциалы на всех участках тракта – от токоприемника до рельсов.

Для обеспечения достаточного качества электрического контакта между контактным проводом и угольной вставкой токоприемника необходимо, чтобы токоприемник следовал наклонам и изменениям наклона контактного провода. Характер изменения высоты иллюстрируется плотностью распределения ее значений (рисунок 2). Следует отметить, что многие токоприемники в силу своей инерции и большой массы полоза не могут соответствовать этим требованиям. Тяжелый токоприемник не может достаточно быстро компенсировать изменение высоты, в результате чего возникают продолжительные нарушения контакта, приводящие к повышенному износу угольных вставок и контактного провода [4].

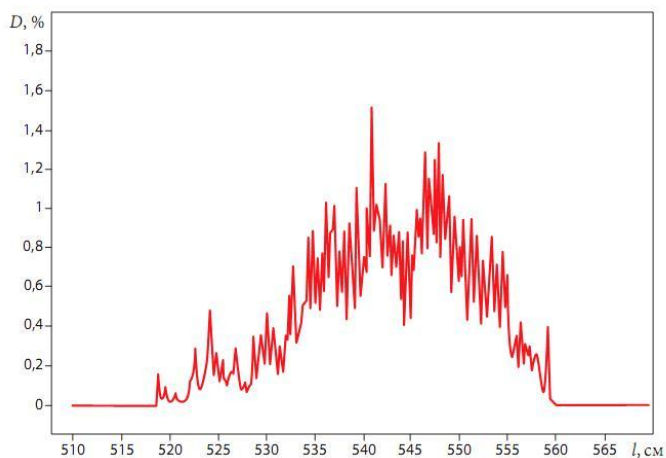


Рисунок 2 – Плотность распределения значений высоты расположения контактного провода  $D$  на участке длиной 3434 м

При сравнении токоприемников были обнаружены большие различия их износостойкости. Эти различия связаны, прежде всего, с массой полоза, его конструкцией (рамной или в виде отдельных подпружиненных контактных накладок), а также с типом эксплуатации токоприемника (движение коленом вперед или назад). Некоторые токоприемники имели недостаточное усилие подпружинивания полоза и повышенное трение в подшипниках. В эксплуатации токоприемники ведут себя по-разному. Эти различия проявляются в износе угольной вставки и контактного провода. При больших снижениях контактного провода, например под мостами, износ контактного провода заметно возрастает. В таких местах контактный провод приходится менять

чаще. В то же время даже там, где подвеска расположена высоко, могут наблюдаться наклоны провода с таким градиентом, который не укладывается в требования стандартов.

Проблему выбора рациональных параметров конструкции токосъемника усложняет то, что в подобного рода системах помимо автоколебаний при больших скоростях поезда в окрестности точки контакта провода и токоприемника могут возникать резонансные локализованные колебания контактной подвески [5, 6]. Вследствие такой возможности объективно затрудняется идентификация природы экспериментально наблюдаемых резонансно-подобных явлений. Поэтому крайне сложно на основе одних только экспериментов уверенно указывать комбинации параметров многоэлементной дискретно-континуальной системы, целенаправленное варьирование которых привело бы к повышению надежности токосъема, оптимальному с точки зрения эксплуатации в конкретно возникающей ситуации [7].

Повысить качество токосъема, т. е. стабилизировать и понизить контактное нажатие до оптимального уровня, можно улучшением параметров и конструктивного исполнения как контактной сети, так и токоприемника или обоих устройств вместе. В настоящее время основой для аналитических исследований динамики системы “контактная сеть–токоприемник” чаще всего являются полуэмпирические модели, в которых за образец взята стандартная дискретная колебательная схема с несколькими степенями свободы, а в качестве инерционных и упругих параметров используют приведенные массы токоприемника и контактного провода и эффективную податливость контактной подвески.

Динамические явления, сопровождающие процесс токосъема высокоскоростного подвижного состава, могут быть проанализированы с помощью многоэлементной модели, изображенной на рисунке 3.

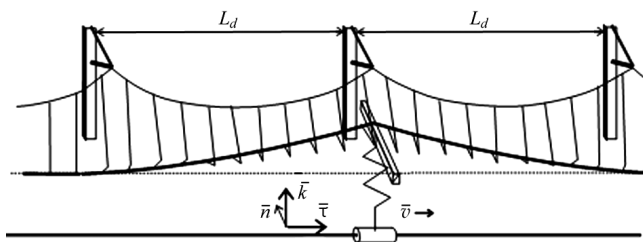


Рисунок 3 – Расчетная схема системы “контактная подвеска-токоприемник”

Она хоть и не в полной мере воспроизводит условия токосъема, тем не менее в определенной степени позволяет проследить весь спектр влияния варьирования того или иного параметра конструкции системы “контактная подвеска-токоприемник” теоретическими методами. Безынерционная упругая струна подвешена на нерастяжимых нитях вдоль жесткой направляющей

и нагружена равномерно распределенной по длине поперечной вертикальной нагрузкой. Погонная нагрузка равна погонному весу контактного провода. При 3D-моделировании деформаций контактного провода подвешенная упругая линия в отсчетной (недеформированной) конфигурации является “зигзагообразной ломаной”, расположенной в горизонтальной плоскости.

В работе [8] выполнено исследование колебательной динамики дискретно-континуальной системы “контактная подвеска–токоприемник электрического подвижного состава”. С использованием метода возмущений показано, что математическое описание такой системы сводится к хорошо изученному в литературе уравнению Матье с периодическим внешним воздействием. Получены аналитические выражения, описывающие взаимодействие контактной подвески и токоприемника. Показано, что в результате подбора оптимальных сочетаний свойств токоприемника и контактной подвески происходит целенаправленное подавление нежелательных автоколебательных режимов непосредственно в процессе движения ЭПС. Таким образом, повышается надежность токосъема.

Выполненный анализ показывает, что при создании новых конструкций токоприемников необходимо решить целый ряд задач кинематики и динамики механизмов. Первая такая задача связана с подбором размеров конструкции, при которых обеспечивается минимальное отклонение от вертикали каретки с угольными вставками. Одним из способов, позволяющих аналитически решить такую задачу, является координатный. Суть его состоит в том, что записываются выражения координат точек механизма и углов поворота звеньев в зависимости от времени. При этом отталкиваются от заданного закона движения какого-либо звена.

Например, для механизма, изображенного на рисунке 4, в качестве такого звена можно рассматривать стержень  $AC$ , так как именно он контактирует с пружиной, поддерживающей требуемое прижатие токосъемника к токоведущему проводу контактной сети. На основе анализа получаемых зависимостей  $x_D(\alpha_1)$  и  $y_D(\alpha_1)$  определяются такие размеры звеньев механизма, при которых обеспечивается минимальное отклонение точки  $D$  от вертикали во всем диапазоне изменения угла  $\alpha_1$ .

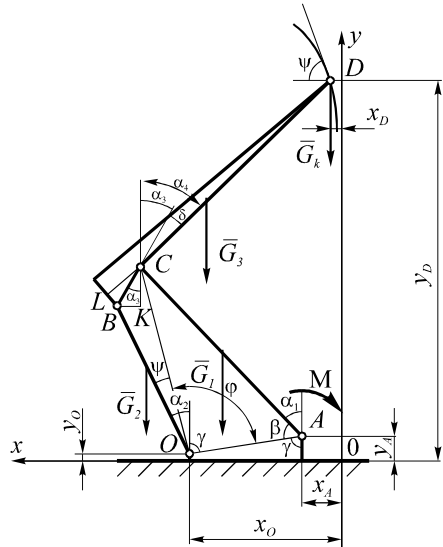


Рисунок 4 – Расчетная схема полупантографа

Для обеспечения хороших динамических свойств при взаимодействии токосъемника с проводом, необходимо, чтобы угол  $\psi$  (см. рисунок 4) наклона касательной к траектории по отношению к горизонту не принимал малые значения. Исходя из этого определяется максимально допустимая высота подъема токосъемника.

В качестве инструмента для выполнения расчетов можно использовать системы типа MathCAD. Поскольку выражения координат точки  $D$  представляют собой неявную функцию угла  $\alpha_1$ , то расчеты целесообразно производить в численной форме. В таком случае определение угла  $\psi$  удобно осуществлять по приближенной формуле

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y(\alpha_1 + \Delta\alpha) - y(\alpha_1)}{x(\alpha_1 + \Delta\alpha) - x(\alpha_1)}.$$

Вторая часть расчета токоприемника связана с нахождением зависимости момента, приложенного к шарниру  $A$ , при котором обеспечивается постоянство силы прижатия токосъемника к контактному проводу, от угла поворота  $\alpha_1$ . Здесь целесообразно применять принцип возможных перемещений. В рассматриваемом случае активные силы – это силы тяжести звеньев и сила давления провода на каретку (рисунок 4). Поскольку сила тяжести каретки и сила давления провода сонаправлены, то через  $G_k$  обозначена сумма названных сил. Учитывая, что проекции всех активных сил на горизонтальную ось равны нулю, то их работы на возможном перемещении системы можно найти следующим образом:

$$\delta A = \overline{F} \delta \overline{r} = -G \delta y.$$

С точки зрения использованного ранее координатного способа расчетное соотношение приобретает вид

$$\delta A = -G \cdot (y(\alpha_1 + \Delta\alpha) - y(\alpha_1)).$$

Тогда с учетом работы момента, приложенного к шарниру  $A$ , уравнение принципа возможных перемещений

$$\sum \delta A_i = -\sum G_i \cdot (y_i(\alpha_1 + \Delta\alpha) - y_i(\alpha_1)) - M \Delta\alpha_1 = 0.$$

Знак перед моментом отрицательный, поскольку момент силы упругости направлен против направления отсчета угла  $\alpha_1$ .

Отсюда рабочее выражение для нахождения уравнивающего момента приобретает вид

$$M = -\frac{\sum G_i \cdot (y_i(\alpha_1 + \Delta\alpha) - y_i(\alpha_1))}{\Delta\alpha}.$$

Силы в шарнирах можно определить, рассматривая систему в целом и отдельные ее звенья. Например, записывая уравнение моментов относительно



но точки  $O$  для всей системы и уравнение моментов относительно точки  $C$  для стержня  $AC$  (см. рисунок 4), получим систему уравнений для нахождения реакции в точке  $A$ . Далее из уравнений проекций сил для стержня  $AC$  можно найти реакцию в точке  $C$ , а из уравнений проекций для всей системы – в точке  $O$  и, наконец, из уравнений проекций для стержня  $OB$  – реакцию в точке  $B$ .

Выполненный анализ показывает, что максимальные значения сил имеют место при наибольшем значении угла  $\alpha_1$ , т. е. в низшем рабочем положении токоприемника.

На основе описанных выше расчетов могут быть предварительно подобраны размеры конструкции токоприемника исходя из выполнения условия прочности. Однако на этом расчет не должен заканчиваться, так как необходимо проанализировать возможность входа в резонанс подвижной рамы при ее взаимодействии с контактным проводом.

Одним из методов определения динамических нагрузок, возникающих в контакте между токосъемником и проводом, является моделирование в среде пакета MSC.ADAMS, последняя версия которого (в отличие от предыдущих) поддерживает работу с гибкими связями. Пример модели такой системы приведен на рисунке 5. В качестве исходных данных для построения модели используются предварительные характеристики механизма и найденная ранее зависимость момента от угла  $\alpha_1$ .

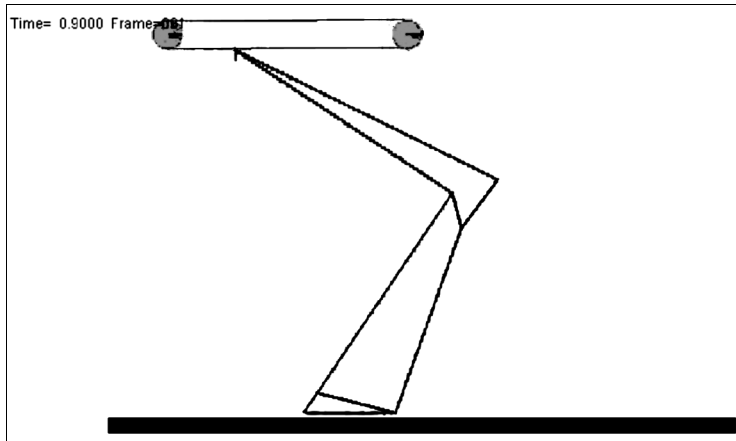


Рисунок 5 – Динамическая модель токосъемника

По результатам расчетов определяются амплитуды колебаний сил в контакте между ползком и проводом, а также принимается окончательное решение о необходимости коррекции масс звеньев и установке специальных гасителей колебаний.

Описанный алгоритм статических и динамических расчетов рам токоприемников позволяет осуществить оптимизацию конструкции с целью обеспечения качественного токосъема.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1 **Михеев, В. П.** Контактные сети и линии электропередачи / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.

2 **ГОСТ Р 54334-2011.** Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. – Введ. 01.11.2011. – М.: Стандартинформ, 2011. – 24 с.

3 **Беляев, И. А.** Токосъём и токоприемники электроподвижного состава / И. А. Беляев, В. П. Михеев, В. А. Шиян. – М.: Транспорт, 1976. – 184 с.

4 **Deutzer, M.** Улучшение контакта между токоприемником и контактным проводом / М. Deutzer // Железные дороги мира. – 2010. – № 3. – С. 55–61.

5 **Индейцев, Д. А.** Локализованные колебания системы “упругая направляющая–движущееся инерционное включение” / Д. А. Индейцев, А. Д. Сергеев // Анализ и синтез нелинейных механических колебательных систем: тр. XXV–XXVI летних школ. – СПб., 1998. – С. 154–162.

6 **Сергеев, А. Д.** Взаимодействие одномерного континуума с движущимся по нему инерционным объектом // ПМТФ. – 2005. – Т. 46, № 4. – С. 88–97.

7 **Михеев, В. П.** Исследование и прогнозирование износа контактных пар устройств токосъема / В. П. Михеев, О. А. Сидоров, И. А. Саля // Изв. ВУЗов “Электро-механика”. – 2003. – № 5. – С. 74–79.

8 **Сергеев, А. Д.** Динамика дискретно-континуальных механических систем: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.04 / Ин-т проблем машиноведения РАН. – СПб., 2006. – 328 с.

*A. O. SHIMANOVSKY, I. I. KAPLIUK*

#### **RATIONAL SIZES DEFINITION OF MOVABLE PANTOGRAPH FRAME FOR ELECTRICALLY DRIVEN VEHICLE**

There are considered technical requirements for the mechanical properties of the electrically driven vehicle pantographs. The algorithm for the analytical calculation of the pantograph is proposed. It is based on the constant pressing force between the pantograph and the wire.

Получено 28.10.2013