

УДК 621.336.7

РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШТАНГОВОГО ТОКОПРИЕМНИКА С ЖЕСТКИМ ТОКОПРОВОДОМ

О.А. Сидоров, И.Л. Саля

Омский государственный университет путей сообщения
E-mail: egt-omgups@mail.ru, armsid@mail.ru, salyail@yandex.ru

Представлен метод расчета взаимодействия токоприемника монорельсового электромагнитного транспорта с жестким токопроводом, включающий в себя расчет статической характеристики, а также расчет динамической характеристики с учетом детерминированного воздействия со стороны стрел провеса токопровода

Токоприемники монорельсового электромагнитного транспорта (ЭМТ) предназначены для токоснимания при скоростях движения свыше 28 м/с (100 км/ч). Широкий амплитудно-частотный спектр воздействия на контактирующие элементы в этих условиях требует использования в конструкции токоприемников управляемых силовых элементов, самым распространенным среди которых является пневматический резинокордный элемент (РКЭ). Особенностью этих пневмоэлементов является нелинейная зависимость нажатия от величины деформации, что оказывает влияние на статические и динамические параметры токоприемников.

При расчете взаимодействия токоприемников ЭМТ с жестким токопроводом приняты следующие допущения:

- токоприемник принимается в виде двухмассовой модели;
- отжатием токопровода пренебрегают, считая его абсолютно жестким;
- форма провисания токопровода принимается косинусоидальной;
- характеристики РКЭ используются в модели без учета теплообмена с окружающей средой;
- нагрузочная характеристика РКЭ, связанного с автоматическим регулятором, принимается аналогичной характеристике РКЭ, соединенного с дополнительным резервуаром бесконечно большого объема;
- усилия от деформации РКЭ принимаются вертикальными;
- при повороте штанги на угол α пружины каретки отклоняются на угол $\alpha/2$;
- токосъемный элемент совершает только поступательное перемещение.

Была рассчитана статическая характеристика, целью ее расчета было определение зависимости нажатия штанги от высотного положения токосъемного элемента с учетом нелинейности упругого резинокордного элемента.

Кинематическая схема штангового токоприемника с указанием его основных геометрических параметров представлена на рис. 1, а. Схема токоприемника с указанием внешних сил, действующих на его элементы, изображена на рис. 1, б.

В расчете статической характеристики были приняты следующие допущения:

- вертикальное направление усилия от деформации РКЭ;
- при повороте штанги на угол α пружины каретки поворачиваются на угол $\alpha/2$;
- токосъемный элемент совершает плоскопараллельное движение.

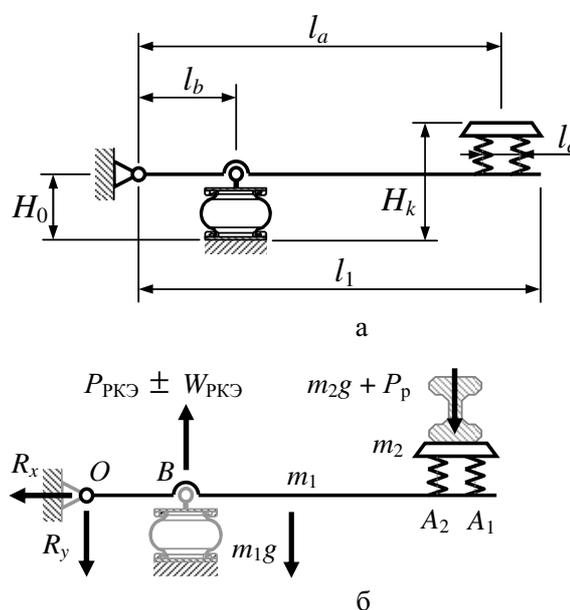


Рис. 1. Расчетные схемы токоприемника с РКЭ

Для расчета составляют уравнения для штанги (рычага) и токосъемного элемента [1, 2].

Для определения усилия, передаваемого от РКЭ к штанге в точке B (рис. 1, б), необходимо иметь функцию

$$P_{PKЭ} = f(\Delta L) = k_1 + k_2 \sqrt{\Delta L} + k_3 \Delta L + k_4 \Delta L^2 + k_5 \Delta L^3, \quad (1)$$

где $k_1 - k_5$ – коэффициенты, определяющие характеристику упругости РКЭ; ΔL – значение абсолютного уменьшения высоты РКЭ по отношению к его ненагруженному состоянию, которое определяется по формуле:

$$\Delta L = h_{PKЭ0} - H_0 - l_b \sin \alpha, \quad (2)$$

где $h_{PKЭ0}$ – высота резинокордного элемента в ненагруженном состоянии.

Коэффициенты k определяются по экспериментально полученным зависимостям (рис. 2, а), где изображены три зависимости $P_{PKЭ} = f(\Delta L)$, отличающиеся друг от друга различными значениями

номинального давления воздуха в РКЭ (без дополнительного объема). Аппроксимируя их, получаем формулы для расчета усилия, передаваемого от РКЭ при его деформации на ΔL (табл. 1).

Таблица 1. Формулы нагрузочных характеристик РКЭ без дополнительного объема. $n=9$

P_0 , МПа	Σ	$P_{РКЭ}$
0,15	1439,0	$-0,98+1299\sqrt{\Delta L}-6827\Delta L+35500\Delta L^2+1675000\Delta L^3$
0,20	803,7	$0,818-1890\sqrt{\Delta L}+36940\Delta L-485700\Delta L^2+8725000\Delta L^3$
0,30	1444,0	$0,99-1303\sqrt{\Delta L}+32920\Delta L-155000\Delta L^2+7958000\Delta L^3$

На рис. 2, б, изображены три зависимости $P_{РКЭ}=f(\Delta L)$, отличающиеся друг от друга разными значениями номинального давления воздуха в РКЭ (дополнительный объем равен бесконечности). Аппроксимируя их, получаем формулы для расчета усилия, передаваемого от РКЭ при его деформации на ΔL (табл. 2).

Статические характеристики для токоприемника ЭМТ, оснащенного двухгофровым РКЭ типа И-08 [3], представлены на рис. 3. В качестве исходных данных использованы: $l_a=0,7$ м; $l_b=0,22$ м; $l_c=0,08$ м; $l_1=0,71$ м; $H_0=0,15$ м; $h_{РКЭ0}=0,19$ м; $L_{к0}=0,04$ м; $m_1=10$ кг; $m_2=0,4$ кг; $W_{РКЭ}=5$ Н; $W_k=1$ Н; $\varepsilon_k=4000$ Н/м.

Наличие пневморегулятора обеспечивает уменьшение неравномерности нажатия в рабочем диапазоне, особенно при опускании штанги ниже среднего положения (участок от 10 до 30·10⁻³ м по оси H_p) [4].

Двойная величина сухого трения, включающая в себя трение в шарнирах и в слоях резинокордной оболочки, составляет 12 Н.

Таблица 2. Характеристики РКЭ при дополнительном объеме, равном бесконечности. $n=9$

P_0 , МПа	Σ	$P_{РКЭ}$
0,15	226,96	$-0,383+940\sqrt{\Delta L}+13410\Delta L-57680\Delta L^2+213900\Delta L^3$
0,20	737,80	$-0,754+1481\sqrt{\Delta L}+19430\Delta L-107900\Delta L^2+136800\Delta L^3$
0,30	675,68	$-0,729+2687\sqrt{\Delta L}+28770\Delta L-268300\Delta L^2+1323000\Delta L^3$

Расчетная схема для учета детерминированного воздействия со стороны стрел провеса жесткого токопровода изображена на рис. 4. Допущения, принятые в расчете, аналогичны тем, что приняты при расчете статической характеристики.

Контактное нажатие определится из системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum M_{10} = M_{РКЭ} - M_k - M_{ин} - M_g = 0; \\ \sum F_{2Y} = F_{кY} - F_{инY} - F_g - P_{км} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $\sum M_{10}$ – суммарный момент всех сил, действующих на штангу токоприемника; $M_{РКЭ}$ – момент силы, передаваемый штанге от резинокордного элемента; M_k – момент от сил, передаваемых на штангу через упругие элементы каретки; $M_{ин}$ – инерционный момент штанги при вращательном движении; M_g – момент силы тяжести, действующей на штангу; $\sum F_{2Y}$ – сумма сил, действующих на

токосъемный элемент в вертикальном направлении (ось Y); $F_{кY}$ – сила, передаваемая от упругих элементов каретки; $F_{инY}$ – сила инерции, действующая на токосъемный элемент; F_g – сила тяжести, действующая на токосъемный элемент; $P_{км}$ – сила контактного нажатия.

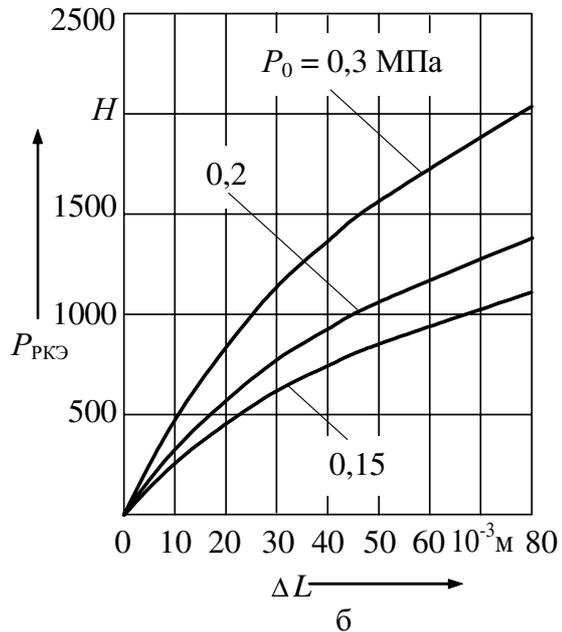
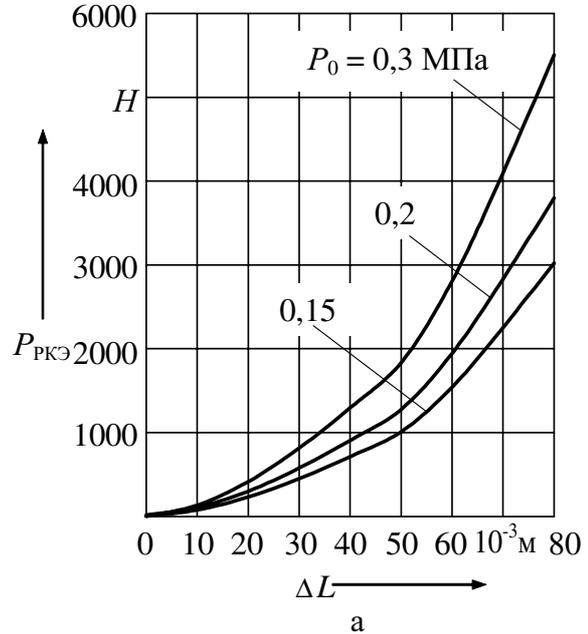


Рис. 2. Нагрузочные характеристики РКЭ И-08

Двойная величина сухого трения, включающая в себя трение в шарнирах и в слоях резинокордной оболочки, составляет 12 Н.

Для определения высотного положения токопровода целесообразно сделать допущение о том, что эта траектория имеет косинусоидальный вид (рис. 5).

Стрела провеса токопровода рассчитывается по следующей формуле:

$$f = \frac{q l_{np}^4}{384 E J_z}, \quad (4)$$

где q – погонная нагрузка от веса токопровода, Н/см; l_{np} – длина пролета, см; E – модуль упругости первого рода для материала, из которого изготовлен токопровод, Н/см²; J_z – момент инерции сечения токопровода для оси Z , см⁴ [5].

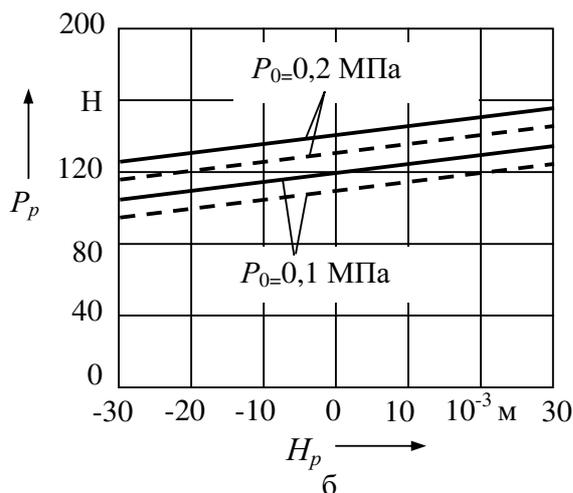
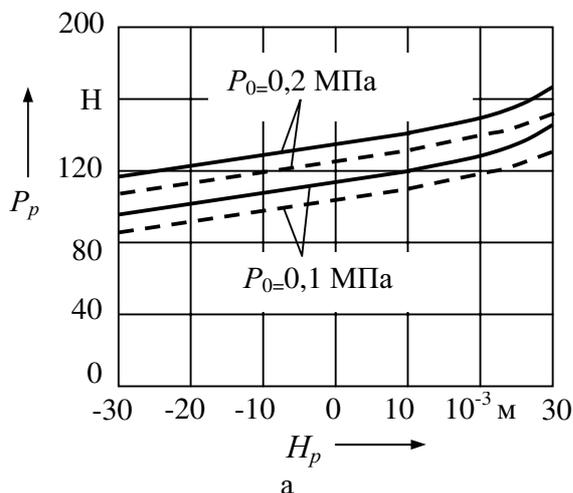


Рис. 3. Статические характеристики токоприемника ЭМТ. РКЭ: а) в замкнутом режиме; б) с авторегулятором (— пассивное; --- активное нажатие)

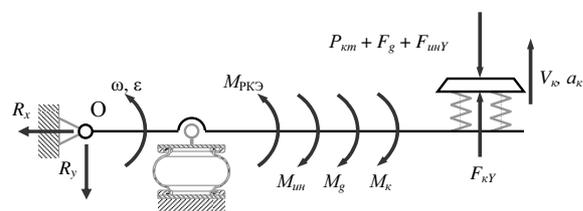


Рис. 4. Расчетная схема штангового токоприемника, оснащенного РКЭ

Токопровод имеет следующие параметры: $q=0,446$ Н/см; $J=5,52$ см⁴; $E=9,7 \cdot 10^6$ Н/см².

Длина пролета в эстакадной транспортной системе равна 2 м. Стрела провеса

$$f = \frac{0,446 \cdot 200^4}{384 \cdot 9,7 \cdot 10^6 \cdot 5,52} \cdot 10^{-2} = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

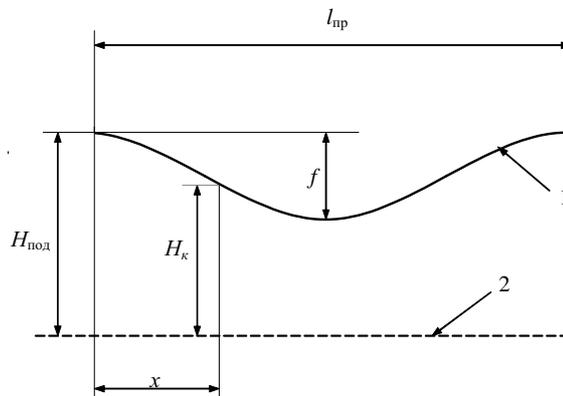


Рис. 5. Высотное положение токопровода в пролете: 1) условное изображение линии контакта; 2) линия, принятая за начало отсчета высоты

Для получения динамической характеристики со средним контактным нажатием в пролете, равным нажатию рам, необходимо, чтобы высота подвеса

$$H_{под} = L_{к0} + H_0 + \frac{m_1 g l_1}{4 \mathcal{J}_к l_a} - \frac{k_1 + k_2 \sqrt{h_{РКЭ0} - H_0}}{2 \mathcal{J}_к l_a} - \frac{k_3 (h_{РКЭ0} - H_0) + k_4 (h_{РКЭ0} - H_0)^2 + k_5 (h_{РКЭ0} - H_0)^3}{2 \mathcal{J}_к l_a} + \frac{f}{2}, \quad (5)$$

где $L_{к0}$ – длина пружины каретки в ненагруженном состоянии; $\mathcal{J}_к$ – жесткость пружины каретки; $h_{РКЭ0}$ – высота резинокордного элемента в ненагруженном состоянии.

Выражение для определения высотного положения токосъемного элемента в любой точке пролета имеет вид:

$$H_к = H_{под} - \frac{f}{2} + \frac{f}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{l_{np}}\right), \quad (6)$$

где x – текущее расстояние контактного элемента от начала пролета; l_{np} – длина пролета токопровода.

Скорость перемещения токосъемного элемента в вертикальном направлении будет рассчитываться как производная по времени формулы (6):

$$V_к = \frac{dH_к}{dt} = \frac{dH_к}{dx} = V_{н.с} \frac{dH_к}{dx} = -V_{н.с} \frac{f}{2} \frac{2\pi}{l_{np}} \sin\left(\frac{2\pi x}{l_{np}}\right), \quad (7)$$

где $V_{н.с}$ – скорость движения подвижного состава (токоприемника).

Ускорение токосъемного элемента в вертикальном направлении определяется по формуле:

$$a_к = \frac{d^2 H_к}{dt^2} = V_{н.с}^2 \frac{d^2 H_к}{dx^2} = -V_{н.с}^2 \frac{f}{2} \left(\frac{2\pi}{l_{np}}\right)^2 \cos\left(\frac{2\pi x}{l_{np}}\right). \quad (8)$$

На рис. 6 представлены динамические характеристики двухмассового токоприемника ЭМТ, полученные в результате расчета процесса его взаимодействия с токопроводом, имеющим стрелы прове-

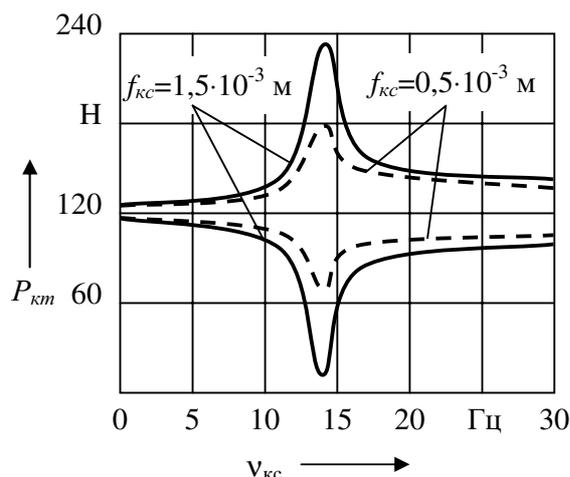


Рис. 6. Влияние стрелы провеса на динамическую характеристику токоприемника

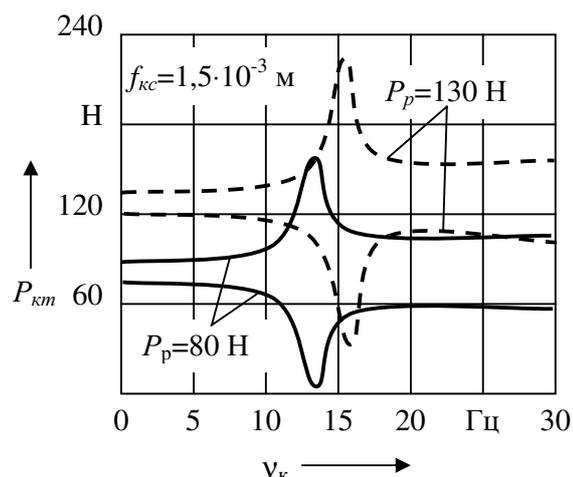


Рис. 7. Влияние статического нажатия на динамическую характеристику токоприемника

са $1,5$ и $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. На частоте 14 Гц наблюдается резонансное явление, вызванное резким увеличением амплитуды колебаний штанги токоприемника.

Влияние статического нажатия P_p на вид динамической характеристики представлено на рис. 7.

Увеличение стрелы провеса с $0,5$ до $1,5 \cdot 10^{-3}$ м ведет к разбросу максимального и минимального

нажатий в пролете. В резонансной зоне наблюдается установившийся разброс нажатий.

Увеличение нажатия с 80 до 130 Н значительно повышает абсолютное значение минимального и максимального нажатий и сдвигает зону резонанса в область более высоких частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
2. Яблонский А.А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 248 с.
3. Зубков И.А. Аппроксимация характеристики пневматического упругого элемента с резинокордной оболочкой // Пневматиче-
4. Михеев В.П., Сидоров О.А., Саля И.Л. Исследование и прогнозирование износа контактных пар устройств токосъема // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 5. – С. 74–79.
5. Общетехнический справочник / Под ред. А.Н. Малова. – М.: Машиностроение, 1971. – 464 с.