

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ТОКОСЪЕМА МОСКОВСКОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

У статті розглянуто недоліки існуючої системи знімання струму московської монорейкової транспортної системи. Запропоновано нову систему, яка відрізняється геометрією контакту. Наведено розрахунок взаємодії пропонованої системи знімання струму на основі рівнянь Лагранжа другого роду.

В статье рассмотрены недостатки существующей системы токосъема московской монорельсовой транспортной системы. Предложена новая система, отличающаяся геометрией контакта. Приведен расчет взаимодействия предлагаемой системы токосъема на основе уравнений Лагранжа второго рода.

The disadvantages of existing current collection system for the Moscow monorail transport system are considered in the article. A new system differing in the contact geometry is proposed. Also the calculation of interaction of the offered current collection system based upon the Lagrange's equations of second kind.

Первая линия монорельса между станциями метро «Тимирязевская» и «Ботанический сад» длиной 4,7 километра появилась в Москве в 2004 году [1]. Существуют планы строительства двух новых линий монорельсовой дороги. Первая ветка длиной 2,5 километра должна появиться в 2012...2013 году между метро «Теплый стан» и торговым комплексом «Славянский мир», строящемся на сорок первом километре МКАД. Вторая линия будет связывать станцию метро «Речной вокзал» с районом Ховрино на севере Москвы. Строительством веток будет заниматься ОАО «Московские монорельсовые дороги», строившее первую линию.

Система электроснабжения Московской монорельсовой транспортной системы (ММТС) представляет собой контактную систему токосъема, состоящую из жестких токопроводов охватывающего типа, с внутренними гранями которых взаимодействуют контактные элементы токоприемников, как показано на рис. 1а. В ходе анализа результатов лабораторных испытаний были выявлены недостатки системы токосъема ММТС [2]. При поперечных колебаниях и наклонах контактного элемента относительно троллея происходит уменьшение площади контакта, с образованием искрения и появлением отжигов, что значительно снижает качество токосъема.

Устранение вышеперечисленных недостатков может быть достигнуто за счет изменения геометрической формы контактных пар, а следовательно, – контактной поверхности. Указанное техническое решение (Пат. №. 78461 на полезную модель) реализовано в Омском государственном университете путей сообщения

(ОмГУПС). Жесткий токопровод предлагаемой системы токосъема представляет собой половину трубы, с внутренней поверхностью которой взаимодействует контактный элемент (см. рис. 1б). Поперечное сечение рабочей поверхности контактного элемента представляет собой дугу меньшего радиуса по сравнению с внутренней поверхностью токопровода.

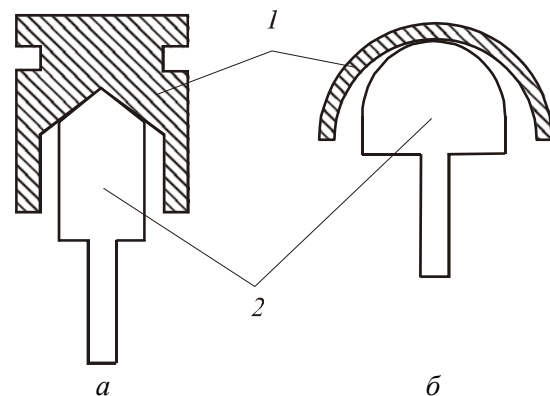


Рис. 1. Системы токосъема монорельсового транспорта (а – существующая; б – предлагаемая): 1 – токопровод; 2 – контактный элемент

Преимуществом предлагаемой системы также является улучшенные динамические характеристики токоприемников за счет снижения стрелы провеса токопровода, имеющего меньшую массу.

Для оценки работоспособности токоприемника существуют различные методы для расчета взаимодействия токоприемников с контактными подвесками [3, 4]. На стадии проектирования новых устройств чаще используют упрощенные методы, в частности, модели с малым количеством степеней свободы, с

внешним гармоническим воздействием со стороны токопровода (синусоидальной формы).

Основной целью расчетов является определение контактного нажатия $P_{кт}$, как основного показателя качества токосъема. Под динамической характеристикой понимается зависимость максимального и минимального контактного нажатия в пролете от скорости движения подвижного состава (частоты вертикальных колебаний контактного элемента токоприемника).

Расчетная схема изображена на рис. 2. В расчетах были приняты следующие допущения: токопровод принимается абсолютно жестким; траектория провисания токопровода выбирается синусоидальной; амплитуды горизонтальных и вертикальных перемещений основания токоприемника равны нулю (влияние экипажа отсутствует); отрывы токосъемного элемента от токопровода отсутствуют; вязкое трение в шарнирах токоприемника отсутствует; аэродинамическое воздействие на токоприемник отсутствует; токопровод не имеет разрегулированных стыковых соединений; перераспределение нажатия между сбегающей и набегающей части контактного элемента отсутствует.

Расчетная схема (см. рис. 2) имеет три степени свободы. Для определения положения элементов токоприемника необходимы три обобщенные координаты: H – вертикальное перемещение контактного элемента; α – угол поворота рычагов токоприемника в вертикальной плоскости; β – угол поворота рычагов в горизонтальной плоскости.

Для рассматриваемой системы уравнения Лагранжа второго рода имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{H}} \right) - \frac{\partial T}{\partial H} + \frac{\partial \Pi}{\partial H} = Q_H; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} + \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} = Q_\alpha; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} + \frac{\partial \Pi}{\partial \beta} = Q_\beta, \end{cases} \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия механической системы; Π – потенциальная энергия; Q_H – обобщенная сила по обобщенной координате H ; Q_α – обобщенная сила по обобщенной координате α ; Q_β – обобщенная сила по обобщенной координате β .

Ось H направлена вертикально вверх. Ось α – перпендикулярно оси вращения рычагов в вертикальной плоскости. Ось β – горизонтальной плоскости.

К системе приложены следующие силы: P_1 – вес нижнего рычага, P_2 – верхнего рычага, P_3 – вес каретки, P_4 – вес токопроводящего кабеля. P_5 – вес нажимной пружины, P_6 – вес пружины вторичного подрессоривания, P_7 – вес контактного элемента, $P_{кт}$ – возмущающая сила, приводящая в движение контактный элемент, $P_{т.с}$ – сила трения скольжения контактного элемента о поверхность токопровода, W_H – сухое трение при перемещении контактного элемента относительно каретки, $M_{w\alpha}$ и $M_{w\beta}$ – сухое трение в шарнирах токоприемника по осям α и β , соответственно.

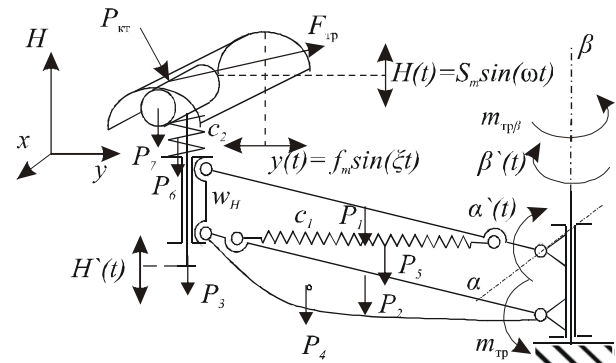


Рис. 2. Расчетная схема рычажного токоприемника с контактным элементом С-образной формы

Кинетическая энергия системы рассчитывается согласно следующему уравнению:

$$T = \sum_{i=1}^7 T_i, \quad (2)$$

где T_i – кинетическая энергия i -го элемента токоприемника.

Верхняя и нижняя штанги токоприемника участвуют в сложном движении: переносном вращательном вокруг вертикальной оси основания токоприемника (см. рис. 2) с угловой скоростью β и относительной вращательной вокруг горизонтальной оси токоприемника, перпендикулярной к плоскости рисунка, с угловой скоростью $\dot{\alpha}$.

Кинетическая энергия верхней штанги рассчитывается по формуле:

$$T_1 = \frac{1}{2} (J_{1\alpha} \dot{\alpha}^2 + J_{1\beta} \beta^2), \quad (3)$$

где $J_{1\alpha}$ – момент инерции верхней штанги токоприемника в вертикальной плоскости вращения:

$$J_{1\alpha} = \frac{1}{3} m_1 l^2; \quad (4)$$

$J_{1\beta}$ – момент инерции верхней штанги токоприемника в горизонтальной плоскости вращения:

$$J_{1\beta} = \frac{1}{3} m_1 (l \cdot \cos \alpha)^2. \quad (5)$$

Кинетическая энергия остальных элементов вычисляется аналогично. Более сложное движение имеют контактный элемент и пружина каретки, перемещающиеся со скоростью:

$$V_7 = \sqrt{\dot{H}^2 + l^2 \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin^2 \alpha + l^2 \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (6)$$

Потенциальная энергия рассчитывается по следующему выражению:

$$\Pi = \sum_{i=1}^7 \Pi_i + \sum_{i=1}^2 \Pi_{\text{упр},i}, \quad (7)$$

где Π_i – потенциальная энергия i -го элемента конструкции токоприемника в поле сил тяжести; $\Pi_{\text{упр},i}$ – потенциальная энергия i -ой пружины токоприемника в поле сил упругости.

Обобщенная сила для токосъемного элемента включает в себя силу контактного нажатия $P_{\text{кт}}$, вектор которой показан на рис. 3.

Сила $P_{\text{кт}}$ является результирующей двух сил:

$$P_{\text{кт}} = \sqrt{P_{\text{кт}Y}^2 + P_{\text{кт}H}^2}, \quad (8)$$

где $P_{\text{кт}H}$ – вертикальная сила, приводящая в движение контактный элемент по вертикали; $P_{\text{кт}Y}$ – горизонтальная.

Из рис. 3а видно:

$$P_{\text{кт}H} = P_{\text{кт}} \cdot \cos \varphi; \quad (9)$$

$$P_{\text{кт}Y} = P_{\text{кт}} \cdot \sin \varphi. \quad (10)$$

Негладкие поверхности токопровода и контактного элемента не являются идеальной связью. Сила трения скольжения $F_{\text{т.с}}$ направлена в сторону, противоположную движению контактного элемента, и равна по модулю:

$$F_{\text{т.с}} = f \cdot N = f \cdot P_{\text{кт}}, \quad (11)$$

где f – коэффициент трения скольжения. Геометрически (см. рис. 3) результирующая сила трения скольжения $F_{\text{т.с}}$ равна сумме двух сил:

$$F_{\text{т.с}} = \sqrt{F_{\text{т.с}X}^2 + F_{\text{т.с}YH}^2}, \quad (12)$$

где $F_{\text{т.с}X}$ – продольная сила трения скольжения, возникающая в результате движения подвижного состава; $F_{\text{т.с}YH}$ – поперечная сила трения скольжения в результате перемещения контактного элемента относительно токопровода.

В расчете принята возможность учета сил трения (вдоль и поперек токопровода) с разными коэффициентами f : μ – вдоль токопровода, η – поперек; с учетом последнего:

$$F_{\text{т.с}X} = \mu \cdot P_{\text{кт}}; \quad (13)$$

$$F_{\text{т.с}YH} = \eta \cdot P_{\text{кт}}. \quad (14)$$

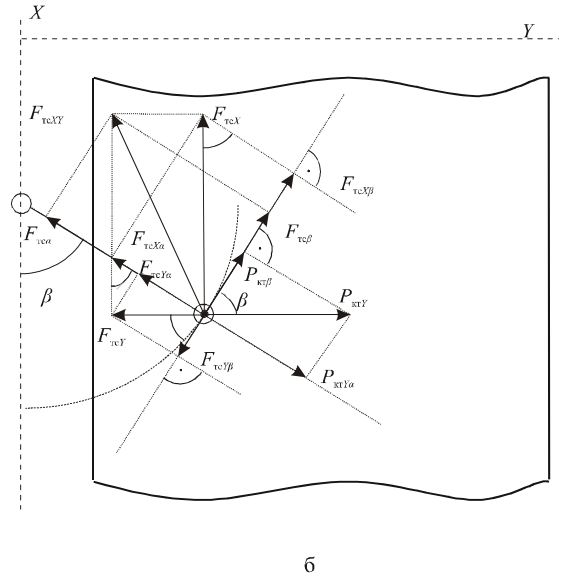
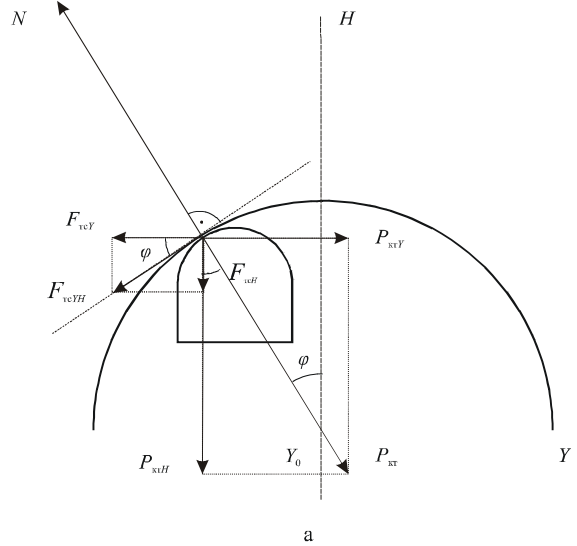


Рис. 3. Расчетная схема для определения обобщенных сил

Проекция продольной силы трения скольжения $F_{\text{т.с}X}$ на касательную к круговой траектории (см. рис. 3б), обобщенной координаты β :

$$F_{\text{т.с}X\beta} = \mu \cdot P_{\text{кт}} \cdot \sin \beta. \quad (15)$$

Эта же сила, как показано на рис. 4, воздействует на штанги токоприемника по обобщенной координате α , и ее проекция равна:

$$F_{\text{т.с}X\alpha} = \mu \cdot P_{\text{кт}} \cdot \cos \beta. \quad (16)$$

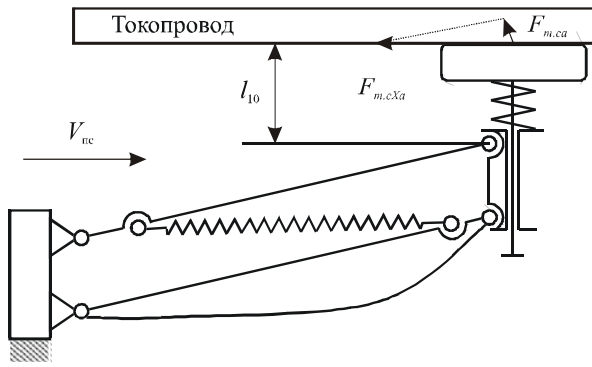


Рис. 4. Действие силы трения скольжения на первый по ходу движения подвижного состава токоприемник

Силу $F_{T,cYH}$ можно разложить на геометрическую сумму сил $F_{T,cY}$ и $F_{T,cH}$:

$$F_{T,cYH} = \sqrt{F_{T,cY}^2 + F_{T,cH}^2}, \quad (17)$$

где $F_{T,cY}$ – сила трения скольжения, действующая в горизонтальной плоскости; $F_{T,cH}$ – сила трения скольжения, действующая на контактный элемент в вертикальной плоскости.

Из рис. 3а видно:

$$F_{T,cH} = F_{T,cYH} \cdot \sin \varphi; \quad (18)$$

$$F_{T,cY} = F_{T,cYH} \cdot \cos \varphi. \quad (19)$$

Проекция силы $F_{T,cY}$ на касательную к траектории движения центра контактного элемента является, аналогично $P_{кTY}$ (см. рис. 3б), силой, действующей на штанги по обобщенной координате β . С учетом вышесказанного проекция:

$$F_{T,cY\beta} = F_{T,cY} \cdot \cos \beta. \quad (20)$$

Эта же сила воздействует на штанги токоприемника по обобщенной координате α , и ее проекция равна:

$$F_{T,cY\alpha} = F_{T,cY} \cdot \sin \beta. \quad (21)$$

Результирующие силы трения скольжения, действующие по обобщенным координатам α и β (см. рис. 3б), соответственно:

$$F_{T,c\alpha} = F_{T,cX\alpha} + F_{T,cY\alpha}; \quad (22)$$

$$F_{T,c\beta} = F_{T,cX\beta} - F_{T,cY\beta}. \quad (23)$$

Сумма работ задаваемых сил и сил трения скольжения $F_{T,c}$ на возможном перемещении точек системы, соответствующем обобщенному возможному перемещению, например $\delta\alpha$, соответственно равна:

$$\sum \delta A_{\alpha} = \delta A_{\alpha}(M_{\omega\alpha}) +$$

$$+ \delta A_{\alpha}(P_{кTY\alpha}) + \delta A_{\alpha}(F_{T,c\alpha}). \quad (24)$$

Обобщенные силы Q_i являются коэффициентами пропорциональности, стоящими при δi , в выражениях, определяющих δA .

После определения частных производных и их подстановки в систему уравнений (1) были получены итоговые уравнения Лагранжа, решая которые можно получить функции углов наклона рычагов токоприемника α и β в функции времени. Зная эту функцию, на следующем шаге рассчитывается кривая контактного нажатия, по которой находится ее минимум и максимум для конкретной скорости. Получив их значения для определенного интервала скоростей, строится динамическая характеристика токоприемника.

В расчете принято допущение о безотрывном движении токоподъемного элемента по токопроводу, т.е. силы, прижимающие токоподъемный элемент к токопроводу, всегда больше сил, стремящихся оторвать его от токопровода.

Выражение для движения контактного элемента, показанного на рис. 5, выводится из уравнения окружности:

$$(H - H_c)^2 + (Y - Y_c)^2 = r^2, \quad (25)$$

где $(H_c; Y_c)$ – координата центра окружности, т.е. центра токопровода, с радиусом r ; $(H; Y)$ – координаты точки принадлежащей окружности, т.е. положение центра контактного элемента относительно токопровода.

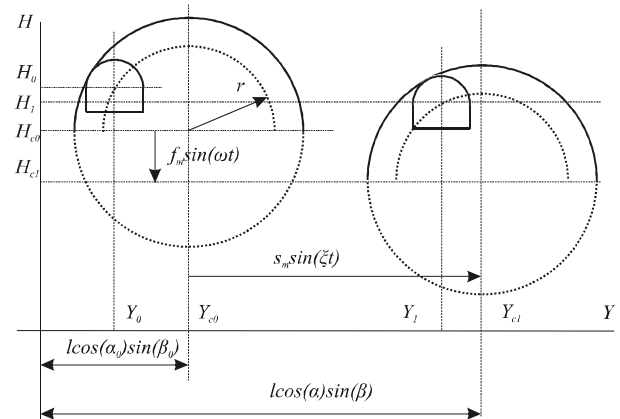


Рис. 5. Расчетная схема для определения движения контактного элемента

Координата H_c является функцией, которая выражает стрелу провеса токопровода, имеющую в расчете синусоидальный вид:

$$H_c = H_{c0} + f_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ), \quad (26)$$

где H_{c0} – исходная координата высоты центра токопровода относительно принятой системы

отсчета; f_m – амплитуда вертикальных колебаний токопровода; t – время; ω – частота вертикальных колебаний токопровода:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{V_{\text{пс}}}{l_{\text{пр}}}, \quad (27)$$

$V_{\text{пс}}$ – скорость движения подвижного состава; $l_{\text{пр}}$ – длина пролета токопровода.

Координата Y_c является функцией, которая выражает величину горизонтального отклонения токопровода, имеющую в данном расчете синусоидальный вид:

$$Y_c = Y_{c0} + s_m \cdot \sin(\xi \cdot t), \quad (28)$$

где s_m – амплитуда горизонтальных колебаний токопровода; Y_{c0} – исходное положение центра токопровода в горизонтальной плоскости (см. рис. 5), которое может быть выражено следующим образом:

$$Y_{c0} = l \cdot \cos \alpha_0 \cdot \sin \beta_0; \quad (29)$$

ξ – частота горизонтальных колебаний токопровода:

$$\xi = 2\pi \cdot \frac{V}{n \cdot l}, \quad (30)$$

n – число отклоняющихся в одну сторону пролетов.

Промежуточное положение контактного элемента в горизонтальной плоскости:

$$Y = l \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta. \quad (31)$$

С учетом вышесказанного выражение для движения контактного элемента (25) примет вид:

$$H = H_{c0} + f_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ) + \sqrt{R^2 - [l \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta - Y_c]^2}. \quad (32)$$

Скорость и ускорение перемещения токоприемного элемента рассчитывается как первая и вторая производные формулы (32), соответственно.

Расчет полученной системы уравнений выполнен в программе MathCAD. Для нижеследующих исходных данных построена кривая контактного нажатия, показанная на рис. 6:

$f_m = 1$ мм; $s_m = 1$ см; $V_{\text{пс}} = 20$ м/с; $l_{\text{пр}} = 2$ м.

Данная математическая модель позволяет учесть горизонтальные колебания, имеющие место при данной форме контактной поверхности. Учет обобщенной координаты β дает возможность отслеживать перемещение точки то-

косъема поперек поверхности взаимодействующей пары, оценивать силу контактного нажатия как сумму горизонтального (см. рис. 6) и вертикального воздействия, так и отдельно.

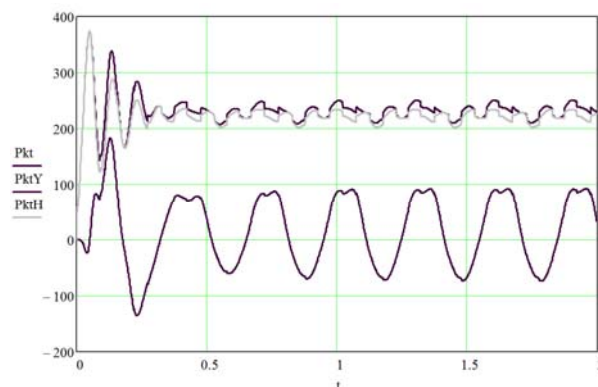


Рис. 6. Фрагмент кривой контактного нажатия:

$P_{\text{кТ}}$ – результирующее нажатие;
 $P_{\text{кТГ}}$ – по горизонтали;
 $P_{\text{кТН}}$ – по вертикали

Линейный стенд для исследования взаимодействия токоприемников с жестким токопроводом С-образной формы спроектирован и реализован в лаборатории «Контактные сети, линии электропередачи и устройства токосъема» ОмГУПС. В настоящее время проводятся экспериментальные исследования для проверки математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров, О. А. Токосъем в монорельсовых системах [Текст] / О. А. Сидоров // Мир транспорта. – 2004. – № 3. – С. 30-39.
2. Сидоров, О. А. Совершенствование систем токосъема монорельсовых транспортных систем [Текст] / О. А. Сидоров, В. В. Томилов // Современная техника и технологии : сб. тр. XIV Межд. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых (Труды в 3-х т.) – Т. 1. – Томск, 2008.
3. Сидоров, О. А. Моделирование взаимодействия токоприемника с жестким токопроводом монорельсовой транспортной системы [Текст] / О. А. Сидоров, В. В. Томилов // Науч.-техн. проблемы транспорта, промышленности и образования : тр. Всерос. науч. конф. (в 6 томах). – Т. 6. – Хабаровск: ДВГУПС, 2008. – С. 256-260.
4. Сидоров, О. А. Расчет динамики взаимодействия токоприемника и жесткого токопровода при низких температурах [Текст] / О. А. Сидоров, В. В. Томилов // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2009» (в 3 ч.) – Ч. 3. – Ростов-на-Дону, 2009. – С. 281-283.

Поступила в редколлегию 14.01.2010.

Принята к печати 21.01.2010.