

Доктор техн.наук, проф. В.Д. Данович, доктор техн.наук, проф. М.Л. Коротенко, канд.техн.наук С.В. Мямлин, Л.А. Недужая (ДИИТ)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОВОЗА С МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ КУЗОВА С ТЕЛЕЖКАМИ

Наведено математичну модель просторових коливань магістрального вантажного електровоза з нетрадиційною схемою ресорного підвішування. Обрано розрахункову схему, визначено кількість ступенів свободи системи, за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду одержано диференціальні рівняння руху механічної системи "екіпаж-колія".

The mathematical model of space oscillations of a turnpike cargo electric locomotive with the non-traditional scheme gear of suspension is indicated. The settlement scheme is selected, the amount of degree of freedoms of a system is determined, with help of equations of the Lagrange of the second kind the differential equations of movement of a mechanical system "vehicle - track" are obtained.

На грузовых электровозах (ВЛ80, ВЛ10 и др.) широко распространена конструкция люлечного подвешивания, в которой совмещены функции люльки и упругого элемента вертикальной связи кузова с тележками [1]. Такая конструкция достаточно компактна, но недостаточно надежна в эксплуатации [2]. При проектировании нового электровоза ДЭ1 УЭлНИИ предложил схему опирания кузова на тележки, имеющую промежуточные балки, с которыми связан кузов люлечными подвесками. Промежуточные балки при помощи пружин, воспринимающих вертикальную нагрузку, опираются на рамы тележек. Помимо этого, рассматриваемая конструкция отличается от известных (ВЛ80, ВЛ10) тем, что связь кузова и тележек в продольном направлении осуществляется при помощи наклонных тяг. В настоящей статье приводится математическая модель пространственных колебаний электровоза, имеющего отмеченные выше особенности конструкции (рис. 1).

При обычных допущениях [3, 4] электровоз рассматривается как механическая система, состоящая из 15 твердых тел: кузова, двух рам тележек, четырех соответственно промежуточных балок, тяговых электродвигателей (ТЭД) и колесных пар - и восьми масс пути, приведенных к точкам контакта колес с рельсами, которые перемещаются в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях.

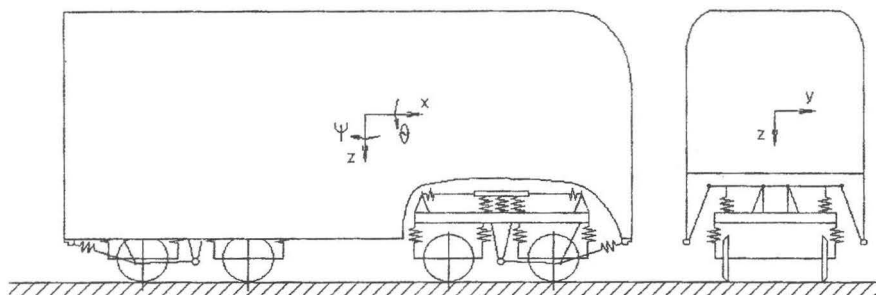


Рис. 1. Расчетная схема электровоза

Обозначим через x, y, z перемещения тел вдоль координатных осей, а через θ, φ, ϕ - углы поворота относительно указанных осей. Положительные линейные перемещения - вдоль соответствующих осей, положительные угловые перемещения - против часовой стрелки, если смотреть с положительного направления соответствующей оси. В дальнейшем без индексов обозначены перемещения кузова, с индексом i ($i = 1, 2$ - номер тележки) - рам тележек, с индексом $пik$ - промежуточных балок, с индексом $пm$ ($m = 1, 2$ - номер колесной пары в тележке) - колесных пар, с индексом $дm$ - ТЭД, с индексом $пik$ - приведенных масс пути ($k = 1$ - с левой стороны по ходу движения электровоза, $k = 2$ - с правой стороны).

Уравнения связей, наложенных на тела системы, имеют следующий вид.

Кузов и промежуточные балки в вертикальном направлении связаны так, что

$$z_{пik} + (-1)^k (b_{то} - b_{сн}) \theta_{пik} = z + (-1)^k b_{ко} \theta, \quad \varphi_{пik} = \varphi, \quad (1)$$

где $2b_{то}$ - расстояние в поперечном направлении между точками крепления промежуточных балок к раме тележки, $2b_{ко}$ - то же к кузову люлечных подвесок, $b_{сн}$ - расстояние в поперечном направлении от центра масс промежуточной балки до точки ее крепления к тележке.

Связи между промежуточными балками и рамой тележки таковы, что при вертикальных и горизонтальных поперечных перемещениях:

$$z_{пik} - (-1)^k b_{сн} \theta_{пik} = z_i, \quad y_{пik} = y_i, \quad (2)$$

$$x_{пik} = x_i - (-1)^k \phi_i (b_{то} + b_{сн}), \quad \phi_{пik} = \phi_i. \quad (3)$$

На ТЭД и колесные пары тележек наложены связи, препятствующие взаимным перемещениям во всех направлениях, кроме галопирования ТЭД, то есть

$$x_{\text{dim}} = x_{\text{im}}, \quad y_{\text{dim}} = y_{\text{im}} + (-1)^m l_{\text{ц}} \phi_{\text{im}}, \quad (4)$$

$$z_{\text{dim}} = z_{\text{im}} - (-1)^m l_{\text{ц}} \phi_{\text{dim}}, \quad \theta_{\text{dim}} = \theta_{\text{im}}, \quad \phi_{\text{dim}} = \phi_{\text{im}},$$

где $l_{\text{ц}}$ - расстояние в продольном направлении между центрами масс колесной пары и якоря ТЭД.

Колеса движутся без проскальзывания (они принимаются во внимание при определении сил псевдоскольжения)

$$\phi_{\text{im}} = x_{\text{im}} / r \quad (5)$$

и без отрыва от рельсов

$$z_{\text{pimk}} = z_{\text{im}} + (-1)^k b_2 \theta_{\text{im}} + \Delta r_{\text{imk}} - \eta_{\text{imk}}, \quad (6)$$

где $2b_2$ - расстояние в поперечном направлении между кругами катания колес.

Итак, число уравнений связей равно 56 и система имеет $15 \cdot 6 + 2 \cdot 8 - 56 = 50$ степеней свободы.

Обобщенные координаты (без координат приведенных масс рельсов в горизонтальной плоскости) выражаются через перемещения тел следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} q_1 = z, \quad q_2 = \varphi, \quad q_3 = \theta, \quad q_4 = y, \quad q_5 = \phi & \quad - \text{перемещения кузова,} \\ q_n = z_i \quad (n=6,7), \quad q_n = \varphi_i \quad (n=8,9), \quad q_n = \theta_i \quad (n=10,11), \\ q_n = y_i \quad (n=12,13), \quad q_n = \phi_i \quad (n=14,15) & \quad - \text{перемещения рам тележек,} \\ q_n = z_{\text{im}} \quad (n=16-19), \quad q_n = \theta_{\text{im}} \quad (n=20-23), \\ q_n = y_{\text{im}} \quad (n=24-27), \quad q_n = \phi_{\text{im}} \quad (n=28-31) & \quad - \text{перемещения колесных пар,} \\ q_n = x_i \quad (n=32,33), \quad q_n = x_{\text{im}} \quad (n=34-37), \quad q_{38} = x & \quad - \text{подергивания тел,} \\ q_n = \phi_{\text{dim}} \quad (n=39-42) & \quad - \text{продольная качка ТЭД.} \end{aligned} \quad (7)$$

Кинетическая энергия системы найдена как сумма кинетических энергий всех тел [1]

$$T = T_o + T_p + T_B + T_k + T_d + T_n, \quad (8)$$

где T_o , T_p , T_B , T_k , T_d , T_n - кинетические энергии соответственно кузова, рам тележек, промежуточных балок, колесных пар, ТЭД, приведенных масс рельсов в точках контакта. Здесь

$$T_o = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} I_x \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_y \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} I_z \dot{\phi}^2, \quad (9)$$

$$T_p = \sum_{i=1}^2 T_{\pi} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 [(m_{\pi} + 2m_d l_{\text{ц}} / l_d) (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) + I_{\pi} \dot{\theta}_i^2 + (I_{\gamma} + 2m_d l_{\text{ц}} / l_d * l_n^2) \dot{\varphi}_i^2 + \quad (10)$$

$$+ (I_z + 2m_d l_{\text{ц}} / l_d * l_n^2) \dot{\phi}_i^2],$$

$$T_B = \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 T_{\text{пik}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \{ m_n [2 \dot{x}_i^2 + 2 \dot{y}_i^2 + 2 (I - \frac{b_{\text{cn}}}{b_n})^2 \dot{z}_i^2] + 2 \frac{I_{\text{rx}}}{b_n^2} \dot{z}_i^2 + 2 I_{\text{nz}} \dot{\phi}_i^2 \} +$$

$$+ \frac{1}{2} \left[\frac{4}{b_n^2} (m_n b_{cn}^2 + I_{nx}) \dot{z}^2 + \frac{4}{b_n^2} (b_{ko}^2 - h_{ko} \operatorname{tg} \delta_0)^2 (m_n b_{cn}^2 + I_{nx}) \dot{\theta}^2 + 4 I_{nz} \dot{\varphi}^2 \right] + \quad (11)$$

$$+ \frac{2}{b_n} \left[m_n \left(1 - \frac{b_{cn}}{b_n} \right) b_{cn} - \frac{I_{nx}}{b_n} \right] \dot{z} (\dot{z}_1 + \dot{z}_2),$$

$$T_k = \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 T_{kim} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 [(m_k + m_a (l_a - l_u) / l_a) (\dot{x}_{kim}^2 + \dot{y}_{kim}^2 + \dot{z}_{kim}^2) + \frac{I_{ky}}{r^2} \dot{x}_{im}^2 + \quad (12)$$

$$(I_{kx} + I_{ax}) \dot{\theta}_{im}^2 + (I_{kz} + I_{az} + (m_k + m_a (l_a - l_u) / l_a) a_{zk}^2) \dot{\phi}_{im}^2 - 2(-1)^m (m_k + m_a (l_a - l_u) / l_a) a_{zk} \dot{y}_{im} \dot{\phi}_{im}],$$

$$T_a = \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 T_{aim} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 [(m_a (l_a - l_u) l_u^2 / l_a + I_{ay}) \dot{\varphi}_{aim}^2 - 2(-1)^m m_a (l_a - l_u) l_u / l_a \dot{z}_{im} \dot{\varphi}_{aim}], \quad (13)$$

$$T_{\pi} = \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 T_{pimk} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 m_z [2 \dot{z}_{im}^2 + (\operatorname{tg}^2 \alpha_{im1} + \operatorname{tg}^2 \alpha_{im2}) \dot{y}_{im}^2 + (b_{im1}^2 + b_{im2}^2) \dot{\theta}_{im}^2], \quad (14)$$

где $I_x, I_y, I_z, I_{Tx}, I_{Ty}, I_{Tz}, I_{Px}, I_{Py}, I_{Pz}, I_{Kx}, I_{Ky}, I_{Kz}, I_{Dx}, I_{Dy}, I_{Dz}, m, m_r, m_{\Pi}, m_k, m_d$ - моменты инерции и массы соответственно кузова, рамы тележки, промежуточной балки, колесной пары, ТЭД; l_a - расстояние в продольном направлении между центром масс колесной пары и осью маятниковой подвески ТЭД, $b_{imk} = (-1)^k b_2 - r \operatorname{tg} \alpha_{imk}$; m_z - приведенная масса пути; r - радиус колеса по кругу катания; α_{imk} - угол наклона плоскости, касательной к поверхности катания колеса в точке контакта.

Общее выражение для кинетической энергии имеет вид

$$T = \frac{1}{2} [a_z \dot{z}^2 + a_{\varphi} \dot{\varphi}^2 + a_{\theta} \dot{\theta}^2 + a_y \dot{y}^2 + a_{\phi} \dot{\phi}^2 + a_x \dot{x}^2 + \sum_{i=1}^2 (a_{xi} \dot{x}_i^2 + a_{zi} \dot{z}_i^2 + a_{\varphi i} \dot{\varphi}^2 + \quad (15)$$

$$a_{\theta i} \dot{\theta}_i^2 + a_{y i} \dot{y}_i^2 + a_{\phi i} \dot{\phi}_i^2) + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 (a_{zim} \dot{z}_{im}^2 + a_{\theta im} \dot{\theta}_{im}^2 + a_{yim} \dot{y}_{im}^2 + a_{\phi im} \dot{\phi}_{im}^2 + a_{xim} \dot{x}_{im}^2 +$$

$$+ a_{\varphi dim} \dot{\varphi}_{dim}^2)] + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 (a_{yim \phi im} \dot{y}_{im} \dot{\phi}_{im} + a_{zim \varphi tim} \dot{z}_{im} \dot{\varphi}_{tim}),$$

где $a_z, a_{\varphi}, a_{\theta}, a_y, a_{\phi}, a_x, a_{y i}, a_{x i}, a_{z i}, a_{\varphi i}, a_{\theta i}, a_{\phi i}, a_{z im}, a_{y im}, a_{x im}, a_{\varphi im}, a_{\theta im}, a_{y im \phi im}, a_{z im \varphi tim}$ - инерционные коэффициенты.

Обобщенные силы определяются как коэффициенты при вариациях обобщенных координат в соответствующих выражениях возможной работы.

Силы взаимодействия между колесами и рельсами в горизонтальной плоскости определяются по теории Картера.

После подстановки выражений кинетической энергии и обобщенных сил в уравнения Лагранжа второго рода получены следующие дифференциальные уравнения движения системы:

$$a_z \ddot{q}_1 + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 (S_{kzim}^0 + S_{kzim}^A) + \sum_{i=1}^2 S_{Tzi} + \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 (S_{kziok}^0 + S_{kziok}^A) = 0, \quad (n=1)$$

$$a_{\varphi} \ddot{q}_2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^i \{ [1 + (-1)^{i+m} a_n] S_{kzimk}^0 + [1 + (-1)^{i+m} a_n] S_{kzimk}^A \} + \\ + \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^i I (S_{kziok}^0 + S_{kziok}^A) + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 (h_{ko} S_{kximk}^0 + h_{kz} S_{kximk}^A) + \\ + \sum_{i=1}^2 (-1)^i (h_k S_{Txi} + l_k S_{Tzi}) - h_a S_y = 0, \quad (n = 2)$$

$$a_{\theta} \ddot{q}_3 + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 \{ (-1)^k [(b_{ko} - h_{ko} \operatorname{tg} \delta_0) S_{kzimk}^0 + b_{kz} S_{kzimk}^A] - h_{kz} S_{kyimk}^A \} + \\ + \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 \{ (-1)^k [(b_{ko} - \operatorname{tg} \delta_0) S_{kziok}^0 + b_{kz} S_{kziok}^A] - h_{kz} S_{kyiok}^A \} - h_k \sum_{i=1}^2 S_{Tyi} + \\ + \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^k h_y S_{yik} = 0, \quad (n = 3)$$

$$a_y \ddot{q}_4 + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 [S_{kyimk}^0 + S_{kyimk}^A + (-1)^k S_{kzimk}^0 \operatorname{tg} \delta_0] + \\ + \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 [(-1)^k S_{kziok}^0 \operatorname{tg} \delta_0 + S_{kyiok}^A] - \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^k S_{yik} + \sum_{i=1}^2 S_{Tyi} = 0, \quad (n = 4)$$

$$a_{zi} \ddot{q}_n - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 (S_{kzimk}^0 + S_{kzimk}^A) - \sum_{k=1}^2 (S_{kziok}^0 + S_{kziok}^A) + S_{Tzi} + \\ + \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 S_{Bzimk} + \sum_{m=1}^2 S_{Dzim} = 0, \quad (n = 5 + i)$$

$$a_{\phi} \ddot{q}_5 - \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 \{ (-1)^k (-1)^i [1 + (-1)^{i+m} a_n] \operatorname{tg} \delta_0 S_{kzimk}^0 + (-1)^i [1 + (-1)^{i+m} a_0] S_{kyimk}^0 + \\ + (-1)^k b_{ko} S_{kximk}^0 + (-1)^i [1 + (-1)^{i+m} a_n] S_{kyimk}^A + (-1)^k b_{kz} S_{kximk}^A \} - \\ - \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 I [(-1)^{k+i} \operatorname{tg} \delta_0 S_{kziok}^0 + (-1)^i S_{kyiok}^A] + \sum_{i=1}^2 (S_{k\phi i}^0 + S_{k\phi i}^A) + \\ + \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+k} l S_{yik} + \sum_{i=1}^2 (-1)^i l_k S_{Tyi} = 0, \quad (n = 5)$$

$$a_{\varphi i} \ddot{q}_n - \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 [(-1)^m (a_n S_{kzimk}^0 + a_n S_{kzimk}^A) - (h_{To} S_{kximk}^0 + h_{Tz} S_{kximk}^A)] - \\ - (-1)^i h_T S_{Txi} + (-1)^i l_T S_{Tzi} - (h_w - h) S_{mi} + \\ + \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 [h_B S_{Bzimk} + (-1)^m l S_{Bzimk}] + \sum_{m=1}^2 (-1)^m l_n S_{Dzim} = 0, \quad (n = 7 + i)$$

$$\begin{aligned}
& a_{\phi i} \ddot{q}_n - \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 [(-1)^k (b_n S_{kzim}^0 + b_{Ta} S_{kzim}^a) + h_{Ta} S_{kyim}^a] - \sum_{k=1}^2 [(-1)^k (b_n S_{kziok}^0 + b_{Ta} S_{kziok}^a) + \\
& + h_{Ta} S_{kyiok}^a] + \sum_{k=1}^2 (-1)^k (h - h_y) S_{yik} - h_T S_{Tyi} - \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 [h_y S_{zyim} - (-1)^k (b_T - (-1)^k b_{am}) - \\
& - S_{Bzim}] - \sum_{m=1}^2 (h_{ti} S_{zyim} - b_{pm} S_{azim}) = 0, \quad (n = 9 + i) \\
& a_{yi} \ddot{q}_n - \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 [(-1)^k \text{tg} \delta_0 S_{kzim}^0 + S_{kyim}^0 + S_{kyim}^a] - \sum_{k=1}^2 [(-1)^k \text{tg} \delta_0 S_{kziok}^0 + S_{kyiok}^a] + \\
& + \sum_{k=1}^2 (-1)^k S_{yik} + S_{Tyi} + \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 S_{Byim} + \sum_{m=1}^2 S_{Jyim} = 0, \quad (n = 11 + i) \\
& a_{\phi i} \ddot{q}_n + \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 [(-1)^{k+m} a_n \text{tg} \delta_0 S_{kzim}^0 + (-1)^m a_0 S_{kyim}^0 + (-1)^k b_{To} S_{kzim}^0 + (-1)^m a_a S_{kyim}^a + \\
& + (-1)^k b_{Ta} S_{kzim}^a] + S_{k\phi i}^0 + S_{k\phi i}^a - (-1)^i S_{Tyi} l_T - \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 [(-1)^k (b_l - (-1)^k b_{am}) S_{Bzim} + \\
& + (-1)^m l_i S_{Byim}] + \sum_{m=1}^2 [S_{B\phi im} - (-1)^m l_n S_{zyim}] = 0, \quad (n = 13 + i) \\
& a_{zim} \ddot{q}_n + a_{zim \phi im} \ddot{q}_{n+23} - \sum_{k=1}^2 S_{Bzim} + S_{Jzim} + \sum_{k=1}^2 S_{Bzim} = 0, \quad (13 + 2i + m) \\
& a_{\phi im} \ddot{q}_n - \sum_{k=1}^2 (-1)^k (b_1 - (-1)^k b_{am}) S_{Bzim} + \sum_{k=1}^2 [r T_{yim} - r P_{cr} \text{tg} \alpha_{im} + \\
& + (-1)^k b_2 S_{Bzim}] = 0, \quad (n = 17 + 2i + m) \\
& a_{yim} \ddot{q}_n + a_{yim \phi im} \ddot{q}_{n+4} - \sum_{k=1}^2 S_{Byim} + S_{Jyim} + \sum_{k=1}^2 (T_{yim} - P_{cr} \text{tg} \alpha_{im}) = 0, \quad (n = 21 + 2i + m) \\
& a_{\phi im} \ddot{q}_n + a_{\phi im yim} \ddot{q}_{n-4} + \sum_{k=1}^2 (-1)^k (b_l - (-1)^k b_{am}) S_{Bzim} + (-1)^m a_{ax} S_{Byim}] + \\
& + S_{B\phi im} + (-1)^m (l_a - a_{ax}) S_{zyim} + \sum_{i=1}^2 (-1)^k (b_2 - (-1)^k b_{Jm}) T_{xim} = 0, \quad (n = 25 + 2i + m) \\
& a_{xi} \ddot{q}_n - \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 (S_{kzim}^0 + S_{kzim}^a) + (-1)^i S_{Txi} + \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 S_{Bxim} = 0, \quad (n = 31 + i) \\
& a_{xim} \ddot{q}_n - \sum_{k=1}^2 S_{Bxim} - 0.25 S_{xi} - \sum_{k=1}^2 T_{xim} = 0, \quad (n = 31 + 2i + m) \\
& a_{xi} \ddot{q}_{38} + \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^2 (S_{kzim}^0 + S_{kzim}^a) + \sum_{i=1}^2 ((-1)^i S_{Txi}) + S_{xi} = 0, \quad (n = 38)
\end{aligned}$$

$$a_{\varphi_{\text{dim}}} \ddot{q}_n + a_{\text{zim} \varphi_{\text{dim}}} \ddot{q}_{n-23} + (-1)^m l_{\text{д}} S_{\text{Дзим}} - F_{\text{зим}} (r_3 + r_{\text{ш}}) = 0, \quad (n = 36 + 2i + m),$$
 где $S_{\text{кримк}} (r=x, y, z)$ - силы, возникающие во второй ступени рессорного подвешивания; $S_{\text{бримк}} (r=x, y, z)$ - силы, возникающие в буксовом подвешивании; $S_{\text{бо}}$, $S_{\text{то}}$ - силы, передающиеся в стационарном режиме через буксовые поводки и через наклонные тяги соответственно; S_3 - силы тяги (торможения) электроваза; r_3 - радиус зубчатого колеса; $r_{\text{ш}}$ - радиус шестерни; $S_{\text{тп}} (r=x, y, z)$ - силы, возникающие в результате взаимных перемещений точек крепления наклонных тяг к кузову и к рамам тележек; $S_{\text{дтп}} (r=y, z)$ - силы в подвеске ТЭД; $T_{\text{пмк}} (r=x, y)$ - силы, псевдоскольжения; $F_{\text{дтп}}$ - силы, возникающие в зацеплении между ведущей шестерней и зубчатым колесом; h - высота центра масс кузова над центром масс рамы тележки; $h_{\text{ко}}$, $h_{\text{кт}}$, $h_{\text{клд}}$ $h_{\text{к}}$, $h_{\text{у}}$, $h_{\text{а}}$, - высота центра масс кузова соответственно над: точками крепления люлечных подвесок к кузову, точками крепления подвесок к промежуточным балкам (к раме), точками крепления к кузову гидроамортизаторов, точками крепления к кузову наклонной тяги, горизонтальной поперечной осью упругого упора, осью автосцепки; $h_{\text{то}}$ - высота точек крепления к тележке люлечных подвесок над центром масс рамы тележки; $h_{\text{тд}}$ - высота точек крепления к тележке гидроамортизаторов; $h_{\text{т}}$, $h_{\text{б}}$, $h_{\text{п}}$ - высота центра масс рамы тележки соответственно над: точкой крепления наклонной тяги к тележке, уровнем осей колесных пар, точкой крепления подвески ТЭД к раме тележки; $2l$ - база кузова; $2a_0$, $2a_{\text{д}}$, $2a_{\text{п}}$, $2l_{\text{к}}$, $l_{\text{т}}$, $2l_{\text{п}}$ - расстояние в продольном направлении соответственно между: точками крепления к кузову люлечных подвесок тележки, гидроамортизаторов, крайними пружинами одной тележки под промежуточной балкой, точками крепления к кузову наклонных тяг, центром тяжести рамы тележки и точкой крепления наклонной тяги к тележке, осями маятниковой подвески ТЭД одной тележки; $2b_{\text{клд}}$, $2b_{\text{тд}}$ - расстояние в поперечном направлении соответственно между точками крепления гидроамортизаторов к кузову и к раме тележки; δ_0 - угол наклона люлечной подвески к вертикали.

Полученная математическая модель была использована при определении рациональных параметров рессорного подвешивания электроваза ДЭ1 в процессе его проектирования. Проведенные после его изготовления динамические ходовые испытания показали, что данные расчетов, полученные с использованием приведенной математической модели, достаточно хорошо соответствуют результатам испытаний [5].

Список литературы

1. Магистральные электровазы: Общие характеристики. Механическая часть / В.И.Бочаров, И.Ф.Кодинцев, А.И.Кравченко и др. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.

2. Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / И.В.Бирюков, А.Н.Савоськин, Г.П.Бурчак и др. М.: Транспорт, 1992. 440 с.
3. Лазарян В.А. Динамика вагонов: Устойчивость движения и колебания. М.: Транспорт, 1964. 256 с.
4. Коротенко М.Л., Радченко Н.А. Сравнительная оценка электровозов различных конструкций с точки зрения устойчивости их невозмущенного движения. Киев: Наукова думка, 1973. 36 - 43 с.
5. Данович В.Д., Коротенко М.Л., Недужая Л.А. Сопоставление некоторых результатов экспериментальных и теоретических исследований динамических качеств электровоза ДЭ1 // Транспорт: Сб. науч. трудов. / Днепропетровск: ДИИТ, 1999. С. 123 - 129.