



MODERNIZATION OF VIBRATION-INSULATING SUSPENSION OF THE SHAFT OF TRACTION MOTORS OF HIGH-SPEED ELECTRIC TRAINS

Khromova Galina Alekseevna ¹

Kamalov Ikram Saidakbarovich ²

Izbasarov Abdurauf Utamurat ugli ³

¹ doctor tech. sciences, professor,

² associate professor,

³ assistant, the Department of Electric Rolling Stock,
State Transport University, Uzbekistan, Tashkent

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17341366>

ARTICLE INFO

Received: 05st October 2025

Accepted: 10th October 2025

Online: 13th October 2025

KEYWORDS

Electric rolling stock, high-speed electric train, vibration-insulating suspension of traction electric motor, rubber-metal shock absorber, dynamic calculation of vibration-insulating suspension, vibration protection.

ABSTRACT

The article presents a new design of vibration-insulating suspension for the shaft of a high-speed electric train traction electric motor, the novelty of the technical solution of which is protected by patent of the Republic of Uzbekistan for invention IAP No. 8040 [1].

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВИБРОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДВЕСКИ ВАЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

Хромова Галина Алексеевна ¹

Камалов Икрам Саидакбарович ²

Избасаров Абдурауф Утамурат угли ³

¹ доктор технических наук, профессор,

² доцент,

³ ассистент, кафедра

“Электроподвижной состав”, Ташкентский государственный транспортный
университет, Узбекистан, Ташкент

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17341366>

ARTICLE INFO

Received: 05st October 2025

Accepted: 10th October 2025

Online: 13th October 2025

KEYWORDS

Электроподвижной состав, высокоскоростной электропоезд, виброизоляционная подвеска

ABSTRACT

В статье представлена новая конструкция виброизолирующей подвески вала тягового электродвигателя высокоскоростного электропоезда, новизна технического решения которой защищена патентом Республики Узбекистан на изобретение IAP № 8040 [1].



*тягового электрического
двигателя,
резинометаллический
амортизатор, динамический
расчет виброизоляционной
подвески, виброзащита.*

Большинство отказов тяговых электродвигателей высокоскоростных электропоездов связано с возникновением недопустимых статических или периодически изменяющихся динамических нагрузок, приводящих к усталостному разрушению элементов тяговых электродвигателей (ТЭД). Наиболее характерными отказами тяговых электродвигателей являются разрушение опор и креплений тягового двигателя к раме тележки, механическое повреждение изоляции, излом соединительных болтов, пальцев щеткодержателей или качающейся траверсы. Усталостный характер разрушения элементов тяговых электродвигателей, согласно [2÷4], более характерен для креплений и опор ТЭД электропоездов, которые получают высокие ускорения и испытывают большие динамические нагрузки.

Нами предложена новая конструкция виброизоляционной подвески вала тяговых электрических двигателей высокоскоростных электропоездов, новизна технического решения которой защищена патентом Республики Узбекистан на изобретение IAP № 8040 [1]. Задачей нашего изобретения является повышение эффективности работы валов тяговых электрических двигателей за счет улучшения их вибрирующих характеристик, возможность гашения как низкочастотных, так и высокочастотных динамических нагрузок, повышение надежности и долговечности работы в целом всего тягового электрического двигателя, особенно при повышенных скоростях движения (рисунок 1).

Поставленная задача решается тем, что в виброизоляционной подвеске вала тяговых электрических двигателей подшипник расположен внутри виброизолирующего кольца, выполненного в виде внутреннего кольцевого элемента и наружного кольцевого элемента, между которыми размещены рессорные элементы и фигурный разрезной упругий кольцевой элемент, по внутренней стороне которого установлены пружины сжатия – растяжения с опорными фиксирующими шайбами, при этом сам фигурный разрезной упругий кольцевой элемент состоит из трех фигурных пазов и трех фигурных кольцевых элементов.

На рисунке 1 показана виброизоляционная подвеска вала тяговых электрических двигателей высокоскоростных электропоездов (поперечный разрез) по патенту Республики Узбекистан на изобретение IAP № 8040 [1].

Вал 1 устанавливается внутри подшипника 2, при этом подшипник 2 расположен внутри виброизолирующего кольца, выполненного в виде внутреннего кольцевого элемента 9 и наружного кольцевого элемента 10, между которыми размещены рессорные элементы 3 и составной упругий кольцевой

элемент состоящий из трех упругих кольцевых элементов 6. Рессорные элементы 3, выполняющие функцию рессоры, крепятся диаметрально относительно подшипника 2 с помощью хомутов 4. Для дополнительного демпфирования изгибных колебаний установлены пружины сжатия и растяжения 5 по внутренней стороне упругих кольцевых элементов 6. При этом каждый упругий кольцевой элемент 6 на одном из концов выполнен с пазом 7, а другом - с фигурным шипом 8. По внутренней стороне составного упругого кольцевого элемента, состоящего из трех упругих кольцевых элементов 6 установлены пружины сжатия и пружины растяжения 5 с опорными фиксирующими шайбами 11 (рисунок 1).

Виброизоляционная подвеска вала тяговых электрических двигателей высокоскоростных электропоездов по патенту Республики Узбекистан на изобретение IAP № 8040 [1] работает следующим образом.

При передаче крутящего момента от вала 1, каждый упругий кольцевой элемент 6 с пружинами сжатия и растяжения 5, и зафиксированные на внутренней части каждого упругого кольцевого элемента 6 рессорные элементы 3 гасят вибрацию, которая поступает от вала 1 к подшипнику 2. В целом вся конструкция работает как амортизатор, смягчая возникающие ударные нагрузки за счет возможности смещения рессор и фигурного разрезного кольца друг относительно друга. При действии осевых и радиальных усилий происходит радиальное смещение упругих кольцевых элементов 6, а именно шипов 8 в пазах 7 и за счет сжатия и растяжения пружин 5 опирающихся на шайбы 11.

При динамических нагрузках рессоры 3 и упругие кольцевые элементы 6 сглаживают вращение вала 1 и уменьшают частоту вибраций двигателя. С повышением скорости движения электропоезда эффект гашения (демпфирования) в предлагаемой нами конструкции увеличивается.

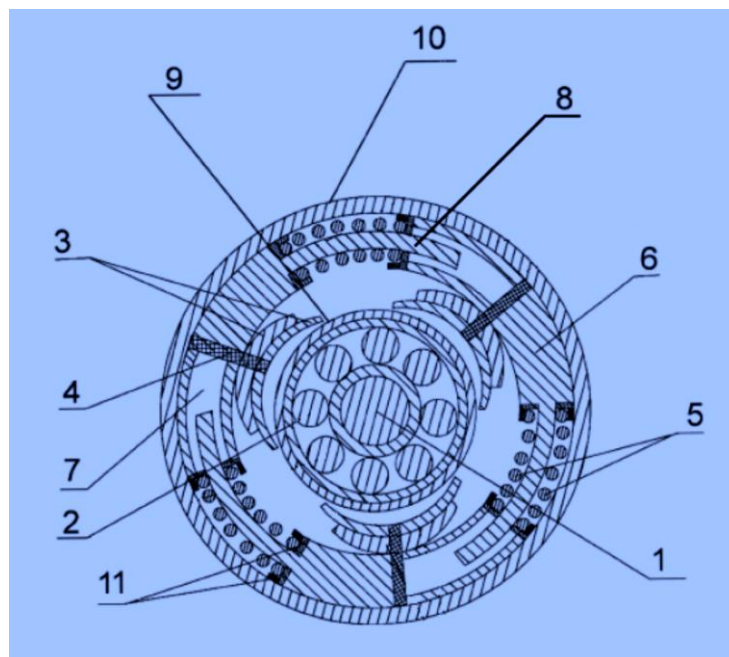




Рисунок 1. Конструкция виброизолирующей подвески вала тяговых электродвигателей высокоскоростных электропоездов (поперечный разрез) по патенту Республики Узбекистан на изобретение IAP № 8040 [1].

Таким образом, предлагаемая конструкция виброизоляционной подвески вала тягового электрического двигателя электропоезда создает условия для существенного снижения динамических нагрузок и повышения надежности и долговечности работы в целом всего тягового электрического двигателя электропоезда. Благодаря высокой степени демпфирования данная конструкция виброизоляционной подвески вала тяговых электрических двигателей может найти широкое применение на подвижном составе железных дорог, особенно при повышенных скоростях движения.

Для анализа демпфирующих и прочностных параметров модернизированной конструкции виброизоляционной подвески вала тягового электрического двигателя высокоскоростного электропоезда (фиг.1, [1]) проводится моделирование совместных изгибно-крутильных колебаний вала якоря тягового электрического двигателя электропоезда.

За расчетную модель принимаем вал круглого сплошного сечения со ступенчатым изменением диаметра и горизонтальной осью вращения OX , опирающегося на две шарнирные податливые опоры A и B . Ось OZ принимаем направленной вертикально.

Интенсивность распределенной массы $m(x)$, массовых моментов инерции $i_x(x)$ относительно оси вращения OX и $i_z(x)$ относительно оси, перпендикулярной к оси вращения OZ , в пределах участков $x = 0 \div a = L_0$ и $x = L_0 = a \div 2.4a$ считаем постоянными и равными соответственно m_1, i_{x1}, i_{z1} и m_2, i_{x2}, i_{z2} . Считаем, что центры тяжести отдельных сечений вала тягового электрического двигателя (ТЭД) электропоезда при их крутильных и изгибных колебаниях совпадают с линией нейтрального слоя этого вала.

Для принятой модели сечение вала ТЭД сечение при $\ell = \ell_B$ считаем консольным (свободный конец), а при $\ell = 0$ и $\ell = L_0$ в точках A и B имеем две шарнирные опоры, в которых установлена виброизолирующая подвеска ТЭД.

Имеем граничные условия для сечений вала ТЭД в виде:

При $\ell = \ell_B$ (на свободном конце (консоль) должны равняться нулю изгибающий момент и поперечная (перерезывающая сила):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 Y_B(\ell=\ell_B)}{\partial \ell^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 X_B(\ell=\ell_B)}{\partial \ell^2} = 0; \quad \frac{\partial^3 Y_n(\ell=0)}{\partial \ell^3} = 0; \\ \frac{\partial^3 X_B(\ell=\ell_B)}{\partial \ell^3} = 0; \quad \frac{\partial Q_B(\ell=\ell_B)}{\partial \ell} = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

При $\ell = 0$ и $\ell = L_0$ (в точках A и B имеем две шарнирные опоры), при этом в этих сечениях должны равняться нулю прогиб и изгибающий момент

$$\begin{aligned} Y_B(\ell = 0) = 0; \quad X_B(\ell = 0) = 0; \quad \frac{\partial^2 Y_B(\ell=0)}{\partial \ell^2} = 0; \\ \frac{\partial^2 X_B(\ell=0)}{\partial \ell} = 0; \quad Q_B(\ell = 0) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$



С учетом допущений, принятых в статьях [5,6], система дифференциальных уравнений для изгибных и крутильных колебаний вала якоря тягового электрического двигателя (ТЭД) электропоезда (с учетом того, что вал ТЭД имеет начальный статический прогиб R_B) имеет вид:

- для изгибных колебаний по двум осям OX и OY

$$m_B \left(\frac{\partial^2 X_B}{\partial t^2} - \omega^2 \cdot X_B + 2\omega \frac{\partial Y_B}{\partial t} \right) + EI_B \frac{\partial^4 X_B}{\partial \ell^4} - \frac{G_B I_0}{R_B} \cdot \frac{\partial^2 Q_B}{\partial \ell^2} + K_X X_B = \sum_{n=1}^3 P_{Xn} \cos n \omega_H \cdot t, \quad (3)$$

$$m_B \left(\frac{\partial^2 Y_B}{\partial t^2} - \omega^2 \cdot Y_B + 2\omega \frac{\partial X_B}{\partial t} \right) + EI_B \frac{\partial^4 Y_B}{\partial \ell^4} - \frac{G_B I_0}{R_B} \cdot \frac{\partial^2 Q_B}{\partial \ell^2} + K_Y Y_B = \sum_{n=1}^3 P_{Yn} \cos n \omega_H \cdot t, \quad (4)$$

- для крутильных колебаний по двум осям OX и OY

$$\frac{\partial^2 Q_B}{\partial t^2} - \gamma^2 \frac{\partial^2 Q_B}{\partial \ell^2} - \frac{1}{R_B} \frac{\partial^2 X_B}{\partial \ell^2} = \frac{M_X(t, \ell)}{I_{\Delta B}}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 Q_B}{\partial t^2} - \gamma^2 \frac{\partial^2 Q_B}{\partial \ell^2} - \frac{1}{R_B} \frac{\partial^2 Y_B}{\partial \ell^2} = \frac{M_Y(t, \ell)}{I_{\Delta B}}, \quad (6)$$

Рассмотрим статическую составляющую для уравнений системы (3) и (4) при условии равенства $t = 0$ и $\omega = 0$

$$\frac{\partial^4 X_B}{\partial \ell^4} - \alpha_x^2 * \frac{\partial^2 Q_B}{\partial \ell^2} + \hat{k}_X X_B = \bar{P}_{nx} * \left(1 - \cos \frac{2\pi \ell}{\ell_B} \right), \quad (7)$$

$$\beta_Q^2 * \frac{\partial^2 X_B}{\partial \ell^2} + \frac{\partial^2 Q_B}{\partial \ell^2} = -\bar{P}_{Qx}, \quad (8)$$

где обозначено

$$\beta_Q^2 = \frac{1}{R_B \gamma^2}; \quad \beta_x^2 = \frac{m_B}{E \cdot I_{BX}}; \quad \beta_Y^2 = \frac{m_B}{E \cdot I_{BY}};$$

$$\alpha_x^2 = G * I_0 / (R_B * E * I_x); \quad \alpha_Y^2 = G * I_0 / (R_B * E * I_Y);$$

$$\hat{k}_X = \frac{K_X}{E \cdot I_{BX}}; \quad \hat{k}_Y = \frac{K_Y}{E \cdot I_{BY}}.$$

Решим систему дифференциальных уравнений (7)÷(8) для статических составляющих, применив метод Фурье и операционное преобразование Лапласа по времени [5÷9], с учетом граничных условий (1) и (2).

В результате получим решения вида

$$X_0 = \frac{4\pi^2 R_x^4 P_{\Pi} R_{\Pi} \cos \lambda}{EI_x (\ell_{\Pi}^2 + 4\pi^2 R_x^2)} * \left(ch \frac{\ell_{\Pi}}{R_x} - 1 \right), \quad (9)$$

$$\dot{X}_0 = - \frac{4\pi^2 R_x^3 P_{\Pi} R_{\Pi} \cos \lambda}{EI_x (\ell_{\Pi}^2 + 4\pi^2 R_x^2)} * sh \frac{\ell_{\Pi}}{R_x}, \quad (10)$$

Далее был выполнен численный расчет на компьютере с использованием среды программирования *Mathcad 15* по методике статей с использованием метода итераций и кусочно-линейной аппроксимации [5÷9].

По данным аналитико-численных исследований можно сделать следующие обобщающие выводы:

1. Нами предложена новая конструкция виброизоляционной подвески вала тяговых электрических двигателей высокоскоростных электропоездов, новизна



технического решения которой защищена патентом Республики Узбекистан на изобретение № 8040 [1].

2. В результате применения комбинированного численно-аналитического метода на базе методов итераций и кусочно-линейной аппроксимации удалось создать инженерный прикладной метод динамического расчета по совместным изгибно-крутильным колебаниям вала тягового электрического двигателя (ТЭД), позволяющий проводить оценку динамических напряжений и деформаций при гармоническом нагружении.

References:

1. G. Khromova, S. Khromov, D. Rajibayev, M. Valiev, I. Kamalov I.S., M. Makhamadalieva. "Vibration-isolating suspension of the shaft of traction electric motors of high-speed electric locomotives". Patent of the Republic of Uzbekistan No. IAP 8040. Publ. 24.05.2025, Bul. № 5(290).
2. Грищенко А.В., Козаченко Е.В. Новые электрические машины локомотивов. Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. - М: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008.- 271 с.
3. Usmanxo'djaev N.M., Xromova G.A., Sviyazev V.P. Elektrovoz elektr jihozlari va ta'miri: Akademik litsey va kasb hunar kolledjlari uchun o'quv qo'llanma/ O'zbekiston Respublikasi oliy va o'rta-maxsus ta'lim vazirligi, Toshkent temir yo'l transport mahandislari institute. - T.: O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2007.- 120 b.
4. M. Spiryagin, C. Cole, Y. Sun and others, Design and Simulation of Rail Vehicles. Ground Vehicle Engineering series. 2014. CRC Press. - 337 p.
5. G. Khromova. Development of a method for calculating the dynamic strength of elastic curved surfaces of a complex configuration. //Journal «Bulletin of YuKazSU», series «Mechanical Engineering», 2007, No. 2, pp. 43-45.
6. Хромова Г.А., Худайкулиев Р.Р., Вершков С.А. Численно-аналитический метод прогнозирования ресурса деталей пространственной конфигурации. // Журнал «Доклады АН РУз», № 1, 2006, С.11-14.
7. G. Khromova, D. Radjibaev. Mathematical model and algorithm for calculating the durability indicators of electric locomotive bogie elements, // (India), International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, volume 9, issue 10, pp. 19901-19907, 2022.
8. G. Khromova, I. Kamalov, D. Mukhsimova. Methods for determining the stiffness of a rubber-metallic shock absorber of a pendulum suspension of a traction electric motor of an electric locomotive. // Eurasian Journal of Academic Research, Volume 3 Issue 2, Part 2, February 2023, pp.124-128. <https://www.doi.org/10.37547/ejar-v03-i02-p2-67>
9. G. Khromova, I. Kamalov, D. Mukhsimova. Theoretical basis for modernizing the supports of traction motors attached to the bogie frame of electric locomotive, //in AIP Conference Proceedings, 2025, 3256(1), CONMECHYDRO-2023, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336502003>.