



NUMERICAL STUDIES ON MODELING BENDING-TORSIONAL OSCILLATIONS OF THE SHAFT OF THE ANCHOR OF THE TRACTION ELECTRIC MOTOR OF A HIGH-SPEED ELECTRIC TRAIN

Khromova Galina Alekseevna¹

Kamalov Ikram Saidakbarovich²

Izbasarov Abdurauf Utamurat ugli³

¹doctor tech. sciences, professor, ²associate professor,

³doctoral student (PhD), the Department of Electric Rolling Stock, State Transport University, Uzbekistan, Tashkent

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19368916>

ARTICLE INFO

Received: 24th March 2026

Accepted: 30th March 2026

Online: 31st March 2026

KEYWORDS

Electric rolling stock, high-speed electric train, traction electric motor armature shaft, vibration-isolating suspension of traction electric motor, bending-torsional vibrations of the shaft of the anchor.

ABSTRACT

The article presents numerical studies on modeling bending-torsional vibrations of the shaft of the anchor of the traction electric motor of a high-speed electric train of a modernized design, the novelty of the technical solution of which is protected by patent of the Republic of Uzbekistan for invention No. 8040 [1].

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛА ЯКОРЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

Хромова Галина Алексеевна¹, Камалов Икрам Саидакбарович²

Избасаров Абдурауф Утамурат угли³

¹доктор технических наук, профессор,

²доцент, ³докторант ((PhD), кафедра “Электроподвижной состав”, Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, Ташкент

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19368916>

ARTICLE INFO

Received: 24th March 2026

Accepted: 30th March 2026

Online: 31st March 2026

KEYWORDS

Электроподвижной состав, высокоскоростной электропоезд, вал якоря тягового электрического

ABSTRACT

В статье представлены численные исследования по моделированию изгибно-крутильных колебаний вала якоря тягового электрического двигателя высокоскоростного электропоезда модернизированной конструкции, новизна технического решения которого защищена патентом Республики Узбекистан на изобретение № 8040 [1].



*двигателя,
виброизоляционная
подвеска тягового
электрического
двигателя, изгибно-
крутильные колебания
вала якоря.*

В мире важное место уделяется развитию и обеспечению безопасности высокоскоростного электроподвижного состава, (конкретно, электровозов и высокоскоростных электропоездов), усовершенствованию систем виброизоляционного подвешивания валов якорей тяговых электрических двигателей (ТЭД) на основании современных средств и оборудования с использованием передовых технологий. В развитых странах мира, таких как США, Англия, Франция, Испания, Германия, Япония, Китай, Россия и в других странах, при проектировании и создании новых электровозов и электропоездов при повышенном скоростном режиме особое внимание уделяется усовершенствованию управляемых систем виброизоляционного подвешивания, использующих пружинные или резинометаллические элементы для минимизации динамических нагрузок. Модернизированные конструкции, включая специализированные патентные решения, (в том числе патентные разработки в Узбекистане [1]), повышают надежность, снижают вибрацию и износ подшипниковых узлов при высоких скоростях.

Опыт эксплуатации тяговых электродвигателей электровозов и высокоскоростных электропоездов на железных дорогах мира показывает, что валы, подшипники ТЭД локомотивов часто выходят из строя, приводя во многих случаях к заклиниванию колесных пар и браку в поездной работе [2÷4]. Это объясняется тем, что валы и подшипники ТЭД воспринимают большие динамические нагрузки от неровностей рельсового пути и погрешностей зубчатого закрепления, обусловленные неравномерным износом зубьев, частыми буксованиями колесных пар от появления сравнительно больших зазоров в моторно-осевых подшипниках и соединениях колесно-моторных блоков со статорами тяговых электродвигателей и рамами тележек, а также не полным учетом специфики нагружения и условий эксплуатации при выполнении динамических расчетов таких валов и подшипников. В связи с этим создание новой методики расчета валов якорей и опор тяговых электродвигателей электровозов и высокоскоростных электропоездов с использованием новых численных технологий (на базе метода кусочно-линейной аппроксимации) является



актуальным, так как позволит наиболее точно оценивать напряженно-деформированное состояние в процессе эксплуатации.

Существующие методики расчета упругих валов ТЭД электровозов не позволяют учитывать сложность их пространственной конфигурации, неравномерность воздействия сил трения от эквивалентных демпферов сухого трения в виде опорных подшипников качения и коллекторно-щеточного узла. Якорь электрического двигателя постоянного тока представляет из себя сложную конструкцию: вал переменного сечения, состоящий из различных материалов (электротехническая сталь, медь, изоляционных материалов и пропиточного лака), расположенный в опорных подшипниках качения, внутри корпусной конструкции (статора). Силы сопротивления вращению вала (якоря) суммируются из четырех основных составляющих: 1). силы трения, зависящие от внешней динамической нагрузки (имеются в виду динамические нагрузки, возникающие от неровностей рельсового пути и погрешностей зубчатого закрепления, обусловленные неравномерным износом зубьев, частыми буксованиями колесных пар от появления сравнительно больших зазоров в моторно-осевых подшипниках и соединениях колесно-моторных блоков со статорами тяговых электродвигателей и рамами тележек); 2). силы трения-качения в

опорных подшипниках; 3). силы трения в коллекторно-щеточном узле; 4). силы сопротивления воздуха охлаждающего вентилятора, расположенного на валу якоря. В соответствии с представленной физической моделью якоря (вала) ТЭД эквивалентные демпферы комбинированного трения также можно разбить на 3 характерные группы: 1). эквивалентные демпферы «гидродинамического» трения в опорных подшипниках качения - точечный контакт при взаимодействии составного вала ТЭД с опорными подшипниками; 2). эквивалентные демпферы «сухого» трения при контакте коллектора якоря ТЭД с щетками; 3). эквивалентный демпфер «сухого» трения в виде диска с лопастями охлаждающего вентилятора.

За расчетную модель для вала якоря ТЭД высокоскоростного электропоезда 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 $ix(x)$ относительно оси вращения OX и $iz(x)$ относительно оси, перпендикулярной к оси вращения OZ , в пределах двух участков $x = 0 \div a = L_0$ и $x = L_0 = a \div 2.4a$ считаем постоянными и равными соответственно m_1, ix_1, iz_1 и m_2, ix_2, iz_2 . 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 А и В имеем две шарнирные опоры, в которых установлена виброизолирующая подвеска ТЭД.

Имеем граничные условия для сечений вала ТЭД в виде:

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

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

2 участок: при $\ell = 0$ и $\ell = L_0$ (в точках А и В имеем две шарнирные опоры), при этом в этих сечениях должны равняться нулю прогиб и изгибающий момент

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

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

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

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

- для крутильных колебаний по двум осям OX и OY

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

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

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

$$X_0 = \frac{4\pi^2 R_x^4 P_n R_n \cos \lambda}{EI_x (l_n^2 + 4\pi^2 R_x^2)} * \left(ch \frac{l_n}{R_x} - 1 \right), \quad (9)$$

$$\dot{X}_0 = - \frac{4\pi^2 R_x^3 P_n R_n \cos \lambda}{EI_x (l_n^2 + 4\pi^2 R_x^2)} * sh \frac{l_n}{R_x}, \quad (10)$$

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].

В результате находим суммарные динамические смещения

для двух участков вала ТЭД при изгибных колебаниях по двум осям OX и OY соответственно по формулам

$$\begin{aligned} X_{1B}(\ell, t) &= T_{1x}(t) \cdot X_{1B}(\ell); \\ Y_{1B}(\ell, t) &= T_{1y}(t) \cdot Y_{1B}(\ell); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} X_{2B}(\ell, t) &= T_{2x}(t) \cdot X_{2B}(\ell); \\ Y_{2B}(\ell, t) &= T_{2y}(t) \cdot Y_{2B}(\ell). \end{aligned} \quad (12)$$

Строим объемные графики для изменения суммарных динамических

смещений вала ТЭД: рисунок 1 – суммарные динамические смещения для первого участка вала для изменения $X_{1B}(\ell, t) \cdot 10^{-5}$ м и рисунок 2 – $Y_{1B}(\ell, t) \cdot 10^{-4}$ м. Очевидно, что динамические смещения $Y_{1B}(\ell, t)$ на порядок больше, чем смещения $X_{1B}(\ell, t)$, в центре участка при $\ell = 0.5 L_0$ наблюдаются максимальные прогибы нейтральной оси вала ТЭД.

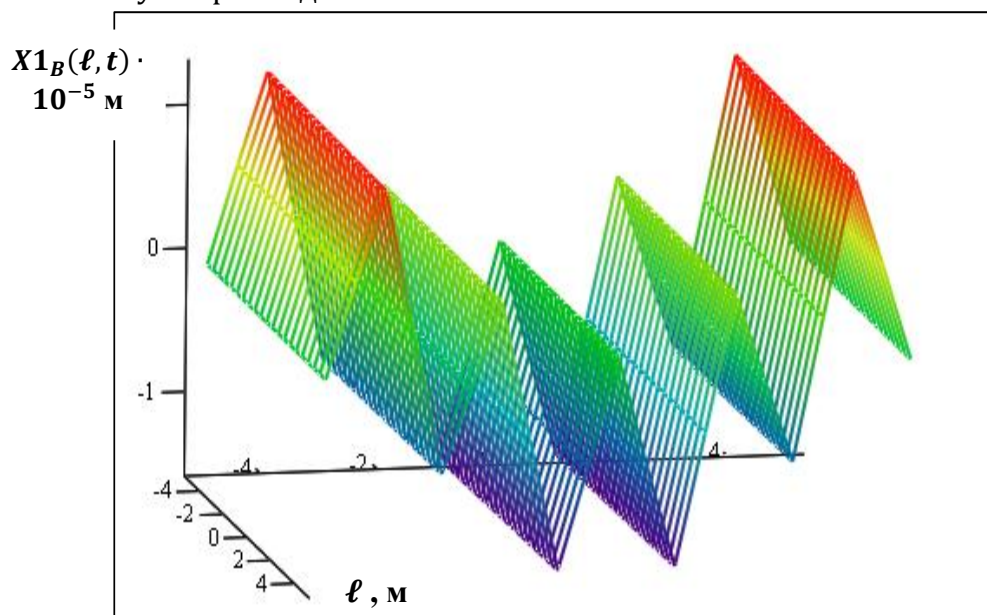
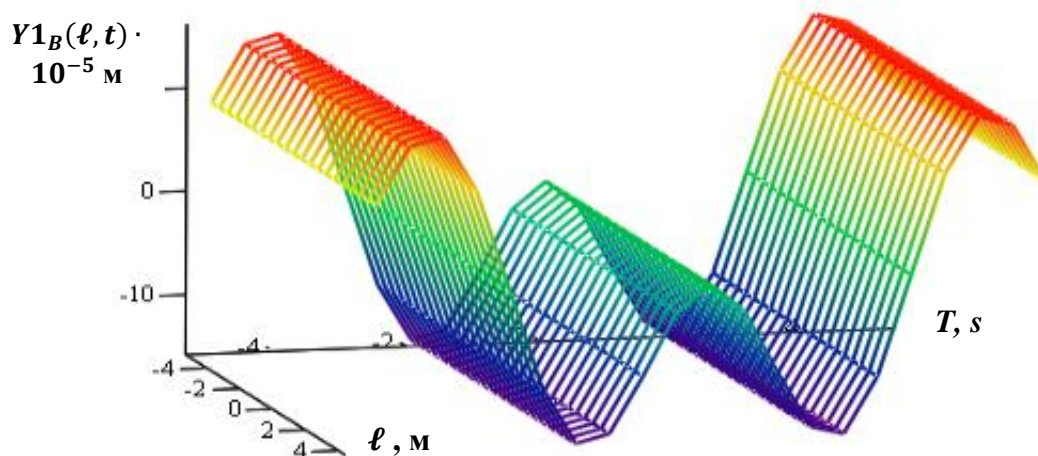


Рисунок 1. Объемный график для изменения суммарных динамических смещений вала ТЭД первого участка вала для изменения $X_{1B}(\ell, t) \cdot 10^{-5}$ м.

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

1. 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.



1. Объемный график для изменения суммарных динамических смещений вала ТЭД первого участка вала для изменения $Y1_B(l, t)$ м

в центре участка при $l = 0.5 L_0$.

2. Нами предложена новая конструкция виброизоляционной

подвески вала тяговых электрических двигателей высокоскоростных электропоездов, новизна технического решения которой защищена патентом Республики Узбекистан на изобретение № 8040 [1].

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. 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>.