

Модальный анализ и валидация модели остова тягового электродвигателя НБ-514Б электровоза 2(3)ЭС5К

О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.О. Линьков, А.В. Коновалов, С.А. Кахаев✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российской Федерации

✉vip.kakhaev@mail.ru

Резюме

В данной статье представлено моделирование колебаний оболочек с использованием в качестве примера остова тягового двигателя НБ-514 и цилиндрических резервуаров, а также проведена проверка на сходимость колебаний их физических объектов. Особое внимание уделено анализу сеточной сходимости и ее критическому влиянию на точность определения частоты основной моды колебаний. В ходе исследования было установлено, что для достижения удовлетворительной сходимости результатов моделирования необходимо обеспечить надежное закрепление объекта, а также следует применять сетку, шаг которой не превышает 3–5 толщин стенки оболочки. Соблюдение указанных условий позволяет значительно снизить погрешность моделирования частоты основной моды колебаний, достигая уровня около 10 % относительно экспериментальных данных. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность и широкую применимость метода конечных элементов для численного анализа сложных конструкций. Это также представляет собой важный шаг вперед на пути к созданию цифровых двойников изделий. Разработанная методика позволяет существенно сократить расходы на физическое тестирование и значительно улучшить прогнозирование характеристик оборудования. Работа развивает современные и инновационные подходы к исследованию, проектированию и повышению надежности электрооборудования электровозов, что делает ее особенно актуальной в сфере современного локомотивостроения, открывая новые перспективы для интеграции численного моделирования в практику проектирования и эксплуатации тягового подвижного состава.

Ключевые слова

тяговый двигатель НБ-514, собственные колебания, модальный анализ, метод конечных элементов, моделирование, построение модели

Для цитирования

Модальный анализ и валидация модели остова тягового электродвигателя НБ-514Б электровоза 2(3)ЭС5К / О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.О. Линьков, А.В. Коновалов, С.А. Кахаев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 1 (85). С. 101–114. DOI 10.26731/1813-9108.2025.1(85).101-114.

Информация о статье

поступила в редакцию: 30.01.2025 г.; поступила после рецензирования: 10.03.2025 г.; принята к публикации: 12.03.2025 г.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» на тему «Разработка цифрового двойника колесно-моторного блока электровоза «Ермак» серии 2(3)ЭС5К» № 124060500020-4 от 5 июня 2024 г.

Modal analysis and validation of the traction motor frame model NB-514B of the 2(3)ES5K electric locomotive

О.В. Mel'nicenko, А.Ю. Portnoi, А.О. Lin'kov, А.В. Konovalov, С.А. Kakhaev✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉vip.kakhaev@mail.ru

Abstract

This study presents the numerical modeling of shell vibrations using the traction motor frame NB-514 and cylindrical tanks as reference objects. A convergence analysis of the modeled vibrations was performed by comparing them with physical experiments. Special attention is paid to the mesh convergence and its critical impact on the accuracy of determining the fundamental mode frequency. The study has shown that achieving satisfactory convergence of modeling results requires reliable boundary conditions and the use of a finite element mesh with a step size not exceeding 3–5 times the wall thickness of the shell. Compliance with these conditions significantly reduces the modeling error of the fundamental frequency, bringing it down to approximately 10 % relative to experimental data. The results confirm the high efficiency and broad applicability of the finite element method for the numerical analysis of complex structures. This also represents an important step toward the development of digital twins of engineering products. The proposed methodology significantly reduces the need for physical testing

and greatly improves the accuracy of equipment performance prediction. The work advances modern and innovative approaches to the study, design, and reliability improvement of locomotive electrical equipment, making it highly relevant for modern locomotive engineering and opening up new opportunities for integrating numerical simulation into the design and operational practices of traction rolling stock.

Keywords

traction motor NB-514, natural vibrations, modal analysis, finite element method, modelling, model building

For citation

Mel'nicenko O.V., Portnoi A.Yu., Lin'kov A.O., Konovalov A.V., Kakhaev S.A. Modal'nyi analiz i validatsiya modeli ostova tyagovogo elektrosvigatelya NB-514B elektrovoza 2(3)ES5K [Modal analysis and validation of the traction motor frame model NB-514B of the 2(3)ES5K electric locomotive]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 1(85). Pp. 101–114. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.1(85).101-114.

Article Info

Received: January 30, 2025; Revised: March 10, 2025; Accepted: March 12, 2025.

Acknowledgements

The research was performed within the framework of the state assignment for the state work «Conducting applied scientific research» on the topic «Development of a digital twin of the wheel-motor unit of the Ermak electric locomotive of the 2(3) series ES5K» No 124060500020-4 dated June 5, 2024.

Введение

Совершенствование работы локомотивного комплекса тесно связано с реализацией Стратегии развития холдинга ОАО «РЖД» до 2030 г., основной целью которой является переход на новый уровень предоставления услуг в области организации железнодорожных перевозок как грузов, так и пассажиров [1]. В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. № 1100-р были утвержден паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с целью повышения пропускных и провозных возможностей (второй этап)» [2]. Целевым показателем данного проекта является увеличение пропускной способности указанных магистралей, до 180 млн т в год. В частности, в 2023 г. – до 173 млн т, затем в 2024 г. – до 180 млн т, а к 2030 г. планируется достижение показателя 210 млн т в год.

Современные требования к надежности и безопасности конструкций в области локомотивостроения подчеркивают актуальность моделирования динамических характеристик различных элементов тягового подвижного состава (ТПС).

В рамках четвертой промышленной революции, отмечающейся значительным скачком в цифровизации, внедрение новых технологий становится необходимым для повышения эффективности и безопасности эксплуатации транспортных средств. Одним из ключевых

трендов процесса является использование цифровых двойников. Они представляют собой виртуальные модели реальных объектов, которые позволяют не только мониторить, но и прогнозировать их поведение в различных условиях эксплуатации, остаточный ресурс и потенциальные отказы [3]. Это создаст основу для перехода к проактивным стратегиям управления состоянием ТПС, что особенно важно в условиях роста требований к надежности, минимизации количества отказов оборудования ТПС и выполнения целевых показателей.

Актуальность

Дефекты тягового двигателя являются одной из причин постановки локомотива на внеплановый ремонт, что влечет за собой значительные экономические потери. Около трети двигателей, поступающих в ремонт, имеют трещины остова в межоконном пространстве, что подтверждается анализом статистических данных по внеплановому ремонту с выявлением причин отказов тяговых электродвигателей (ТЭД) электровоза серии 2(3)ЭС5К [4–10]. Длительный простой локомотива на внеплановом ремонте по указанной причине приводит к увеличению эксплуатируемого парка.

Исследование причин и механизмов образования трещин, а также разработка инновационных технологий для их предотвращения становится актуальной задачей как для научного сообщества, так и для современного отечественного локомотивостроения.

Новизна исследования заключается в разработке и практической реализации метода валидации упрощенной модели остова тягового электродвигателя на основе сопоставления модального анализа и результатов физических испытаний. Работа демонстрирует допустимость применения тонкостенных оболочечных моделей в инженерной практике с допустимой сходимостью на уровне 10 % по частоте основной моды.

Целью работы является проведение валидации математической модели остова тягового электродвигателя НБ-514Б методами модального анализа и конечных элементов.

Для исследования математической модели используется метод конечных элементов (МКЭ), конечно-элементный анализ, представляющий собой численный метод приближенного решения краевых (граничных) задач, имеющих место в технике и математической физике [11–14].

МКЭ широко применяется сегодня при моделировании внутренних процессов, включающих процессы как механических нагрузок, так и колебаний. Этот метод позволяет детально анализировать поведение конструкций под воздействием различных внешних факторов и физических процессов, возникающих в реальных условиях эксплуатации. В сочетании с современными вычислительными мощностями и программным обеспечением, МКЭ открывает возможности для оптимизации конструкций, увеличивая их работоспособность, надежность и долговечность.

Моделирование проводилось в программной среде «Логос». Для дискретизации трехмерного пространства могут использоваться различные типы конечных элементов, наиболее простым из которых является четырехузловой тетраэдрический элемент [15–17]. Для оценки сходимости моделирования по частоте при моделировании колебаний использовалась тетраэдричная сетка с изменяемым шагом.

Исследование сеточной сходимости при расчете собственных колебаний объекта определяет сходимость результатов, которая значительно зависит как от размеров ячеек сетки, так и от ее типа и шага. Выбор оптимального шага сетки важен для достижения достоверных данных, при этом необходимо избегать чрезмерной нагрузки на вычислительные ресурсы. Уменьшение шага сетки значительно увеличивает требования к аппаратным ресурсам компьюте-

ра, используемого в процессе моделирования, что также требует оценки необходимости дальнейшего уменьшения сетки.

Закрепление объекта математической модели в пространстве выполнено с помощью функции «Constraints» (ограничения). Эта функция позволяет установить фиксированные точки или границы, которые не подвержены перемещению, что обеспечивает стабильность и надежность результатов моделирования. При анализе собственных колебаний важно учитывать, что колебательные процессы в различных системах зависят от условий, в которых они функционируют. При использовании функции «Constraints» задаются жесткие связи для определенных узлов или элементов модели, фиксируя их в заданных координатах.

Остов ТЭД НБ-514Б и его модификации электровозов 2,3ЭС5К [18] и ВЛ85 [19] имеет достаточно сложную конфигурацию с отверстиями нестандартной формы, что затрудняет аналитическое описание, поскольку обычно не существует точного аналитического решения, описывающего колебания такого объекта. Поэтому принято решение для исследования упростить остов ТЭД и представить его в виде тонкой оболочки с сохранением его геометрической формы и размеров.

Критериями корректности моделирования колебаний могут служить совпадения собственных частот колебаний исследуемого объекта с применением модального способа [3].

Исследование сходимости математической модели и экспериментальных данных

Модальные испытания представляют собой процесс экспериментального определения параметров динамического поведения конструкции: частот собственных колебаний, коэффициентов демпфирования и форм колебаний [17]. Каждая конструкция обладает набором таких устойчивых форм колебаний (мод), которые определяют ее динамическое поведение. Задача модальных испытаний – найти этот набор мод, который адекватно описывает динамику конструкции.

Основной принцип получения модальных параметров: любая вынужденная динамическая деформация конструкции может быть представлена в виде взвешенной суммы мод, где каждая мода может быть представлена в виде модели системы с одной степенью свободы. Уравнения

движения системы со многими степенями свободы, записанные в матричной форме уравнений равновесия, имеют вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\}, \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица масс конструкции; $[C]$ – матрица демпфирования; $[K]$ – матрица жесткости; $\{P\}$ – известный вектор внешней нагрузки, зависящий от времени; $\{u\}$ – неизвестный вектор перемещений узлов конечно-элементной модели, зависящий от времени [14, 16].

Математическая система (1) представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений второго порядка. В момент времени $t = 0$ определены начальные условия – $\{u_0\}$ и $\{\dot{u}_0\}$. Векторы ускорений и скоростей – $\{\ddot{u}\}$ и $\{\dot{u}\}$ – вычисляются в процессе численного интегрирования системы вместе с вектором $\{u\}$.

При изменении модуля упругости материала собственные частоты будут другими, а собственные формы колебаний останутся теми же. Если изменить граничные условия, то изменятся и частоты, и формы колебаний.

Дифференциальное уравнение колебаний в матричном виде без учета затухания записывается как

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2), соответствующее собственной форме колебаний $\{\phi\}$, может быть записано в форме:

$$\{u\} = \{\phi\} \cdot \sin \omega(t - t_0), \quad (3)$$

где $\{\phi\}$ – вектор порядка n ; t_0 – начальная фаза; ω – угловая частота колебаний.

Подставляя (3) в (2) получим нелинейное уравнение общей проблемы собственных значений:

$$([K] - \omega^2[M]\{\phi\}) = 0, \quad (4)$$

из решения которого может быть определена собственная форма $\{\phi\}$ и угловая частота ω .

Возможны два варианта решения (4):

1. $|[K] - \omega^2[M]\{\phi\}| \neq 0$. Тогда решением является $\{\phi\} = 0$, что не дает никакой полезной информации с физической точки зрения, поскольку представляет собой вариант отсутствия движения.

2. Определитель выражения в скобках равен нулю:

$$|[K] - \omega^2[M]\{\phi\}| = 0. \quad (5)$$

Уравнения (5) имеет n корней $\lambda_i = \omega_i^2$.

Числа λ_i называются собственными значениями системы (4).

Нетривиальные решения $\{\phi\} \neq 0$ получаются из уравнений:

$$([K] - \lambda_i[M]\{\phi_i\}) = 0 \quad (i = 1, \dots, n). \quad (6)$$

При выполнении условия (5) по крайней мере одно из уравнений системы (6) является следствием остальных, поэтому каждому значению λ_i соответствует определенное соотношение между амплитудами ϕ_{ik} . Иными словами, все амплитуды вектора могут быть выражены через одну из них. Соотношения между амплитудами ϕ_{ik} определяют i -ю собственную форму колебаний. Итак, проблема собственных значений имеет n -собственных решений $(\omega_1^2, \{\phi_1\}), (\omega_2^2, \{\phi_2\}), \dots, (\omega_n^2, \{\phi_n\})$.

Из уравнения (3) следует, что все степени свободы в процессе колебания с собственной частотой ω_i совершают синхронное движение. Таким образом, конфигурация конструкции не изменяет своей базовой формы, а меняются только амплитуды.

Для конструкций, модели которых имеют несколько степеней свободы, кроме собственных частот, имеет смысл определения собственных форм колебаний. Собственные частоты конструкции – это частоты, с которыми конструкция стремится колебаться, если ее вывести из состояния покоя. Форма деформации конструкции при колебании с собственной частотой называется собственной формой, или нормальной модой, или модальной формой. Каждая собственная форма ассоциируется с определенной собственной частотой.

Проведение валидации созданной математической модели остова ТЭД НБ-514Б является сложной задачей. Для этого необходимо провести аналогичные испытания остова ТЭД на физической модели. Однако для того, чтобы подтвердить, что программная среда «Логос» способна производить расчеты с допустимой погрешностью, сопоставимой с результатами замеров на физической модели, авторами выполнено физическое моделирование частот собственных колебаний двух металлических цилиндров емкостью 60 и 20 л. Для измерения собственных частот применялся вычислительный комплекс фирмы «Мера», состоящий из крейта МС-036 [20] и измерительной платы МС-201, способной измерять сигнал. Частота дискретизации была выбрана 14,4 кГц. Также использовался трехкоординатный датчик вибрации АР2038-10 [21] фирмы «Глобалтест» и согласующее устройство AG01-B. Принцип действия

датчика основан на генерации электрического сигнала, пропорционального действующему ускорению. Крепление датчика на объекте осуществлялось с помощью изолирующего магнита АМ05. Полоса пропускания сигнала виброускорения при таком способе крепления оценивалась не менее 2,5 кГц, что вполне достаточно для дальнейшего описываемых результатов.

При проведении эксперимента для возбуждения конструкции использовались единичные удары, физически моделирующие дельта-функцию и имеющие математически «белый» спектр [22]. Удары производились обрезиненным молотком для исключения высокочастотного дребезга. Применение ударного молотка во время проведения испытаний приводило к импульсному возбуждению конструкции, при котором она начинает колебаться с затухающей во времени амплитудой. В этом случае спектр колебаний зависит только от места удара и возбуждаемых мод. Амплитудный спектр просто пропорционален силе удара. Далее аналогичные резервуары смоделированы в «Логос» для сравнения их собственных частот с результатами физического моделирования.

Геометрические размеры, места ударов и места закрепления при эксперименте и моделировании цилиндрических резервуаров объемом 60 и 20 л показаны на рис. 1 и 2. Заданные параметры материала цилиндрического резервуара

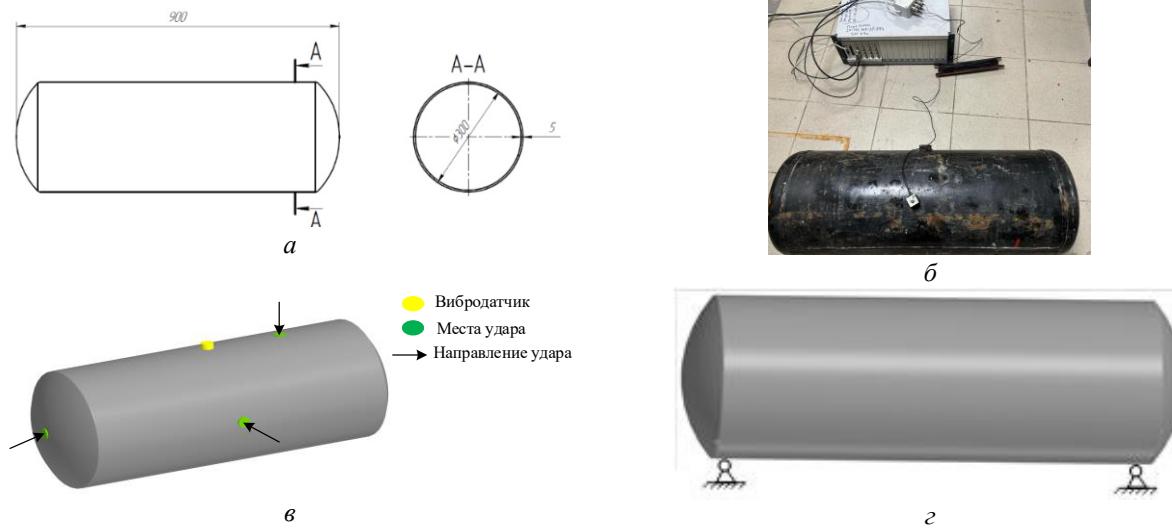


Рис. 1. Измерение собственных колебаний на цилиндрическом резервуаре объемом 60 л:
а – геометрические размеры; б – физическое моделирование; в – место удара при эксперименте;

г – место закрепления при моделировании и эксперименте

Fig. 1. Measurement of natural vibrations on a 60 L cylindrical tank:

а – geometrical dimensions; б – physical modelling; в – place of impact in the experiment;

г – place of fixation in the modelling and experiment

при моделировании представлены на рис. 3. Заданный анализ расчета для моделирования собственных колебаний представлен на рис. 4.

Спектр зафиксированных собственных колебаний после ударов по трем координатам приведен на рис. 6. Из него видно, что колебание первой моды в эксперименте имеет частоту 295 Гц.

Полученные моды колебаний цилиндрического резервуара при разных сетках представлены на рис. 5. Видно, что при уменьшении шага сетки вид колебаний не изменяется, а частота колебаний стремится к экспериментальной частоте первой гармоники, при этом ошибка определения частоты моды составила около 10 %. Расчет абсолютной погрешности производился по формуле (7):

$$\Delta A = A_x - A \quad (7)$$

где A_x – значения, полученные в ходе физического эксперимента; A – значения, полученные в ходе математического моделирования:

$$\Delta A = 325 - 295 = 30 \text{ Гц.}$$

Расчет относительной погрешности производился по формуле (8):

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%;$$

$$\delta_A = \frac{30}{325} \cdot 100\% = 9,2\%. \quad (8)$$

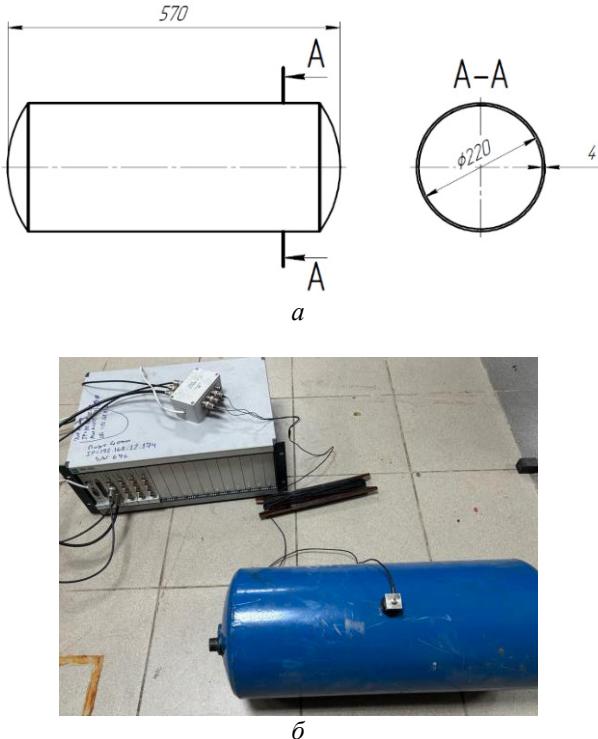


Рис. 2. Измерение собственных колебаний на цилиндрическом резервуаре объемом 20 л:
 а – геометрические размеры; б – физическое моделирование

Fig. 2. Measurement of natural vibrations on a 20 L cylindrical tank:
 a – geometrical dimensions; б – physical modelling

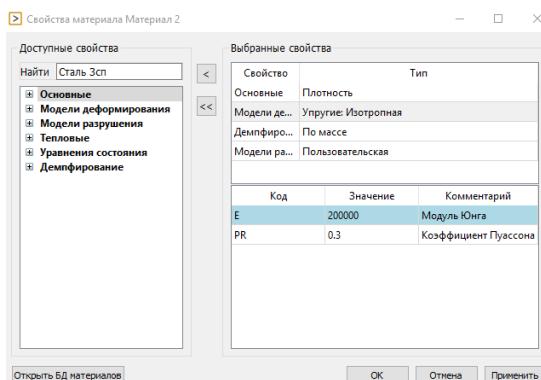


Рис. 3. Заданные параметры материала
 (сталь 3сп) цилиндрического резервуара
Fig. 3. Set material parameters of the cylindrical tank

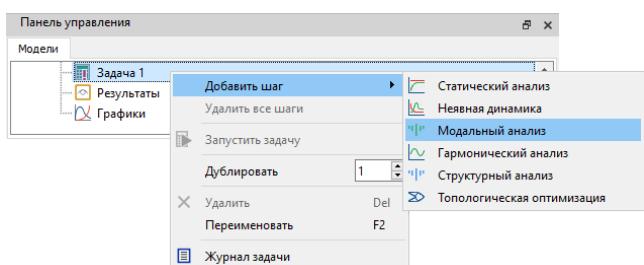
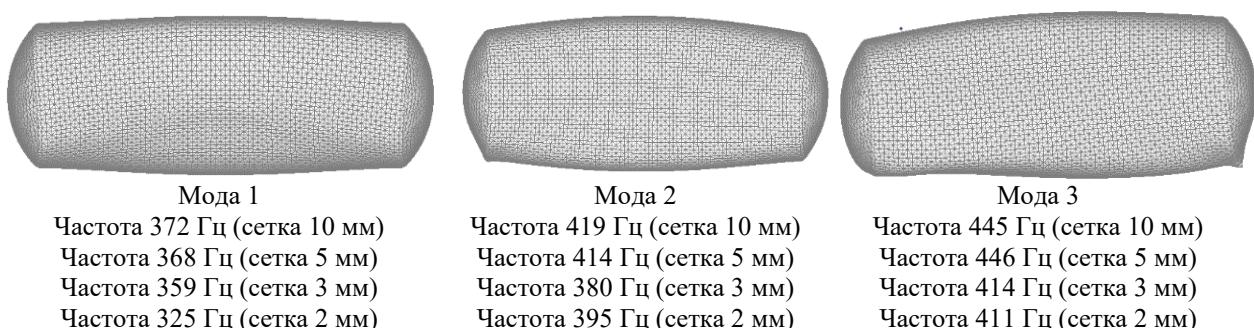


Рис. 4. Заданный анализ расчета цилиндрического
 резервуара для моделирования собственных колебаний
Fig. 4. Pre-defined analysis of 'cylindrical tank'
 calculation for modelling of natural vibrations



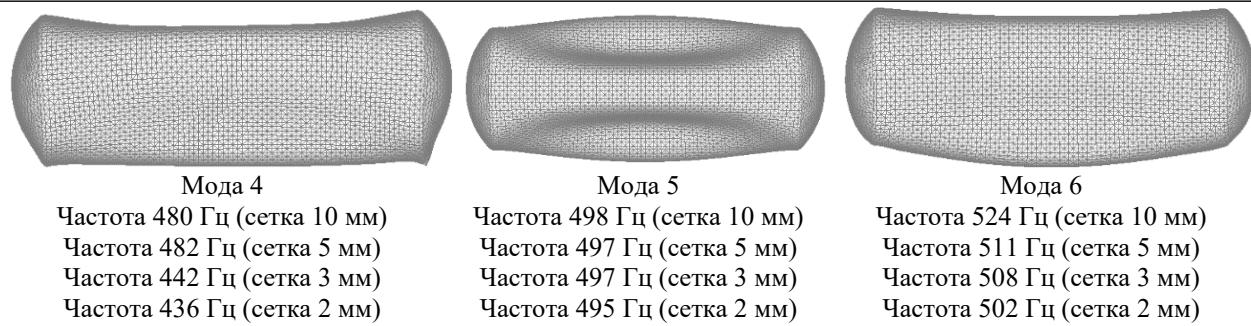


Рис. 5. Моды колебаний и их частоты для цилиндрического резервуара объемом 60 л при различных сетках
Fig. 5. Modes of vibrations and their frequencies for a cylindrical tank with a volume of 60 L with different grids

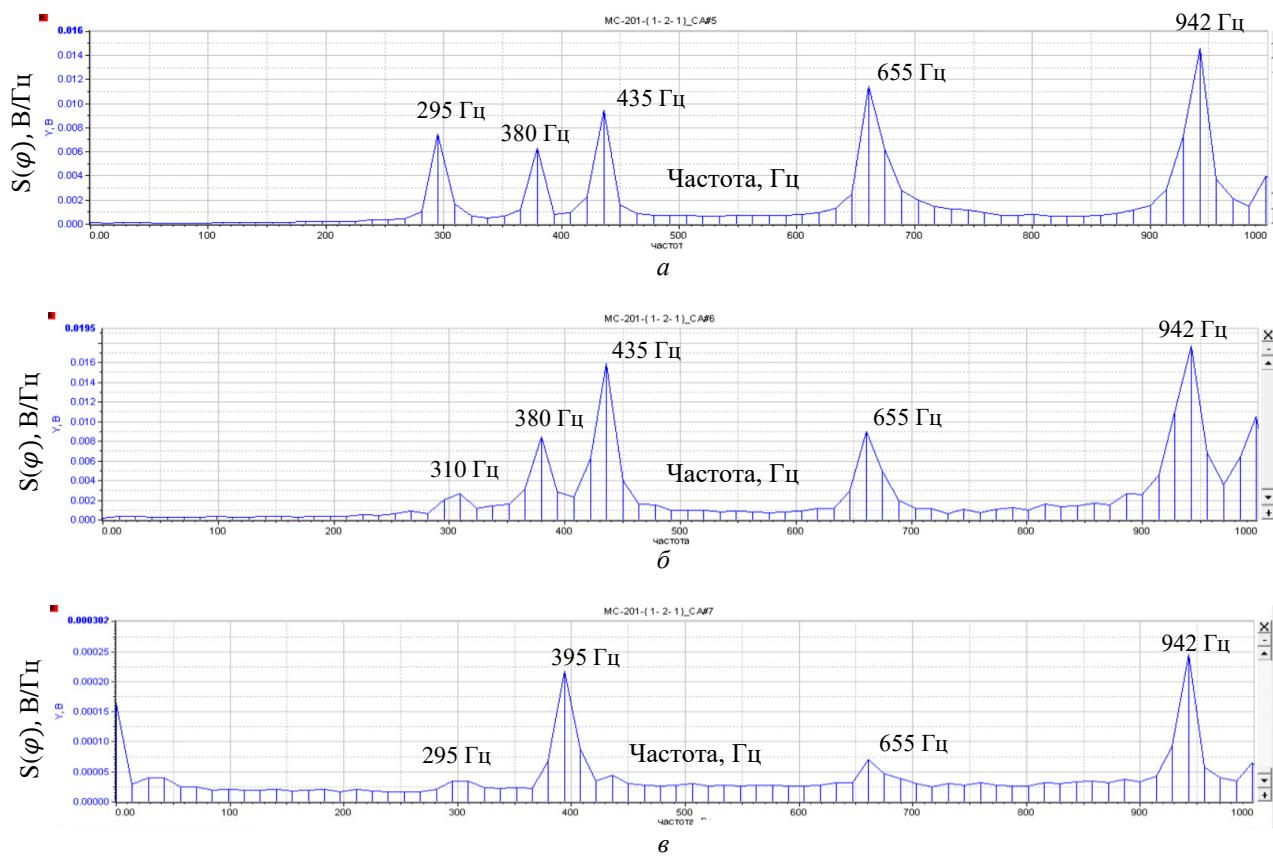


Рис. 6. Спектр собственных колебаний цилиндрического резервуара объемом 60 л, зафиксированный экспериментально:

а – удар сбоку; б – удар сверху; в – удар с торца

Fig. 6. The spectrum of natural vibrations of a cylindrical tank with a volume of 60 L, recorded experimentally:
 а – side impact; б – top impact; в – end impact

Спектр зафиксированных собственных колебаний после ударов в результате эксперимента приведен на рис. 7. Видно, что колебание первой моды в эксперименте имеет частоту 450 Гц.

Смоделированные моды колебаний модели цилиндрического резервуара при разных сетках

показаны на рис. 8. При уменьшении шага сетки вид колебаний не изменяется, а частота колебаний стремится к экспериментальной частоте первой гармоники, при этом ошибка расчета частоты первой моды составляет около 10 %.

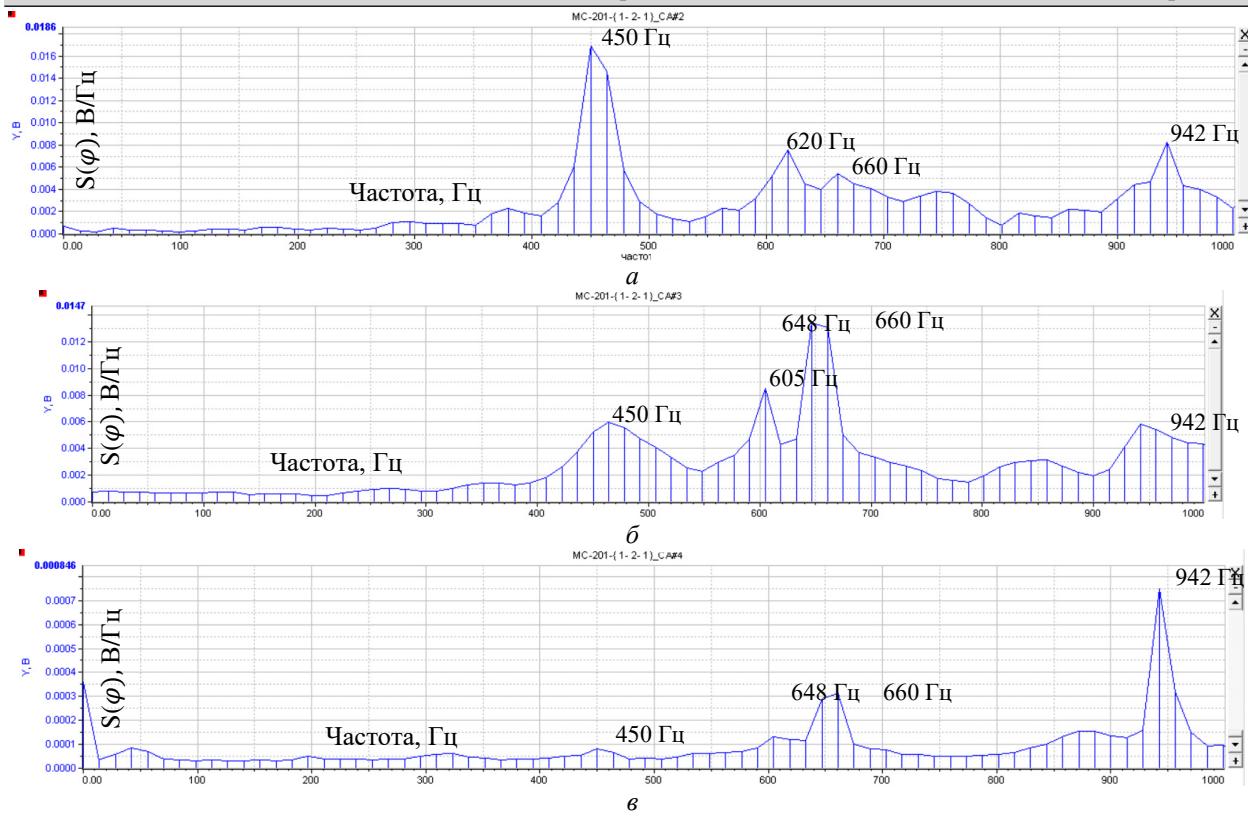


Рис. 7. Спектр собственных колебаний цилиндрического резервуара объемом 20 л, зафиксированный экспериментально:

a – удар сбоку; *б* – удар сверху; *в* – удар с торца

Fig. 7. The spectrum of natural vibrations of a cylindrical tank with a volume of 20 L, recorded experimentally:
a – side impact; *б* – top impact; *в* – end impact

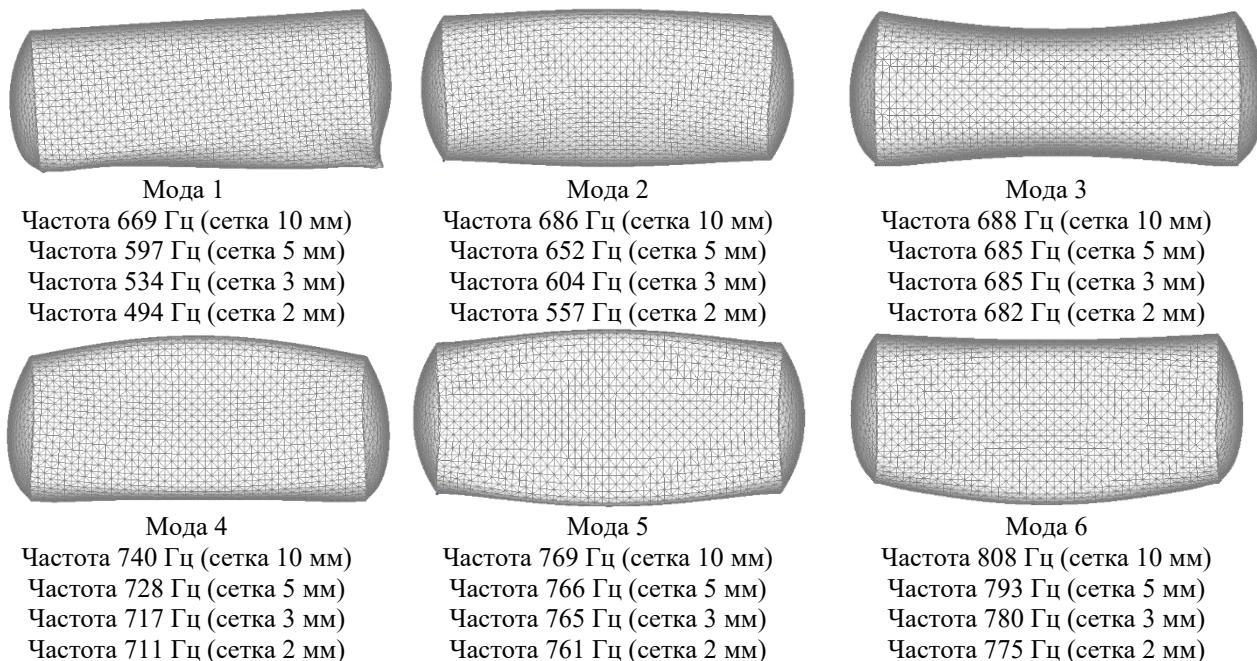


Рис. 8. Моды колебаний и их частоты для цилиндрического резервуара объемом 20 л при различных сетках

Fig. 8. Modes of oscillations and their frequencies for a 20 L cylindrical tank at different meshes

МКЭ предполагает разбиение сложной геометрической области на конечное количество элементов, что позволяет упростить расчет сложных физических процессов. Однако при наложении сетки на сложные формы, такие как остов ТЭД НБ-514, возникает необходимость в тщательном выборе и упрощении геометрии.

Сложные узлы и элементы на расчетной модели приводят к несоответствиям в наложении сетки, что, в свою очередь, вызывает концентрацию напряжений и деформаций в переходных сопряжениях. Это отрицательно сказывается на сходимости расчетов. Упрощение геометрии модели позволяет решить данную проблему, позволяя эффективно разбить мо-

дель на элементы с одинаковыми размерами и формой, что минимизирует погрешности вычислений и обеспечивает сходимость расчетов.

Простая геометрическая форма математической модели остова ТЭД НБ-514 представлена на рис. 9 в виде оболочки. Экспериментальное измерение собственных колебаний на остове ТЭД приведено на рис. 10. Параметры материала остова ТЭД НБ-514 при моделировании представлены на рис. 11, а заданный анализ расчета для моделирования собственных колебаний – на рис. 12. Полученный в результате эксперимента спектр собственных колебаний изображен на рис. 13, а моды колебаний и их частот при моделировании – на рис. 14.

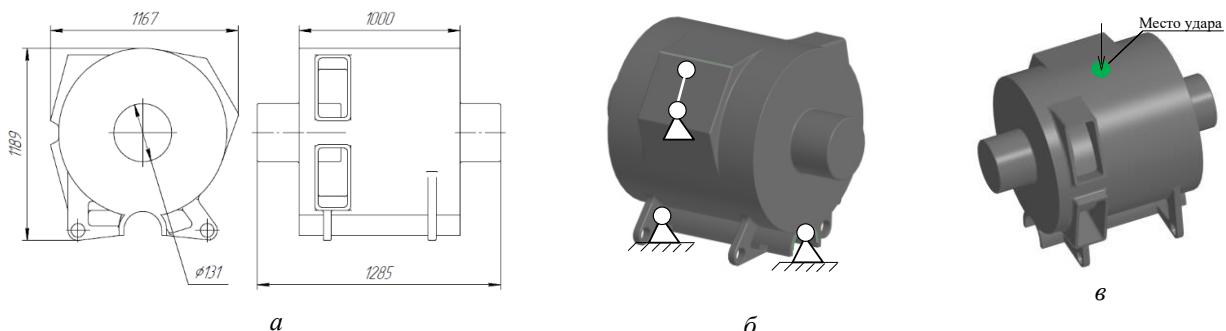


Рис. 9. Остов тягового электродвигателя НБ-514:
 а – габаритные размеры; б – присоединение тягового электродвигателя к земле при моделировании;
 в – место удара при экспериментальном определении спектра собственных колебаний

Fig. 9. Body of traction motor NB-514:
 а – overall dimensions; б – connection of the traction motor to the ground during modelling;
 в – impact point during experimental determination of the spectrum of natural vibrations

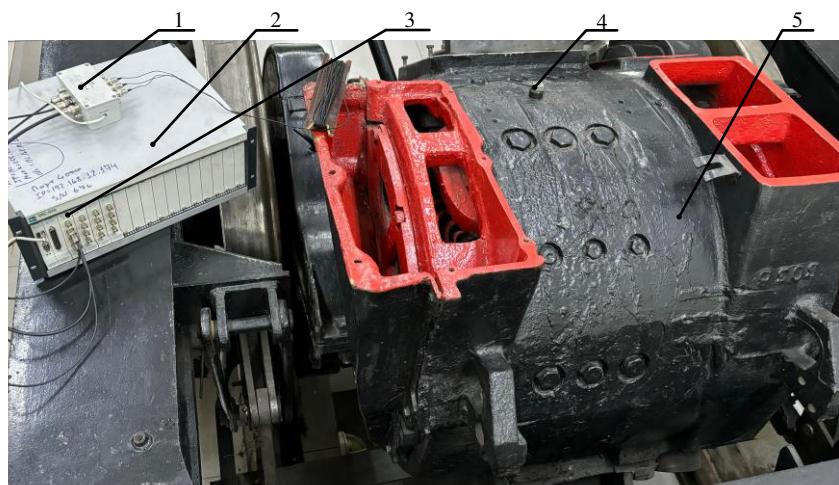


Рис. 10. Измерение собственных колебаний на остове тягового электродвигателя НБ-514:
 1 – согласующее устройство AG01-8; 2 – измерительно-вычислительный комплекс MIC-036;
 3 – измерительная плата MC-201; 4 – датчик вибрации AR2038-10 с магнитом;
 5 – остов тягового электродвигателя НБ-514

Fig. 10. Measurement of natural vibrations on the traction motor NB-514 base:
 1 – AG01-8 matching device; 2 – measuring-computing complex MIC-036; 3 – measuring board MC-201;
 4 – sensor vibration sensor AR2038-10; 5 – frame of NB-514 traction motor

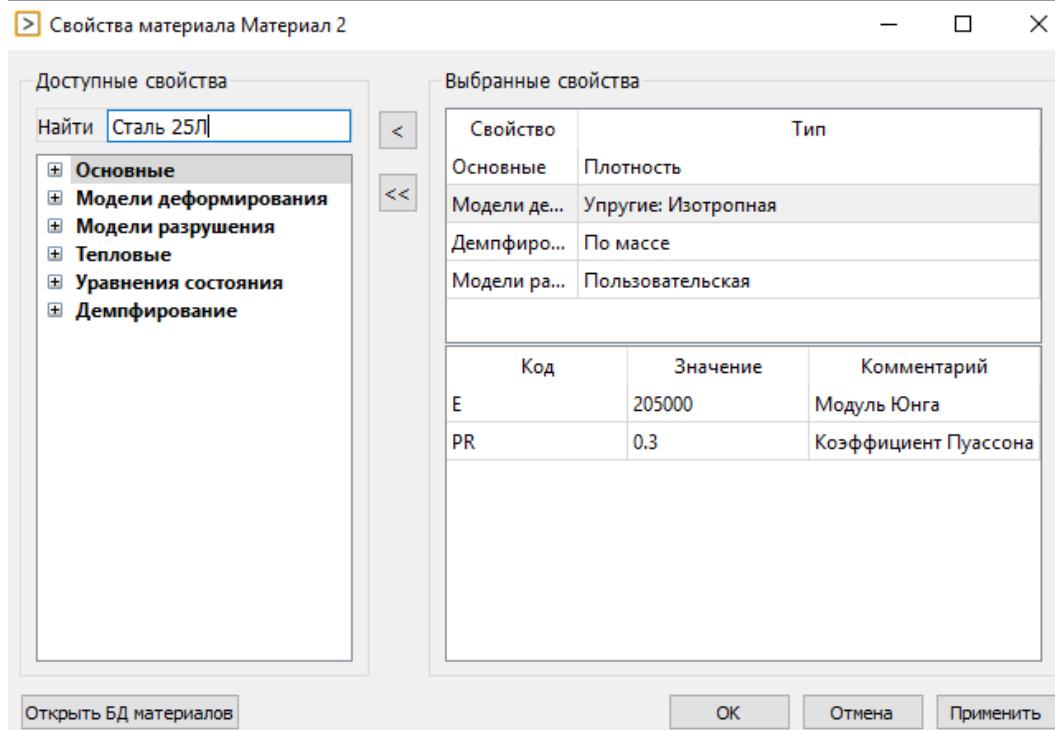


Рис. 11. Заданные параметры материала остова (сталь 25Л) тягового электродвигателя НБ-514

Fig. 11. Set parameters of the NB-514 traction motor frame material

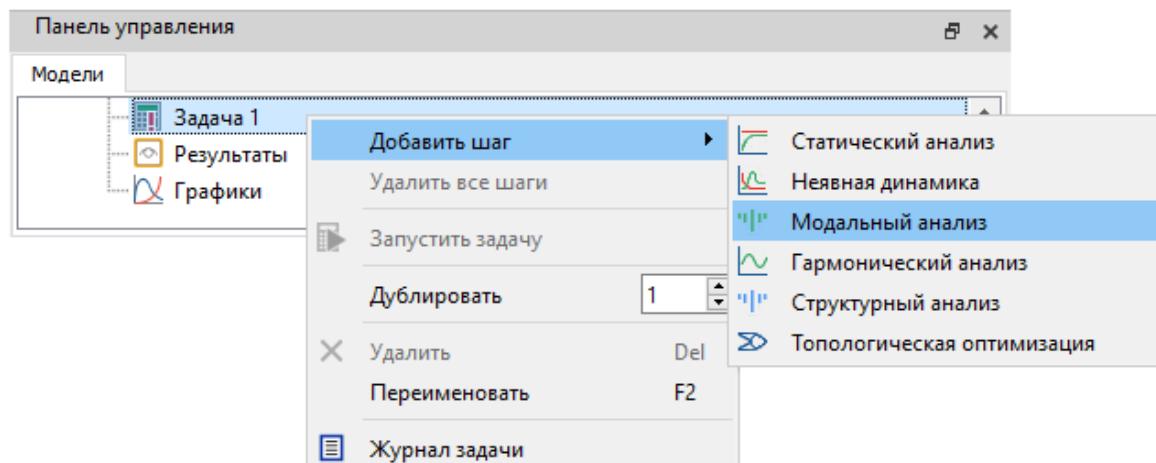


Рис. 12. Заданный анализ расчета остова тягового электродвигателя для моделирования собственных колебаний

Fig. 12. Defined analysis of traction motor frame calculation for modelling of natural vibrations

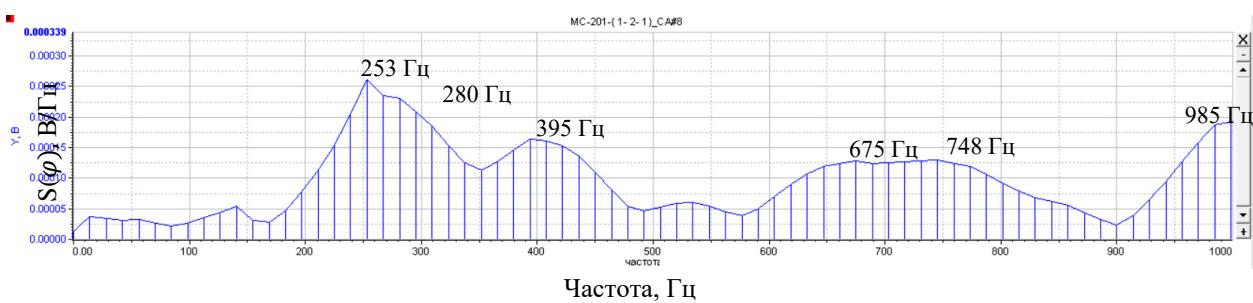


Рис. 13. Спектр собственных колебаний остова тягового электродвигателя

Fig. 13. Spectrum of natural vibrations of the traction motor frame

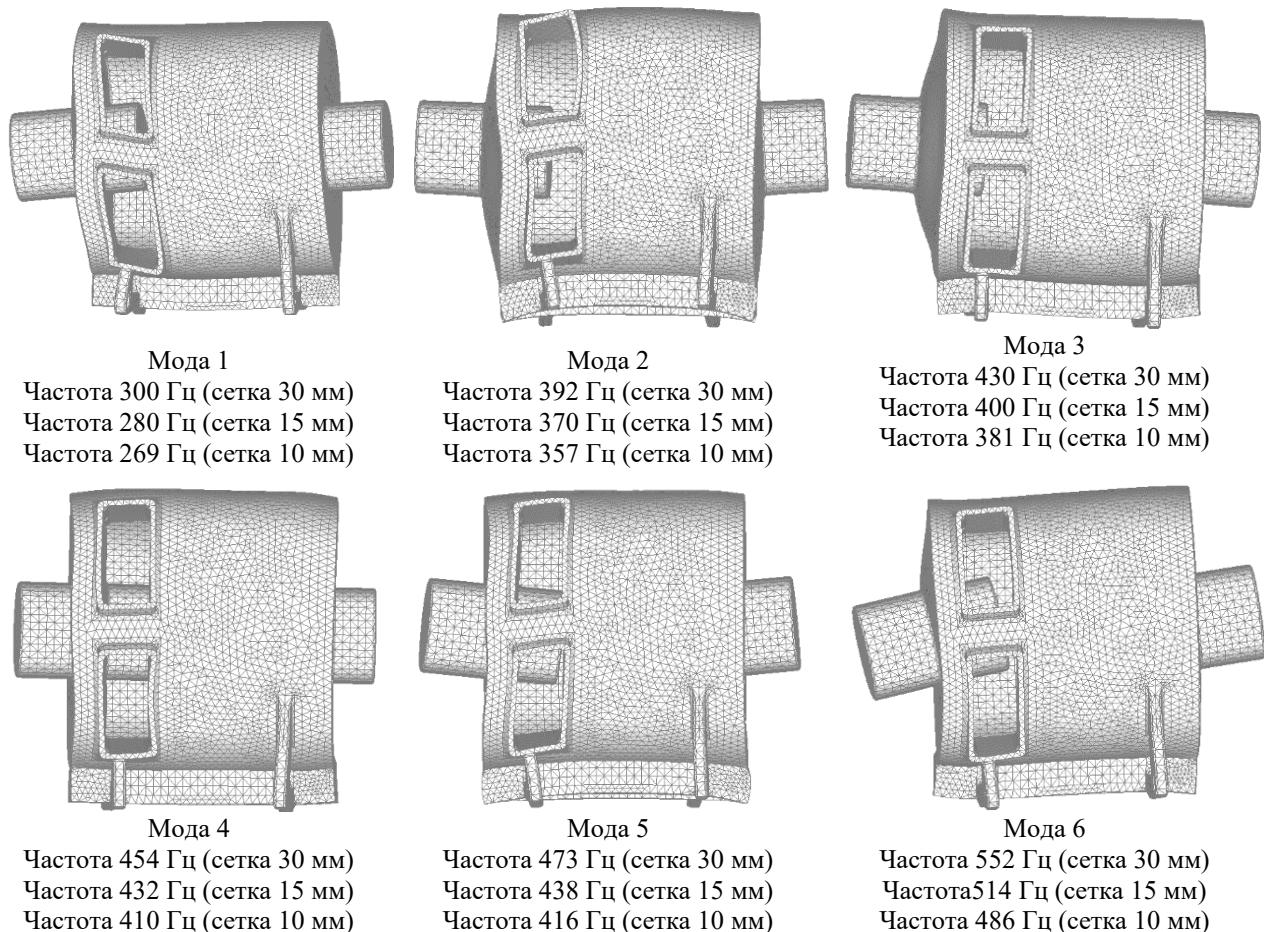


Рис. 14. Моды колебаний остова тягового электродвигателя НБ-514
Fig. 14. Modes of vibrations of the frame of traction motor NB-514

Из результатов, представленных на рис. 5, 8, 14, видно, что при моделировании колебаний оболочки с уменьшением шага сетки погрешность моделирования частоты колебаний уменьшается. Так, при шаге сетки примерно в 3 раза меньшем, чем толщина оболочки, погрешность моделирования частоты колебаний первой моды достигает 10 %, что может рассматриваться как технически обоснованный результат, подтверждающий адекватность модели. Уменьшение шага сетки при моделировании частоты колебаний неизбежно приводит к проблеме вычислительных мощностей памяти на жестком диске компьютера. В дальнейшем представляется перспективным применение оболочечных и твердотельных гибридных элементов для повышения точности моделирования в условиях сложной геометрии.

Данные результаты подчеркивают важность выбора оптимального шага сетки для

адекватного моделирования, а также демонстрируют потенциал применения МКЭ для анализа других конструкций с аналогичными характеристиками.

Заключение

В проведенной работе выполнен анализ моделирования собственных частот колебаний оболочек с использованием МКЭ. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что при уменьшении шага сетки до значений, составляющих примерно одну треть минимальной толщины оболочки, достигается достаточная сходимость результатов с погрешностью не более 10 %. С опорой на полученные результаты и погрешности, выявленные в ходе физического и математического моделирования, был разработан инструмент в программной среде, который позволяет переходить от натурных испытаний

к виртуальным. Это, как правило, характеризуется значительно меньшей трудоемкостью и позволяет за счет множества итераций на модели получать решения актуальных задач в эксплуатации, например, формирование трещин в остовах ТЭД локомотивов и др.

Результаты исследования имеют практическую значимость и подтверждаются данными моделирования: при использовании шага сетки, равного одной трети толщины стенки, погрешность первой моды не превышает 10 % (напри-

мер, 295 Гц в эксперименте и 325 Гц в модели). Это позволяет переходить от физического тестирования к численному анализу, снижая затраты времени и ресурсов.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке более высокоточных моделей, оптимизации алгоритмов моделирования, а также применении более производительных вычислительных систем. Эти меры позволяют снизить погрешность и расширить границы применения численных методов.

Список литературы

1. Об утверждении Стратегии развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 17.08.2017 № 1756-р (ред. 13.10.2022). Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
2. Об утверждении паспорта инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)» : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 28.04.2021 г. № 1100-р (ред. 04.05.2023). Доступ из справ.-правов. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
3. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. Введ. 2022-01-01. М. : Рос. ин-т стандартизации, 2021. 14 с.
4. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 / А.Ю. Портной, О.В. Мельниченко, К.П. Селедцов и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 90–100.
5. Портной А.Ю., Селедцов К.П., Мельниченко О.В. Математическое моделирование механических напряжений, возникающих при неравномерном нагреве остова тягового электродвигателя НБ-514 и совершенствование его конструкции // Известия Транссиба. 2021. № 2 (46). С. 13–23.
6. Заболотный В.В. Совершенствование оценки весовой нормы поезда с использованием уточненной модели нагревания тягового электродвигателя : дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2024. 172 с.
7. An estimation of mechanical stresses in the stator of the NB-514 motor of an electric locomotive / O. Mel'nicchenko, A. Portnoi, P. Grigorenko et al. // Territory Development and Sustainability : XIV International Conference on Transport Infrastructure (TITDS-XIV-2023). Bukhara, 2023. Vol. 471. DOI 10.1051/e3sconf/202447102007.
8. О вибрации колесно-моторного блока вследствие взаимодействия колеса с рельсом и работы зубчатой передачи электровоза 3ЭС5К в условиях горно-перевального участка / А.Ю. Портной, О.В. Мельниченко, К.П. Селедцов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2020. Т. 24. № 3. С. 527–547.
9. Андриевский А.Г., Москвичев В.В., Чабан Е.А. Расчетно-экспериментальное определение динамических характеристик кожуха тяговой зубчатой передачи электровоза // Известия Транссиба. 2020. № 3 (43). С. 47–57.
10. Некоторые вопросы статического анализа собственной корпсунской вибрации элементов колесно-моторных блоков (КМБ) локомотивов для целей диагностики / З.Г. Гиоев, Д.А. Наумов, В.И. Гончаренко и др. // Повышение качества и надежности машин : межвуз. сб. науч. тр. Ростов-на-Дону, 1994. С. 129–134.
11. Каменев С.В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях. Оренбург : ОГУ, 2019. 110 с.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 541 с.
13. Секулович М. Метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1993. 660 с.
14. Ашайчик А.А., Полонский В.Л. Расчет деталей машин методом конечных элементов. СПб : СПбПУ, 2016. 242 с.
15. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М. : ДМК Пресс, 2013. 784 с.
16. Рычков С.П. MSC.visual NASTRAN для Windows. М. : НТ Пресс, 2004. 552 с.
17. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М. : ДМК Пресс, 2003. 446 с.
18. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): руководство по эксплуатации (в 2 т.). Новочеркасск : НЭВЗ, 2007. Т. 1. 635 с. Т. 2. 640 с.
19. Электровоз ВЛ-85 : руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднякова и др. М. : Маршрут, 1992. 480 с.
20. Руководство по эксплуатации БЛИЖ.401250.001 РЭ. Комплексы измерительно-вычислительные МИС. Мытищи : Мера, 2016. 144 с.
21. Руководство по эксплуатации на датчик АБКЖ.433642.019.РЭ. Вибропреобразователь АР2038. Руководство по эксплуатации. М. : ООО «ГлобалТест», Б.г.
22. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб. : Питер, 2003. 604 с.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 17.08.2017 g. № 1756-р «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya transportnogo mashinostroeniya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda» (red. 13.10.2022) [Decree of the Government of

the Russian Federation dated August 17, 2017 No 1756-r «On approval of the Strategy for the Development of Transport Engineering in the Russian Federation for the period up to 2030» (ed. October 13, 2022)].

2. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 28.04.2021 g. № 1100-r «Ob utverzhdenii pasporta investitsionogo proekta «Modernizatsiya zheleznodorozhnoi infrastruktury Baikalo-Amurskoi i Transsibirskoi zheleznodorozhnykh magistralei s razvitiem propusknykh i provoznykh sposobnostei (vtoroi etap)» (red. 04.05.2023) [Decree of the Government of the Russian Federation dated April 28, 2021 No 1100-r «On approval of the passport of the investment project «Modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian Railway with the development of throughput and carrying capacity (second stage)» (ed. May 4, 2023)].

3. GOST R 57700.37-2021 Komp'yuternye modeli i modelirovaniye. Tsifrovye dvoyniki izdelii. Obschie polozheniya [State Standard R 57700.37-2021 Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 14 p.

4. Portnoi A.Yu., Mel'nicenko O.V., Seledtsov, K.P., Ivanov V.N. Matematicheskoe modelirovaniye mekhanicheskikh napryazhenii, voznikayushchikh pri neravnomernom nagreve ostova tyagovogo elektrosvigatelya NB-514 [Mathematical modeling of mechanical stresses arising from uneven heating of the core of a traction electric motor NB-514]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 1 (11), pp. 90–100.

5. Portnoi A.Yu., Seledtsov K.P., Mel'nicenko O.V. Matematicheskoe modelirovaniye mekhanicheskikh napryazhenii, voznikayushchikh pri neravnomernom nagreve ostova tyagovogo elektrosvigatelya NB-514 i sovershenstvovaniye ego konstruktsii [Mathematical modeling of mechanical stresses arising from uneven heating of the core of the NB-514 traction electric motor and improvement of its design]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2021, no 2 (46), pp. 13–23.

6. Zabolotnyi V.V. Sovershenstvovaniye otsenki vesovoi normy poezda s ispol'zovaniem utochnennoi modeli nagrevaniya tyagovogo elektrosvigatelya [Improving the estimation of the weight norm of a train using a refined model of heating a traction electric motor]. Ph.D.' theses. Khabarovsk, 2024. 172 p.

7. Mel'nicenko O., Portnoi A., Grigorenko P., Shramko S., Mishchenkov M. An estimation of mechanical stresses in the stator of the NB-514 motor of an electric locomotive // XIV International Conference on Transport Infrastructure «Territory Development and Sustainability (TITDS-XIV-2023)». Bukhara, 2023. Vol. 471. DOI <https://doi.org/10.1051/c3sconf/202447102007>.

8. Portnoi A.Yu., Mel'nicenko O.V., Seledtsov K.P., Lin'kov A.O., Yagovkin D.A., Shramko S.G., Gruzin G.G. O vibratsii kolesno-motornogo bloka vsledstviye vzaimodeistviya kolesa s rel'som i raboty zubchatoi peredachi elektrovoza 3ES5K v usloviyakh gorno-pereval'nogo uchastka [On the vibration of the wheel-motor unit due to the interaction of the wheel with the rail and the operation of the electric transmission 3ES5K in the conditions of the mining area]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2020, Vol. 24, no 3, pp. 527–547.

9. Andrievskii A.G., Moskvichev V.V., Chaban E.A. Raschetno-eksperimental'noe opredelenie dinamicheskikh kharakteristik kozhukha tyagovoi zubchatoi peredachi elektrovoza [Computational and experimental determination of dynamic characteristics of a traction gear transmission casing of an electric locomotive]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2020, no 3 (43), pp. 47–57.

10. Gioev Z.G., Naumov D.A., Goncharenko V.I., Chmelev I.E. Nekotorye voprosy staticheskogo analiza sobstvennoi korpusnoi vibratsii elementov kolesno-motornykh blokov (KMB) lokomotivov dlya tselei diagnostiki [Some issues of static analysis of intrinsic body vibration of elements of wheel-motor blocks (WMB) of locomotives for diagnostic purposes]. *Mezhevuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Povyshenie kachestva i nadezhnosti mashin»* [Interuniversity proceedings «Improving the quality and reliability of machines»]. Rostov-on-Don, 1994, pp. 129–134.

11. Kamenev S.V. Osnovy metoda konechnykh elementov v inzhenernykh prilozheniyakh [Fundamentals of the finite element method in engineering applications]. Orenburg: OGU Publ., 2019. 110 p.

12. Zienkiewicz O.C. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 541 p.

13. Sekulovich M. Metod konechnykh elementov [The finite element method]. Moscow: Stroizdat Publ., 1993. 660 p.

14. Asheichik A.A., Polonskii V.L. Raschet detalei mashin metodom konechnykh elementov [Calculation of machine parts by the finite element method]. Saint Petersburg: SPbPU Publ., 2016. 242 p.

15. Rychkov S.P. Modelirovaniye konstruktsii v srede Femap with NX Nastran [Modeling of structures in the Femap environment with NX Nastran]. Moscow: DMK Press Publ., 2013. 784 p.

16. Rychkov S.P. MSC.visual NASTRAN dlya Windows [MSC.visualNASTRAN for Windows]. Moscow: NT Press Publ., 2004. 552 p.

17. Shimkovich D.G. Raschet konstruktsii v MSC/NASTRAN for Windows [Calculation of structures in MSC/NASTRAN for Windows]. Moscow: DMK Press Publ., 2003. 446 p.

18. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): rukovodstvo po ekspluatatsii (v 2 t.) [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K): operation manual (in 2 vol.)]. Novocherkassk: NEVZ Publ., 2007. Vol. 1. 635 p. Vol. 2. 640 p.

19. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnyakova L.A., Yarosh V.P., Sobolev Yu.V., Matlakhov A.A., Ukrainskii E.V., Andryushchenko T.F., Krivun A.A., Strel'tsov A.I., Mikheev B.K., Orlov Yu.A., Parichenko N.A., Zakis' E.A., Shtepenko P.K., Shestakov E.F. Elektrovoz VL-85: rukovodstvo po ekspluatatsii [VL-85 electric locomotive: operation manual]. Moscow: Marshrut Publ., 1992. 480 p.

20. Rukovodstvo po ekspluatatsii BLIZh.401250.001.RE. Kompleksy izmeritel'no-vychislitel'nye MIC [Instruction manual BLIZH.401250.001.RE. Measuring and computing complexes MIC]. Mytishchi: Mera Publ., 2016. 144 p.

21. Rukovodstvo po ekspluatatsii na datchik ABKZh.433642.019.RE. Vibropreobrazovatel' AR2038. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Operating instructions for the sensor PKZH.433642.019.RE. Vibration converter AR2038. User manual].

22. Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2003. 604 p.

Информация об авторах

Мельниченко Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Портной Александр Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: portnoy_alexander@mail.ru.

Линьков Алексей Олегович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: linkovalex@mail.ru.

Коновалов Алексей Владимирович, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: aleksei-konovalov2016@mail.ru.

Кахаев Семен Александрович, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vip.kakhaev@mail.ru.

Information about the authors

Oleg V. Mel'nicenko, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

Alexander Yu. Portnoi, Doctor of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: portnoy_alexander@mail.ru.

Alexei O. Lin'kov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: linkovalex@mail.ru.

Alexei V. Konovalov, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: aleksei_konovalov2016@mail.ru.

Semen A. Kakhaev, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vip.kakhaev@mail.ru.