CC BY 4.0

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья
УДК 620.178.5: 620.179.1:629.463
EDN: https://elibrary.ru/mmoxpq
DOI: http://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-190-198
Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Выбор критериев оценки эффективности вибродиагностирования узлов подвижного состава на современном этапе цифровизации для гармонизации нормативных документов

В. Ю. Тэттэр[1, 2]✉, О. В. Гателюк[1], А. Ю. Тэттэр[1]

[1]Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
Омск, Российская Федерация
[2]Омский завод современных технологий машиностроения (ООО «ОЗТМ»),
Омск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена вопросам улучшения работы оборудования, предназначенного для вибродиагностики роторных механических узлов подвижного состава и определения объективных критериев оценки эффективности процесса диагностики. Отраслевые нормативные документы имеют существенные недоработки в части определения показателей эффективности диагностического оборудования. Расчеты параметра «достоверность», выполненные по разным методикам, показали, что результаты расчета этого показателя зависят от величины выборки продиагностированных узлов. Цель работы — анализ существующих методов оценки качества работы вибродиагностического оборудования и разработка дополнительного критерия оценки качества на основе функции правдоподобия.
Материалы и методы. Исходным материалом для обсуждаемой проблемы являются выборки результатов диагностирования буксовых узлов колесных пар грузовых вагонов (выбраны в качестве примера). Применяемые методы относятся к разделам математической статистики и теории вероятности. Разобран математический метод оценки параметров на основе вычисления функции правдоподобия. Приведен пример расчета функции правдоподобия на смоделированных данных.
Результаты. Результатом выполненной работы является методика, позволяющая определить границы достоверности результатов диагностирования с заданной степенью вероятности («надежности»).
Обсуждение и заключение. Авторы предлагают ввести в употребление интервальные оценки параметра «достоверность». Предлагается использовать три интервала с конкретными граничными значениями. Наряду с оценкой достоверности (подтверждаемости) результатов диагностирования, авторы предлагают оценивать качество и эффективность работы вибродиагностического оборудования путем расчета функции правдоподобия. Отмечено, что результаты исследования могут быть использованы в различных отраслях промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, подвижной состав, вибродиагностика, достоверность, оценка, функция правдоподобия, вероятность, интервал

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тэттэр В. Ю., Гателюк О. В., Тэттэр А. Ю. Выбор критериев оценки эффективности вибродиагностирования узлов подвижного состава на современном этапе цифровизации для гармонизации нормативных документов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 3. С. 190–198. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-190-198.

✉ tetterv@gmail.com (В. Ю. Тэттэр)

© Тэттэр В. Ю., Гателюк О. В., Тэттэр А. Ю., 2025

CC BY 4.0

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article
UDK 620.178.5: 620.179.1:629.463
EDN: https://elibrary.ru/mmoxpq
DOI: http://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-190-198
Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification

Selection of criteria for assessing the effectiveness of vibration diagnostics of rolling stock units at the current stage of digitalisation for the harmonisation of regulatory documents

Vladimir Yu. Tetter[1, 2]✉, Oleg V. Gatelyuk[1], Alexander Yu. Tetter[1]

[1]Omsk State Transport University,
Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Plant of Modern Engineering Technologies,
Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article considers the issues of improving the operation of equipment for vibration diagnostics of rotary mechanical units of rolling stock, and determining objective criteria for assessing the efficiency of the diagnostic process. Industry regulatory documents have significant shortcomings in terms of determining the efficiency indicators of diagnostic equipment. Examples of calculating the "certainty" indicator, performed using different methods, showed that the results of calculating this indicator depend on the sample size of the diagnosed units. The purpose of the article is to analyse existing methods for assessing the quality of operation of vibration diagnostic equipment and to develop an additional criterion for assessing quality based on the likelihood function.
Materials and methods. The samples of diagnostic results of axle boxes of wheel pairs of wagons (selected as an example) are the source material for the discussed problem. The employed methods relate to the sections of mathematical statistics and probability theory. A mathematical method for estimating parameters based on the calculation of the likelihood function is analysed. An example of calculating the likelihood function on simulated data is given.
Results. The result of the work performed is a methodology that allows to determine the certainty limit of diagnostic results of a given degree of probability ("reliability").
Discussion and conclusion. The authors propose to introduce interval estimates of the "certainty" parameter. It is proposed to use three intervals with specific boundary values. Along with the assessment of the certainty (confirmability) of diagnostic results the authors propose to assess the quality and efficiency of operation of vibration diagnostic equipment by calculating the likelihood function. It is noted that the results of the study could be used in various industries.

KEYWORDS: railway transport, rolling stock, vibration diagnostics, certainty, estimation, likelihood function, probability, interval

FOR CITATION: Tetter V. Yu., Gatelyuk O. V., Tetter A. Yu. Selection of criteria for assessing the effectiveness of vibration diagnostics of rolling stock units at the current stage of digitalisation for the harmonisation of regulatory documents. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(3):190–198. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-190-198.

✉ tetterv@gmail.com (V. Yu. Tetter)

© Tetter V. Yu., Gatelyuk O. V., Tetter A. Yu., 2025

Введение. Вибродиагностическое оборудование (далее — ВДО) получило широкое распространение с середины 1990-х гг. Основанием для этого стала с одной стороны потребность в контроле технического состояния ответственных механических узлов и агрегатов, с другой — тотальное внедрение персональных компьютеров, микропроцессорных устройств [1–3]. ВДО успешно применяется в нефтегазовой и химической отраслях, металлургии, целлюлозно-бумажном производстве, энергетике, на железнодорожном транспорте.

В России использование ВДО как в локомотивном, так и в вагонном хозяйствах регламентируется отраслевыми нормативными документами[1, 2]. Как правило, локомотиворемонтные и вагоноремонтные предприятия являются основными заказчиками такого оборудования. В государственном стандарте установлены показатели достоверности и точности диагностирования[3]. При выполнении задачи определения технического состояния объекта, такими показателями являются вероятность пропуска дефекта, вероятность ложной браковки. На практике этими показателями не пользуются.

В нормативных документах ОАО «РЖД» в данном случае используется термин «достоверность», причем формула для расчета этого показателя приводится только в документах по локомотивному хозяйству[4].

Подтвержденная достоверность постановки диагноза D_T системы диагностирования узлов (специалиста по диагностике) определяется выражением (в локомотивном хозяйстве диагностируются подшипники качения, подшипники скольжения и зубчатые зацепления):

$$D_T = \left(1 - \frac{N_{\text{отк}} + N_{\text{ош}}}{N_{\text{Д}}}\right) \cdot 100\,\%, \qquad (1)$$

где 1 — коэффициент 100 % достоверности постановки диагноза;

$N_{\text{Д}}$ — количество забракованных средствами диагностирования узлов;

$N_{\text{отк}}$ — количество узлов, отказавших в гарантируемый период после проведения диагностирования в период эксплуатации;

$N_{\text{ош}}$ — количество ошибочно забракованных и не допущенных к эксплуатации узлов по результатам диагностирования.

Разработчиками ВДО, например, ООО «ДиаТех», предлагались и другие формулы определения показателя достоверности.

В [4] авторы предложили свою методику и формулу расчета показателя достоверности, в которую введены коэффициенты, учитывающие степень понесенного ущерба при следовании ошибочной рекомендации по результатам диагностирования. Значения этих коэффициентов должны определяться методом экспертных оценок.

Целью работы является анализ существующих методов оценки качества работы вибродиагностического оборудования и разработка дополнительного критерия оценки качества на основе определения функции правдоподобия.

Постановка задачи по уточнению методики расчета функции правдоподобия. Все известные методики расчета функции предполагают разборку узла после диагностирования и определение его фактического технического состояния. Так как рассматриваемый показатель имеет вероятностную природу, то для его определения необходимо иметь репрезентативную выборку. По предварительным оценкам эта выборка должна состоять не менее чем из 150 экспериментов.

Для оценки эффективности выполнения задач по определению технического состояния посредством ВДО предлагается использовать функцию правдоподобия[5].

Этот метод наиболее полно использует данные выборки об оцениваемом параметре, поэтому он особенно полезен в случае малых выборок. Функцией правдоподобия дискретной случайной величины x называют функцию аргумента θ:

$$f_x(\theta \mid x) \qquad (2)$$

или, в случае независимых наблюдений, функция правдоподобия может быть записана как произведение плотностей вероятности каждого наблюдения:

$$f(x_1, x_2, ..., x_n; \theta) = p(x_1; \theta)\, p(x_2; \theta) ... p(x_n; \theta), \qquad (3)$$

где $x_1, x_2, ..., x_n$ — фиксированные числа.

При этом будем считать, что параметр θ — это результат диагностирования, который выражается в виде заключений «годен» или «брак», а параметр x — это фактическое техническое состояние объекта, также выражаемое в бинарной системе: работоспособное

[1] Руководство по вибродиагностическому контролю буксовых узлов вагонных колесных пар РД 32 ЦВ 198-2024. Утв. расп. ОАО «РЖД» от 29 августа 2024 г. № 2080/р.

[2] ПКБ ЦТ.06.0050 «Вибрационное диагностирование узлов локомотивов». Технологическая инструкция. Утв. ОАО «РЖД» 11 января 2013 г. (с Извещением об изменении № 2619 от 25 ноября 2019 г.).

[3] ГОСТ 27518–87. Диагностирование изделий. Общие требования: утв. и введен в действ. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15 декабря 1987 г. № 4520. М.: Стандартинформ, 2009.

[4] ПКБ ЦТ.06.0050 «Вибрационное диагностирование узлов локомотивов».

[5] Чуличков А. И. Математическая статистика: конспект ФИЗФАК МГУ. URL: https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/mathematical-statistics-chulichkov2-M2.pdf (дата обращения: 01.03.2025).

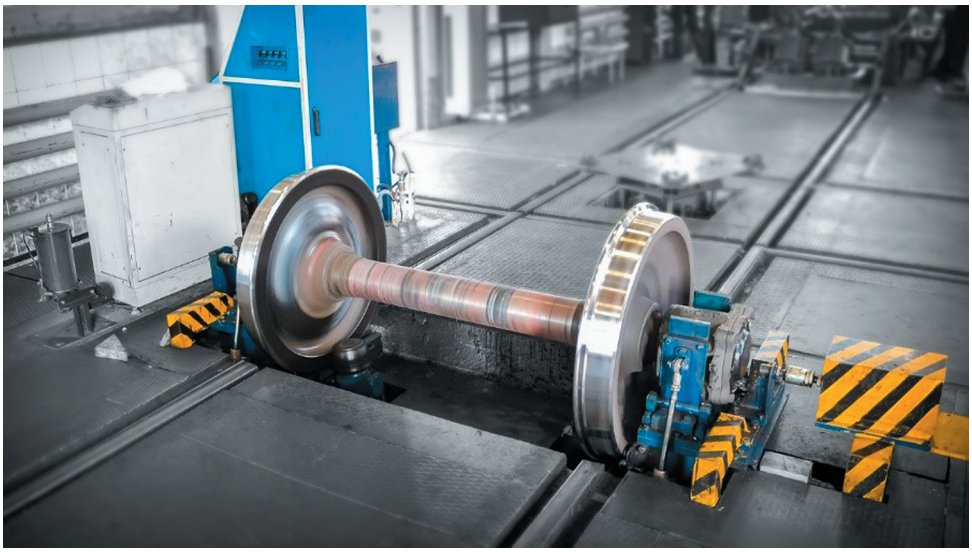
состояние («годен»), неработоспособное состояние («брак»).

Требуется найти точечную оценку параметра θ, т. е. количественную оценку правдоподобности (правильности) поставленного диагноза при известном фактическом состоянии объекта, например, подшипника качения в буксовом узле колесной пары. Для этого необходимо вычислить функцию правдоподобия и найти ее максимум. При этом целесообразно использовать логарифмическую функцию правдоподобия, так как логарифм функции достигает максимума в той же точке, что и сама функция[6]:

$$L(\theta \mid x) = \ln f_x(\theta \mid x). \quad (4)$$

Анализ существующих методик расчета показателя достоверности диагностирования. Рассмотрим пример расчета достоверности диагностирования буксовых узлов по одной из установившихся в вагонном хозяйстве методик. В вагоноремонтном депо *N* на установке ВДО «Эксперт-Д» (рис. *а* и *б*) было

а)



б)

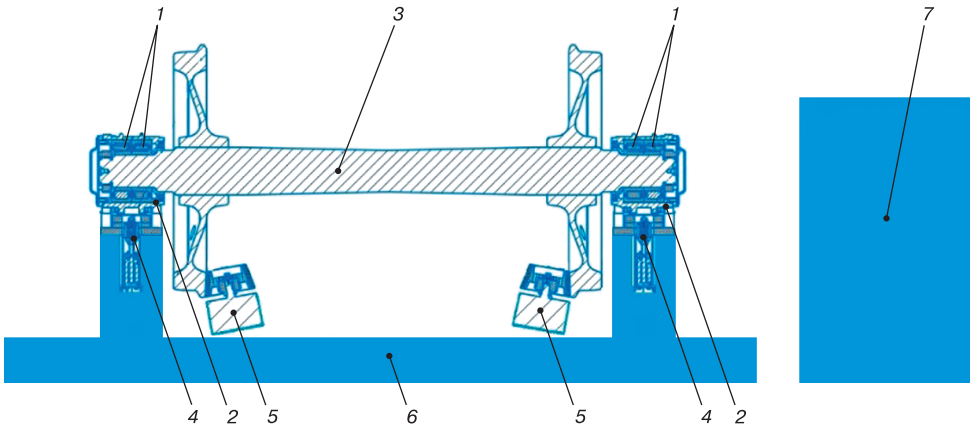


Рис. Вибродиагностичекий комплекс «Эксперт-Д» для определения технического состояния буксовых узлов колесных пар*:
а — общий вид комплекса; *б* — функциональная схема диагностического комплекса; *1* — подшипники качения; *2* — корпуса буксовых узлов; *3* — колесная пара; *4* — датчики вибрации (акселерометры); *5* — электроприводы с роликами; *6* — основание; *7* — блок обработки и анализа сигналов, включающий в себя усилители, аналоговые и цифровые фильтры сигналов, аналогово-цифровые преобразователи, цифровое вычислительное устройство (например, промышленную ПЭВМ), устройство управления электроприводами
* Источник: рисунки предоставлены авторами

Fig. Vibration diagnostic complex “Expert-D” for determining the technical condition of axle box assemblies of wheel pairs*:
a — general view of the complex; *б* — functional diagram of the diagnostic complex; *1* — rolling bearings; *2* — axle box housings; *3* — wheel pair; *4* — vibration sensors (accelerometers); *5* — electric drives with rollers; *6* — base; *7* — signal processing and analysis unit, including amplifiers, analogue and digital signal filters, analogue-to-digital converters, digital computing device (for example, an industrial PC), electric drive control device
* Source: images provided by the authors

[6] Насыров Ф. С. Девять лекций по теории вероятностей: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2006. 62 с.

продиагностировано 200 колесных пар грузовых вагонов (400 буксовых узлов) с последующей комиссионной разборкой и осмотром буксовых узлов для определения их фактического технического состояния. Несовпадение поставленных диагнозов с фактическим техническим состоянием зафиксировано в 19 случаях (ложная браковка — 15 случаев, пропуск дефекта — 4 случая).

Стенд функционирует следующим образом (рис. *б*): колесную пару *3* устанавливают на основание *6*, первичные преобразователи *4* подводят до касания к корпусам буксовых узлов *2*, колесную пару *3* приводят во вращение приводами *5*, при этом подшипники качения *1* находятся под нагрузкой, обусловленной собственным весом колесной пары.

При прокрутке колесной пары с нормированной частотой вращения на этой установке с буксовых узлов снимаются сигналы вибрации (с двух букс одновременно), которые подвергаются анализу с помощью специальной диагностической программы. При этом анализируются параметры временного сигнала (коэффициент усиления, среднеквадратическое значение, пик-фактор, фактор куртозиса [5, 6]) и производится глубокий спектральный анализ трех видов спектров — широкополосного спектра, автоспектра или прямого спектра, спектра огибающей сигнала [7]. Анализирующая программа позволяет определять до двенадцати видов дефектов подшипников и степень их развития. Результатом диагностирования является интегральная оценка технического состояния буксового узла в виде заключения «годен»/«брак» (допустить в эксплуатацию/не допустить в эксплуатацию). При браковке хотя бы одной из букс вся колесная пара направляется в ремонт.

По наиболее распространенной в вагонном хозяйстве методике достоверность диагностирования D рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{N - N_{\text{Н}}}{N} \cdot 100\%, \qquad (5)$$

где N — общее количество продиагностированных узлов, фактическое техническое состояние которых было определено осмотром;

$N_{\text{Н}}$ — количество несовпадений диагноза ВДО с фактическим техническим состоянием узла.

Для проведенного эксперимента:

$$D = \frac{400 - 381}{400} \cdot 100\% = 95{,}25\%.$$

Разберем случай, когда 19 несовпадений были зафиксированы при диагностировании первых 160 колесных пар, т. е. первых 320 буксовых узлов. При этом показатель D будет иметь следующее значение:

$$D = \frac{320 - 19}{320} \cdot 100\% = 94\%.$$

Таким образом, видно, что значение показателя достоверности зависит от величины выборки (количества проведенных экспериментов).

Исходя из того, что показатель «достоверность» носит вероятностный характер, и принимая во внимание возможность (по множеству причин) постановки неправильного диагноза, возникает необходимость определения репрезентативности выборки при количественной оценке показателя достоверности. Иными словами, встает вопрос о минимально необходимом количестве проведенных экспериментов (диагностирований), по результатам которых можно вычислять показатель «достоверность» с достаточной «надежностью».

Ни в одном из отраслевых нормативных документов нет рекомендаций по количеству экспериментов, которое можно использовать при расчете показателя «достоверность». Очевидно, что при снижении количества экспериментов «надежность» количественной оценки будет снижаться, а при увеличении — повышаться.

Авторы предлагают перейти от точечных оценок по критерию «достоверность» к интервальным, с указанием объема репрезентативной выборки для каждого определенного интервала. Практическое применение интервальных оценок обсуждается, например, в работах[7] [8, 9]. Использование таких оценок дает возможность установить связь показателей достоверности и точности и с числом испытаний [10]. Это становится особенно актуально при ограниченном числе опытов (испытаний).

Опираясь на длительный опыт внедрения и анализа работы вибродиагностического оборудования на сети дорог, авторы предлагают ограничиться тремя интервалами: первый — от 75 % до 85 %, второй — от 85 % до 90 %, третий — от 90 % до 95 %. Указанные интервалы являются экспертной оценкой авторов и подлежат корректировке с учетом мнения других специалистов. Методика получения согласованной оценки малой группой экспертов из 5–7 специалистов разработана авторами и приведена в [11]. Для каждого предлагаемого интервала следует провести расчет минимально необходимой выборки (при уже упомянутой оценке надежности в 0,95).

Методика определения функции правдоподобия. Ниже приведены соображения по нахождению оценки правдоподобности (надежности) правильного диагноза методом наибольшего правдоподобия.

[7] Назин С. А. Эллипсоидальное и интервальное оценивание состояний и параметров дискретных динамических систем с неопределенным описанием модели: дисс. канд. физ.-мат. наук: 05.13.01. М., 2004. 118 с.

Пусть имеется n серий испытаний по диагностированию технического состояния объекта, в каждом из которых проведено m_i ($1 \leqslant i \leqslant n$) испытаний. Обозначим достоверность диагностирования через θ ($0 \leqslant \theta \leqslant 1$). Заметим, что все испытания можно считать независимыми, а поэтому можем предположить, что θ — случайная величина, распределенная по биномиальному закону. В этом случае соответствующие вероятности определяются по формуле Бернулли. Пояснения применимости биномиального закона (биномиального распределения) приводятся в источнике[8].

Пусть x_i ($1 \leqslant i \leqslant n$) — количество совпадений поставленных диагнозов с фактическим техническим состоянием в i-й серии. Найдем оценку параметра θ методом наибольшего правдоподобия.

Тогда вероятность того, что в i-й серии испытаний будут достоверно продиагностированы ровно x_i объектов можно найти по следующей формуле:

$$P_{m_i}(x_i) = C_{m_i}^{x_i}\theta^{x_i}(1-\theta)^{m_i - x_i}, \tag{6}$$

где $C_{m_i}^{x_i}$ — это число способов, которыми в серии из m_i испытаний будут достоверно продиагностированы x_i объектов.

Вывод соответствующей формулы приводится в источнике[9].

Составим функцию правдоподобия и логарифмическую функцию правдоподобия — в нашем случае с использованием формул (3) и (4):

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \ldots, x_n, \theta) = C_{m_1}^{x_1}\theta^{x_1}(1-\theta)^{m_1 - x_1} \times \\ \times C_{m_2}^{x_2}\theta^{x_2}(1-\theta)^{m_2 - x_2} \cdot \ldots \cdot C_{m_n}^{x_n}\theta^{x_n}(1-\theta)^{m_n - x_n}, \end{aligned} \tag{7}$$

откуда

$$\begin{aligned} \ln f(x_1, x_2, \ldots, x_n, \theta) = \ln(C_{m_1}^{x_1} \cdot C_{m_2}^{x_2} \cdot \ldots \cdot C_{m_n}^{x_n}) + \\ + \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot \ln\theta + \left(\sum_{i=1}^{n} m_i - \sum_{i=1}^{n} x_i\right) \cdot \ln(1-\theta). \end{aligned} \tag{8}$$

Найдем первую производную по θ:

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \theta} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{\theta} - \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i - \sum_{i=1}^{n} x_i}{1-\theta}. \tag{9}$$

Приравняв эту производную к нулю и решив полученное уравнение относительно θ, получим искомую оценку достоверности диагностирования:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}. \tag{10}$$

Таблица

Результаты диагностирования (определения технического состояния) подшипников качения*

Table

Results of diagnostics of technical condition of rolling bearings*

Номер серии	1	2	3	4	5
x_i	13	15	19	12	9
m_i	14	17	20	14	9

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

С помощью второй производной легко убедиться в том, что данное значение θ является максимальным.

Пример расчета функции правдоподобия и определения границ достоверности (доверительного интервала) диагностирования с заданной надежностью. В качестве примера рассмотрена серия из пяти опытов (серий диагностирований) буксовых узлов колесных пар грузовых вагонов РУ1Ш-957-Г на промежуточной ревизии, в которых были получены следующие результаты, представленные в табл.

Тогда из формулы (10) получаем:

$$\sum_{i=1}^{5} x_i = 68, \quad \sum_{i=1}^{5} m_i = 74, \quad \theta = \frac{68}{74} \approx 0{,}919, \text{ или } 91{,}9\,\%.$$

Однако в силу того, что величина достоверности диагностирования является случайной и может меняться с проведением каждой новой серии испытаний, для более надежной оценки правдоподобности поставленного диагноза авторы предлагают использовать интервальную оценку параметра θ (доверительный интервал). Доверительным интервалом с надежностью $\theta < \gamma < 1$ называется интервал с концами $\theta_1 < \theta < \theta_2$, зависящими от параметров θ и γ, накрывающий истинное значение параметра θ с вероятностью (надежностью) γ[10].

Заметим, что при увеличении γ длина доверительного интервала увеличивается, поэтому в инженерных расчетах чаще всего полагают $\gamma = 0{,}95$, или 95 %.

Обозначим для удобства $\sum_{i=1}^{n} m_i = m$. Тогда для биномиального распределения границы доверительного интервала с надежностью определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{m}{t^2+m} \cdot \left(\theta + \frac{t^2}{2m} - t \cdot \sqrt{\frac{\theta(1-\theta)}{m} + \left(\frac{t}{2m}\right)^2}\right); \\ \theta_2 &= \frac{m}{t^2+m} \cdot \left(\theta + \frac{t^2}{2m} + t \cdot \sqrt{\frac{\theta(1-\theta)}{m} + \left(\frac{t}{2m}\right)^2}\right), \end{aligned} \tag{11}$$

[8] Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2006. С. 59–60.

[9] Там же.

[10] Там же.

где θ определяется по формуле (10), а величина t находится из уравнения $\Phi(t) = \gamma/2$. В данном случае t является переменной функции Лапласа:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Таблицы функции Лапласа приведены во многих учебниках или учебных пособиях по теории вероятностей, например, в руководстве[11]. Значение t также можно получить с помощью встроенной в MS Excel функции НОРМ.СТ.ОБР, аргументом которой должно служить выражение $(1 + \gamma)/2$. Знак второй производной указывает на то, является ли данное значение параметра θ, при котором первая производная функции правдоподобия равна нулю, максимальным или минимальным. Общее правило исследования функции с помощью старших производных на экстремум изложено в учебном пособии[12].

Если же m достаточно велико, порядка нескольких сотен, то для нахождения границ можно воспользоваться следующими формулами:

$$\theta_1 = \theta - t \cdot \sqrt{\frac{\theta(1-\theta)}{m}}; \qquad \theta_2 = \theta + t \cdot \sqrt{\frac{\theta(1-\theta)}{m}}. \tag{12}$$

Найдем интервальную оценку параметра для примера из таблицы с надежностью $\gamma = 0{,}95$. Тогда из таблицы функции Лапласа найдем, что $t = 1{,}96$. Подставив в формулы (11) значения $\theta = 0{,}919$, $m = \sum_{i=1}^{5} m_i = 74$, получим:

$$\theta_1 = \frac{74}{1{,}96^2 + 74} \times \left(0{,}919 + \frac{1{,}96^2}{148} - 1{,}96 \cdot \sqrt{\frac{0{,}919(1-0{,}919)}{74} + \left(\frac{1{,}96}{148}\right)^2}\right) = 0{,}834;$$

$$\theta_2 = \frac{74}{1{,}96^2 + 74} \times \left(0{,}919 + \frac{1{,}96^2}{148} + 1{,}96 \cdot \sqrt{\frac{0{,}919(1-0{,}919)}{74} + \left(\frac{1{,}96}{148}\right)^2}\right) = 0{,}962. \tag{13}$$

Таким образом, границы достоверности диагностирования с надежностью 0,95 лежат в границах от 83,4 % до 96,2 %. К сожалению, возможность сузить этот доверительный интервал заключается только в увеличении количества испытаний, что не всегда возможно и рационально в условиях работы депо.

Обсуждение. Из приведенных выше данных следует вывод, что нормативные документы по вибродиагностированию узлов подвижного состава имеют недоработки в части критериев, определяющих эффективность и качество работы вибродиагностического оборудования. Отсутствует единая методика расчета показателей достоверности, вследствие чего результаты расчетов по разным методикам являются несопоставимыми. Авторами разработана методика оценки качества диагностирования по дополнительному параметру — функции правдоподобия. Использование предложенной методики позволит более объективно оценивать функциональные возможности и эффективность применения ВДО.

В отраслевых документах целесообразно привести не только требуемую величину показателя достоверности, но и методику проведения экспериментов по определению этих показателей. Разработка такой методики с использованием соответствующего математического аппарата является предметом отдельного исследования и не рассматривалась авторами в этой статье.

Заключение. В статье обоснована недостаточная проработка отраслевых нормативных документов по вибродиагностированию. Доработку этих документов целесообразно проводить специально организованной рабочей группой из специалистов железнодорожного транспорта, заводов-изготовителей подшипников и предприятий-разработчиков ВДО. Предложен новый критерий оценки качества диагностирования ВДО и разработана методика его определения.

Материалы настоящей статьи могут быть использованы не только на железнодорожном транспорте, но и в других отраслях, где вибродиагностическое оборудование нашло широкое применение.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

[11] Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учебное пособие. М.: Высшее образование, 2008. 404 с.

[12] Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: учеб. пособие для университетов и педагогических институтов. Т. 1. М.: Наука, 2006. С. 287.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Mitchell J. S. From Vibration Measurement to Condition Based Maintenance. Seventy Years of Continuous Progress. *Journal of Sound and Vibration*. 2007; 41(1):62–78.

2. Барков А. В., Никитин В. С. Современные возможности вибродиагностики машин и оборудования [Электронный ресурс]. URL: https://masters.donntu.ru/2006/eltf/marunevich/library/vibro_vast.htm (дата обращения: 25.07.2025).

Barkov A. V., Nikitin V. S. Modern possibilities of vibration diagnostics of machines and equipment. (In Russ.). URL: https://masters.donntu.ru/2006/eltf/marunevich/library/vibro_vast.htm (access date: 25.07.2025).

3. Харрасов Б. Г., Валеев А. Р., Хурамшина Р. А., Соколова В. В. Этапы развития и пути становления методов контроля вибрации оборудования в мировой практике // История науки и техники. 2002. № 2–3. С. 49–52. https://doi.org/10.24412/2226-2296-2022-2-3-49-52. EDN: https://www.elibrary.ru/xabhte.

Kharrasov B. G., Valeev A. R., Khuramshina R. A., Sokolova V. V. History and development of vibration control methods of equipment in world practice. *History and Pedagogy of Natural Science*. 2022;(2–3):49–52. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2226-2296-2022-2-3-49-52. EDN: https://www.elibrary.ru/xabhte.

4. Тэттэр В. Ю., Тэттэр А. Ю. Прикладные вопросы диагностирования роторных узлов по вибрации. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. 131 с. EDN: https://www.elibrary.ru/tuhlwp.

Tetter V. Yu., Tetter A. Yu. Applied issues of diagnostics of rotor units by vibration. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. 131 p. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/tuhlwp.

5. Надежин М. И., Слободзян Н. С., Киселев А. А. Улучшение качества моделей классификации отказов для диагностики электромеханических систем // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 1. С. 73–80. https://doi.org/10.31776/RTCJ.10108. EDN: https://www.elibrary.ru/prhrzh.

Nadezhin M. I., Slobodzyan N. S., Kiselev A. A. Improving quality of the faults' classification models for electromechanical systems' diagnostics. *Robotics and technical cybernetics*. 2022;10(1):73–80. (In Russ.). https://doi.org/10.31776/RTCJ.10108. EDN: https://www.elibrary.ru/prhrzh.

6. Матвеев С. А., Коротков Е. Б., Жуков Ю. А., Надежин М. И. Сравнение методов искусственного интеллекта в задачах диагностики электропривода // Экстремальная робототехника. 2020. № 1(31). С. 183–187. EDN: https://www.elibrary.ru/jttmfz.

Matveev S. A., Korotkov E. B., Zhukov Yu. A., Nadezhin M. I. Comparison of artificial intelligence methods in следующий: tasks of electric drive diagnostics. *Extreme Robotics*. 2020;1(31):183–187. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/jttmfz.

7. Тэттэр В. Ю., Тэттэр А. Ю., Корнейчук И. Л., Бородин А. В. Математические модели дефектов роторных механизмов подвижного состава в частотной и временной областях // Известия Транссиба. 2019. № 3(39). С. 39–48. EDN: https://www.elibrary.ru/izjkgx.

Tetter V. Yu., Tetter A. Yu., Korneichuk I. L., Borodin A. V. Mathematical models of defects of rotor mechanisms of rolling stock in the frequency and time domains. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2019;3(39): 39–48. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/izjkgx.

8. Сучкова Л. И., Якунин А. Г. Применение интервальных оценок в приборах и методах контроля для выделения информационных параметров квазидетерминированных сигналов // Вестник Югорского государственного университета. 2011. № 2(21). С. 69–81. EDN: https://www.elibrary.ru/oqqqjn.

Suchkova L. I., Yakunin A. G. Application of interval estimations in devices and methods of a quality monitoring for discrimination of information parameters of the quasidetermined signals. *Yugra State University Bulletin*. 2011;2(21):69–81. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/oqqqjn.

9. Недугов Г. В., Недугова В. В. Вероятностные аналитические технологии в судебной медицине: базовые математические модели и практические приложения. Самара: Офорт, 2009. 241 с. EDN: https://www.elibrary.ru/qlwlch.

Nedugov G. V., Nedugova V. V. Probabilistic analytical technologies in forensic medicine: basic mathematical models and practical applications. Samara: Ofort, 2009. 241 p. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/qlwlch.

10. Ардашов А. А., Арсеньев В. Н., Силантьев С. Б. Оценивание характеристик надежности сложной системы при ограниченном объеме экспериментальных данных // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 197–200. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-3-197-201. EDN: https://www.elibrary.ru/vqyanp.

Ardashov A. A., Arseniev V. N., Silantev S. B. Assessment of reliability characteristics of a complex system by a limited volume of experimental data. *Journal of Instrument Engineering*. 2016;59(3):197–200. (In Russ.). https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-3-197-201. EDN: https://www.elibrary.ru/vqyanp.

11. Tetter V., Gatelyuk O., Denisova I. Evaluating market attractiveness of railway car repair companies based on expert analysis. *Ingegneria Ferroviaria*. 2022;77(2):93–108. EDN: https://www.elibrary.ru/idztds.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Юрьевич ТЭТТЭР,
канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, Маркса пр., д. 35); начальник научно-исследовательского отдела, Омский завод современных технологий машиностроения (ООО «ОЗТМ», 644065, г. Омск, ул. Нефтезаводская, д. 42А, офис 21), Author ID: 456255, https://orcid.org/0000-0001-6440-5291

Олег Владимирович ГАТЕЛЮК,
канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика», Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, Маркса пр., д. 35), Author ID: 493854, https://orcid.org/0009-0009-8108-6689

Александр Юрьевич ТЭТТЭР,
канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, Маркса пр., д. 35), Author ID: 543289, https://orcid.org/0000-0001-5802-7001

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Yu. TETTER,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marx Ave.); Head of the Research Department, Omsk Plant of Modern Engineering Technologies (644065, Omsk, 42A, off. 21, Neftezavodskaya St.), Author ID: 456255, https://orcid.org/0000-0001-6440-5291

Oleg V. GATELYUK,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Higher Mathematics Department, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marx Ave.), Author ID: 493854, https://orcid.org/0009-0009-8108-6689

Alexander Yu. TETTER,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marx Ave.), Author ID: 543289, https://orcid.org/0000-0001-5802-7001

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Юрьевич ТЭТТЭР. Анализ состояния вопроса, нормативных документов, сбор и интерпретация данных. Написание статьи, смысловое, стилистическое и техническое редакти-

рование. Формирование выводов. Решение об окончательном утверждении варианта статьи для публикации (60 %).

Олег Владимирович ГАТЕЛЮК. Выполнение математических расчетов по определению функции правдоподобия. Смысловое, стилистическое и техническое редактирование. Решение об окончательном утверждении варианта статьи для публикации (25 %).

Александр Юрьевич ТЭТТЭР. Сбор, анализ и интерпретация данных. Организация структуры представления материала. Смысловое, стилистическое и техническое редактирование. Решение об окончательном утверждении варианта статьи для публикации (15 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir Yu. TETTER. Data collection, analysis and interpretation. Article writing, semantic, stylistic and technical editing. Final approval of the article version for publication (60 %).

Oleg V. GATELYUK. Mathematical calculations to determine the likelihood function. Semantic, stylistic and technical editing. Final approval of the article version for publication (25 %).

Alexander Yu. TETTER. Data collection, analysis and interpretation. Organisation of the material presentation structure. Semantic, stylistic and technical editing. Final approval of the article version for publication (15 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 06.03.2025, рецензия от первого рецензента получена 23.04.2025, рецензия от второго рецензента получена 14.05.2025, рецензия от третьего рецензента получена 09.06.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 01.07.2025, принята к публикации 11.08.2025.

The article was submitted 06.03.2025, first review received 23.04.2025, second review received 14.05.2025, third review received 09.06.2025, fourth review received 01.07.2025, accepted for publication 11.08.2025.