

УДК 629.5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_15

Оригинальное исследование



Апробация вибродиагностического метода для обнаружения дефектов крепления при ослаблении натяжения крепежного элемента

И.В. Буковский, О.В. Хруцкий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Одной из причин повышенной вибрации роторного оборудования является потеря стягивающей нагрузки между подшипниковым узлом и фундаментом, что может быть вызвано дефектами крепежных элементов, такими как износ резьбы, ослабление затяжки, коррозия, усталость металла и другие. Такие дефекты ведут к росту вибрации, ухудшению работы оборудования и его преждевременному износу. Для предотвращения таких негативных последствий в вибродиагностике существует методика, позволяющая установить наличие дефектов в крепежных элементах на основе анализа коэффициентов, однако доступные источники указывают на отсутствие дифференцированного подхода к различным видам дефектов крепежных элементов. Нет экспериментальных данных, подтверждающих эффективность этой методики для обнаружения конкретных типов дефектов в рамках общей категории.

Цель — оценка эффективности данного метода для установления факта наличия дефекта в крепежном узле, вызванного ослаблением натяжения винта, соединяющего лапу стойки подшипника с фундаментом.

Материалы и методы. Применен вибродиагностический метод, основанный на анализе коэффициентов, для выявления дефектов в крепежном узле, вызванных ослаблением затяжки крепежного винта. В рамках исследования была проведена экспериментальная проверка методики, основанной на анализе коэффициентов, представляющих собой отношение общих уровней вибрации на конструктивных частях подшипникового узла и фундаменте.

Результаты. В ходе экспериментов измерялось среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости в трех плоскостях на различных компонентах имитационного стенда AP7000 посредством анализатора СД-21 и датчика вибрации AP40. Полученные данные использовались для расчета коэффициентов, характеризующих состояние крепления.

Наиболее информативными для диагностики крепежных узлов роторного оборудования являются коэффициенты, рассчитанные как отношение СКЗ на корпусе подшипникового узла к СКЗ на фундаменте в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также отношение СКЗ на лапе стойки подшипника к СКЗ на фундаменте в вертикальной плоскости. Только эти коэффициенты позволяют достоверно устанавливать наличие дефектов креплений при ослаблении затяжки крепежных винтов.

Выводы. Результаты исследования подтвердили практическую ценность рассматриваемой методики для выявления дефектов в крепежном узле, вызванных ослаблением затяжки винта.

Ключевые слова: вибродиагностика; подшипниковый узел; вибрация; виброанализатор; СКЗ; коэффициенты; затяжка винта; дефект крепления; крепежный винт; общий уровень вибрации; факт наличия дефекта; критический порог; область допустимых значений; AP7000; СД-21; AP-40.

Как цитировать

Буковский И.В., Хруцкий О.В. Апробация вибродиагностического метода для обнаружения дефектов крепления при ослаблении натяжения крепежного элемента // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 15–22. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_15

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_15

Original study article

Testing vibration diagnostic method to detect fastening defects due to slackening

Ilya V. Bukovsky, Oleg V. Khrutsky

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: One cause of increased vibration in rotary equipment is the loss of clamp load between the bearing assembly and the foundation caused by fastening defects, including thread wear, slacking, corrosion, metal fatigue, etc. Such defects lead to increased vibration, reduced equipment performance, and its early wear. To prevent such negative effects, a method is used in vibration monitoring to identify defects in fasteners based on the analysis of factors; however, available sources indicate that there are no differentiated approaches to various types of fastener defects.

AIM: The article examines the performance of this method to identify fastening defects occurring due to slacking of the fastener that connects the bearing bracket leg to the foundation.

MATERIALS AND METHODS: There is no experimental data to support the performance of this method in identifying specific defects within the general category. The article examines the possible use of a vibration diagnostic method based on the analysis of factors to identify fastening defects caused by slacking of fastening screws. The study includes an experimental validation of the method based on the analysis of factors, i.e. the ratio of overall structure vibration of the bearing assembly and the foundation.

RESULTS: During the experiments, the root mean square (RMS) value of vibration velocity was measured in three planes on various components of AP7000 simulation test bench using SD-21 analyzer and AP40 vibration sensor. The data were used to calculate factors characterizing the fastening health. The most insightful factors to identify defects in fasteners of rotary equipment include those calculated as the ratio of the bearing housing RMS to the foundation RMS in horizontal and vertical planes and the ratio of the bearing bracket leg RMS to the foundation RMS in the vertical plane. Only these factors allow to reliably identify fastening defects when the fastening screws are loose.

CONCLUSIONS: The results confirmed that the considered method is useful in identifying fastening defects caused by screw slacking.

Keywords: vibration diagnostics; bearing assembly; vibration; vibration analyzer; SKZ; coefficients; screw tightening; fastening defect; fixing screw; general vibration level; the fact of a defect; critical threshold; range of permissible values; AR7000; SD-21; AR-40.

To cite this article

Bukovsky IV, Khrutsky OV. Testing vibration diagnostic method to detect fastening defects due to slackening. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):15–22. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_15

Received: 29.01.2025

Accepted: 10.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин повышенной вибрации роторного оборудования, к числу которых также относятся различные судовые агрегаты, часто является потеря части стягивающей нагрузки между основаниями опор установки и фундаментом. Снижение жесткости соединения чаще всего связано с различными дефектами крепежных элементов, среди которых можно выделить: износ или повреждение резьбы, ослабление натяжения крепежного элемента, коррозию крепежных элементов, усталостные трещины на крепежных элементах, деформации крепежных элементов. Появление хотя бы одного из перечисленных дефектов приводит к повышению общего уровня вибрации, что в итоге может негативно сказаться на работоспособности оборудования, привести к преждевременному износу его компонентов и даже вызвать аварийные ситуации.

Анализ ряда открытых интернет-ресурсов, специализирующихся на рассмотрении различных методик, применяемых в вибродиагностике, показал, что характерными параметрами, позволяющими дать оценку текущему состоянию качества крепления машины к фундаменту как удовлетворительному или неудовлетворительному, являются коэффициенты, рассчитанные как отношения общих уровней вибрации, зафиксированных на элементах подшипникового узла и фундаменте диагностируемого оборудования. Если значения этих коэффициентов превысят установленный критический порог, который соответствует значению 3,0, это может указывать на наличие потенциальных проблем с креплением агрегата к фундаменту.

Тем не менее среди изученных интернет-источников отсутствует какая-либо конкретная и экспериментально подтвержденная информация о зависимостях, устанавливаемых между различными видами дефектов элементов крепления и коэффициентами, рассчитываемыми по данной методике. В частности, остаются открытыми следующие вопросы:

1. Какие типы дефектов крепежных элементов приводят к выходу рассчитанных коэффициентов за пределы допустимых значений, а какие — нет?
2. Как влияет интенсивность развития определенного дефекта на значения коэффициентов?
3. Какой из коэффициентов наиболее чувствителен к различным типам дефектов?
4. Насколько выраженным должен быть дефект крепежного элемента, чтобы можно было установить факт его наличия по данным коэффициентам?
5. В каких плоскостях и точках на элементах подшипникового узла и фундаменте необходимо и достаточно измерять общие уровни вибрации для последующего расчета коэффициентов?

Ответы на поставленные вопросы позволят выявить, какие именно дефекты крепления можно выявить

(установить факт наличия) с использованием методики, основанной на анализе коэффициентов.

Принцип методики, основанной на анализе коэффициентов, вычисленных как отношение общих уровней вибрации на конструктивных элементах диагностируемого агрегата

Метод диагностики ослабления крепления машины к фундаменту по общему уровню вибрации подразделяется на несколько этапов:

1. Измеряется среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости в трех взаимно перпендикулярных плоскостях на корпусе подшипникового узла (датчик вибрации устанавливается на верхней части крышки подшипникового узла со стороны крепежного винта), лапе стойки подшипника (датчик вибрации крепится как можно ближе к крепежному винту на лапе стойки подшипника) и непосредственно самом фундаменте (датчик вибрации размещается вблизи стойки подшипника с диагностируемым крепежным винтом). В случае, если отсутствует прямой доступ к подшипниковому узлу, измерения СКЗ виброскорости проводится как можно ближе к предполагаемым местам расположения верхней части крышки подшипникового узла и лапы стойки подшипника на жестком участке корпуса диагностируемого агрегата.
2. По результатам измерений рассчитываются три коэффициента K_1 , K_2 , K_3 (далее — $K_{1,2,3}$, если речь идет сразу о трех коэффициентах), как отношение общих уровней вибрации в одноименных плоскостях:

$$K_1 = \text{СКЗ}_{\text{коп}} / \text{СКЗ}_{\text{лсп}}; \quad (1)$$

$$K_2 = \text{СКЗ}_{\text{лсп}} / \text{СКЗ}_{\text{ф}}; \quad (2)$$

$$K_3 = \text{СКЗ}_{\text{коп}} / \text{СКЗ}_{\text{ф}}; \quad (3)$$

где $\text{СКЗ}_{\text{коп}}$ — среднеквадратическое значение виброскорости, измеренное на верхней части крышки корпуса опорного подшипника, мм/с; $\text{СКЗ}_{\text{лсп}}$ — среднеквадратическое значение виброскорости, измеренное на лапе стойки подшипника, мм/с; $\text{СКЗ}_{\text{ф}}$ — среднеквадратическое значение виброскорости, измеренное на фундаменте.

3. Сравнение полученных коэффициентов с установленными допустимыми значениями и определение текущего состояния диагностируемого крепежного элемента: 1. «Нормальное» состояние — крепление сохраняет достаточный уровень стягивающей нагрузки (данное состояние присваивается крепежным элементам, если для всех коэффициентов, определенных в трех плоскостях, выполняется условие — $K_{1,2,3} < 2,5$); 2. «Ослабленное» состояние — частичная потеря стягивающей нагрузки, но крепежные элементы все еще выполняют свои функции (данное состояние присваивается крепежным элементам, если хотя бы для одного из коэффициентов, определенных в трех плоскостях,

выполняется условие — $2,5 \leq K_{1,2,3} \leq 3,0$). «Критическое» состояние — существенная потеря стягивающей нагрузки, крепежные элементы свои функции более не выполняют (данное состояние присваивается крепежным элементам, если хотя бы для одного из коэффициентов, определенных в трех плоскостях, выполняется условие — $K_{1,2,3} > 3,0$)¹ [1].

Цель и задачи исследования

Проводимое исследование было направлено на экспериментальное подтверждение возможности применения рассматриваемого вибродиагностического метода для выявления дефектов крепления, возникающих из-за ослабления натяжения крепежного элемента, соединяющего лапу стойки подшипника с фундаментом.

Основные задачи исследования были направлены на определение:

- 1) возможности установить факт наличия дефекта крепления по расчетным коэффициентам $K_{1,2,3}$ при ослаблении затяжки крепежного винта, соединяющего лапу стойки подшипника с фундаментом (отбор коэффициентов, значения которых хотя бы один раз превышали допустимые пределы — $K_{1,2,3} > 3,0$, но только в условиях раскрученного крепежного винта);
- 2) минимальной степени раскручивания крепежного винта, достаточной для выхода значений коэффициентов $K_{1,2,3}$ из области допустимых значений ($K_{1,2,3} > 3,0$);
- 3) коэффициентов, наиболее чувствительных к раскручиванию крепежного винта (отбор коэффициентов, значения которых наиболее существенно превышают установленный критический порог, равный 3,0, при различных степенях затяжки винта);
- 4) воздействия ослабления степени затяжки крепежного элемента на значения коэффициентов, по которым можно установить факт наличия дефекта крепления (рассматривается динамика изменения значений коэффициентов от степени ослабления крепежного винта, с целью зафиксировать возможное снижение значений коэффициентов ниже критического порога при ослаблении степени затяжки винта);

- 5) необходимых и достаточных реперных точек для установки первичных преобразователей вибрации на фундаменте и элементах подшипникового узла.

СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Элементная база, которая использовалась в эксперименте для имитации дефекта и его выявления:

- 1) стенд имитационный AP7000 — экспериментальный агрегат для регистрации сигналов вибрации при работе в бездефектном состоянии и при постепенном ослаблении крепежных элементов, соединяющих стойки подшипниковых узлов с фундаментом²;
- 2) виброанализатор СД-21 — устройство для сбора, анализа и отображения данных о вибрации, поступающих от датчика AP40, в форме среднеквадратичного значения³;
- 3) первичный преобразователь AP40 — датчик для регистрации параметров вибрации на контрольных точках подшипникового узла и фундамента⁴;
- 4) спектр-07 и фототахометр ТСТ 1100.01 — диагностический комплекс и совместимый с ним тахометрический датчик для отслеживания текущей частоты вращения роторного оборудования⁵.

ХОД ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения и регистрация общих уровней вибрации проводились с использованием виброанализатора СД-21 и первичного преобразователя AP40. Они заключались в фиксации СКЗ виброскорости при пошаговом раскручивании крепежного винта на 1/8 от полного оборота (45°) из исходного положения (0° — винт полностью закручен) до момента, когда крепежный винт перестает оказывать давление на лапу стойки опорного подшипника (винт раскручен на 3/4 от полного оборота или 270°).

Датчик вибрации AP40 в процессе проведения измерений поочередно устанавливался на конструктивные части подшипникового узла (верхнюю часть крышки корпуса подшипникового узла, лапу стойки

¹ Вибрационная диагностика состояния фундаментов // Компания Вибро-Центр. Приборы и программы для контроля и диагностики оборудования. URL: <https://vibrocenter.ru/book13.html> (дата обращения: 21.04.2024); Диагностика фундаментов, вибродиагностика фундаментов. BALTECH // Статьи по теме основы вибродиагностики и динамической балансировки. BALTECH. URL: <http://vibropoint.ru/diagnostika-fundamentov/> (дата обращения: 21.04.2024).

² Стенд имитационный AP7000. УЧЕБНАЯ ТЕХНИКА // Компания «Учебная техника» поставщик учебного оборудования. URL: <https://учебнаятехника.рф/wps/stend-imitacionnyj-ar7000/?ysclid=m74qbmppsp53548026> (дата обращения: 23.04.2024).

³ Виброанализатор СД-21 // Компания СЕТРИКС — оборудование для контроля и анализа вибрации. Измерительные приборы для диагностики. URL: <https://www.setrix.ru/p/vibroanalizator-sd-21> (дата обращения: 23.04.2024).

⁴ Вибропреобразователи пьезоэлектрические AP40, 16602-12. Справочник средств измерений Поверь.ру // Центр поверки средств измерений в Москве — Поверь.ру. URL: <https://www.pover.ru/spravochnik-sredstv-izmerenij/16602-12-vibropreobrazovateli-pezelektricheskie-ar40-isp/> (дата обращения: 23.04.2024).

⁵ Переносной вибродиагностический комплекс «Спектр-07» // АО «ТСТ» — Вибродиагностика, балансировка, центровка, вибромониторинг оборудования, виброанализаторы, виброконтроль, приборы измерения вибрации. URL: <https://tst-spb.ru/products/spectr-07> (дата обращения: 23.04.2024); Датчики // АО «ТСТ» — Вибродиагностика, балансировка, центровка, вибромониторинг оборудования, виброанализаторы, виброконтроль, приборы измерения вибрации. URL: <https://www.tst-spb.ru/products/sensors> (дата обращения: 23.04.2024).

подшипника) и фундамента (рядом со стойкой подшипникового узла с диагностируемым крепежным винтом) стэнда AP7000 в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (в вертикальном, осевом и горизонтальном направлениях по отношению к валу электродвигателя имитационного стэнда)⁶.

Измерения общих уровней вибрации на имитационном стэнде осуществлялись в условиях, когда диагностируемый агрегат не находился под действием внешнего возбуждающего дефекта, такого как дисбаланс, расцентровка,

сильный износ опорных подшипников, изгиб вала, перекосяк опор и т.д.

Для определения фактических значений частоты вращения вала электродвигателя стэнда AP7000, с целью контроля и обеспечения одинаковых условий при проведении эксперимента, использовались сборщик данных Спектр-07 и фототахометр ТСТ 1100.01.

Таким образом, проведенные измерения позволили получить данные, которые отображены в табл. 1. В данной таблице представлены усредненные результаты десяти

Таблица 1. Среднеквадратическое значение виброскорости в трех плоскостях измерения на конструктивных элементах имитационного стэнда AP7000

Table 1. Root mean square vibration velocity in three measurement planes of structures of AP7000 simulation test bench

Направление измерений	Параметр	Положение винта, градус							Частота, Гц
		0	45	90	135	180	225	270	
Корпус подшипникового узла									
Вертикаль	СКЗ, мм/с	0,74	0,84	0,82	1,48	3,67	3,24	3,99	30
Горизонт	СКЗ, мм/с	1,38	1,25	1,38	2,41	4,77	5,19	5,67	30
Ось	СКЗ, мм/с	1,03	1,15	1,14	1,4	2,66	2,34	2,57	30
Лапа стойки подшипника									
Вертикаль	СКЗ, мм/с	1,17	1,44	1,35	3,02	9,34	8,04	8,02	30
Горизонт	СКЗ, мм/с	1,39	1,44	1,46	3,56	3,43	3,64	4,53	30
Ось	СКЗ, мм/с	1,09	1,18	1,19	1,29	1,68	1,81	2,44	30
Фундамент									
Вертикаль	СКЗ, мм/с	0,7	0,99	0,91	0,97	1,06	1,04	1,22	30
Горизонт	СКЗ, мм/с	1,22	1,34	1,36	1,48	1,68	1,75	1,83	30
Ось	СКЗ, мм/с	0,34	0,5	0,35	0,36	0,31	0,31	0,36	30

Примечание: СКЗ — среднеквадратическое значение.

Note: СКЗ, root mean square value.

Таблица 2. Значения коэффициентов в трех плоскостях

Table 2. Factor values in three planes

Направление измерений	Коэффициенты	Положение винта, градус						
		0	45	90	135	180	225	270
Вертикаль	K1	0,63	0,58	0,61	0,49	0,39	0,40	0,50
Горизонт	K1	0,99	0,87	0,95	0,68	1,39	1,43	1,25
Ось	K1	0,95	0,97	0,96	1,09	1,58	1,29	1,05
Вертикаль	K2	1,68	1,45	1,48	3,11	8,81	7,73	6,57
Горизонт	K2	1,14	1,07	1,07	2,41	2,04	2,08	2,48
Ось	K2	3,21	3,37	3,40	3,58	5,33	5,80	6,78
Вертикаль	K3	1,06	0,85	0,90	1,53	3,46	3,12	3,27
Горизонт	K3	1,13	0,93	1,01	1,63	2,84	2,97	3,10
Ось	K3	3,04	3,29	3,26	3,89	8,44	7,50	7,14

⁶ Измерение вибрации, методы измерения вибрации, измерение вибрации акселерометром, средства измерения вибрации, точки измерения вибрации, правила измерения вибрации. BALTECH // Статьи по теме основы вибродиагностики и динамической балансировки. BALTECH. URL: <http://vibropoint.ru/izmerenie-vibracii/> (дата обращения: 21.04.2024).

измерений СКЗ виброскорости для каждой точки, зафиксированные на конструктивных частях стенда AP7000 в различных плоскостях при семи различных степенях затяжки крепежного винта, когда диагностируемый агрегат не подвергался воздействию внешнего возбуждающего дефекта.

По данным, приведенным в табл. 1, с использованием формул (1–3) был выполнен расчет коэффициентов K1, K2, K3 для каждой плоскости и при семи различных положениях крепежного винта. Результаты расчета коэффициентов отображены в табл. 2.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализ, проведенный с опорой на представленные в табл. 2 данные, позволил выявить, что:

- факт наличия ослабления крепежного элемента, вызванного его раскручиванием, можно безошибочно установить только по коэффициентам K2 (вертикаль) и K3 (вертикаль, горизонт). Однако это возможно не при всех исследуемых степенях затяжки винта. У прочих коэффициентов были выявлены некоторые недостатки: K1 (вертикаль, горизонт, ось) и K2 (горизонт) не превысили установленный критический порог для данной методики при всех рассмотренных степенях затяжки винта. В то же время коэффициенты K2 (ось) и K3 (ось) превысили этот порог при исходном положении крепежного винта, т.е. в случае, когда он был полностью закручен. По этим причинам коэффициенты K1 (вертикаль, горизонт, ось), K2 (горизонт, ось) и K3 (ось) не были включены в дальнейший анализ. На рис. 1 представлены данные из табл. 2, иллюстрирующие распределение значений коэффициентов

по различным степеням затяжки винта относительно критического порога (численное значение равно 3,0);

- минимальная степень ослабления затяжки крепежного винта, при которой можно достоверно установить факт наличия соответствующего дефекта, варьируется в зависимости от рассматриваемого коэффициента. Для K2 (вертикаль) — винт раскручен на 3/8 от полного оборота или 135°, для K3 (вертикаль) — винт раскручен на 1/2 от полного оборота или 180°, K3 (горизонт) — винт раскручен на 3/4 от полного оборота или 270°;
- коэффициенты K2 (вертикаль) и K3 (вертикаль, горизонт) демонстрируют различную реакцию на изменения степени затяжки крепежного винта. Наиболее чувствительным к ослаблению стягивающей нагрузки между опорами агрегата и фундаментом оказался коэффициент K2 (вертикаль). Это подтверждается данными, представленными в табл. 3, где указано процентное отклонение коэффициентов от критического порога при тех степенях затяжки, которые позволяют установить факт наличия дефекта;
- показатели коэффициентов K2 (вертикаль) и K3 (вертикаль) после выхода из области допустимых значений не снижались ниже установленного критического порога даже при дальнейшем наращивании ослабления стягивающей нагрузки. В то же время коэффициент K3 (горизонт) превысил критический порог лишь один раз, и это произошло только при максимальном ослаблении затяжки крепежного винта. Поэтому рассмотреть динамику изменения значений данного коэффициента от степени затяжки винта не представляется возможным;

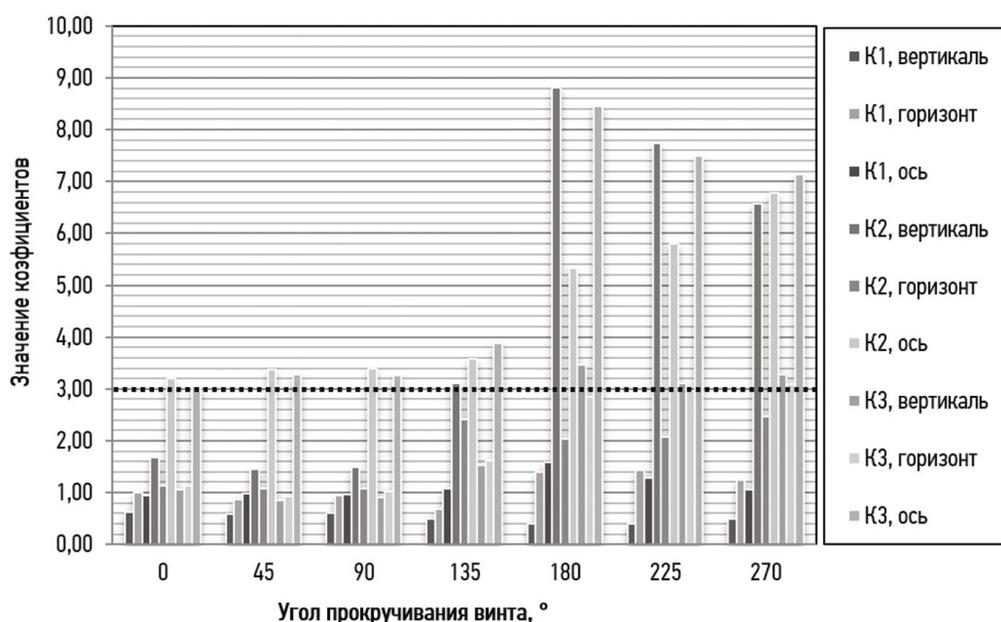


Рис. 1. Распределение значений коэффициентов по различным степеням затяжки винта относительно критического порога.
Fig. 1. Distribution of factor values for different screw tightening degrees relative to the critical threshold.

Таблица 3. Процентное отклонение рассчитанных коэффициентов от критического порога

Table 3. Percentage deviation of calculated factors from the critical threshold

Коэффициенты	Процентное отклонение	Положение винта, градус						
		0	45	90	135	180	225	270
К2 (вертикаль)	%	–	–	–	3,78	193,7	157,6	119,1
К3 (вертикаль)	%	–	–	–	–	15,4	3,85	9,02
К3 (горизонт)	%	–	–	–	–	–	–	3,28

- при выборе плоскостей измерения и мест установки первичных преобразователей на объекте диагностики необходимо ориентироваться на параметры вибрации, которые требуются для расчета хотя бы одного из трех коэффициентов: К2 (вертикаль) и К3 (вертикаль, горизонт). Для определения К2 (вертикаль) следует измерять СКЗ виброскорости на лапе стойки подшипника и на фундаменте в вертикальных плоскостях. В случае К3 (вертикаль, горизонт) измерения СКЗ виброскорости необходимо проводить на верхней части крышки корпуса опорного подшипника и на фундаменте в вертикальных и горизонтальных плоскостях соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента и анализ полученных данных подтверждают, что методика, основанная на расчете коэффициентов по общим уровням вибрации, позволяет выявлять факт наличия дефектов креплений, возникающих из-за ослабления натяжения крепежного винта. Однако не все рассмотренные коэффициенты пригодны для решения этой задачи. Как показал эксперимент, только по коэффициентам К2 (вертикаль) и К3 (вертикаль, горизонт) можно обнаружить дефект, связанный с раскручиванием крепежного винта. Причем коэффициент К2 (вертикаль) продемонстрировал наибольшую эффективность, поскольку с его помощью можно достоверно определить наличие данного дефекта при самой минимальной степени ослабления затяжки крепежного винта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русов В.А. Вибрационная диагностика состояния фундаментов. В кн.: Состояние фундамента. Спектральная вибродиагностика. 2012.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: И.В. Буковский — провел основное исследование, собрал и проанализировал данные, ответственен за обработку и визуализацию данных, написал текст статьи; О.В. Хруцкий — участвовал в подготовке статьи к публикации, провел литературный обзор по существующим методам диагностики и выявления дефектов.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: I.V. Bukovsky, conducted the main research, collected and analyzed the data, is responsible for processing and visualizing the data, wrote the text of the article; O.V. Khrutsky, participated in preparing the article for publication, conducted a literature review of existing methods of diagnostics and detection of defects.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

REFERENCES

1. Rusov VA. Vibration diagnostics of the condition of foundations. In: *Condition of foundations. Spectral vibrodiagnostics*. 2012. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Илья Валерьевич Буковский**, аспирант, старший преподаватель кафедры судовой автоматики и измерений;
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3;
eLibrary SPIN: 4561-7543; e-mail: ilya.bukovskiy@mail.ru

Олег Валентинович Хруцкий, д-р техн. наук, профессор кафедры судовой автоматики и измерений;
e-mail: obx47@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Ilya V. Bukovsky**, Postgraduate Student, Senior Lecturer at the Department of Marine Automation and Measurements;
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia;
eLibrary SPIN: 4561-7543; e-mail: ilya.bukovskiy@mail.ru

Oleg V. Khrutsky, Dr. Sci. (Engineering), Professor at the Department of Marine Automation and Measurements;
e-mail: obx47@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author