

УДК 629.3.083.4

doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-16-23

Анализ методов вибродиагностики металлических конструкций

Т.А. Паутова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Analysis of Vibration Diagnostic Methods of Metal Structures

T.A. Pautova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Ввиду постоянного увеличения сложности машин и предъявляемых к ним требований обеспечение их надежности становится все более актуальной задачей. Основным элементом любой машины является ее несущая металлическая конструкция, техническое состояние которой влияет и на машину в целом. Это указывает на необходимость диагностирования конструкций с целью предотвращения отказов. В настоящее время широко развиваются методы вибродиагностики применительно к объектам различных отраслей промышленности. Исследования ученых направлены на изучение различных дефектов и методов их обнаружения, параметров вибрации и оценки остаточного ресурса. Рассмотрены основные актуальные направления развития методов вибродиагностики. Исследована чувствительность динамических характеристик конструкции к наличию дефекта в виде трещины. Выполнен конечно-элементный анализ стальной двутавровой балки для различных вариантов ее закрепления и расположения трещины. Проанализирована зависимость частот собственных колебаний и амплитудно-частотных характеристик балки от размера трещины. Установлено, что наличие дефекта оказывает наибольшее влияние на амплитудно-частотные характеристики балки.

Ключевые слова: мониторинг конструкций, вибродиагностика металлических конструкций, модальный анализ, определение расположения дефектов, частота поврежденной балки, амплитудно-частотная характеристика

Due to the constant machine complexity increasing as well as the requirements imposed on them, the issue of ensuring their reliability is becoming more and more urgent. The main part of any machine is supporting metal structure, which state determines the state of the machine as a whole. This determines the need to diagnose structures in order to prevent failures. At present, the methods of vibration diagnostics are being widely developed, as applied to objects of various industries. Scientists' research is aimed at studying various types of defects, vibration parameters, methods for detecting defects and assessing the residual life. The article considers the main current trends in the development of vibration diagnostics methods. The sensitivity of the dynamic structure characteristics to the presence of a defect in the form of a crack has been investigated. A finite element analysis of a steel I-beam was performed for various cases of its fixation and crack location. The dependence of the natural frequencies and amplitude-frequency characteristics of the beam on the crack size has been analyzed. It is found that the presence of a defect has the greatest effect on the frequency response of the beam.

Keywords: structure monitoring, vibration diagnostics of metal structures, modal analysis, determination of the defect positions, beam damage frequency, frequency response function

Возникновение повреждений в конструкциях приводит к снижению их несущей способности и может повлечь за собой отказы, если их не предотвращать. В связи с этим необходимо своевременно обнаруживать дефекты, для чего проводится мониторинг их технического состояния во время работы. Важным является возможность проведения мониторинга без непосредственного участия человека с обнаружением скрытых дефектов в виде трещин, коррозии и износа материала некоторых частей конструкции. Отсюда вытекает необходимость проведения мониторинга с использованием надежных и точных средств неразрушающего контроля.

Внешними факторами, влияющими на долговечность металлоконструкции, являются механические и физико-химические воздействия, внутренними — свойства материала, конфигурация и размеры конструкции, накопленные повреждения (старение, износ, коррозия и др.).

Для элементов металлоконструкций, подвергающихся переменным во времени внешним нагрузкам, характерно возникновение усталостного разрушения. Такой тип разрушения проявляется в появлении и развитии трещины, после достижения которой критического размера происходит долом. В силу того, что процесс развития усталостного повреждения имеет стадийный характер и происходит в течение продолжительного времени, его можно спрогнозировать путем проведения технической диагностики.

Техническая диагностика — это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства обнаружения и поиска дефектов, повреждений и неисправностей объектов. Совокупность принципов, методов и средств диагностирования является основой диагностического обеспечения надежности.

Для диагностики металлоконструкций и сварных соединений чаще используют неразрушающий контроль проникающими веществами, радиационный, акустический, оптический, магнитный и вихретоковый контроль [1]. Важной особенностью этих методов является необходимость участия человека в процессе диагностики, а также невозможность их применения непрерывно при эксплуатации объекта контроля. Поэтому необходимо разрабатывать методы мониторинга технического состояния конструкции, которые позволяют проводить диагностику без участия человека на месте.

Обзор исследований в области мониторинга и вибродиагностики. Метод вибродиагностики является перспективным методом для оценки надежности конструкции и ее остаточного ресурса. Наибольшее распространение и развитие метод нашел в области диагностики роторных машин для выявления дефектов роторов, зубчатых передач и подшипников [2, 3].

Основная идея всех методов вибродиагностики заключается в зависимости динамических характеристик конструкции от ее физических свойств (массы, демпфирования и жесткости), вследствие чего их изменения, возникающие в результате развития повреждений, вызовут изменения данных характеристик.

Основное дифференциальное уравнение движения в матричной форме для системы со множеством степеней свободы имеет вид

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

где $[M]$ — матрица масс; $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ и $\{u\}$ — вектор ускорений, скоростей и перемещений соответственно; $[C]$ — матрица демпфирования; $[K]$ — матрица жесткости; $\{P\}$ — вектор внешней нагрузки, зависящей от времени.

В работе [4] выделены два основных подхода к идентификации повреждений: модальный и основанный на вынужденных колебаниях системы.

Возможность диагностирования объектов посредством анализа его собственных колебаний рассмотрена в трудах [5–9]. В процессе экспериментальных и численных исследований установлено, что данный метод имеет существенные недостатки: невозможность обнаруживать малые повреждения и характеризовать наличие нескольких повреждений сразу, трудность реализации для диагностики сложных конструкций, а также их соединений.

Также существует подход к обнаружению небольших локальных повреждений на основе определения модальных деформаций [10]. Однако его недостатком является использование комбинации двух типов датчиков, что может быть затруднительно как с точки зрения технологичности, так и по экономическим соображениям.

Выявить повреждения на основе формы и частоты собственных колебаний конструкции трудно из-за влияния на них внешних факторов, в частности рабочих вибраций, и воздействия окружающей среды [11].

В статье [12] отмечено, что методы, основанные на анализе частотных характеристик, имеют некоторые преимущества над методами, базирующимися на определении модальных параметров. Среди преимуществ выделена простота реализации, возможность использования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) без ее преобразования и определения АЧХ сразу в нескольких местах конструкции [12, 13].

Одним из ограничений этих методов является необходимость размещения большого количества датчиков для получения информации о местоположении зоны повреждения [14].

Имеется также модальный вибротермографический подход к диагностике состояния ослабленных болтовых соединений [15], основанный на том, что при возникновении дефекта происходит трение в местах контакта поврежденных поверхностей. Значительным недостатком данного подхода является трудность реализации с целью мониторинга больших и сложных конструкций, а также существенная зависимость от условий внешней среды. Например, для металлургического крана, работающего при высоких температурах, такой подход может дать некорректные данные.

Авторами статьи [16] предложен метод диагностирования сварных соединений, основанный на определении декремента затухания в зависимости от времени. Важной особенностью предлагаемого метода является то, что значение декремента затухания значительно зависит от жесткости опор, определить которую бывает трудно или невозможно, особенно в сложных металлоконструкциях.

Исходя из анализа проведенных исследований, можно сказать, что АЧХ является самым перспективным параметром для идентификации повреждений, так как она имеет потенциал для определения расположения дефектов на основании данных сети датчиков. Нераскрытыми остаются вопросы, касающиеся обнаружения и оценки характера повреждений, определения их количественных и качественных характеристик.

Численное исследование влияния дефекта на динамические характеристики конструкции. Проведены начальные исследования в рамках разработки методики мониторинга конструкций на основе вибраций. Прежде всего необходимо определить тот параметр, который можно использовать для обнаружения и поиска дефектов.

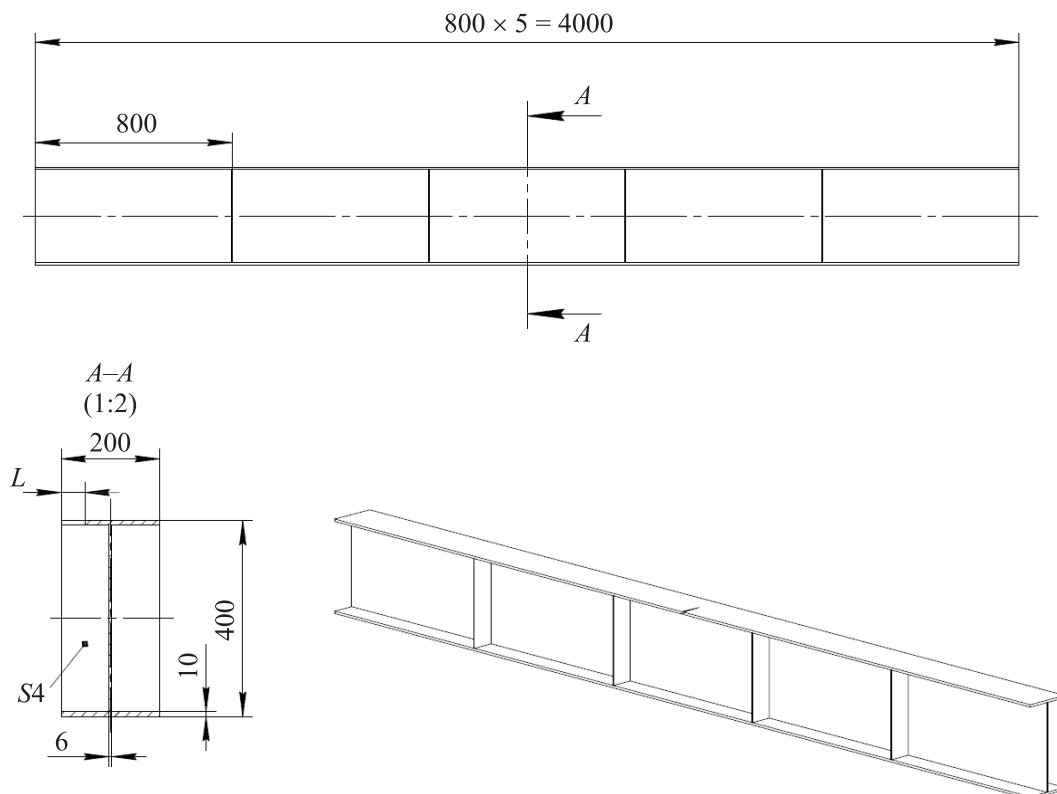


Рис. 1. Схема стальной двутавровой балки с трещиной (S4 — толщина ребра, равная 4 мм)

Рассмотрена стальная двутавровая балка с трещиной длиной L , схема которой приведена на рис. 1.

Цель исследования — определить динамическую характеристику, наиболее чувствительную к дефекту балки в виде трещины и оценить влияние условий закрепления балки и расположения трещины для отсеивания параметра, не удовлетворяющего поставленным задачам мониторинга.

Рассмотрены следующие варианты закрепления балки и расположения трещины:

- шарнирное закрепление балки, трещина в центре пролета;
- защемление балки, трещина в центре пролета;
- защемление балки, трещина на расстоянии 100 мм от опоры (возле заделки).

Численный анализ выполнен в программе NX Nastran. Моделирование балки проведено плоскими конечными элементами (PLATE), размеры которых составляли 5...20 мм: 5 мм — возле закреплений и трещины, 20 мм — в остальных областях. Для моделирования трещины осуществлялось локальное удаление связей в узлах. Ширина трещины равнялась 0,2 мм, длина варьировалась в диапазоне 20...100 мм с шагом 10 мм.

Физико-механические характеристики модели балки

Материал.....	Ст3
Модуль Юнга, ГПа.....	210
Коэффициент Пуассона.....	0,3
Плотность, кг/м ³	7850

Выполнен модальный анализ с вычислением первых двенадцати форм собственных колебаний для шарнирно опертой балки и двадцать пять — для защемленной. Данные значения приняты так, чтобы суммарная модальная масса конструкции, охваченная в процессе анализа, составляла не менее 85 %. Также проведен расчет форм и частот собственных колебаний поврежденных балок.

По результатам численного исследования построены графические зависимости частоты собственных колебаний балки от их формы для различных вариантов ее закрепления и расположения трещины длиной $L = 0, 20, 40, 60, 80$ и 100 мм, приведенные на рис. 2, *a-v*.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что с увеличением длины трещины растет отклонение частоты собственных коле-

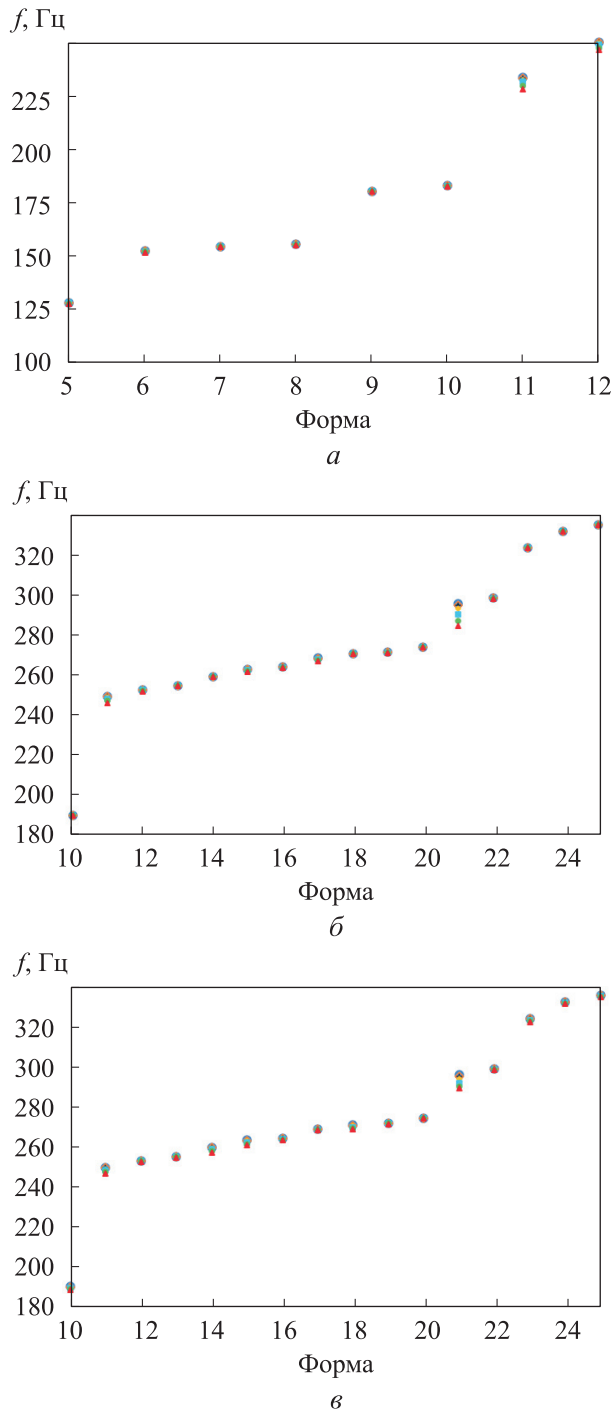


Рис. 2. Зависимости частоты собственных колебаний f поврежденной балки от их формы для различных вариантов ее закрепления и расположения трещины длиной $L = 0$ (●), 20 (◇), 40 (◆), 60 (■), 80 (●) и 100 мм (▲): *a* — шарнирно опертой балки с трещиной в центре пролета; *б* и *в* — защемленной балки с трещиной в центре пролета и возле заделки

баний балки от эталонного значения. Наиболее чувствительными к повреждению являются формы собственных колебаний балки, при которых происходит изгиб поясов. Максимальная

чувствительность наблюдается для формы № 11 шарнирно опертой балки и для формы № 21 защемленной балки.

Вместе с тем максимальное относительное отклонение частоты собственных колебаний

балки наблюдается у формы № 1 во всех рассмотренных вариантах и составляет 3,8 % для трещины в центре пролета, и 5,9 % — для трещины возле заделки защемленной балки. Эти отклонения лежат в пределах погрешностей

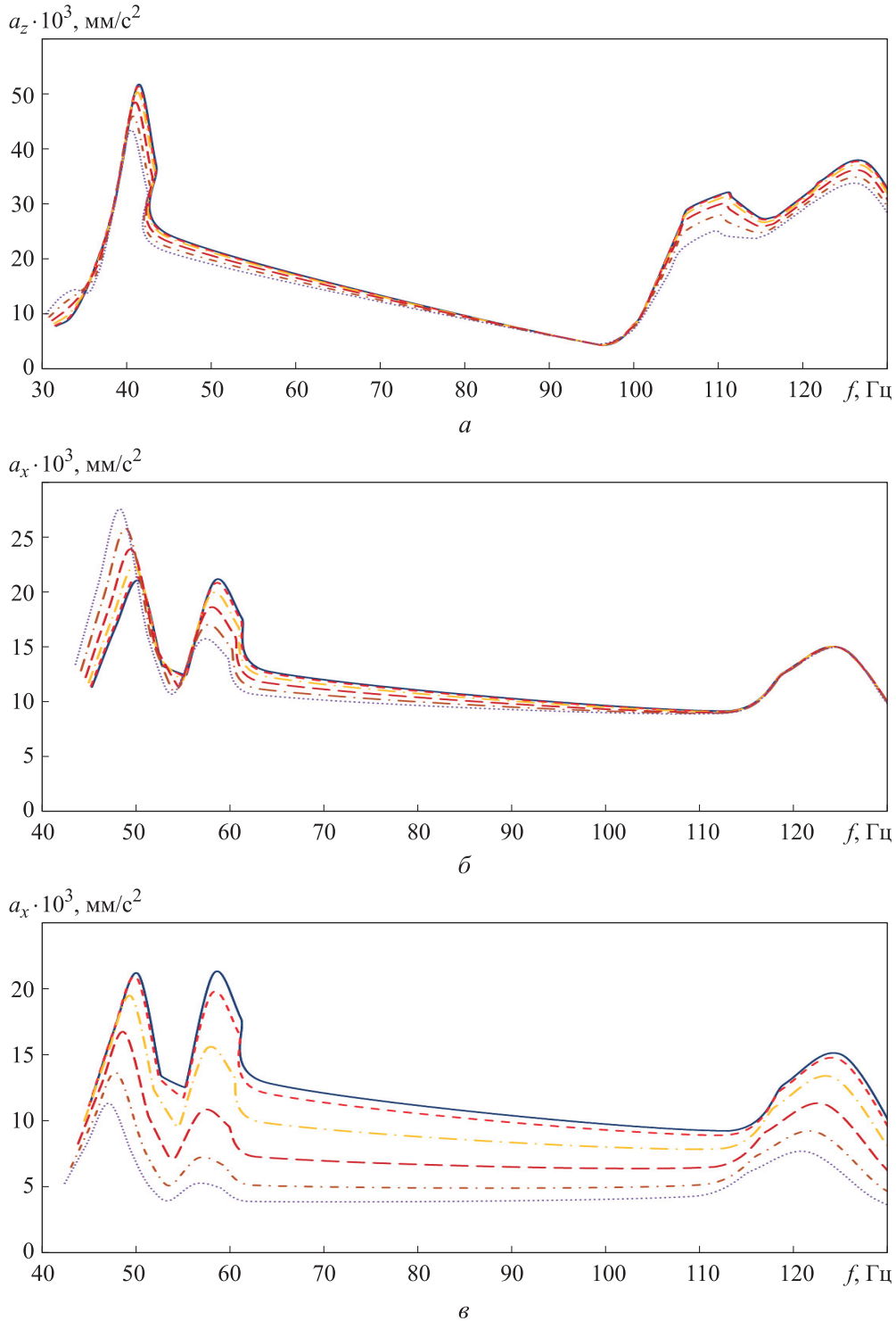


Рис. 3. АЧХ поврежденной балки для различных вариантов ее закрепления и расположения трещины длиной $L = 0$ (—), 20 (---), 40 (- · - ·), 60 (---), 80 (- · - ·) и 100 мм (· · · ·): а — шарнирно опертой балки с трещиной в центре пролета; б и в — защемленной балки с трещиной в центре пролета и возле заделки

экспериментальных исследований и не могут быть приняты во внимание как показатель наличия дефекта.

Для описанных моделей также выполнен анализ отклика конструкции на переменное внешнее воздействие. Анализ проведен модальным методом на основании выполненных ранее расчетов форм и частот собственных колебаний поврежденной балки.

В расчетах также необходимо задать демпфирование конструкции для учета эффектов рассеяния энергии. В реальности на демпфирующие свойства конструкции влияет множество факторов, и их бывает трудно определить. Для большинства конструкций коэффициент демпфирования составляет 5...10 % критического значения. В рассматриваемом случае он был принят равным 10 %.

Нагружение конструкции происходит путем приложения виброускорения с торца балки по направлению ее оси. Измерение ускорения a_x осуществляется с противоположного торца.

Если балка закреплена шарнирно, то наибольшее отклонение от эталонной АЧХ возникает в направлении оси Z (рис. 3, а). При фиксированном закреплении балки АЧХ меняет характер (рис. 3, б, в).

Отклонение АЧХ от эталонной кривой наблюдается уже при первых значениях частоты собственных колебаний конструкции. Для шар-

нирно опертой балки четко прослеживаются отклонения до пятого резонанса (см. рис. 3, а), для заземленной — до третьего (см. рис. 3, б, в).

Анализ результатов исследования позволяет заключить, что о наличии дефекта можно судить по АЧХ. Кроме того, условия закрепления поврежденной балки влияют на АЧХ. Также установлено (см. рис. 3, б, в), что чувствительность АЧХ к трещине зависит от ее расположения, следовательно, есть потенциальная возможность определять расположение дефекта на основании АЧХ.

Выводы

1. Проведено исследование по определению динамической характеристики, наиболее чувствительной к дефекту балки в виде трещины.
2. Выявлено, что частоты собственных колебаний поврежденной балки изменяются незначительно, поэтому их использование не позволяет выявлять дефекты.
3. Полученные результаты подтверждают возможность использования АЧХ без ее преобразования для идентификации повреждений, а также для их обнаружения.
4. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение чувствительности АЧХ к дефектам другого типа.

Литература

- [1] Офрим А.В., Черепанов К.В., Хижняков П.В. Применение методов неразрушающего контроля при диагностике металлоконструкций подъемных сооружений. *Молодой ученый*, 2015, № 24, с. 163–165.
- [2] Budzan S., Buchczik D., Pawełczyk M., et al. Rotating machinery diagnostics based on fusion of infrared and vibration. In: *Advances in condition monitoring of machinery in non-stationary operations*, vol. 9, Springer, 2018, pp. 203–212.
- [3] Tollis G., Chiariotti P., Martarelli M. Rolling bearing diagnostics by means of EMD-based independent component analysis on vibration and acoustic data. In: *Shock & vibration, aircraft/aerospace, energy harvesting, acoustics & optics*. Vol. 9. Springer, 2017, pp. 293–300.
- [4] Fritzen C.P. Vibration-based structural health monitoring — concepts and applications. *Key Eng. Mater.*, 2005, vol. 293–294, pp. 3–20, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.3>
- [5] Хорошевский Р.А. *Вибрационный метод диагностики металлических ригелей жестких поперечин контактной сети*. Дис. ... канд. тех. наук. Москва, МИИТ, 2009. 112 с.
- [6] Андриенко Л.А., Брыкин К.И. Экспериментальное исследование развития усталостной трещины в прямоугольной пластине. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 10, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1683>
- [7] Кадомцев М.И., Ляпин А.А., Шатилов Ю.Ю. Вибродиагностика строительных конструкций. *Инженерный вестник Дона*, 2012, № 3. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18278858_61367623.pdf

- [8] Шатилов Ю.Ю., Эксузян К.А. Идентификация повреждений несущих стальных конструкций моста вибрационными методами диагностики. *Инженерный вестник Дона*, 2016, № 4. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3762>
- [9] Khadka A., Fick B., Afshar A., et al. Non-contact vibration monitoring of rotating wind turbines using a semi-autonomous UAV. *Mech. Syst. Signal Process*, 2020, vol. 138, art. 106446, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106446>
- [10] De Roeck G., Reynders E., Anastasopoulos D. Assessment of small damage by direct modal strain measurements. In: *Experimental vibration analysis for civil structures*, vol. 5, Springer, 2017, pp. 3–16.
- [11] Conte J.P., Astroza R., Benzoni G., et al. Damage sensitivity evaluation of vibration parameters under ambient excitation. In: *Experimental vibration analysis for civil structures*, vol. 5, Springer, 2017, pp. 249–260.
- [12] Wang S., Long X., Luo H., et al. Damage identification for underground structure based on frequency response function. *Sensors*, 2018, vol. 18, no.9, art. 3033, doi: <https://doi.org/10.3390/s18093033>
- [13] Жидков А.Б. Вибродиагностика ответственных металлоконструкций. *IX Межд. науч.-практ. интернет-конф. Наука в информационном пространстве*, 2013. URL: https://confcontact.com/2013-nauka-v-informatsionnom-prostranstve/tn3_zhidkov.htm (дата обращения: 03.10.2020).
- [14] Owolabi G.M., Swamidas A.S.J., Seshadri R. Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions. *J. Sound Vib.*, 2003, vol. 265, no. 1, pp. 1–22, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01264-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01264-6)
- [15] Chi X., Di Maio D., Lieven N.A.J. Health monitoring of bolted joints using modal-based vibrothermography. *SN Appl. Sci.*, 2020, vol. 2, no. 8, art. 1446, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03251-7>
- [16] Szeleziński A., Muc A., Murawski L. Analysis concerning changes of structure damping in welded joints diagnostics. *J. KONES*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 313–320, doi: <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0010.3147>

References

- [1] Ofrim A.V., Cherepanov K.V., Khizhnyakov P.V. Using non-destructive control methods for diagnostics of lifting device metal structures. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 24, pp. 163–165 (in Russ.).
- [2] Budzan S., Buchczik D., Pawełczyk M., et al. Rotating machinery diagnostics based on fusion of infrared and vibration. In: *Advances in condition monitoring of machinery in non-stationary operations*, vol. 9, Springer, 2018, pp. 203–212.
- [3] Tollis G., Chiariotti P., Martarelli M. Rolling bearing diagnostics by means of EMD-based independent component analysis on vibration and acoustic data. In: *Shock & vibration, aircraft/aerospace, energy harvesting, acoustics & optics*, vol. 9, Springer, 2017, pp. 293–300.
- [4] Fritzen C.P. Vibration-based structural health monitoring — concepts and applications. *Key Eng. Mater.*, 2005, vol. 293–294, pp. 3–20, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.3>
- [5] Khoroshevskiy R.A. *Vibratsionnyy metod diagnostiki metallicheskih rigeley zhestkikh poperechin kontaktной seti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Vibration diagnostic method for metal crossbars of contact system portal structures. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MIIT Publ., 2009. 112 p.
- [6] Andrienko L.A., Brykin K.I. Experimental research of fatigue crack development in a rectangular plate. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 10, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1683> (in Russ.).
- [7] Kadomtsev M.I., Lyapin A.A., Shatilov Yu.Yu. Vibration monitoring of building constructions. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2012, no. 3. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18278858_61367623.pdf (in Russ.).
- [8] Shatilov Yu.Yu., Eksuzyan K.A. Vibration-based damage detection on a multi-girder bridge superstructure. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, no. 4. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3762> (in Russ.).

- [9] Khadka A., Fick B., Afshar A., et al. Non-contact vibration monitoring of rotating wind turbines using a semi-autonomous UAV. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2020, vol. 138, art. 106446, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106446>
- [10] De Roeck G., Reynders E., Anastasopoulos D. Assessment of small damage by direct modal strain measurements. In: *Experimental vibration analysis for civil structures*, vol. 5, Springer, 2017, pp. 3–16.
- [11] Conte J.P., Astroza R., Benzoni G., et al. Damage sensitivity evaluation of vibration parameters under ambient excitation. In: *Experimental vibration analysis for civil structures*, vol. 5, Springer, 2017, pp. 249–260.
- [12] Wang S., Long X., Luo H., et al. Damage identification for underground structure based on frequency response function. *Sensors*, 2018, vol. 18, no.9, art. 3033, doi: <https://doi.org/10.3390/s18093033>
- [13] Zhidkov A.B. [Vibration diagnostics of critical metal structures. *IX Mezhd. nauch.-prakt. Internet-konf. Nauka v informatsionnom prostranstve* [IX Int. Sci.-Pract. Internet-Conf. Science in Infosphere], 2013. URL: https://confcontact.com/2013-nauka-v-informatsionnom-prostranstve/tn3_zhidkov.htm (accessed: 03.10.2020) (in Russ.).
- [14] Owolabi G.M., Swamidass A.S.J., Seshadri R. Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions. *J. Sound Vib.*, 2003, vol. 265, no. 1, pp. 1–22, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01264-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01264-6)
- [15] Chi X., Di Maio D., Lieven N.A.J. Health monitoring of bolted joints using modal-based vibrothermography. *SN Appl. Sci.*, 2020, vol. 2, no. 8, art. 1446, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03251-7>
- [16] Szeleziński A., Muc A., Murawski L. Analysis concerning changes of structure damping in welded joints diagnostics. *J. KONES*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 313–320, doi: <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0010.3147>

Статья поступила в редакцию 09.04.2021

Информация об авторе

ПАУТОВА Татьяна Алексеевна — аспирант. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: tanya.pautova1512@gmail.com).

Information about the author

PAUTOVA Tatyana Alexeevna — Postgraduate. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: tanya.pautova1512@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Паутова Т.А. Анализ методов вибродиагностики металлических конструкций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10, с. 16–23, doi: [10.18698/0536-1044-2021-10-16-23](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-16-23)

Please cite this article in English as:

Pautova T.A. Analysis of Vibration Diagnostic Methods of Metal Structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 16–23, doi: [10.18698/0536-1044-2021-10-16-23](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-16-23)