

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ВИБРОДИАГНОСТИКИ ТРЕЩИНЫ И МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЕЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

Я.В. Александров

yarikalexandrow@mail.ru

SPIN-код: 6671-0639

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*Разработан стенд для проведения усталостных испытаний. Проведены экспериментальные испытания развития дефекта в виде трещины в пластине. Во время испытаний сняты временные сигналы с вибродатчиков, установленных на пластине и основании стойки, доказана линейная связь полученных сигналов, результаты обработаны методом спектрального анализа. В результате получен амплитудно-частотный спектр исследуемой пластины. С использованием метода конечных элементов создана модель исследуемого объекта. Выполнен модальный анализ построенной модели, проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования. Сделан вывод о возможности использования построенной диагностической модели на практике.*

### Ключевые слова

*Вибродиагностика трещин, усталостные испытания, испытательный стенд, неразрушающие методы контроля, собственные частоты, амплитудно-частотные характеристики, спектральный анализ, конечно-элементное моделирование*

Поступила в редакцию 24.12.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

---

**Введение.** В настоящее время существует несколько методов оценки работоспособности деталей машин с трещинами. К ним относят:

- визуально-экспертные оценки состояния конструкций;
- механические методы прямого и косвенного контроля с частичными повреждениями или разрушениями исследуемых материалов;
- неразрушающие методы контроля и диагностики материалов, конструкций и их элементов.

В настоящее время неразрушающие методы исследования состояния конструкций и их элементов находят все более широкое применение. Для диагностики состояния деталей, у которых трещину визуально обнаружить невозможно из-за сложности доступа к ней, как правило, используют методы вибродиагностики. Наиболее эффективным методом диагностики образования и развития трещин в деталях конструкций является ударное испытание с регистрацией спектрального отклика на динамическое воздействие. Определенные ударные воздействия обуславливают отклик объекта в виде его вынужденных и собственных колебаний, именно эти сигналы анализируют в качестве диагностических.

В данной работе осуществляется оценка работоспособности тонкой пластины с отверстием, подверженной усталостному разрушению. Исследование виб-

раций с помощью эксперимента заключается в рассмотрении отклика системы на ударное воздействие [1].

**Проведение эксперимента на испытательном стенде.** Усталостные экспериментальные исследования были выполнены на специально разработанном и изготовленном испытательном стенде, в состав которого входит электродвигатель, соединенный с помощью муфты с червячным редуктором, имеющим эксцентриковый тихоходный вал, и осуществляющий нагружение пластины по отнулевому циклу (рис. 1). Для получения амплитудно-частотной характеристики объекта исследований использовали двухканальный анализатор сигналов и программный комплекс частотного анализа, позволяющий получать сигнал, служащий для обработки результатов.



**Рис. 1.** Экспериментальный стенд для проведения усталостных испытаний

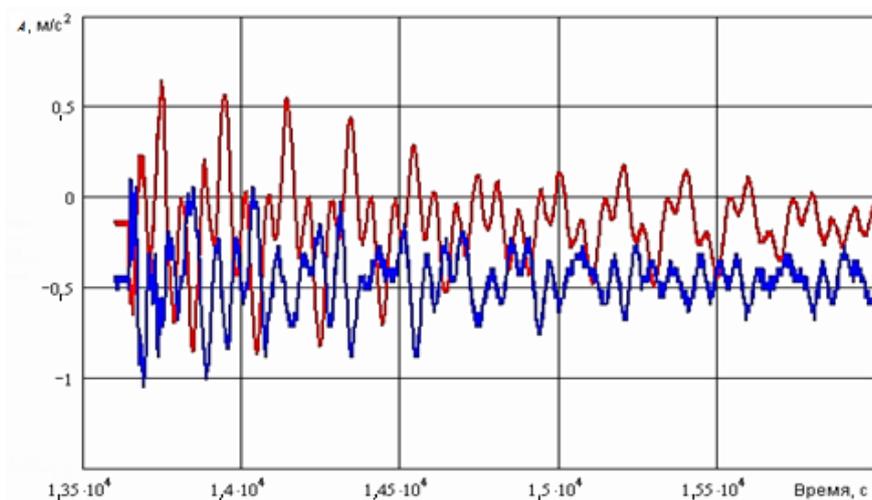
Система для исследования вибраций пластины была построена на базе программно-аппаратного комплекса, разработанного фирмой L-CARD, и включающего в себя два пьезоэлектрических датчика ускорений ДН-4 (рис. 2), усилитель сигналов LT-41, аналого-цифровой преобразователь LTR-22 и персональный компьютер.

**Анализ сигналов, получаемых с вибродатчиков.** Задача эксперимента — проверка наличия в сигнале с датчика, установленного вне пластины (например, на основании стойки), информации о техническом состоянии пластины. Для этого были установлены два датчика, вибросигналы с обоих датчиков записывались одновременно двухканальным анализатором сигналов. Один из датчиков был расположен на пластине (см. рис. 2) в непосредственной близости к трещине (канал 1), второй — на основании стойки (канал 2).



**Рис. 2.** Пьезоэлектрический датчик ускорений, установленный на пластине

На рис. 3 показаны временные сигналы виброускорений, полученные с двух пьезодатчиков (один закреплен на пластине — канал 1, второй на основании стойки — канал 2; по оси абсцисс задано время, а по оси ординат — виброускорение пластины в месте установки пьезодатчиков), на рис. 4 — амплитудно-частотный спектр этих сигналов (по оси абсцисс задана частота, а по оси ординат — виброускорение; красная линия относится к каналу 1, синяя — к каналу 2). Удар в обоих случаях наносился по стойке вблизи заделки пластины.



**Рис. 3.** Временные сигналы с вибродатчиков, установленных на пластине без трещины и основании стойки

Корреляционный анализ спектров двух сигналов показал их высокую линейную связь. В обоих спектрах присутствуют частоты, относящиеся непосредственно к испытываемой пластине, а также «шумовые» — это собственные частоты стойки, датчиков и электросети.

Результаты испытаний показали, что диагностику наличия и развития трещины в пластине по ее резонансным характеристикам, когда доступ к пластине невозможен, можно проводить по вибросигналу с датчика, установленного вне пластины. Такой вибросигнал коррелирует с сигналом датчика, установленного непосредственно на пластине, и содержит всю информацию о ее техническом состоянии. Полученная таким образом информация является исходной для дальнейшего анализа и поиска диагностических признаков наличия и развития усталостной трещины в пластине и прогнозирования остаточного ресурса детали [2–4].

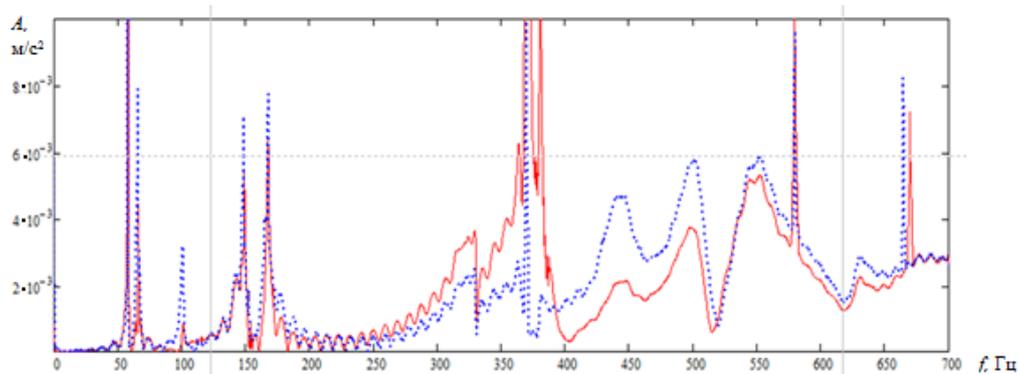


Рис. 4. Амплитудно-частотный спектр вибросигналов с вибродатчиков

**Результаты экспериментального исследования.** Для обнаружения диагностических признаков развития дефекта выполнен анализ амплитудно-частотных спектров вибросигнала пластин с различной глубиной трещины. Пики кривой затухающих колебаний на рис. 5 соответствуют истинным значениям собственных частот пластины, а также «шумовым» составляющим конструкции (собственные частоты стойки, датчиков и электросети) [5–7].

По мере роста трещины происходит уменьшение значений собственных частот и их амплитуд. На рис. 6 представлен амплитудно-частотный спектр вибросигнала пластин с трещинами различной глубины в диапазоне 40...60 Гц. Пики кривой затухающих колебаний иллюстрируют уменьшение значения первой собственной частоты.

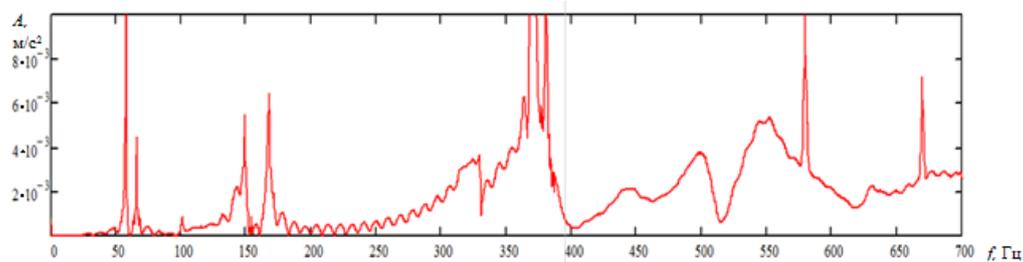
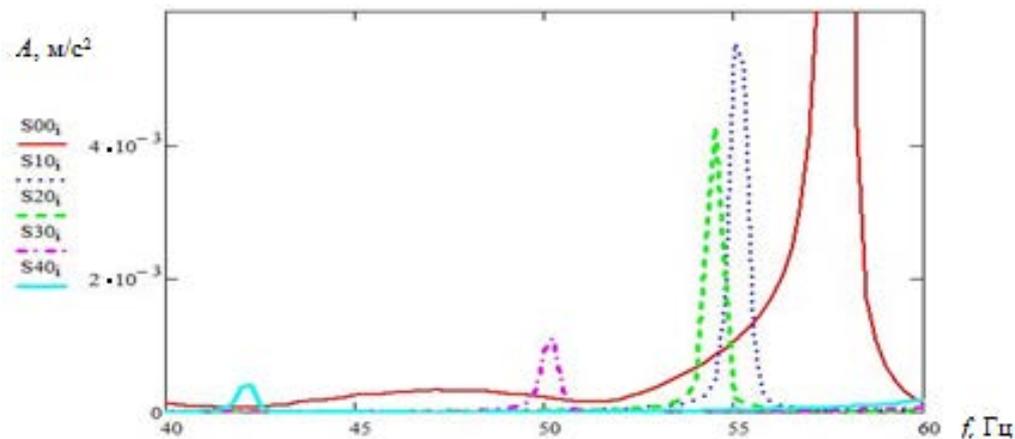


Рис. 5. Амплитудно-частотный спектр вибросигнала пластины без трещины

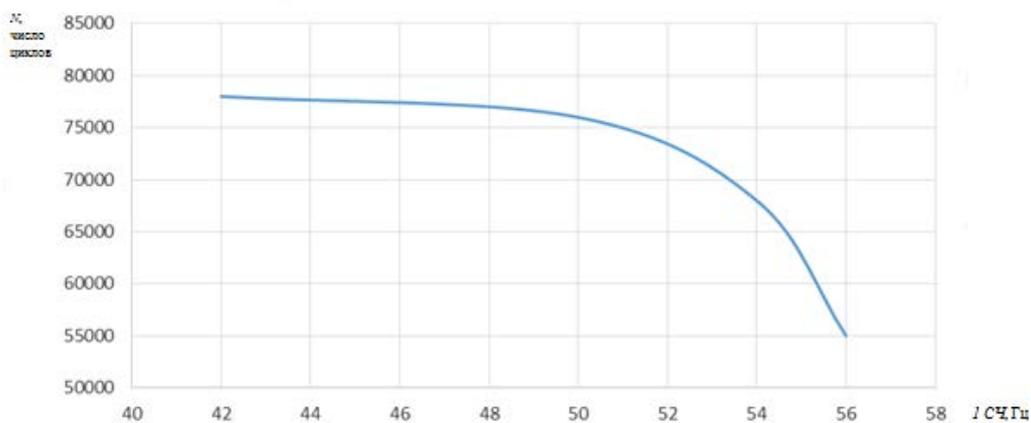


**Рис. 6.** Амплитудно-частотный спектр вибросигнала пластин с трещинами различной глубины:

S00 — пластина без трещины; S10 — пластина с трещиной глубиной 0,5 мм; S20 — пластина с трещиной глубиной 1 мм; S30 — пластина с трещиной глубиной 2 мм; S40 — пластина с трещиной глубиной 3 мм

В результате экспериментального модального анализа были определены частотные характеристики и вычислены модальные частоты для систем с различной глубиной трещины (табл. 1).

По полученным экспериментальным данным определены частоты, более чувствительные к росту трещины. Самые существенные изменения в значениях собственных частот в процессе роста трещины преобладали на первой форме собственных колебаний. На рис. 7 представлен график зависимости первой собственной частоты от числа циклов нагружения (по оси абсцисс задана первая собственная частота пластины, а по оси ординат — число циклов нагружения пластины).



**Рис. 7.** Зависимость первой собственной частоты от числа циклов нагружения

Собственные частоты пластины, полученные экспериментально

Глубина трещины, мм	Собственные частоты, Гц			
	1	2	3	4
0	63	372	587	677
0,5	60	365	575	663
1	57	345	543	650
2	49	341	540	647
3	42	339	537	640

**Численный метод определения собственных частот пластины с трещиной, создание конечно-элементной модели.** В процессе расчета методом конечных элементов были определены собственные формы колебаний и соответствующие им частоты пластин с трещиной различной глубины. Эти данные позволяют определить частоты, более чувствительные к трещине заданных размеров.

Следующей задачей являлась разработка адекватной конечно-элементной модели, способной без проведения эксперимента дать значения собственных частот пластины в зависимости от глубины трещины в ней. Такой путь помогает значительно сократить время и затраты на анализ данных о состоянии пластины. Для этого был применен метод конечно-элементного анализа. На рис. 8 и рис. 9 показаны результаты моделирования в программном комплексе, благодаря которому мы можем определить собственную частоту пластины.

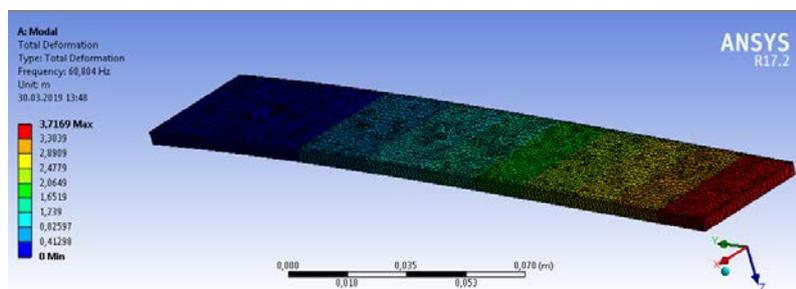


Рис. 8. Модель пластины без трещины для определения ее собственной частоты

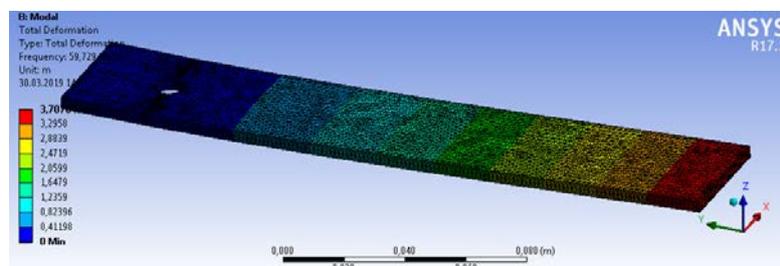


Рис. 9. Модель пластины с трещиной глубиной 1 мм для определения ее собственной частоты

В результате численного эксперимента для трещин различной глубины были определены собственные частоты:

Глубина трещины, мм .....	0	1	2	3
Первая собственная частота, Гц .....	60,804	59,729	55,629	42,367

В результате анализа собственных частот можно сделать вывод о том, что возможность распознавания дефекта при диагностировании существенно зависит от формы собственных колебаний, т. е. не на всех формах собственных колебаний можно ожидать существенного изменения собственной частоты колебаний пластины из-за наличия трещины.

**Сравнение собственных частот, полученных экспериментально и с помощью конечно-элементной модели.** Данные для сравнения о собственных частотах пластины с трещиной различной глубины приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Данные для сравнения собственных частот, полученных экспериментально и с помощью конечно-элементной модели**

Глубина трещины, мм	Эксперимент				Конечно-элементная модель			
	Собственные частоты, Гц				Собственные частоты, Гц			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	63	372	587	677	60,8	366,5	577,5	663,8
1	57	345	543	650	59,7	363,2	574,1	662,5
2	49	341	540	647	52,8	350,8	553,6	659,6
3	42	339	537	640	41,0	324,9	495,8	656,8

В результате сравнения получена средняя погрешность при определении собственных частот численным методом:

Собственные частоты, Гц .....	1	2	3	4
Средняя погрешность, % .....	4	5	5	7

Таким образом, результаты, полученные с помощью конечно-элементной модели пластины, совпадают со значениями собственных частот, полученных экспериментально. Разница в значениях собственных частот в среднем составляет 4 %.

**Заключение.** На основании теоретически-экспериментального подхода разработана диагностическая модель усталостной трещины, которая дает возможность выявить частотный диапазон, наиболее чувствительный к появлению дефекта на ранних стадиях его развития, по результатам экспериментального модального анализа. Поскольку разница в значениях собственных частот, полученных экспериментально и аналитически, невелика, можно сделать вывод об

адекватности созданной конечно-элементной модели и о возможности ее использования как в расчетах, так и на практике [8–10].

### Литература

- [1] 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>
- [2] Барау Н.И., Кулиш Э. Вибрационная диагностика противоположных защитных сооружений. Киев, Центр учебной литературы, 2017.
- [3] Бовсуновский О.А. Конечноэлементная модель для исследования колебаний стержня с закрывающейся трещиной. *Проблемы прочности*, 2008, № 5, с. 114–120.
- [4] Бовсуновский А.П. Оценка эффективности вибрационной диагностики повреждения валопровода турбин. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2016, № 2, с. 54–65.
- [5] Бернс В.А., Лысенко Е.А., Долгополов А.В. и др. Опыт контроля дефектов летательных аппаратов по параметрам вибраций. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2016, № 4, с. 86–96.
- [6] Жуков Р.В. Обзор некоторых стандартов ISO/TC-108 в области диагностики машинного оборудования. *Контроль. Диагностика*, 2004, № 12, с. 61–66.
- [7] Ключев В.В., ред. Неразрушающий контроль. Т. 7. Кн. 2. Вибродиагностика. М., Машиностроение, 2005.
- [8] Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск, Изд-во ОмГТУ, 2011.
- [9] Постнов В.А. Определение повреждений упругих систем путем математической обработки частотных спектров, полученных из эксперимента. *Известия РАН. МТТ*, 2000, № 6, с. 155–160.
- [10] Косицын А.В. Метод вибродиагностики дефектов упругих конструкций на основе анализа собственных форм колебаний. *Приборы и методы измерений*, 2011, № 2, с. 129–135.

**Александров Ярослав Владимирович** — студент кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Андриенко Людмила Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Детали машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

### Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Александров Я.В. Экспериментальный метод вибродиагностики трещины и модальный анализ ее конечно-элементной модели. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 02(43). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-02-578>

## EXPERIMENTAL VIBRODIAGNOSTICS OF CRACK AND MODAL ANALYSIS OF ITS FINITE-ELEMENT MODEL

Ya.V. Aleksandrov

yarikalexandrow@mail.ru

SPIN-code: 6671-0639

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

A stand for fatigue testing has been developed. Experimental tests are carried out of the development of a defect in the form of a crack in the plate. During the tests, temporary signals were taken from vibration sensors mounted on the plate and the base of the rack, the linear relationship of the received signals was proved, the results were processed by the method of spectral analysis. As a result, the amplitude-frequency spectrum of the plate under study was obtained. Using the finite element method, a model of the object is created. A modal analysis of the constructed model is carried out, theoretical and experimental research results are compared. The conclusion is drawn about the possibility of using the constructed diagnostic model in practice.

### Keywords

Vibration diagnostics of cracks, fatigue tests, test bench, non-destructive testing methods, natural frequencies, amplitude-frequency characteristics, spectral analysis, finite element modeling

Received 24.12.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

---

### References

- [1] 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.).
- [2] Barau N.I., Kulish E. Vibratsionnaya diagnostika protivopolznevnykh zashchitnykh sooruzheniy [Vibration diagnostics of landslide protection structures]. Kiev, Tsentruchebnoy literatury Publ., 2017 (in Russ.).
- [3] Bovsunovskiy O.A. Finite element model for simulation of vibrations of a beam with a closing crack. *Problemy prochnosti* [Problems of Strength], 2008, no. 5, pp. 114–120 (in Russ.).
- [4] Bovsunovskiy A.P. Estimation of effectiveness of vibration diagnostics of damage of turbines shafting. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*, 2016, no. 2, pp. 54–65 (in Russ.).
- [5] Berns V.A., Lysenko E.A., Dolgoplov A.V., et al. Experience of aircraft defects monitoring by vibration parameters. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2016, no. 4, pp. 86–96 (in Russ.).
- [6] Zhukov R.V. Review on some ISO/TC-108 standards in field of machine equipment diagnostics. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2004, no. 12, pp. 61–66 (in Russ.).
- [7] Klyuev V.V., ed. *Nerazrushayushchiy kontrol'. T. 7. Kn. 2. Vibrodiagnostika* [Nondestructive control. Vol. 7. P. 2. Vibration diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005 (in Russ.).
- [8] Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin* [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and monitoring of machines]. Omsk, Izd-vo OmGTU Publ., 2011 (in Russ.).

- [9] Postnov V.A. Determination of elastic system damages by mathematical evaluation of frequency spectra, derived from experiment. *Izvestiya RAN. MTT*, 2000, no. 6, pp. 155–160 (in Russ.).
- [10] Kositsyn A.V. Method of the vibrating diagnostics of defects of elastic designs on the basis of the analysis own forms of fluctuations. *Pribory i metody izmereniy* [Devices and methods of measurements], 2011, no. 2, pp. 129–135 (in Russ.).

**Aleksandrov Ya.V.** — Student, Department of Machine Tools, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Andrienko L.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Machine Parts, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Aleksandrov Ya.V. Experimental vibrodiagnostics of crack and modal analysis of its finite-element model. *Politekhnicheskii molodezhnyi zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 02(43). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-02-578.html> (in Russ.).