

DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-34-43

УДК 621.31:658.588.2:53.082.4:004.032.26

ББК 32.873

А.В. БЫЧКОВ

СИСТЕМА ВИБРОКОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С АКТИВНЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ

Ключевые слова: электродвигатель, комплексный виброконтроль, ультразвуковые измерения, пусковой и установившийся режим, прецессия вала.

В настоящее время значительная часть основных фондов оборудования электросетевого комплекса РФ устаревает. Этот процесс влечет за собой неизбежное снижение надежности работы отдельного электрооборудования и систем электроснабжения в целом. При этом требование по надежности для большинства электротехнических комплексов является основным. В связи с этим диагностика является важнейшей частью в эксплуатации электрооборудования. Диагностика строится на основе измерений, контроля и анализа большого количества характеристик и параметров оборудования. Одной из важных составляющих диагностики является вибрационный контроль, так как он позволяет выявлять большое количество дефектов как механической природы, так и дефектов, связанных с повреждениями в электрической или магнитной частях электрооборудования. Вибрационный контроль, как средство диагностирования неисправностей и обеспечения устойчивой эксплуатации электрооборудования, осуществляется чаще всего контактными датчиками. В работе описана и экспериментально протестирована система вибродиагностики электродвигателя, в которой вместе с контактными измерениями использованы бесконтактные ультразвуковые измерения. Показано, что измерения бесконтактным способом имеют более широкие возможности с точки зрения контроля вибраций непосредственно подвижных элементов. Обнаружено значительное различие вибрационных сигналов, полученных разными способами: традиционными контактными датчиками, установленными на корпусе двигателя, и вибросигналов, полученных при активном ультразвуковом зондировании вращающихся элементов. Для контроля электрооборудования предложен сравнительный анализ информации с контактными и бесконтактными датчиков. Анализ проводился как в пусковых режимах, так и в установившемся режиме работы электродвигателя. Совместное использование контактных и дистанционных измерений значительно повышает информативность и достоверность прогнозов технического состояния.

Введение. Своевременное упреждающее техобслуживание электрооборудования и качественный, своевременно проводимый ремонт обеспечивают существенное увеличение сроков эксплуатации и повышение надежности его работы [3, 10]. Сопутствующим косвенным фактором также может явиться снижение затрат на содержание электрооборудования [5]. Для предприятий энергетического комплекса вопросы техобслуживания и диагностики состояния функционирования систем, а также эксплуатации в целом являются важнейшими. В частности, одной из основных составляющих диагностики электроприводного оборудования (электродвигателей, генераторов, насосов и т.п.) является вибрационная диагностика [14, 20, 23]. Вибрация – это смещение точки агрегата относительно некоторого среднего (нулевого) положения. Так как вибрации присущи всем системам, содержащим электроприводные элементы, это является важным фактором возможности проведения анализа их интенсивности. По анализу вибрационного состояния электрооборудования можно производить исследование общего состояния и выявлять неисправности в узлах

агрегатов, а также давать некоторые прогнозы по срокам эксплуатации [13, 18]. Отдельным положительным фактором диагностики по анализу вибрации является то, что оценка технического состояния проводится «безразборно».

Существуют две основные группы приборов и систем виброконтроля, разделяющиеся на основе разницы принципов взаимодействия с объектом контроля: контактные [21, 23] и бесконтактные [8, 22]. В контактных методах контроля измерительный датчик вибрации находится в непосредственном жестком контакте с агрегатом [3, 7].

Согласно используемым зондирующим волнам (электромагнитным (световым) или акустическим) бесконтактные методы делятся на две подгруппы: оптические и акустические [4, 19]. Большинство методов (как оптических, так и акустических) основаны на активном зондировании объекта контроля [4, 19]. Акустические методы, по сравнению с оптическими, являются менее дорогостоящими, поэтому получают широкое распространение [4, 10].

Акустическая (ультразвуковая) волна, отразившись от вибрирующего агрегата, претерпевает изменение формы в виде амплитудной и фазовой модуляции [2]. По анализу отраженного модулированного сигнала имеется возможность проводить контроль электрооборудования [11].

Анализу вибросигналов [18, 21, 23] и методам обработки соответствующей информации посвящено значительное число работ [6, 12].

В настоящей статье предлагается система комплексного виброконтроля электрооборудования с одновременным использованием контактных и бесконтактных методов. Ее возможности анализируются на примере вибрационного контроля электродвигателя.

Система виброконтроля. Система виброконтроля состоит из набора УЗ датчиков (УЗП); передающего устройства (ПРД); приемного устройства (ПРМ); набора контактных вибродатчиков (ПД); лазерного цифрового тахометра (ЦЛТ); аналого-цифрового преобразователя (АЦП); блока анализатора (БА) (рис. 1).

Передающее устройство УЗ сигналов строится на основе генератора импульсов (ГИ) и блока задания последовательности (БЗП). Настройками БЗП можно задавать последовательность фазовой манипуляции: код Баркера и другие последовательности с минимальной шириной автокорреляционной функции [15]. На выходе при помощи формирователя импульсов (ФИП) сигнал выдается через схему ключа (ЭК) на передающий УЗП. В блоке управления имеется возможность задавать длительность и дискретность генерируемого сигнала. Приемный тракт состоит из фильтрующего устройства (ФПП) и усилителя напряжения (УН) на основе инвертирующего усилителя. Блок тахометра состоит из излучающего узла на основе светодиода (И) и принимающего фотоэлемента (ФЭ). Фильтром (ФПП) производится фильтрация помех, сигнал усиливается усилителем (УН). Все сигналы поступают на АЦП и далее в блок анализатора (БА). Сигналы с датчиков контактных измерений (ПД) очищаются от помех при помощи фильтра (ФПП) и поступают в АЦП.

Система реализована на базе микросхемы FPGA XC3S500E, входящей в состав серии модулей Xilinx Spartan-3E. Подробное описание узлов приемопередающего тракта УЗ измерений приводилось в работах [16, 17].

вибраций (рис. 2), полученных с разных направлений и различными способами, можно говорить о том, что переходный режим проявляется во всех случаях по-разному: неодинаковое время переходного процесса, разная форма графиков изменения частоты. Время нарастания частоты вибраций от начального до установившегося после пуска значения, измеренное контактными датчиками, составляет порядка 400 мс (кривые 1 и 2, рис. 2, *а*). Измерения при помощи УЗП дают значение больше 500 мс (кривые 3 и 4, рис. 2, *б*). На графиках осевого направления (*z*) видны значительные колебания частоты (кривая 3). Из этого вытекает вывод о том, что информация, получаемая разными способами, сильно различна и может взаимодополняться. Более того, сравнивая вибросигналы с сигналом тахометра (кривая 5), можно говорить, что в разгонном режиме электродвигателя динамика скорости вращения вала двигателя, изменения частоты и амплитуды вибраций в направлении оси вала (*z*) и в перпендикулярном направлении (*y*) существенно отличаются.

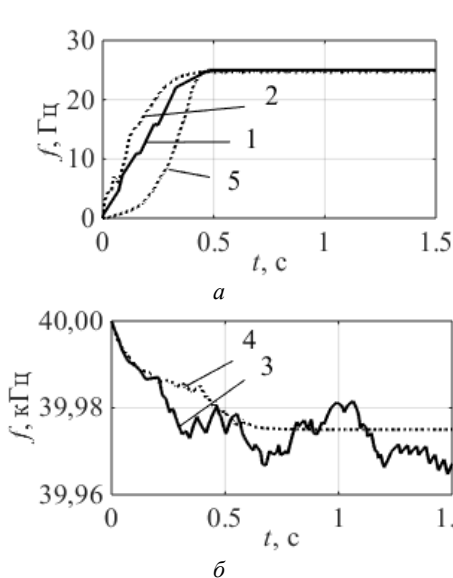


Рис. 2. Временные зависимости изменения частоты вибрации:
а – ПД и ЦЛТ; *б* – УЗП

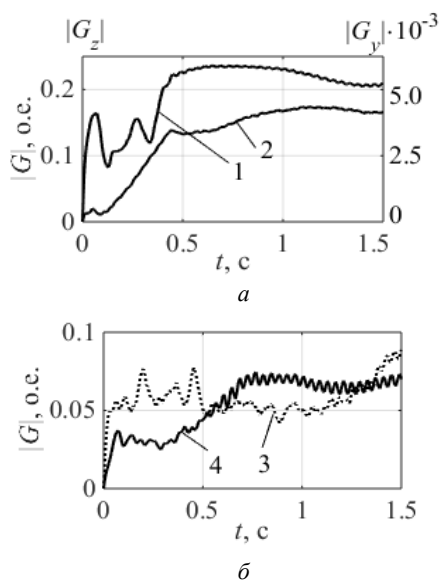


Рис. 3. Временные зависимости изменения амплитуды спектра:
а – ПД (для кривой 1 вертикальная ось слева, для кривой 2 – справа); *б* – УЗП

На рис. 3, *а* (кривые 1 и 2) показано изменение амплитуды спектров вибросигналов с контактных датчиков в двух направлениях. На рис. 3 обозначены две вертикальных оси: слева для кривой 1, справа – для кривой 2. Из графиков видно значительное различие в амплитуде вибраций в разных направлениях. Таким образом, отклонение механической нагрузки рабочего механизма от плоскости вращения приводит к существенно более значительным вибрациям корпуса в направлении оси вала (*z*), чем в перпендикулярном направлении (*y*).

Для УЗ (бесконтактных) вибросигналов амплитуда вибраций проявляется в глубине фазовой модуляции сигнала, слабо влияет на его амплитуду, поэтому независимо от амплитуды вибраций уровень регистрируемых УЗ сигналов для любых направлений измерения примерно одинаковый, что не требует дополнительных схемных решений для учета различных диапазонов измеряемых амплитуды колебаний поверхности объекта. Анализ спектров УЗ вибросигналов показывает, что если амплитуды вибраций вращающегося рабочего механизма в направлении вдоль оси вала (z) и в перпендикулярном направлении (y) сопоставимы, то амплитуда вибраций корпуса отличается более чем на порядок. То есть вибрации вала могут передаваться на корпус со значительным ослаблением, а дистанционные измерения непосредственно на вращающихся элементах ЭД имеют преимущества.

Выше упоминалось, что длительность переходного процесса нарастания частоты вибраций (кривые 1, 2, 4, рис. 2) при контактных измерениях и УЗ измерениях отличаются более чем на 20 %. Необходимо отметить, что в осевом направлении имеют место сильные колебания даже в установившемся режиме работы электродвигателя (кривые 3, рис. 2, б). Это не проявляется при контактных измерениях вибраций корпуса. Частота вибраций вала с нагрузкой выходит на стационарный режим, соответствующей скорости вращения, значительно медленнее, чем частота вибраций корпуса ЭД. То есть при ультразвуковом бесконтактном виброконтроле обнаруживаются явления медленного изменения амплитуды проекции вибраций на направление рассеяния УЗ, связанные с прецессией вала [1, 9, 14]. Для анализа этого явления регистрировались соответствующие вибросигналы и построены годографы в плоскости вращения. Для примера на рис. 4 приведены такие сигналы. Кроме фазовой модуляции сигналы имеют также явную амплитудную модуляцию. Спектры таких сигналов имеют характерный пик на частоте 40 кГц, частоте УЗ волны и боковые пики на частотах, отстоящих от основного пика на расстоянии, равном частоте вибрации [17].

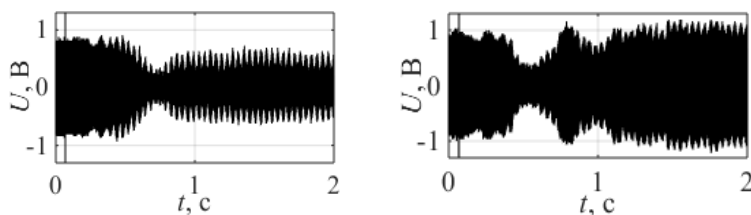


Рис. 4. УЗ вибросигналы

Низкочастотная модуляция УЗ вибросигнала, о которой идет речь, имеет частоты в единицы герц. Ее анализ может проводиться после высокочастотной фильтрации, по огибающей вибросигналов (см. рис. 3, б) или при использовании гетеродинной схемы, когда через промежуточную частоту 40 кГц выделяется низкочастотная часть спектра вибросигнала. На рис. 5 представлен спектр сигнала, обработанного по гетеродинному алгоритму. В спектре имеются пики

в области 25 Гц – частота вибраций, и пик в области 1-2 Гц. Ниже, на рис. 6 изображены годографы, построенные по таким сигналам. На графиках отображается развитие переходного процесса вибраций.

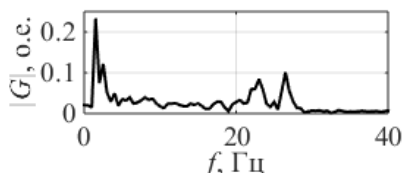


Рис. 5. Спектр УЗ сигнала после гетеродинаирования

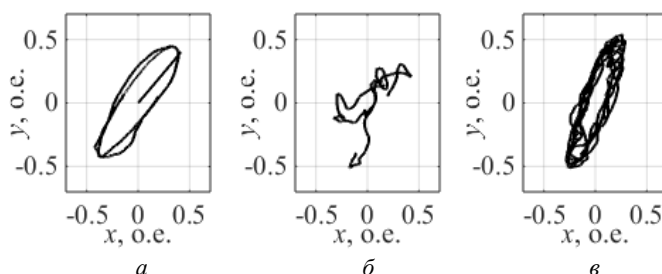


Рис. 6. Годограф:

а – первые два периода НЧ колебания;

б – вторые два периода; в – установившийся режим

Из годографа видно, что при пуске электродвигателя имеет место эллипсообразная форма. Далее в переходном режиме начинают появляться значительные вибрации вала ЭД, что приводит к искажению формы годографа. При выходе на установившийся режим годограф снова приобретает форму эллипса с наложением составляющей 25 Гц, соответствующей вибрациям на основной оборотной частоте ЭД. В данном случае под пуском и выходом в установившийся режим понимается длительный процесс, отличный от процессов рис. 2 и 3 (кривые 1, 2, 5). Таким образом, УЗ измерения вибраций непосредственно на подвижных элементах позволяют получать информацию о частоте низкочастотных колебаний. Наличие такой НЧ модуляции УЗ сигнала является следствием прецессии вала. Это расширяет диагностические возможности виброконтроля.

Заключение. В работе представлена разработанная система комплексного вибрационного контроля электродвигателей с использованием бесконтактных измерений. Проведена экспериментальная проверка функционирования системы. Выявлена значительная разница в параметрах регистрируемых вибросигналов с контактных и бесконтактных датчиков. Сигналы, полученные разными способами, содержат в себе различную информацию. Одновременное использование комплексной информации со всех датчиков дает возможность сопоставлять параметры вибраций для подвижных и неподвижных элементов электроустановки.

Обнаружены значительные отличия в динамике изменения вибраций подвижных и неподвижных частей электрооборудования. Вибрации ротора могут передаваться на корпус уже сильно ослабленными, поэтому разбалансировка электродвигателя более полно регистрируется на вращающихся подвижных элементах. Показано, что бесконтактный УЗ контроль дает возможность оценить наличие плавных НЧ колебаний, что может являться следствием прецессии вала двигателя, степень и скорость передачи колебаний от вала к корпусу двигателя в переходных режимах.

Литература

1. Балицкий Ф.Я., Соколова А.Г. Диагностическая информативность полных спектров и орбит при анализе сигналов относительных вибросмещений вала в опорах скольжения // Вестник научно-технического развития. 2010. № 2 (30). С. 30–39.
2. Бычков А.В., Славутский Л.А. Возможности корреляционной обработки импульсных ультразвуковых сигналов при бесконтактном виброконтроле оборудования электроэнергетики // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 24–32.
3. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. Ч. 2. 128 с.
4. Гордеев Б.А., Новожилов М.В., Образцов Д.И. Применение ультразвукового метода в вибродиагностике легковых автомобилей // Метрология. 2000. № 6. С. 33–36.
5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.
6. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Павленков Д.В. Оценка возможности использования фрактального анализа для целей диагностики машинного оборудования // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Омск: ОмГУПС, 2012. С. 153–157.
7. Матюшкова О.Ю., Тэттэр В.Ю. Современные методы виброакустического диагностирования // Омский научный вестник. 2013. № 3 (123). С. 294–299.
8. Николаев А.А., Славутский Л.А. Дистанционный контроль ультразвуковых магнито-стрикционных преобразователей противонакипных устройств // Вестник Чувашского университета. 2008. № 2. С. 228–232.
9. Пасынкова И.А. Вынужденные колебания неуравновешенного ротора в неизотропных опорах // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. Математика. Механика. Астрономия. 2014. Т. 1, № 2. С. 292–302.
10. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь: ДимРус, 2012. 200 с.
11. Славутский Л.А., Костюков А.С. Статистическая погрешность ультразвукового цифрового уровнемера с частотно-фазовой модуляцией сигнала // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 8. С. 35–37.
12. Фридман А. Что такое «Крест-фактор»? И почему он используется // Вибрационная диагностика. 2005. № 1. С. 30–31.
13. Alikhani A.M., Vahedi A., Khlyupin P.A. Induction Motor Fault Detection in ESP Systems Based on Vibration Measurements. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022. vol. 232, pp. 497–505. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_43.
14. Bentley D.E., Hatch C.T., Grisson B. Fundamentals of rotating machinery diagnostics. Minden, NV, Bentley Pressurized Bearing Press, 2002, 726 p.
15. Borwein P., Ferguson R. Polyphase sequences with low autocorrelation. *IEEE Transactions on information theory*, 2005, vol. 51, iss. 4, pp. 1564–1567. DOI: 10.1109/TIT.2004.842778.
16. Bychkov A., Slavutskii L., Slavutskaya E. Neural network for pulsed ultrasonic vibration control of electrical equipment. In: Proceedings 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering (UralCon), 2020, pp. 24–28. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216248.

17. Bychkov A., Bychkova I., Slavutskii L. Active Ultrasonic Vibration Control of Electrical Equipment: Correlation Signal Processing. In: Proceedings 2019 Int. Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2019. pp. 244–248. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877666.

18. Gaud D.K., Agrawal P., Jayaswal P. Fault diagnosis of rolling element bearing based on vibration and current signatures: An optimal network parameter. In: Proceedings 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016, pp. 4065–4069. DOI: 10.1109/ICEEOT.2016.7755478.

19. Kazutaka A., Kenju O., Jing-Yang Ko. Self-mixing laser Doppler vibrometry with high optical sensitivity: Application to real-time sound reproduction. *New Journal of Physics*, 2003, no. 5(1), pp. 8.1–8.9. DOI: 10.1088/1367-2630/5/1/308.

20. Krishnareddy G., Venkatesham B., Ramireddy G. Vibration diagnosis of turbomachinery coupled with induction motor. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2020, no. 35(3), pp. 1–6. DOI: 10.21595/vp.2020.21768.

21. Ribeiro R.F., Alves de Almeida F., Gomes G.F. Fault classification in three-phase motors based on vibration signal analysis and artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 2020, no. 32, pp. 15171–15189. DOI: 10.1007/s00521-020-04868-w.

22. Yadarova O.N., Okhotkin G.P., Slavutskii L.A. A Control System of a Fan Drive Based on Airflow Doppler Ultrasonic Control. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 7, pp. 420–422.

23. Zarei J., Tajeddini M.A., Karimi H.R. Vibration analysis for bearing fault detection and classification using an intelligent filter. *Mechatronics*, 2014, vol. 24, no. 2, pp. 151–157. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2014.01.003.

БЫЧКОВ АНАТОЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – аспирант кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (bav.xlab@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2674-8626>).

Anatoly V. BYCHKOV

VIBRATION DIAGNOSTICS SYSTEM FOR ELECTRIC MOTOR WITH ACTIVE ULTRASONIC SENSING

Key words: electric motor, complex vibration control, ultrasonic measurements, starting and steady state conditions, shaft precession.

At present, part of the fixed assets of electric grid infrastructure is becoming obsolete in the Russian Federation. It leads to an inevitable decrease of operational reliability of single electrical equipment and power-supply systems as a whole. At the same time the requirement to the reliability for most electrotechnical complexes is the main one. As a result, diagnostics is the most important process in electrical equipment's operation. Diagnostics is based on measurements, control and analysis of a large number of equipment's characteristics and parameters. One of the important components of diagnostics is vibration control, as it allows detecting a large number of mechanical defects and defects in electrical or magnetic parts of electrical equipment. Vibration control, as a means of malfunctions diagnosis and ensuring the stable operation of electrical equipment, is most often carried out by contact sensors. The paper describes the experimentally tested vibration diagnostics system for an electric motor, which is based on remote ultrasonic measurements together with contact measurements. It is shown that remote measurements allow controlling moving elements and having more capabilities than contact ones. A significant difference between vibration signals obtained by different methods was found: using traditional contact sensors installed on the engine body and using active ultrasonic sensing of rotating elements. A comparative analysis of information obtained from contact and noncontact sensors is proposed for the diagnostics of electrical equipment. The analysis was carried out both in starting and steady state operation modes of the electric motor. The joint use of contact and remote measurements significantly increases the informative value and data reliability of technical condition forecasts.

References

1. Balitskii F.Ya., Sokolova A.G. *Diagnostichestskaya informativnost' polnykh spektrov i orbit pri analize signalov odnositel'nykh vibromeshchenii vala v oporakh skol'zheniya* [Diagnostic information content of full spectra and orbits in the analysis of signals of relative vibration displacements of the shaft in sliding bearings]. *Vestnik nauchnotekhnicheskogo razvitiya*, 2010, no. 2(30), pp. 30–39.
2. Bychkov A.V., Slavutskii L.A. *Vozmozhnosti korrelyatsionnoi obrabotki impul'snykh ul'trazvukovykh signalov pri beskontaktnom vibrokontrole oborudovaniya elektroenergetiki* [Capabilities of correlation processing of pulse ultrasonic signals for noncontact vibration control of electric power industry equipment]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 3, pp. 24–32.
3. Gavrilin A.N., Moizes B.B. *Diagnostika tekhnologicheskikh sistem* [Diagnostics of technological systems: a tutorial]. Tomsk, 2014, Part 2, 128 p.
4. Gordeev B.A., Novozhilov M.V., Obraztsev D.I. *Primenenie ul'trazvukovogo metoda v vibrodiagnostike legkovykh avtomobilei* [Application of the ultrasonic method in vibration diagnostics of passenger cars]. *Metrologiya*, 2000, no. 6, pp. 33–36.
5. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa mashin* [Fundamentals of vibroacoustic diagnostic and monitoring of machines]. Omsk, Omsk State Technical University Publ, 2011, 360 p.
6. Kostyukov V.N., Boichenko S.N., Pavlenkov D.V. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya fraktal'nogo analiza dlya tselei diagnostiki mashinnogo oborudovaniya* [Assessment of the possibility of using fractal analysis for the purpose of diagnostics of machinery]. In: *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Proc. of Russ. Sci. Conf. «Operational reliability of a locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction»]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2012, pp. 153–157.
7. Matyushkova O.Yu., Tetter V.Yu. *Sovremennye metody vibroakusticheskogo diagno-stirovaniya* [Modern methods of vibroacoustic diagnostics]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 3(123), pp. 294–299.
8. Nikolaev A.A., Slavutskii L.A. *Distsionnyi kontrol' ul'trazvukovykh magnito-striksionnykh preobrazovatelei protivonakipnykh ustroystv* [Remote control of ultrasonic magnetostriuctive transducers for scale distortion devices]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2008, no. 2, pp. 228–232.
9. Pasyukova I.A. *Vynuzhdennye kolebaniya neuravnovesennogo rotora v neizotropnykh oporakh* [Forced vibrations of an unbalanced rotor]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 292–302.
10. Rusov V.A. *Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam* [Diagnosis of defects in rotating equipment by vibration signals]. Perm, DimRus Publ., 2012, 200 p.
11. Slavutskii L.A., Kostyukov A.S. *Statisticheskaya pogreshnost' ul'trazvukovogo tsifrovogo urovnera s chastotno-fazovoi modulyatsiei signala* [Statistical error of an ultrasonic digital level meter with frequency-phase modulation of the signal]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2009, no. 8, pp. 35–37.
12. Fridman A. *Chto takoe «Krest-faktor»? I pochemu on ispol'zuetsya* [What is Crest Factor? And why it is used]. *Vibratsionnaya diagnostika*, 2005, no. 1, pp. 30–31.
13. Alikhani A.M., Vahedi A., Khlyupin P.A. Induction Motor Fault Detection in ESP Systems Based on Vibration Measurements. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022. vol. 232, pp. 497–505. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_43.
14. Bentley D.E., Hatch C.T., Grisson B. *Fundamentals of rotating machinery diagnostics*. Minden, NV, Bentley Pressurized Bearing Press, 2002. 726 p.
15. Borwein P., Ferguson R. Polyphase sequences with low autocorrelation. *IEEE Transactions on information theory*, 2005, vol. 51, iss. 4, pp. 1564–1567. DOI: 10.1109/TIT.2004.842778.
16. Bychkov A., Slavutskii L., Slavutskaya E. Neural network for pulsed ultrasonic vibration control of electrical equipment. In: *Proceedings 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2020, pp. 24–28. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216248.
17. Bychkov A., Bychkova I., Slavutskii L. Active Ultrasonic Vibration Control of Electrical Equipment: Correlation Signal Processing. In: *Proceedings 2019 Int. Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2019. pp. 244–248. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877666.

18. Gaud D.K., Agrawal P., Jayaswal P. Fault diagnosis of rolling element bearing based on vibration and current signatures: An optimal network parameter. In: Proceedings 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016, pp. 4065–4069. DOI: 10.1109/ICEEOT.2016.7755478.

19. Kazutaka A., Kenju O., Jing-Yang Ko. Self-mixing laser Doppler vibrometry with high optical sensitivity: Application to real-time sound reproduction. *New Journal of Physics*, 2003, no. 5(1), pp. 8.1–8.9. DOI: 10.1088/1367-2630/5/1/308.

20. Krishnareddy G., Venkatesham B., Ramireddy G. Vibration diagnosis of turbomachinery coupled with induction motor. *Vibroengineering PROCEDIA*, 2020, no. 35(3), pp. 1–6. DOI: 10.21595/vp.2020.21768.

21. Ribeiro R.F., Alves de Almeida F., Gomes G.F. Fault classification in three-phase motors based on vibration signal analysis and artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 2020, no. 32, pp. 15171–15189. DOI: 10.1007/s00521-020-04868-w.

22. Yadarova O.N., Okhotkin G.P., Slavutskii L.A. A Control System of a Fan Drive Based on Airflow Doppler Ultrasonic Control. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 7, pp. 420–422.

23. Zarei J., Tajeddini M.A., Karimi H.R. Vibration analysis for bearing fault detection and classification using an intelligent filter. *Mechatronics*, 2014, vol. 24, no. 2, pp. 151–157. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2014.01.003.

ANATOLY V. BYCHKOV – Post-Graduate Student, Department of Automatics and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (bav.xlab@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2674-8626>).

Формат цитирования: Бычков А.В. Система виброконтроля электродвигателя с активным ультразвуковым зондированием // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1. – С. 34–43. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-34-43.