

О едином диагностическом критерии для выявления дефектов электрических машин по параметрам механических колебаний

Павел Борисович ГЕРИКЕ*

Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, Россия, Кемерово

Актуальность работы. В настоящей работе приведены некоторые результаты анализа методологических подходов к разработке единого диагностического критерия, пригодного для выполнения оценки фактического состояния электрических машин и разработки прогнозных деградационных моделей.

Цель работы: обобщить результаты анализа параметров механических колебаний, генерируемых при работе электрических машин различной конструкции, что позволит осуществить классификацию дефектов данного оборудования по базовым группам и формализовать диагностические признаки для удобства их использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по частотным наборам диагностических признаков; показать, что в условиях до сих пор действующей на предприятиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса системы плановых ремонтов приоритет должен быть отдан только краткосрочным прогнозным математическим моделям, позволяющим оценить вероятность возникновения аварийных отказов техники на ближайшую перспективу; разработать алгоритм создания единого диагностического критерия, пригодного для выявления и оценки степени опасности дефектов электрической природы на оборудовании горных машин.

Методы исследования. В рамках исследования обоснована необходимость использования результатов комплексного подхода к диагностике электрических машин по параметрам генерируемой при их работе вибрации с одновременным применением нескольких диагностических методов, включая спектральный анализ, анализ огибающей, вейвлет-преобразование, анализ характеристики выбега. Показано, что комплексный подход к диагностике по параметрам вибрации открывает широкие возможности для своевременного диагностирования дефектов энергомеханического оборудования горных машин, в том числе находящихся на стадии зарождения.

Результаты работы. Результаты проведенных исследований уверенно доказывают принципиальную возможность создания нового адекватного единого диагностического критерия для выявления дефектов электрической природы, который может быть использован в качестве базового элемента системы обслуживания техники по ее фактическому техническому состоянию. Применение на практике разрабатываемого критерия позволит повысить эффективность управления техническим обслуживанием сложных механических систем и осуществлять прогнозирование изменения фактического состояния электрических машин, эксплуатируемых в угольной и горнорудной промышленности.

Ключевые слова: вибродиагностика, электродвигатели, дефекты электрической природы, горное оборудование, управление техническим обслуживанием.

Введение
На сегодняшний день до 25 % от общего количества технических устройств, эксплуатируемых на угольных разрезах и обогатительных фабриках Кузбасса и подпадающих под обязательную процедуру экспертизы промышленной безопасности как отработавшие свой нормативный срок, находятся в недопустимом техническом состоянии [1]. Дальнейшая эксплуатация такого технологического оборудования неминуемо влечет за собой риски, связанные с ростом числа аварийных ситуаций и увеличением эксплуатационных и логистических издержек предприятий [2, 3].

В основу настоящей работы положены результаты анализа параметров вибрации энергомеханического оборудования горных машин, полученные при обследовании выборки, состоящей из экскаваторов и другого технологического оборудования. Интервал обследований составлял от одного до трех раз в три года, вибродиагностические работы выполнялись в рамках процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах, общий период сбора информации составляет более 10 лет. Анализ полученных данных позволяет заключить, что в недопустимом техническом состоянии сегодня находится до 30 % от общего числа обследованных электрических экскаваторов.

Изучение процессов формирования и распространения виброакустических волн проводилось на выборке из 40 единиц экскаваторов типа ЭКГ (ЭКГ-4,6Б; ЭКГ-5А; ЭКГ-8И; ЭКГ-10; ЭКГ-12,5; ЭКГ-15) и 30 единиц экскаваторов-драглайнов (ЭШ 10/70, ЭШ 6/45, ЭШ 11/70, ЭШ 15/90). Кроме того, данная выборка включает 150 единиц дробильно-сортировочного, горнотранспортного и углеобогатительного оборудования. Диагностируемое оборудование эксплуатируется на угольных разрезах, каменных карьерах и обогатительных фабриках Кемеровской области (филиалы ПАО «УК «Кузбассразрезуголь»: Моховский (в том числе Караканское и Сартакинское поле), Талдинский, Кедровский, Бачатский угольные разрезы, ООО «Разрез Киселевский», ПАО «КТК», разрез Виноградовский, ООО «Кемеровский каменный карьер», обогатительные фабрики «Листвяжная», «Распадская» и др.). Диагностические измерения выполнялись с учетом особенностей работы энергомеханического оборудования горных машин в соответствии с разработанной методикой и с использованием программно-аппаратного комплекса, удовлетворяющего всем предъявляемым требованиям для работы в условиях угольной промышленности [3] и прошедшего в установленном порядке процедуру государственной поверки метрологических характеристик.

Эффективное решение актуальных научных задач, связанных с разработкой комплекса адекватных математических моделей развития дефектов энергомеханического оборудования горных машин, не может быть получено без выявления основных закономерностей изменения технического состояния объектов диагностирования по параметрам генерируемых при их работе механических колебаний [4].

На сегодняшний день в мире не существует единого критерия, основанного на анализе параметров механических колебаний, ориентированного на решение задачи по выявлению дефектов электрической природы. Это объясняется

* am_besten@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2085-6108>

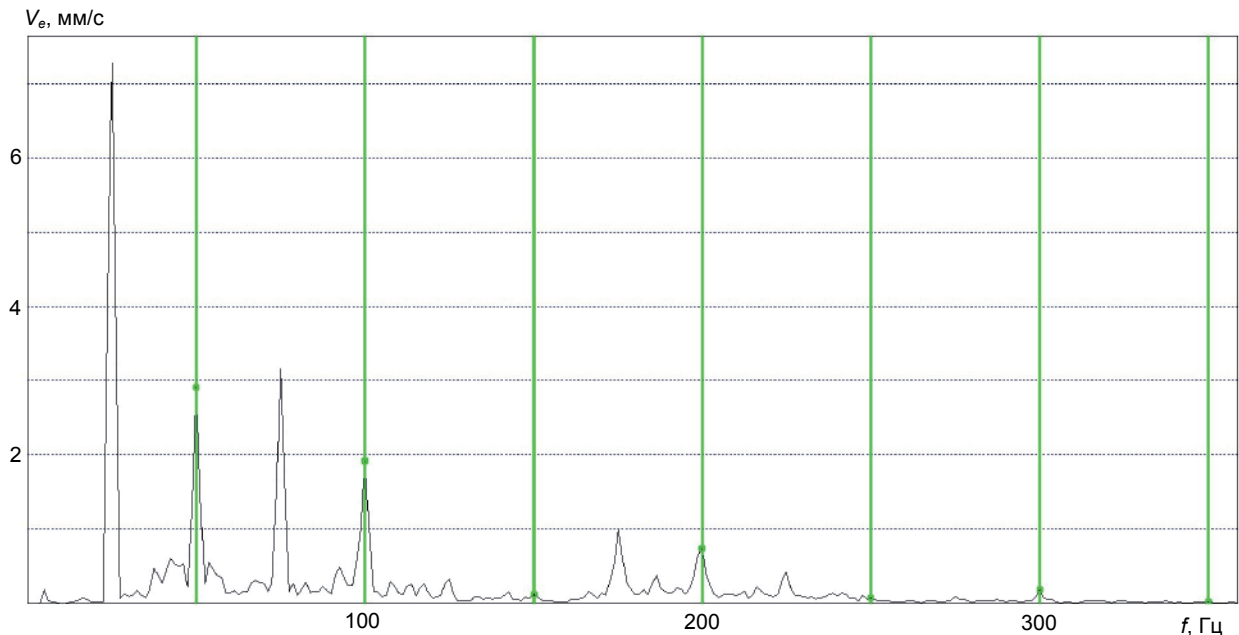


Рисунок 1. Совпадение частотных признаков дефектов механической (нарушение центровки, дисбаланс) и электрической (замыкание обмоток асинхронного электродвигателя) природы на примере сетевого двигателя экскаватора ЭКГ-5А.

Figure 1. The coincidence of frequency signs of mechanical defects (loss of alignment, imbalance) and electrical (short circuit of the induction motor windings) defects is exemplified by the supply-line engine of the EGG-5A excavator.

несколькими причинами – недостаточной изученностью вопросов динамики энергомеханического оборудования горных машин и отсутствием представительных баз данных, содержащих диагностическую информацию по однотипным объектам исследования, в данном случае генераторам и электродвигателям различного типа, установленным на горном оборудовании, эксплуатация которого ведется в тяжелых условиях (запыленность, перепады температур, влажность, нарушения регламента технического обслуживания, проведение ремонтов с использованием восстановленных и контрафактных запасных частей, материалов и т. п.).

Результаты и их применение

Решение задачи по созданию критерия для диагностирования дефектов электрической природы было бы невозможным без проведения детального анализа причинно-следственной связи и закономерностей изменения технического состояния энергомеханического оборудования горных машин. В рамках настоящей работы использован комплексный подход к анализу параметров механических колебаний, включающий в себя прямой спектральный анализ в расширенном частотном диапазоне и анализ огибающей спектра. Кроме того, рассмотрена возможность применения в рамках настоящего исследования результатов, полученных с использованием анализа характеристики выбега роторного агрегата и вейвлет-преобразования параметров исходной виброакустической волны. Именно такое сочетание методов вибродиагностики позволяет с максимальной эффективностью получать объективную информацию об изменении технического состояния электрических машин при минимальных затратах времени на проведение измерений и выполнение последующего анализа первичных диагностических данных [1, 2, 5].

Результаты анализа диагностических данных позволяют сделать вывод о том, что дефекты электрической природы, такие как межвитковые замыкания обмотки ротора или смещение в магнитном поле, получили достаточное распространение на энергомеханическом оборудовании горных машин. Так, например, по причинам, связанным с наличием дефектов электрической природы, происходит до 10 % от общего числа аварийных простоев генераторных групп карьерных экскаваторов типа драглайн [1]. Далее на реальных примерах приведены результаты анализа параметров полигармонических волн, содержащих информацию о наличии тех или иных дефектов электрической природы энергомеханического оборудования горных машин (рис. 1–4).

Одним из факторов, значительно затрудняющих проводимый анализ, является совпадение значащих гармоник спектра (генерируемых процессами различной природы, например при нарушении соосности валов агрегата, нарушении жесткости системы и замыкании обмоток статора) вплоть до 0,1 Гц. Кроме того, рабочие частоты агрегатов из-за особенностей кинематики и конструкции технических устройств довольно часто могут проявляться на гармониках частотного ряда питающей электрической сети [6, 7]. На рис. 1 представлен пример, наглядно подтверждающий наличие данной проблемы. Составляющие гармонического ряда оборотной частоты на генераторной группе экскаватора ЭКГ-5А полностью совпали с компонентами частотного ряда питающей электрической сети. В подобных случаях наиболее эффективным может оказаться использование алгоритма характеристики выбега роторного агрегата, позволяющей получить четкую ассоциативную связь с наличием дефектов электрической природы [2].

Большинство диагностических признаков выявления дефектов электрической природы при помощи анализа параметров вибрации сосредоточены в области спектрального анализа [1, 2]. Дополнять данную совокупность признаков результатами анализа огибающей спектра и характеристикой разгона/выбега целесообразно только в тех случаях, когда получение объективного результата диагностирования стандартными методами затруднено или является невозмож-

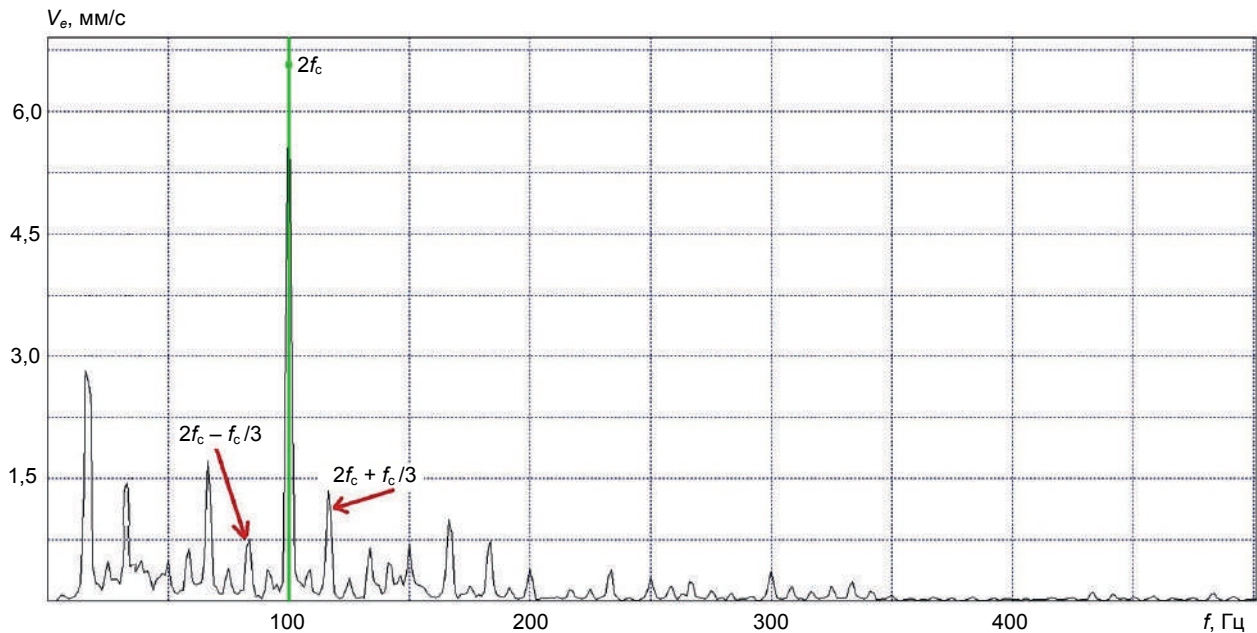


Рисунок 2. Пример спектра, иллюстрирующий нарушение симметрии фаз на генераторе подъема экскаватора ЭКГ-10.
Figure 2. An example of a spectrum illustrating the disbalance of phase symmetry in the lifting generator of the EKG-10 excavator.

ным из-за конструктивных или кинематических особенностей обследуемого агрегата. Все дефекты электродвигателей вызваны причинами либо механической (тепловая неуравновешенность ротора, перекосы пакетов стали статора и ротора, смещение массы лака при сушке), либо электрической природы (межвитковые замыкания и обрывы обмоток, несимметричность воздушного зазора ротора/статора, неправильное соединение полюсов синхронного ЭД и т. д.) и их различными сочетаниями. Для выполнения поставленных перед настоящим исследованием задач необходимо было решить задачу клиппирования, т. е. освобождения исходных спектров от всех составляющих, природа возникновения которых не связана с рассматриваемой группой дефектов (произвести ликвидацию «лишних» гармоник). В рамках настоящей работы использовался алгоритм клиппирования, включающий процедуру уточнения оборотной частоты, основанную на принципе поиска составляющих спектра с максимальными амплитудами в низкочастотном диапазоне. Данная процедура, предложенная в работе [8], зарекомендовала себя в качестве эффективного инструмента, пригодного для реализации алгоритма клиппирования при работе со спектрами виброскорости и виброускорения подшипников качения, где максимальные амплитуды значащих гармоник априори могут не принадлежать оборотной частоте. Единый диагностический критерий для выявления дефектов электрической природы разработан с учетом реализации многомерного пространства диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [8], включающих пошаговую сегментацию групп объектов с различной степенью развития дефектов.

Проведенные исследования [1, 3] позволяют утверждать, что наибольшее распространение среди дефектов электрической природы на оборудовании горных машин получили следующие повреждения:

- межвитковые замыкания обмоток (рис. 1);
- нарушение симметрии фазовых токов (рис. 2);
- эксцентриситет воздушного зазора между статором и ротором (рис. 3);
- повреждения стержней роторов (обрывы, растрескивания) – рис. 4.

Этим четырем базовым дефектам электрической природы соответствует более 20 диагностических признаков в области практического виброанализа, часть которых взаимно перекрывают друг друга [9, 10]. К сожалению, объем настоящей статьи не позволяет детально и в полной мере рассмотреть все признаки проявления дефектов электрической природы, присущих оборудованию горных машин. Далее для примера приведены некоторые признаки, использование которых позволяет выявлять наиболее распространенные из перечисленных дефектов.

Одним из распространенных дефектов электрической природы, который встречается на оборудовании горных машин, является нарушение симметрии фаз, которое проявляется как следствие неравномерного распределения сопротивления обмоток по фазам и секциям якорных обмоток. Данный дефект сопровождается заметными тангенциальными колебаниями статора и проявляется себя на частотах $2f_c \pm f_c/3$; где f_c – линейная частота питающей сети (рис. 2). Помимо прочего, проводимый анализ затрудняет тот факт, что довольно часто дефекты электрической природы сопровождаются обрывом проводников, из-за чего частично теряется электрический контакт. В результате диагностические признаки нарушения симметрии токов проявляются в спектре, то нет – по причине того, что соединение электрической сети будет случайным.

Единственный метод вибродиагностики, позволяющий провести однозначную ассоциацию между параметрами вибрации и наличием на агрегате дефектов электрической природы, является неинформативным с точки зрения определения конкретного типа дефекта (трещина стержня ротора, межвитковые замыкания и т. п.). Данный метод позволяет лишь подтвердить имеющееся предположение о наличии на электрической машине дефекта электрической природы, но не позволяет определить конкретный тип дефекта и степень его развития. Кроме того, реализация данного метода

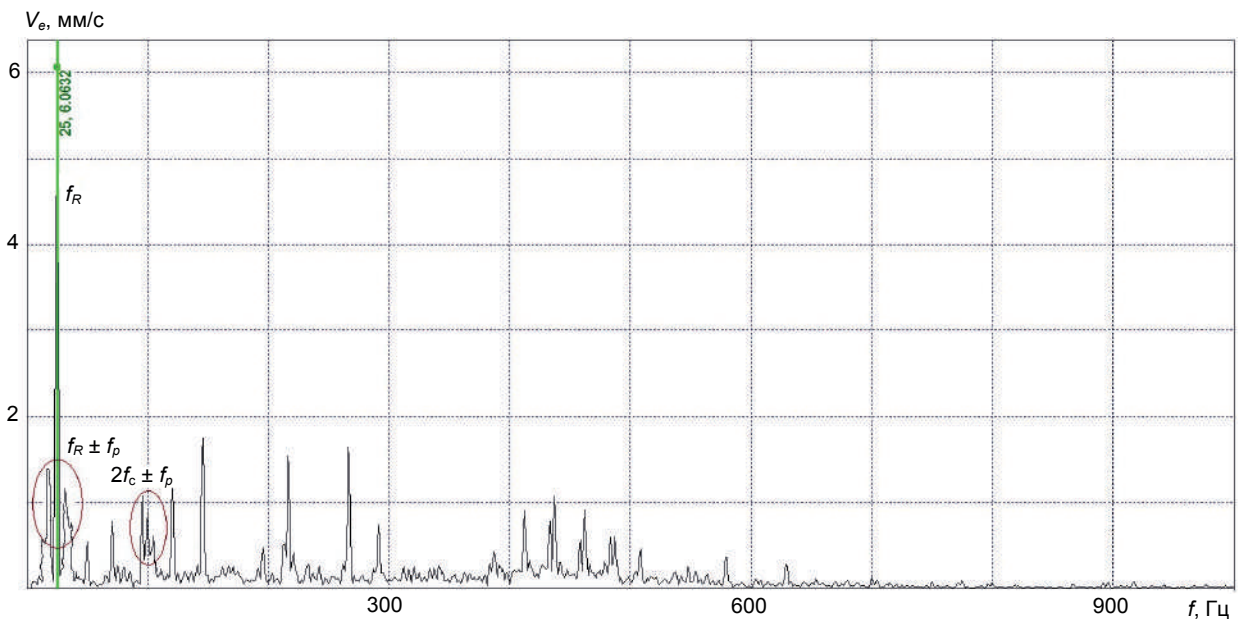


Рисунок 3. Диагностические признаки наличия эксцентриситета ротора на генераторе поворота экскаватора ЭКГ-5А.
Figure 3. Diagnostic properties of the presence of the concentricity error of the rotor in the generator of the rotation of the EKG-5A excavator.

потребуется значительных затрат времени, что нивелирует его преимущества с учетом условий проведения измерений на промышленных предприятиях [11, 12]. Данные недостатки не позволяют использовать метод анализа характеристики выбега при разработке единого диагностического критерия оценки дефектов электрической природы.

Еще одним распространенным дефектом электрической природы является наличие вращающегося эксцентриситета ротора, характеризующегося изменением воздушного зазора между статором и ротором в процессе работы агрегата, что обычно связано с нарушением технологии монтажа роторного агрегата (рис. 3). Наиболее информативным диагностическим признаком в этом случае служит наличие ярко выраженных компонентов вибрации на удвоенной частоте питающей сети и первой гармонике оборотной частоты при условии появления боковых частот прохода поля $f_R \pm f_p$; $2f_c \pm f_p$, где f_R – частота вращения ротора; f_p – боковая полоса частоты прохождения поля, $f_p = Nf_{sl}$; f_c – линейная частота питающей сети; f_{sl} – частота скольжения (разность частоты вращения магнитного поля и оборотной частоты ротора), $f_{sl} = f_s - f_r$; f_s – частота вращения магнитного поля, $f_s = f_c / p$; p – число пар полюсов, $p = N/2$, N – число полюсов.

Эксцентриситет статора, основной причиной возникновения которого является деформация статора при нагреве [13, 14], характеризуется появлением в спектре ярко выраженной радиальной компоненты оборотной частоты и гармонического ряда частот питающей сети в том случае, когда хотя бы одна из основных осей роторного агрегата не совпадает с другими осями (например, ось вращения ротора и геометрическая ось статора). Кроме того, в случае наличия развитой асимметрии магнитного поля в спектре появляются составляющие с частотами $f_{паз} \pm 2kf_c$ и $f_{паз} \pm kf_R$, обусловленные модуляцией гармоник пазовой частоты ($f_{паз}$ – пазовая частота, $f_{паз} = Xf_R$; X – число пазов ротора).

Диагностическими признаками наличия повреждений стержней ротора, таких как обрыв или растрескивание, могут выступать ярко выраженная амплитудная модуляция параметров регистрируемых виброакустических волн, а также присутствие в спектре некоторых характерных частот:

$$kf_R \pm nf_p (kf_c, kf_{паз} \pm 2f_c).$$

Кроме того, в качестве дополнительного диагностического признака наличия повреждения стержней может использоваться величина отношения амплитуд гармоник спектра по параметру виброскорости на частотах f_p и f_R . Это правило можно записать выражением вида $A[V_e(f_R)]/A[V_e(f_p)] < 10$. Выполнение данного условия подтверждает наличие на агрегате развитого дефекта электрической природы (повреждение стержня, повлекшее за собой электрическую асимметрию ротора).

Известно, что повреждение стержней ротора предопределяется превышением критического числа пусков [3]. В этом случае токовая нагрузка, действующая на неповрежденные стержни, увеличивается. В результате имеет место неравномерный нагрев как отдельных деталей так и всего ротора, что приводит к возникновению пластичных температурных деформаций ротора. Описанный процесс приводит к возникновению дисбаланса ротора и выхода из строя подшипников качения, изменению вращающего момента и частоты вращения ротора, появлению в спектре специфических гармонических рядов и значительной модуляции боковых частот. В данном случае в качестве диагностических признаков можно было бы использовать результаты теплового контроля и анализа временной реализации параметров вибрации роторных агрегатов, однако это значительно усложнит разрабатываемый комплекс базовых признаков и правил, решение этой задачи лежит за рамками настоящего исследования.

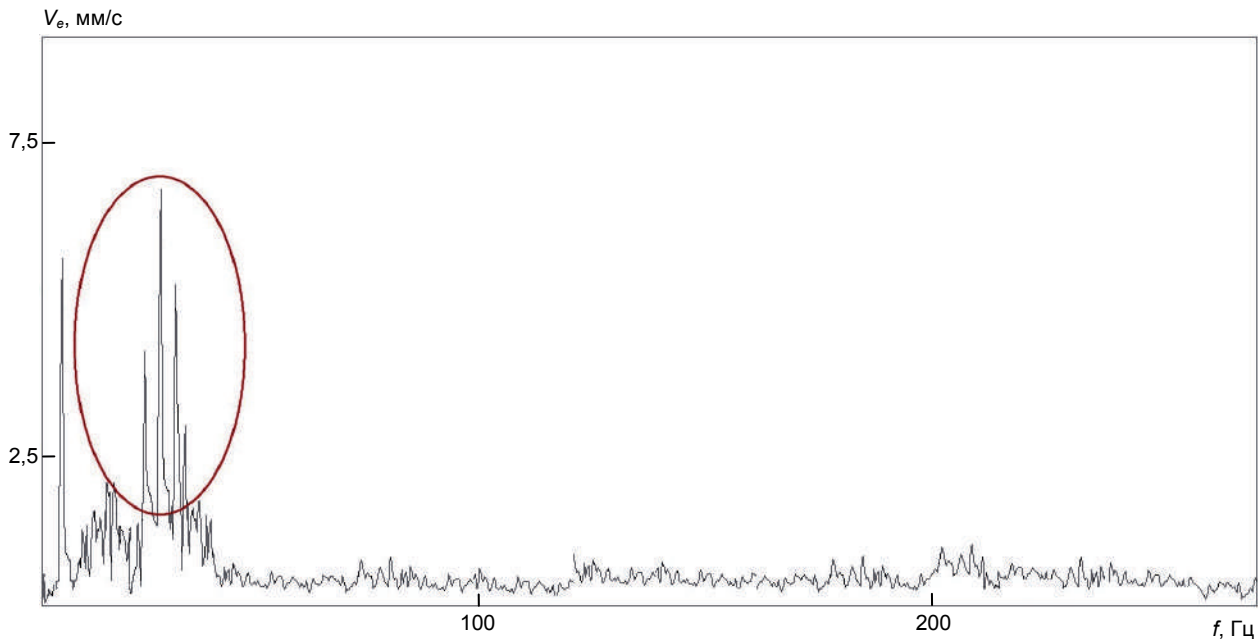


Рисунок 4. Характер спектра при наличии растрескивания стержня ротора электродвигателя силовой установки бурового станка СБШ-250 МНА-32.

Figure 4. The nature of the spectrum in the presence of cracking of the rotor rod of the electric motor of the power plant of the SBSH-250 MNA-32 drilling machine.

Выводы

Наиболее эффективный путь для разработки обобщенного единого диагностического критерия представляет реализация с применением многомерного пространства диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [8, 14, 15]. Данная процедура включает в себя пошаговую сегментацию групп однотипных объектов (генераторов и электродвигателей синхронного и асинхронного типа) с различной степенью развития базовых дефектов электрической природы (замыкания обмоток, нарушение симметрии фазовых токов, эксцентриситет воздушного зазора, повреждения стержней роторов). Формализация диагностических признаков и правил с применением результатов комплексного диагностического подхода позволила сформировать блок из 25 базовых правил, принадлежащих трем основным критериям (виброскорость и виброускорение в расширенном диапазоне, спектр огибающей). Реализация алгоритма поиска оборотной частоты и клиппирования позволит приступить к созданию единого диагностического критерия для оценки фактического состояния электрической части агрегатов горных машин.

Заключение

Полученные результаты убедительно доказали, что использование принципов совершенствования методологии анализа и нормативно-методической базы по параметрам механических колебаний при условии широкого использования современных методов и средств виброанализа позволит свести к минимуму вероятность возникновения аварий на производстве, связанных с фактическим состоянием эксплуатируемого горного оборудования. Предложенное направление позволит создать единый критерий оценки, который может быть использован при реализации алгоритмов прогнозического моделирования, что станет залогом безопасной эксплуатации машин и механизмов в сложных условиях угольной промышленности [16].

ЛИТЕРАТУРА

- Герике П. Б. Высокочастотные грохоты как объект диагностики по параметрам механических колебаний // Вестник КузГТУ. 2017. № 1. С. 59–67.
- Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes // AIP Conference Proceedings. 2018. 2053, 040090. <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
- Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. М., 2005. Т. 7. 828 с.
- Wang T., Han Q., Chu F., Feng Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox: A review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 126. P. 662–685. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051>
- Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis – Their Effectiveness and Flexibilities // Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123, issue 3. P. 303–310. <https://doi.org/10.1115/1.1379745>
- Краковский Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. Новосибирск: Наука, 2006. 227 с.
- Кравченко В. М., Сидоров В. А., Буцукин В. А. Повреждения подшипников качения в результате износа // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 45–47.
- Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.
- Ещеркин П. В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 18 с.
- Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems // Applied Condition Monitoring. 2018. Vol. 9. P. 91–101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9
- Schreiber R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis // Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC 2016). P. 668–672. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179>

12. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration // Journal of Mechanical Design. 2008. Vol. 130, issue 12. P. 121402/1–121402-13. <https://doi.org/10.1115/1.2976803>
13. Герике П. Б. Новые подходы к оценке технического состояния электрических буровых станков // Вестник КузГТУ. 2018. № 1. С. 118–124. <http://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-1-118-124>
14. Huňady R., Pavelka P., Lengvarský P. Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 121. P. 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024>
15. Лукьянов А. В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 230 с.
16. Клишин В. И., Зворыгин Л. В., Лебедев А. В., Савченко А. В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск, 2011. 524 с.

Статья поступила в редакцию 19 апреля 2018 г.

About a single diagnostic criterion for detecting defects of electric machines by the parameters of vibrations

Pavel Borisovich GERIKE*

Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of RAS, Kemerovo, Russia

The relevance of the work. This paper discusses some results of the analysis of methodological approaches to the development of a single diagnostic criterion suitable for performing an estimation of the actual state of electric machines and the development of predictive degradation models.

The purpose of the work: to summarize the results of the analysis of the parameters of vibrations generated by the operation of electric machines of various designs, which will allow classifying some defects of this equipment by basic groups and formalizing diagnostic signs for ease of use when developing the code of the automated control algorithm for complex systems according to frequency sets of diagnostic signs; to show that, under the conditions of the planned repairs system still operating in the coal and mining industries of Kuzbass, priority should be given only to short-term predictive mathematical models, which make it possible to assess the probability of the occurrence of equipment failures in the near future; to develop an algorithm for creating a unified diagnostic criterion suitable for identifying and assessing the degree of danger of electrical defects of mining fleet.

Methods of the study. The study substantiated the need to use the results of an integrated approach to the diagnosis of electric machines according to parameters of vibration generated during their work, while simultaneously using several diagnostic methodologies, including spectral analysis, analysis of high-frequency vibration envelope, wavelet decomposition, and running down analysis. It is shown that an integrated approach to the diagnosis of vibration parameters opens up broad opportunities for the timely diagnosis of defects in the electromechanical equipment of mining machines, including defects that are still in their infancy.

Results of the work. The results of the studies confidently prove the fundamental possibility of creating a new relevant single diagnostic criterion for identifying electrical defects, which can be used as a basic element of the maintenance system for machines according to its actual technical condition. The application of the developed criterion will make it possible to increase the efficiency of the maintenance management of complex mechanical systems and predict changes in the actual state of electric machines operated in the coal and mining industries.

Keywords: vibration monitoring, electric motors, electrical defects, mining equipment, maintenance management

REFERENCES

- 2017, Gerike P. B. High-speed screens as an object of diagnostics according to parameters of vibrations. *Vestnik KuzGTU* [Vestnik of Kuzbass State Technical University], no. 1, pp. 59–67. (In Russ.)
- Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. 2018, Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. *AIP Conference Proceedings*. 2053, 040090. <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
- 2005, *Nerazrushayushchiy kontrol'* [Non-destructive testing], book of reference in 7 volumes. Ed. by Klyueva V. V., Corresponding member of the Academy of Sciences. Moscow, vol. 7, 828 p.
- Wang T., Han, Q., Chu F., Feng Z. 2019, Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 126, pp. 662–685. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051>
- Tse P., Peng Y., Yam R. 2001, Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis – Their Effectiveness and Flexibilities. *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 123, issue 3, pp. 303–310. <https://doi.org/10.1115/1.1379745>
- Krakovsky Yu. M. 2006, *Matematicheskiye i programmnyye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya* [Mathematical and software tools for estimating the technical condition of equipment]. Novosibirsk, 227 p.
- Kravchenko V. M., Sidorov V. A., Butsukin V. A. 2013, Rolling bearing damage due to wear. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], no. 2, pp. 45–47. (In Russ.)
- Sushko A. E. 2007, *Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnoy obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh sistem* [Development of special mathematical and software for automated diagnostics of complex systems], PhD thesis. Moscow, 170 p.
- Eshcherkin P. V. 2012, *Razrabotka metodiki diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya dizel'-gidravlicheskiykh burovnykh stankov* [Development of methods for diagnosing and predicting the technical condition of diesel-hydraulic drilling rigs], PhD thesis, 18 p.
- Puchalski A., Komorska I. 2018, Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. *Applied Condition Monitoring*, vol. 9, pp. 91–101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9
- Schreiber R. 2016, Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC 2016), pp. 668–672. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179>
- Liu G., Parker R. 2008, Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, issue 12, pp. 121402/1–121402-13. <https://doi.org/10.1115/1.2976803>
- Gerike P. B. 2018, New approaches to the assessment of the technical condition of electric rock drilling machine. *Vestnik KuzGTU* [Vestnik of Kuzbass State Technical University], no. 1, pp. 118–124. (In Russ.) <http://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-1-118-124>
- Huňady R., Pavelka P., Lengvarský P. 2019, Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 121, pp. 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024>
- Lukyanov A. V., 1999, *Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin* [Classifier of vibration diagnostic properties of defects in rotary machines]. Irkutsk, 230 p.
- Klischen V. I., Zvorygin L. V., Lebedev A. V., Savchenko A. V., 2011, *Problemy bezopasnosti i novyye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy* [Safety aspects and new technologies for underground mining of coal deposits]. Novosibirsk, 524 p.

The article was received on March 20, 2019

*✉ am_besten@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2085-6108>