



УДК 622.333:622.275

РАЗРАБОТКА ЕДИНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РАСЦЕНТРОВКИ И НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНЫХ МАШИН

Герике П.Б.,¹ Ещеркин П.В.²

¹Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского
отделения Российской академии наук

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
Филиал в г. Белово



Информация о статье

Поступила:

18 января 2021 г.

Рецензирование:

06 июня 2021 г.

Принята к печати:

23 июля 2021 г.

Ключевые слова:

расцентровка,
вибродиагностика, единый
диагностический критерий,
энергомеханическое
оборудование, карьерные
экскаваторы

Аннотация.

В данной работе приведены некоторые результаты исследований в области разработки алгоритма создания единого диагностического критерия для диагностики наиболее широко распространенных дефектов энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов, таких как расцентровка валов агрегатов, неуравновешенность вращающихся элементов и нарушение жесткости системы. Анализ диагностических данных, полученных на работающем оборудовании экскаваторов типа ЭШ и ЭЖГ, позволил осуществить классификацию базовых дефектов данного оборудования. Также дано обоснование и приведена формализация диагностических признаков и правил в области анализа вибрации, пригодных для разработки единого диагностического критерия. Доказано, что созданный критерий может использоваться в качестве одного из элементов базовой платформы внедрения концепции обслуживания техники по ее фактическому состоянию. Полученные в рамках выполнения настоящего исследования научные результаты доказывают принципиальную состоятельность предложенной методологии создания единых критериев и ее эффективность для оценки и прогнозирования деградационных процессов на оборудовании горных машин. Реализация предложенных подходов к совершенствованию анализа параметров вибрации позволит оптимизировать логистику горных предприятий и уменьшить число несчастных случаев на производстве, связанных с недопустимым состоянием эксплуатируемой техники.

Для цитирования: Герике П.Б., Ещеркин П.В. Разработка единого диагностического критерия для выявления расцентровки и неуравновешенности элементов оборудования горных машин // Техника и технология горного дела. – 2021. – № 2 (13). – С. 4-12. – DOI: 10.26730/2618-7434-2021-2-4-12

Введение

На сегодняшний день в Кузбассе эксплуатируется большая доля электрических карьерных экскаваторов, подлежащих обязательной процедуре экспертизы промышленной безопасности. Часть этой техники находится в недопустимом или предельно допустимом техническом состоянии [1], что влечет за собой рост аварийных простоев и снижение показателей работы предприятий угольной и горнорудной промышленности.

В рамках настоящего исследования анализировались диагностические данные по параметрам вибрации, полученные на выборке из тридцати карьерных экскаваторов типа ЭШ и ЭЖГ.

Результаты выполненного анализа позволили заключить, что широкое распространение на обследованных экскаваторах получили такие дефекты энергомеханического оборудования, как:



нарушение жесткости системы (примерно 90% всех агрегатов из обследованной выборки), дефекты подшипников качения и ослабление их посадки (30% - см. пример на рисунке 1), расцентровка валопровода агрегата (30%), дефекты элементов соединительных муфт (15%), развитые дисбалансы элементов вращения (20%), дефекты электрической природы (около 10% от объема обследованной выборки).

Повысить достоверность и эффективность результатов виброконтроля можно при условии реализации комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации. Доказано [2, 3, 4, 5], что набор методологий для проведения комплексного виброанализа должен включать в себя результаты спектрального анализа в расширенном частотном и динамическом диапазонах, эксцесс, анализ временной реализации сигнала, анализ огибающей, в некоторых случаях целесообразно добавить в этот набор вейвлет-преобразование исходного полигармонического сигнала.

Отсутствие в анализе вибрации единого диагностического критерия (ЕДК), пригодного для оценки фактического состояния оборудования карьерных экскаваторов, объясняется слабой проработкой вопросов анализа виброакустических характеристик, генерируемых при работе оборудования горных машин и недостаточной представительностью существующих баз данных по параметрам вибрации используемого в их конструкции энергомеханического оборудования. Ценность для практического виброанализа результатов разработки ЕДК для выявления расцентровки и сопутствующих механических дефектов заключается в том, что его реализация на практике позволит минимизировать количество ошибок, связанных с квалификацией специалистов-вибродиагностов, и уменьшить количество времени, затрачиваемого на выполнение анализа [6, 7, 8].

Материалы и методы исследования

На рисунке 1 приведена спектральная характеристика подшипника генератора тяги драглайна, иллюстрирующая наличие нескольких наиболее распространенных дефектов – раковины наружном кольце и трещины сепаратора. Для идентификации данной группы дефектов существует большое количество узкоспециализированных методов контроля вибрации, а также имеются представительные базы данных вибрации по однотипному оборудованию горной техники, работающему на постоянных частотах (в частности, для генераторных групп карьерных экскаваторов). Сепараторная частота на спектре выражена неявно, однако результаты комплексного подхода, включая анализ огибающей спектра, позволили подтвердить гипотезу о наличии данного повреждения, что в итоге было еще раз подтверждено результатами визуального контроля при вскрытии подшипника. Полученные в рамках выполнения комплексного анализа данных научные результаты были использованы при создании ЕДК для подшипников качения, основу которого составили несколько разномерных признаков, включая общий уровень значащих составляющих и меру сходства сигналов по спектру огибающей [9], приведенных к общему критерию с помощью алгоритмов «оптимальной» скаляризации.

Еще одним повсеместно распространенным дефектом энергомеханического оборудования карьерных экскаваторов является нарушение жесткости системы (см. пример спектра на рисунке 2), которое является дефектом-спутником, соседствующим с самыми разнообразными механическими и электрическими дефектами, и часто приводящим к увеличению числа сопутствующих неисправностей, росту общего уровня вибрации и увеличению скорости развития повреждений.

Нарушение жесткости зачастую проявляет себя большим числом диагностических признаков, основным из которых является наличие в спектре широкого гармонического ряда оборотной частоты при условии наличия шумов и, в ряде случаев, заметной флуктуации уровня значащих гармоник [10, 11, 12, 13].



$A, m/s^2$

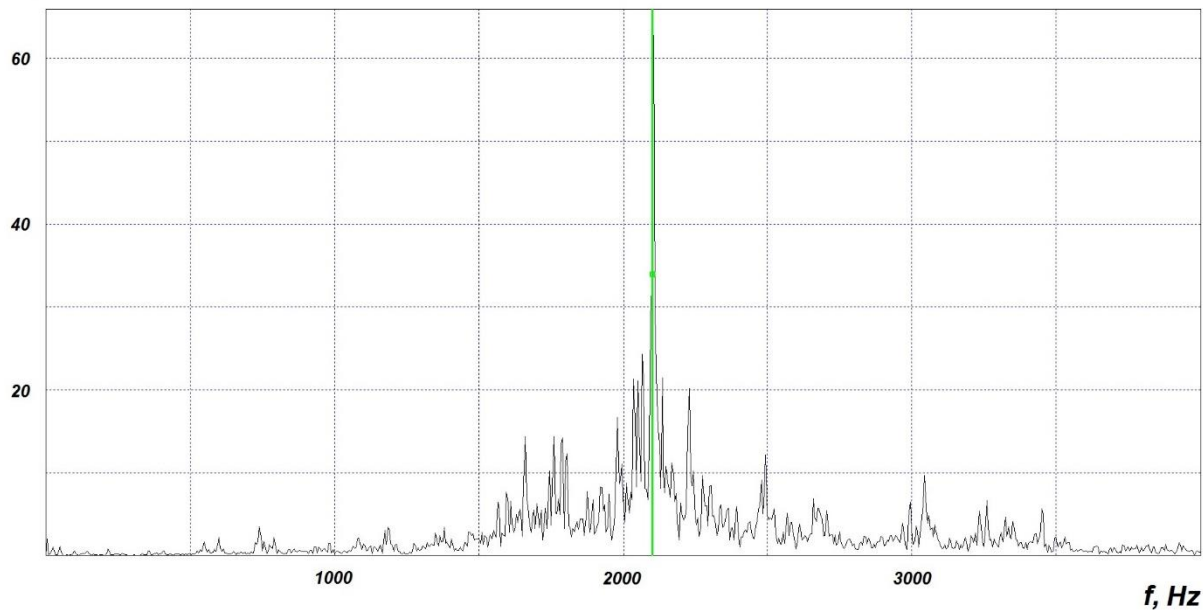


Рис. 1. Дефекты подшипника генератора тяги ЭШ 10/70
Fig. 1. Defects of thrust generator bearing ESH 10/70

$V_e, mm/s$

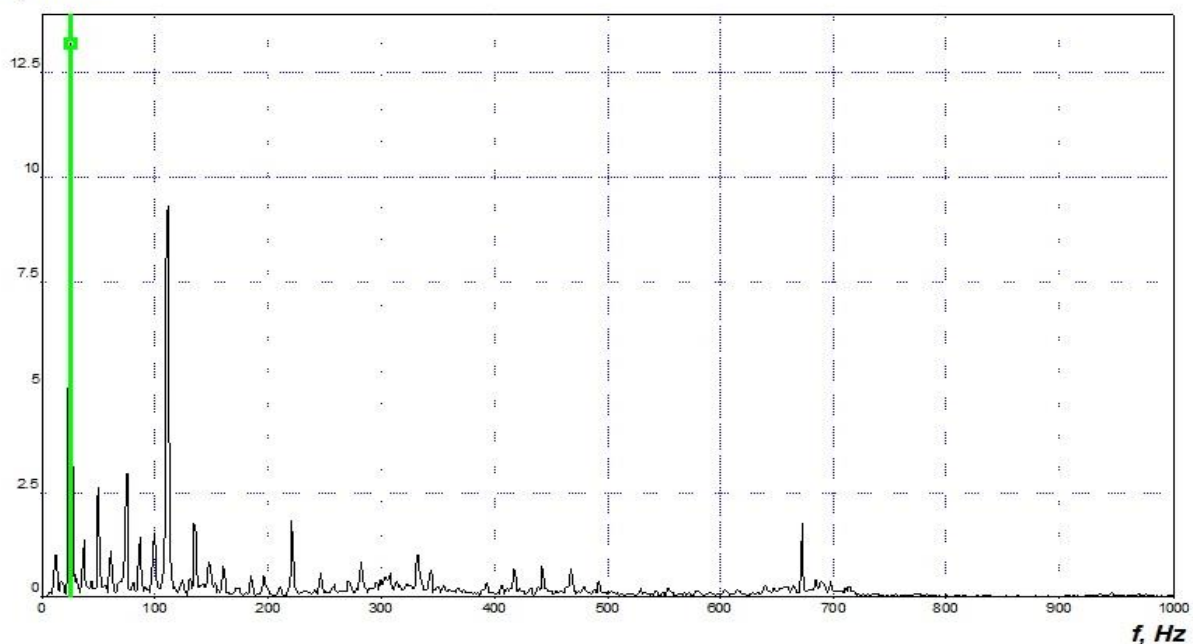


Рис. 2. Основной диагностический признак наличия развитого нарушения жесткости системы на генераторной группе экскаватора ЭКГ-5А
Fig. 2. The main diagnostic sign of the presence of a developed violation of the rigidity of the system on the generator group of the EKG-5A excavator

Наличие развитого дисбаланса ротора электрических машин (неуравновешенности деталей редукторов и т.д.), в сочетании с общим нарушением жесткости опорной системы и расцентровкой обычно приводит к значительному росту амплитудных величин параметров вибрации, сокращает ресурс подшипников и соединительных муфт и является одной из причин резкого перехода обследуемой механической системы в недопустимое техническое состояние (см. спектр на рисунке 3). В таком случае нередко именно использование результатов



комплексного подхода к диагностике по параметрам вибрации позволяет оценить степень опасности развития каждого из присутствующих на агрегате множественных дефектов и корректно спланировать ремонт и виброналадку дефектного агрегата [14, 15].

V_e/V_0 , дБ

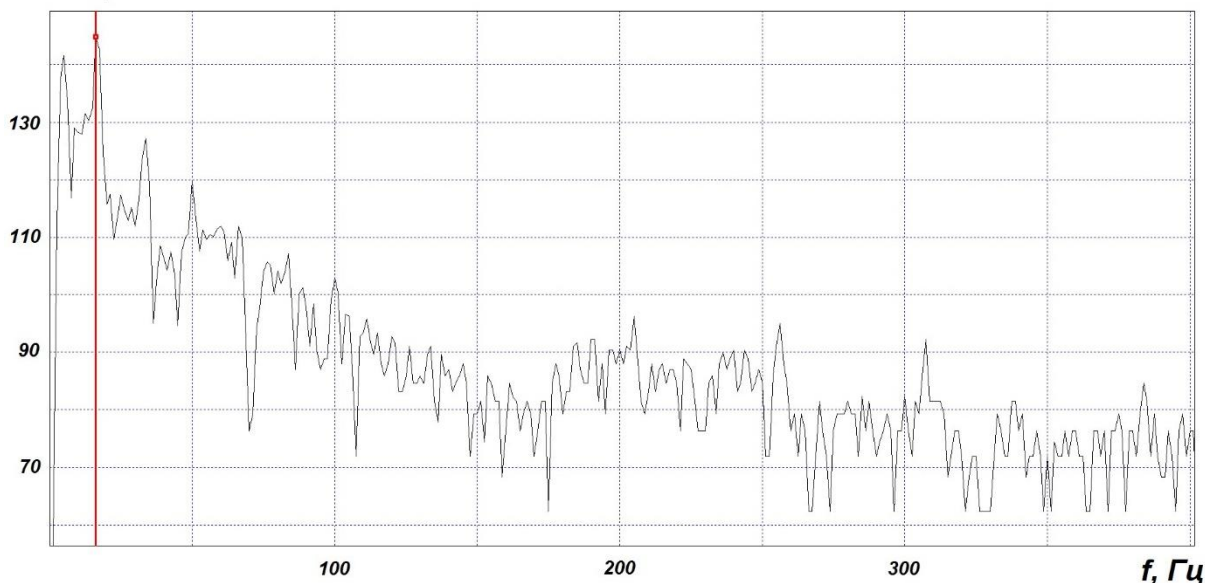


Рис. 3. Высокоэнергетические вибрационные процессы на генераторе напора ЭКГ-5А
Fig. 3. High-energy vibration processes on the EKG-5A pressure generator

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенного анализа экспериментальных диагностических данных позволили осуществить формализацию базовых признаков выявления дефектов по параметрам вибрации, пригодных для создания ЕДК для обнаружения расцентровки валов и сопутствующих дефектов (нарушение жесткости, дисбаланс) на энерго-механическом оборудовании карьерных экскаваторов. Ниже приведен примерный перечень этих признаков:

1. Суммарный амплитудный вклад базовых составляющих оборотных частот ($n=5$) в общий уровень сигнала по параметру виброскорости, полученный с учетом трехмерности пространственного положения обследуемого агрегата.

2. Гармоническая активность на удвоенной оборотной частоте, присутствующая во всех плоскостях и преобладающая в направлении плоскости расцентровки (вертикальная или горизонтальная несоосность, осевой изгиб – см. пример на рисунке 4).

3. Глубина модуляции спектра огибающей вибросигнала в области ряда оборотной частоты, а также присутствие в спектре субгармоник и обертонов, которыми «обрастают» составляющие ряда оборотной частоты, подтверждающих наличие развитого нарушения жесткости опорной системы в сочетании с расцентровкой валопровода.

4. Амплитуды гармоник ряда оборотной частоты подчиняются условию вида $4...8 f_R \gg 1...3 f_R$ при одновременном наличии значительного уровня флуктуации составляющих спектра, что свидетельствует о наличии развитого нарушения жесткости системы.

5. Преобладание в спектре частотных компонент гармонического ряда $k \cdot f_R$, особенно его первой и шестой гармоники $6 \cdot f_R$, свидетельствующее о наличии теплового дисбаланса ротора синхронных электрических двигателей.

6. Выполнение условия $2 \cdot f_R \gg f_R$ на подшипниках по обе стороны от соединительной муфты в радиальном и тангенциальном направлениях проведения измерений, свидетельствующее о наличии развитой расцентровки.

7. Появление спектральных компонент (дробных гармоник) вида $k \cdot f_R \pm (l/m) f_R$, при условии значительного роста уровня шумов.



8. Наличие в спектре ярко выраженного гармонического ряда $X=y*f_{RI}$ ($y=1, 2 \dots 16$) во всех трех плоскостях измерений, при одновременном росте шумовой компоненты спектра, также свидетельствует о наличии развитого нарушения жесткости опорной системы.

9. Сравнительный анализ меры подобия, определяемой по результатам сравнения временных волн, а также реального и «эталонного» спектров.

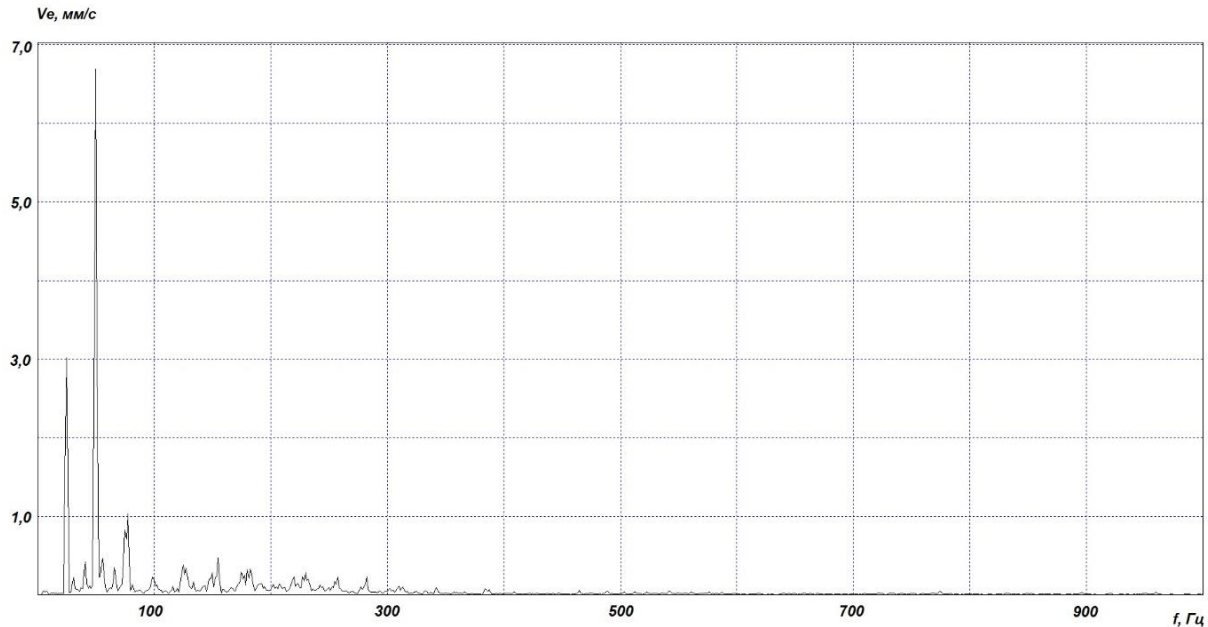


Рис. 4. Ярко выраженная расцентровка валопровода генераторной группы экскаватора ЭКГ-5А
Fig. 4. Pronounced misalignment of the shafting of the generator group of the EKG-5A excavator

Выводы

Таким образом, при разработке ЕДК использовались диагностические признаки, сосредоточенные большей частью в области спектрального анализа, что объясняется хорошей сходимостью получаемых результатов и достаточной проработанностью вопросов спектрального анализа виброакустических характеристик горной техники. Используемый в настоящей работе алгоритм клиппирования базируется на принципе удаления из спектра «лишних» гармоник, не имеющих отношение к природе рассматриваемых дефектов. Процедура уточнения оборотной, используемая в данном алгоритме, основана на принципе поиска гармоник с максимальными амплитудами в низкочастотном диапазоне спектра [4, 16]. Единый диагностический критерий (см. пример блок-схемы на рисунке 5) для выявления дефектов расцентровки, нарушения жесткости и дисбаланса был разработан с учетом пересчета многомерных векторов различных диагностических данных в скалярные величины ЕДК с применением алгоритмов «оптимальной» скаляризации, предложенной в трудах Герцбаха [17].

Заключение. Обобщая вышесказанное, можно заключить, что научные результаты, полученные в рамках выполнения настоящей работы, прямо свидетельствуют об эффективности предложенного методологического подхода к разработке единого диагностического критерия для выявления нарушений центровки валов и других сопутствующих дефектов. Кроме того, применение данного критерия при осуществлении краткосрочного моделирования процессов деградации фактического состояния горных машин позволит внедрить на угольных предприятиях Кузбасса некоторые элементы системы обслуживания техники по фактическому состоянию, что позволит уйти от действующих сегодня схем проведения плановых ремонтов и повысить уровень безопасности на открытых горных работах. Реализация принципов системы управления ремонтами качественно нового уровня позволит оптимизировать логистические издержки эксплуатирующих предприятий, сократить количество аварийных простоев дорогостоящего технологического оборудования, а



также приведет к снижению количества несчастных случаев на производстве, связанных с недопустимым состоянием горного оборудования.

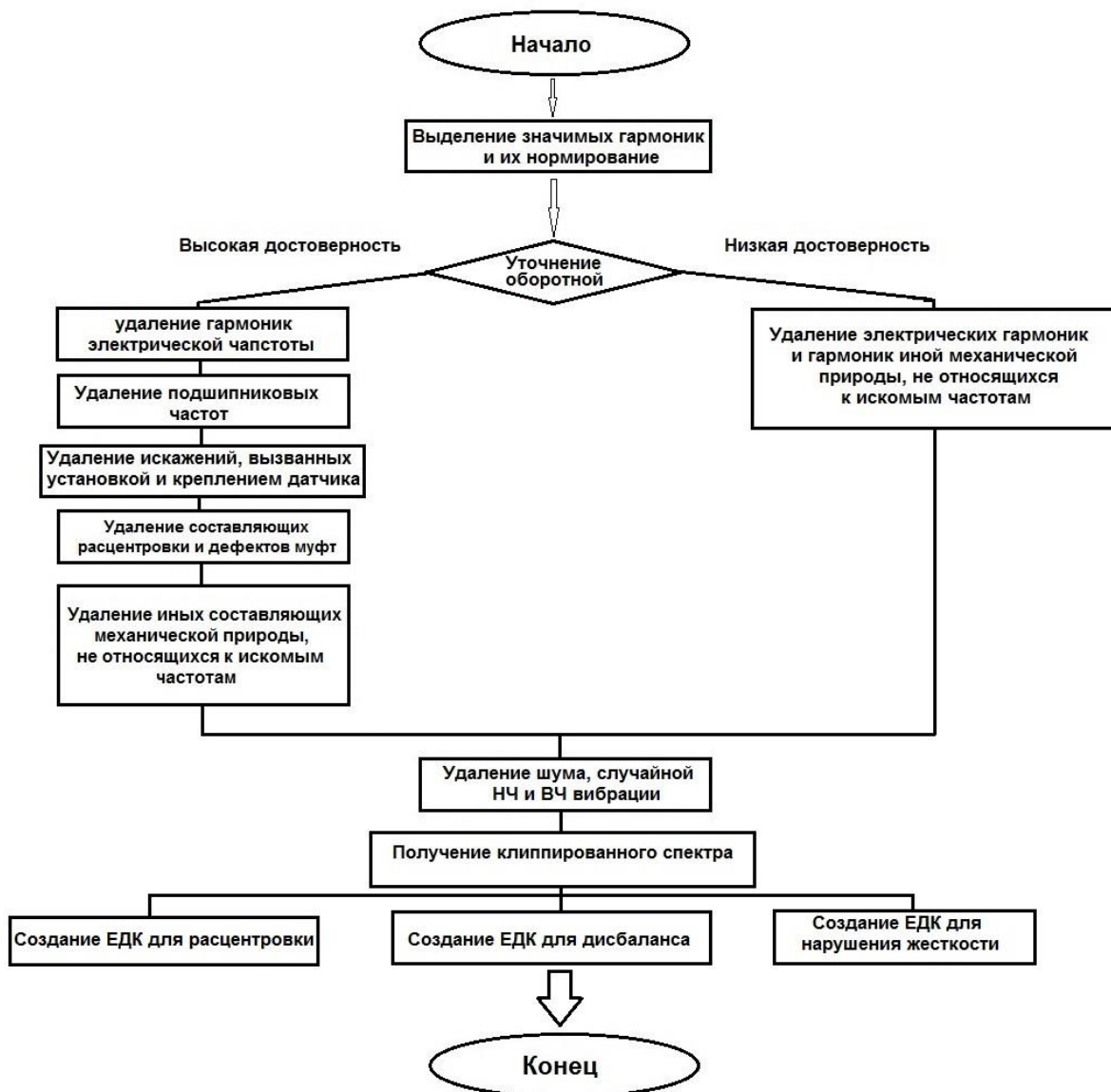


Рис. 5. Блок-схема алгоритма реализации алгоритма клиппирования и создания ЕДК
Fig. 5. Block diagram of the algorithm for the implementation of the clipping algorithm and the creation of the EBC

Источники финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420010\21.

Список источников

1. Герике, Б.Л. Применение вибродиагностики при проведении экспертизы промышленной безопасности шагающих экскаваторов/ Б.Л. Герике, П.Б. Герике // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов, № 1. – Новокузнецк. – 2014. – С. 42-46.
2. 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 2053, 040090 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
3. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.



4. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
5. V. Pozhidava. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA
6. 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. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745.
7. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
8. Барков, А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова / Издательство СПбГМТУ. – Санкт Петербург, 2004. — 156 с.
9. Герике, П.Б. Методы диагностики горно-шахтного оборудования // Труды IV Всероссийской конференции. В 2-х томах. Научн. ред. В. В. Москвичев. – 2012. – С. 217-220.
10. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
11. F. Balducci, M. Arghir, S. Gaudillere. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany.
12. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
13. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. Journal of Mechanical Design. 2008. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803
14. Герике, П.Б. Вибродиагностика планетарных редукторов карьерных экскаваторов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды международной научно-практической конференции. – Кемерово: КВК «Экспо-Сибирь», 2013 – С. 44-46.
15. Ещеркин, П.В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово. – 2012. – 18 с.
16. Лукьянов, А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
17. Герцбах, И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию: Монография / Под ред. В.В. Рыкова; пер. с англ. М.Г. Сухарева. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 263 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Герике Павел Борисович, канд. техн. наук, доцент, Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук. Российская Федерация, Кемеровская область – Кузбасс, 650065, г. Кемерово, проспект Ленинградский, 10

e-mail: am_besten@mail.ru

Ещеркин Павел Викторович, канд. техн. наук, доцент, Филиал Кузбасского государственного технического университета в г. Белово, Российская Федерация, Кемеровская область – Кузбасс, 652644, г. Белово, пгт Инской, ул. Ильича 32а

e-mail: esherkinpv@gmail.com



DEVELOPMENT OF UNIFIED DIAGNOSTIC CRITERIA FOR IDENTIFYING MISALIGNMENT AND UNBALANCE OF MINING MACHINERY SOME COMPONENTS

Pavel B. Gericke¹, Pavel V. Eshcherkin²

¹ Mining Institute of The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

²Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in Belovo



Article info

Received:

18 January 2021

Revised:

06 June 2021

Accepted:

23 July 2021

Keywords: misalignment, vibration analysis, a single diagnostic criterion, energy-mechanical equipment, mining shovels

Abstract.

This paper presents some research results in the development of an algorithm for creating a unified diagnostic criterion for diagnosing the most widespread defects in the power-mechanical equipment of mining shovels, such as misalignment of unit shafts, imbalance of rotating elements and violation of the rigidity of the support system. Analysis of experimental diagnostic data obtained on the operating equipment of ESH- and EKG-type mining shovels made it possible to classify the basic defects of this equipment. Also, the substantiation and formalization of diagnostic signs and rules in the field of vibration analysis, suitable for the development of a single diagnostic criterion, has been carried out. It is proved that the created criterion can be used as one of the elements of the basic platform for introducing the concept of servicing equipment based on its actual state. The scientific results obtained within the framework of this study prove the fundamental consistency of the proposed methodology for creating unified criteria and its effectiveness for assessing and predicting degradation processes on the equipment of mining machines. The implementation of the proposed approaches to improving the analysis of vibration parameters will optimize the logistics of mining enterprises and reduce the number of industrial accidents associated with the unacceptable state of the equipment being operated.

For citation Gericke P., Eshcherkin P. (2021) Development of unified diagnostic criteria for identifying misalignment and unbalance some components of mining machinery, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 2(13):4. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-2-4-12

References

1. Gerike, B.L. Primenenie vibrodiagnostiki pri provedenii jekspertizy promyshlennoj bezopasnosti shagajushhih jekskavatorov/ B.L. Gerike, P.B. Gerike // Naukoemkie tehnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov, № 1. – Novokuzneck. – 2014. – S. 42-46.
2. 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 2053, 040090 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5084528>
3. Gol'din, A. S. Vibracija rotornyh mashin. – M.: Mashinostroenie, 1999. – 344 s.
4. Nerazrushajushhij kontrol'. Spravochnik v 7 tomah pod redakciej chl.-korr. RAN V.V. Kljueva, t.7 – Moskva, 2005. – 828 s.
5. V. Pozhidaeva. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA
6. 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. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745.
7. Krakovskij, Ju. M. Matematicheskie i programmnye sredstva ocenki tehničeskogo sostojanija oborudovanija. / Novosibirsk: Nauka, 2006. – 227 s.



8. Barkov, A.V. Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovanija. Analiz vibracii. Uchebnoe posobie / A.V. Barkov, N.A. Barkova / Izdatel'stvo SPbGMTU. – Sankt Peterburg, 2004. — 156 s.
9. Gerike, P.B. Metody diagnostiki gorno-shahtnogo oborudovanija // Trudy IV Vserossijskoj konferencii. V 2-h tomah. Nauchn. red. V. V. Moskvichev. – 2012. – S. 217-220.
10. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
11. F. Balducchi, M. Arghir, S. Gaudillere. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany.
12. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
13. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. Journal of Mechanical Design. 2008. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803
14. Gerike, P.B. Vibrodiagnostika planetarnyh reduktorov kar'ernyh jekskavatorov // Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii. Novye podhody k razvitiyu ugol'noj promyshlennosti: Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Kemerovo: KVK «Jekspo-Sibir'», 2013 – S. 44-46.
15. Eshcherkin, P.V. Razrabotka metodiki diagnostirovanija i prognozirovaniya tehničeskogo sostojanija dizel'-gidravličeskikh burovyh stankov. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehničeskikh nauk. Kemerovo. – 2012. – 18 s.
16. Luk'janov, A.V. Klassifikator vibrodiagnostičeskikh priznakov defektov rotornyh mashin. / Irkutsk: Izdatel'stvo IrGTU, 1999. – 230 s.
17. Gercbah, I. Teorija nadezhnosti s prilozhenijami k profilaktičeskomu obsluzhivaniju: Monografija / Pod red. V.V. Rykova; per. s angl. M.G. Suhareva. M.: GUP Izd-vo «Nef't' i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina, 2003. – 263 s.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Pavel B. Gericke, Ph.D. (Tech.), Assistant Professor, Mining Institute of The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Kemerovo region – Kuzbass, 650065, Kemerovo, 10 Leningradsky av.

e-mail: am_besten@mail.ru

Pavel V. Eshcherkin, Ph.D. (Tech.), Assistant Professor Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in Belovo Russian Federation, Kemerovo region – Kuzbass, 652644, Belovo, urban-type settlement Inskoy, 32a Ilyicha str.

e-mail: esherkinpv@gmail.com