

А.А. Чистоклетов¹, К.Г. Пугин^{2,3}¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия²Пермский государственный аграрно-технологический университет

имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

³Волжский государственный университет водного транспорта (Пермский филиал), Пермь, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассматриваются основные направления применения вибродиагностики в области оценки технического состояния гидронасосов, гидрораспределителей, гидроцилиндров. Описано направление развития и актуальность на сегодняшний день данного вопроса за рубежом. Проведен анализ литературы в данной области исследований вибраций гидравлического оборудования. Рассмотрены основные методы исследований, представленные авторами в статьях. На основе вышеуказанных методов планируется разработка методики для диагностики технического состояния элементов гидропривода в условиях производственной эксплуатации. В каждой гидросистеме есть генератор импульсов, есть совершающие возвратно-поступательное движение элементы, которые могут быть источником вибрации в различных диапазонах. Исходя из этого, можно сделать предположение, что амплитуда и частота колебаний могут являться диагностическими сигналами при их детальном рассмотрении и обработке полученного сигнала, наложении различных фильтров, преобразованиях. В ходе проведения исследовательской работы по изучению возможности осуществления оценки технического состояния гидросистем строительных и дорожных машин планируется использовать прибор для измерения вибрации «Диана-8». Изначально планируется провести измерения на стенде в лабораторных условиях, расположить датчики на элементах гидросистемы в нескольких плоскостях для получения вибросигнала в различных плоскостях. Измерения планируется проводить при различных условиях работы гидросистемы. В последующем при обработке данных, полученных в ходе эксперимента, необходимо провести преобразования вибрационных данных, извлечь спектры, провести анализ полученных результатов. В итоге планируется разработать методику по оценке технического состояния элементов гидропривода машин по параметрам вибрации в условиях производственной эксплуатации.

Ключевые слова: вибродиагностика, гидронасос, гидроцилиндр, гидрораспределитель.

A.A. Chistokletov¹, K.G. Pugin^{2,3}¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation²Perm State Agrarian-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikova,
Perm, Russian Federation³Volga State Academy of Water Transport, Perm Branch, Perm, Russian Federation

USING VIBRATION DIAGNOSTICS TO DETERMINE THE TECHNICAL CONDITION OF HYDRAULIC EQUIPMENT

This article discusses the main areas of application of vibration diagnostics in the field of assessing the technical condition of hydraulic pumps, hydraulic valves and hydraulic cylinders. The direction of development and the relevance of this issue abroad are described. The analysis of literature in this field of research of vibrations of hydraulic equipment is carried out. The main research methods presented by the authors in the articles are considered. On the basis of the above methods, it is planned to develop a methodology for diagnosing the technical state of hydraulic drive elements under industrial operation conditions. Each hydraulic system has an impulse generator; there are reciprocating elements that can be a source of vibration in various ranges. Based on this, it can be assumed that the amplitude and frequency of oscillations can be diagnostic signals during their detailed examination and processing of the received signal, the imposition of various filters, transformations. In the course of research work to study the possibility of assessing the technical condition of the hydraulic systems of construction and road machines, it is planned to use the Diana-8 vibration measuring device. Initially, it is planned to carry out measurements at the stand in laboratory conditions, to place the sensors on the elements of the hydraulic system in several planes, in order to receive a vibration signal in different planes. The measurements are planned to be carried out under various operating conditions of the hydraulic system. Subsequently, when processing the data obtained during the experiment, it is necessary to transform the vibration data, extract the spectra, and analyze the results obtained. As a result, it is planned to develop a methodology for assessing the technical condition of the hydraulic drive elements of machines by vibration parameters, in the conditions of production operation.

Keywords: vibration diagnostics, hydraulic pump, hydraulic cylinder, hydraulic valve.

На сегодняшний день в различных отраслях промышленности наблюдается рост эксплуатации машин, имеющих сложные системы гидравлических приводов, которые применяются в качестве исполнительных органов систем управления, автоматизации производственных процессов, приводов рабочих машин. Оценка технического состояния такого гидропривода затруднительна. Для поддержания его в работоспособном состоянии необходимо обладать современными средствами и методами диагностики технического состояния. Они служат для сохранения оборудования в работоспособном состоянии, предупреждения и прогнозирования отказов.

Разработка новых методов диагностирования технического состояния гидравлического оборудования позволяет обеспечивать прогнозирование отказов, обнаруживать неисправности различных узлов на ранней стадии. Это дает экономическую выгоду при использовании данных методов в условиях производственной эксплуатации, где внезапный отказ одной машины может повлечь за собой убытки гораздо большие, чем просто ремонт [1–5].

Вибрационная диагностика – это один из способов диагностирования технологического оборудования, который основывается на анализе параметров вибрации, создаваемой работающим оборудованием, либо является вторичной вибрации, которая обусловлена структурой исследуемого объекта.

Методы диагностирования по параметрам вибрации применяются при контроле технического состояния гидравлического оборудования, являются одним из основных методов контроля технического состояния. Данные методы могут решать следующие задачи: выявлять причины высокого уровня вибрации отдельных агрегатов, обнаруживать скрытые дефекты в конструкции.

Диагностику оборудования по параметрам вибрации можно назвать наиболее перспективным методом по следующим причинам: применение данного метода не требует остановки работы оборудования; простота размещения датчиков для проведения измерений; для проведения измерения требуется минимальное количество времени.

В работе [6] авторов из Германии произведен статистический анализ вибрационных характеристик для возможности мониторинга состояния гидросистем. Предлагается автоматизированный статистический анализ вибрационных характеристик для контроля состояния гидросистем. Для измерения вибрации используется микромеханический акселерометр. В качестве объекта исследования выступали шестеренные насосы с различными неисправностями. Параметры вибрации, измеренные на корпусе насоса, анализировали по коэффициенту корреляции с целевым значением неисправности и впоследствии свели к дискриминантным функциям, которые позволяют классифицировать состояния компонентов с использованием многомерной статистики.

Подход был успешно опробован на экспериментальном гидравлическом испытательном стенде, имитирующем типичные сценарии неисправности, такие как ухудшение подачи или падение давления. Показано, что изучаемые сценарии неисправностей могут быть выборочно обнаружены (внутренняя утечка насоса) и даже количественно оценены. Результаты эксперимента представлены на рис. 1.

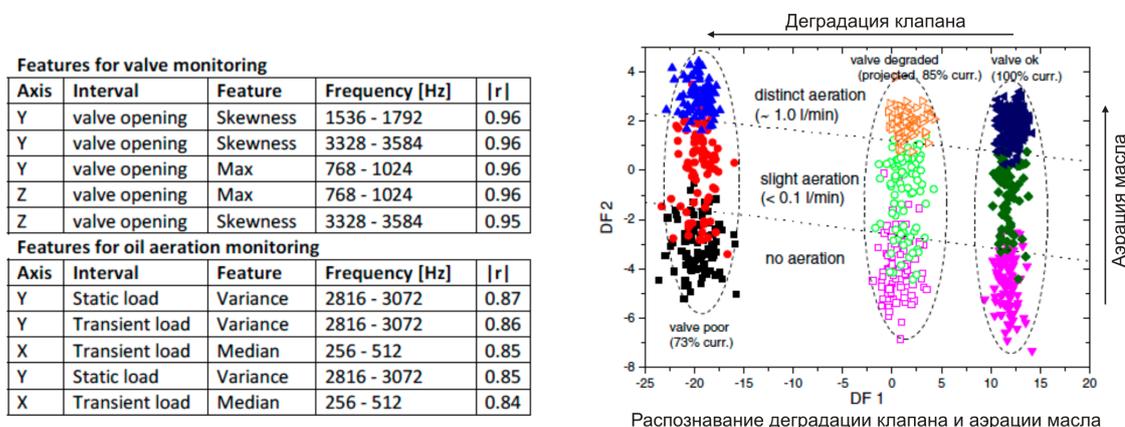


Рис. 1. Результаты эксперимента [6]

В работе [7] описан подход к диагностике неисправностей, основанный на теории Демпстера – Шафера для гидравлических клапанов. Выявление множественных неисправностей в гидравлических клапанах с использованием существующих подходов сложно из-за замкнутости конструктивных элементов. Поэтому интеллектуальный подход к диагностике неисправностей, основанный на теории Демпстера – Шафера, предлагается специально для обнаружения нескольких различных неисправностей, возникающих в гидравлических клапанах.

В этом подходе сегменты сигнала, содержащие информацию о неисправности, сначала выбираются для структурирования наборов выборок. Затем наборы выборок одновременно загружаются в единый классификатор, включая сети с долговременной и краткосрочной памятью (long short-term memory networks), нейронную сеть (convolutional neural network) и случайные параметры (randomforests). Благодаря автоматическому обучению, в этих интеллектуальных подходах к классификации определяются признаки неисправности и соответственно выявляется вероятность неисправности каждого типа. Все вероятности построены как функции базового распределения вероятностей, которые в дальнейшем вычисляются в процессе объединения информации согласно теории Демпстера – Шафера. Типы неисправностей идентифицируются по окончательным результатам проверки. В статье показано, что средний коэффициент точности предлагаемого интеллектуального подхода к диагностике неисправностей гидравлических клапанов составляет 98,5 % для обнаружения шести типов неисправностей. Схема оборудования, которое применялось в ходе эксперимента, представлена на рис. 2.

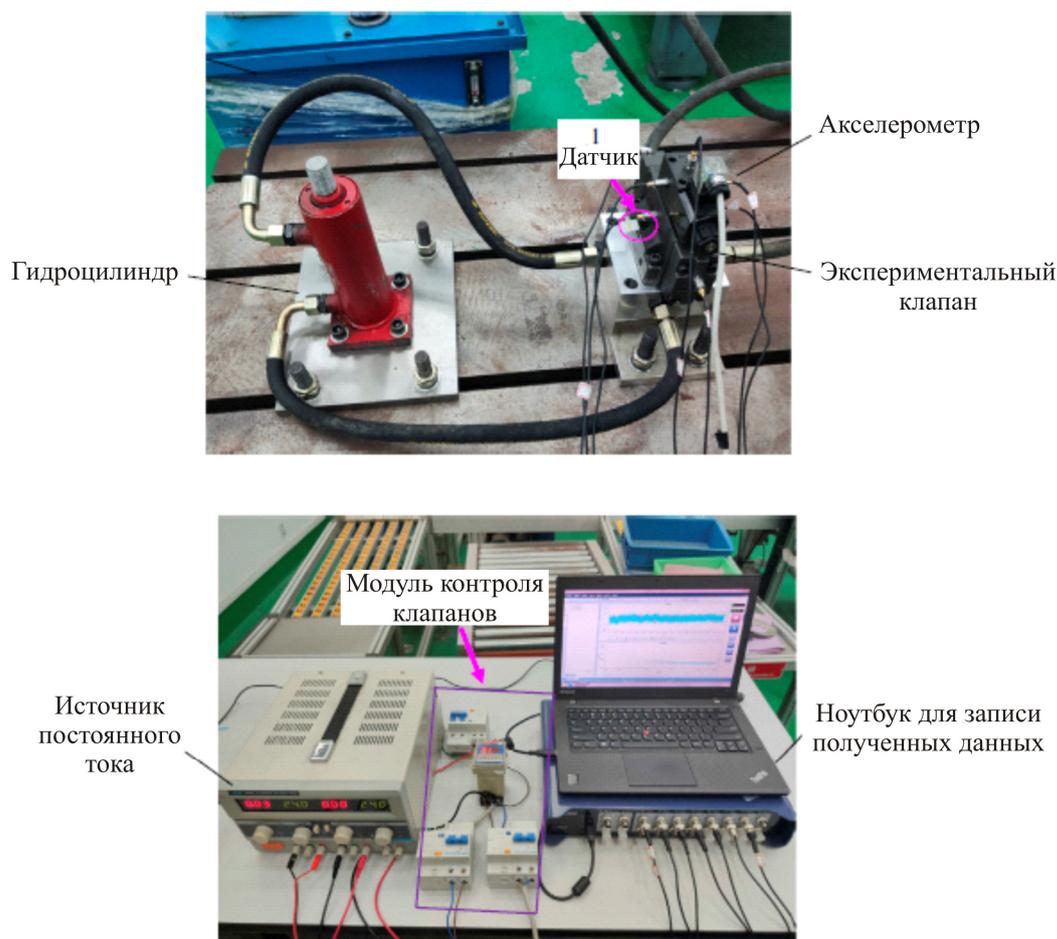


Рис. 2. Схема экспериментальной установки и применяемое оборудование [7]

Авторы исследования [8] разработали метод диагностики аксиально-поршневого насоса. Определение технического состояния насоса производят на основе модели виртуального прототипа. Моделируется, анализируется и тестируется динамический отклик насоса при различных состояниях износа и различных нагрузках. Результаты показывают, что как внешняя нагрузка, так и техническое состояние влияют на динамический отклик поршневого насоса. Также обнаружено, что градиенты линий тренда среднеквадратичного значения (RMS) осевой вибрации являются чувствительной характеристикой, отражающей разрушение поршней при изменяющейся нагрузке.

Метод позволяет провести диагностику поршневого насоса при изменении нагрузки. Предлагаемый метод сначала собирает сигнал осевой вибрации поршневого насоса, затем разделяет сигнал вибрации на равные части, далее вычисляет среднеквадратичное значение каждого сигнала сегмента и вычисляет градиент среднеквадратичной линии тренда и, наконец, обнаруживается неисправность незакрепленного проскальзывания на основе градиента линии тренда. Эффективность этого метода авторами проверена экспериментально (рис. 3).

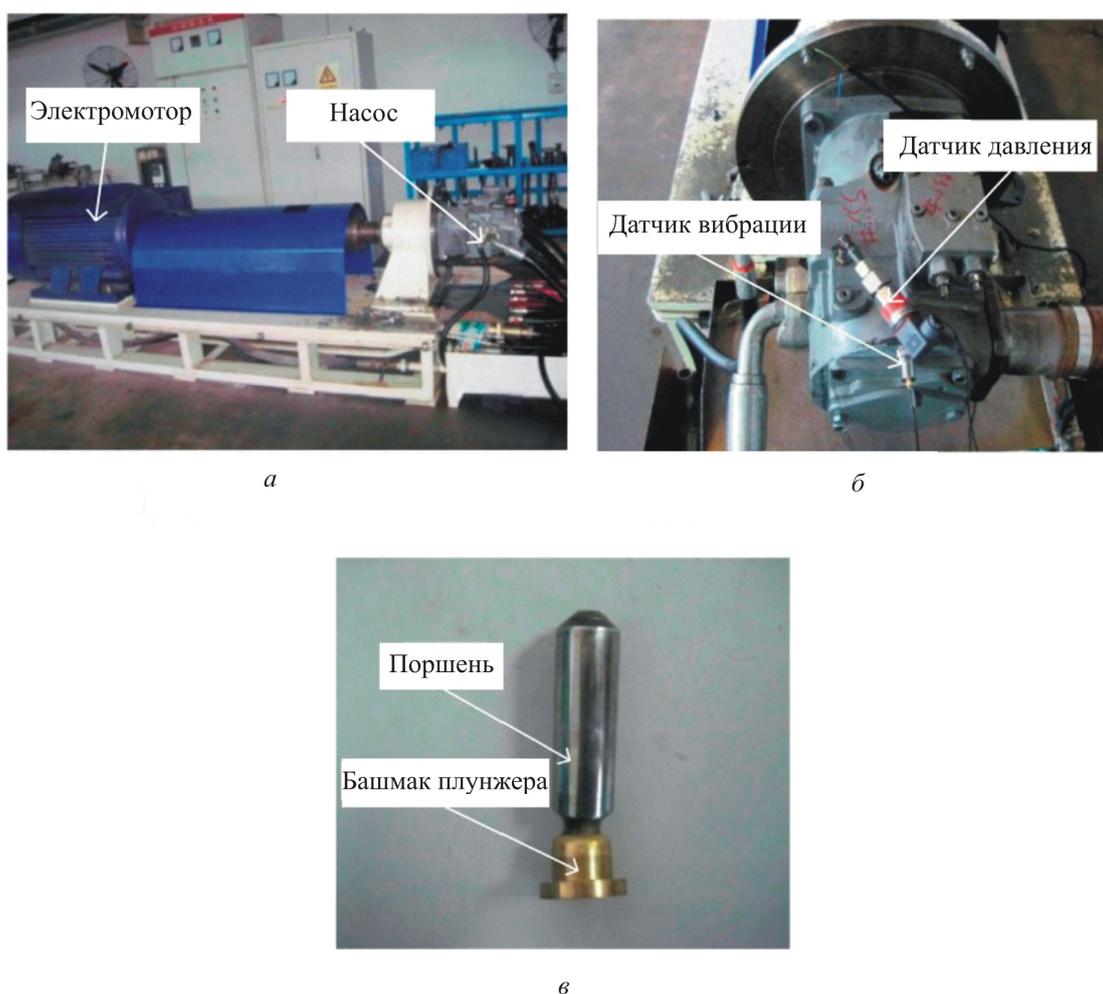


Рис. 3. Схема эксперимента [8]:

а – экспериментальная платформа, *б* – тестовый поршневой насос, *в* – плунжер

В статье [9] рассматривается метод диагностики по полному векторному спектру сигнала вибрации. Полный векторный спектр – это эффективный и действенный инструмент для слияния данных, снятых с нескольких датчиков. Для анализа поступающих сигналов используется преобразование Фурье. Для повышения точности получаемых значений и исключения влияния «шума» предлагается использовать новый подход, называемый EWT–VCR, основанный на эм-

пирическом вейвлет-преобразовании (EWT) и коэффициенте вклада дисперсии (VCR). Это позволяет повысить адаптируемость к особенностям гидросистемы и точность слияния сигналов с датчиков. EWT представлен как метод предварительной обработки сигналов для разложения сложных сигналов на измеряемые полосы частот вибрации. Предлагается использовать фильтр для шумоподавления, объединение компонентов EWT в разных частотных диапазонах и усиления полезных гармонических составляющих. Предлагаемая методика обработки сигналов применяется к объединению многоканальных сигналов вибрации для гидравлических насосов для обнаружения определенных частот, связанных с процессом деградации элементов насоса. Предложено в качестве параметра деградации элементов насоса использовать полную энтропию векторного фактора (FVFE). Эффективность предлагаемых методов подтверждена двумя экспериментами.

В ходе исследования проводились измерения параметров вибрации в трех плоскостях на насосе, при установке поршней с различной степенью износа. В итоге выстроили графики, на которых в зависимости от степени износа плунжера видно увеличение вибрации на определенных частотах, тем самым можно прогнозировать и предупреждать поломки оборудования.

В статье [10] авторы из Китая представили алгоритм объединения сигналов вибрации с использованием улучшенного эмпирического вейвлет-преобразования и коэффициента вариации при помощи объединения трехканальных сигналов вибрации с целью обнаружения слабовыраженных неисправностей гидравлических насосов. На рис. 4 представлен гидронасос с тремя датчиками вибрации, расположенными в трех плоскостях.

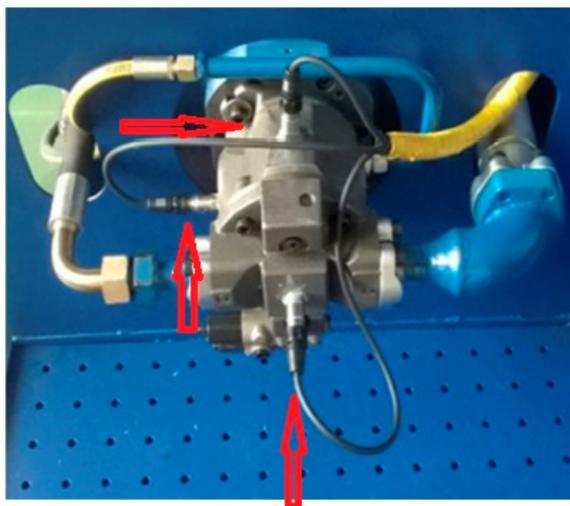


Рис. 4. Гидронасос с тремя датчиками вибрации [10]

Для разложения трехканальных сигналов на несколько компонентов АМ-ФМ использовали вейвлет-преобразование (EWT). Затем в соответствии со статистическими характеристиками компонентов определяется степень вклада дисперсии, после чего вычисляется вклад точек данных компонентов. Точки объединяются в один сигнал, и выполняется преобразование Гильберта для демодуляции характеристической частоты повреждения с целью обнаружения неявного повреждения. Результаты моделирования и анализа эксперимента демонстрируют хорошую точность представленного алгоритма при обнаружении слабовыраженных неисправностей гидравлических насосов.

В работе [11] авторы указывают на проблему получения и обработки информации о техническом состоянии аксиально-поршневых насосов. Из-за высокой скорости вращения приводного вала и высокого давления в ключевых компонентах насоса (например в подшипниках качения, поршнях) возможно появление непредвиденных неисправностей, что может привести

к внезапному выходу из строя машины. Авторы показывают, что анализ вибрации является эффективным средством диагностики неисправностей, однако диагностический сигнал часто погружен в помехи и сильные естественные периодические импульсы, вызванные возвратно-поступательным движением движущихся частей насоса. Ключевой задачей диагностики неисправностей аксиально-поршневого насоса является выделение импульсов неисправности из исходных сигналов вибрации. На рис. 5 представлено оборудование, участвующее в ходе проведения эксперимента.

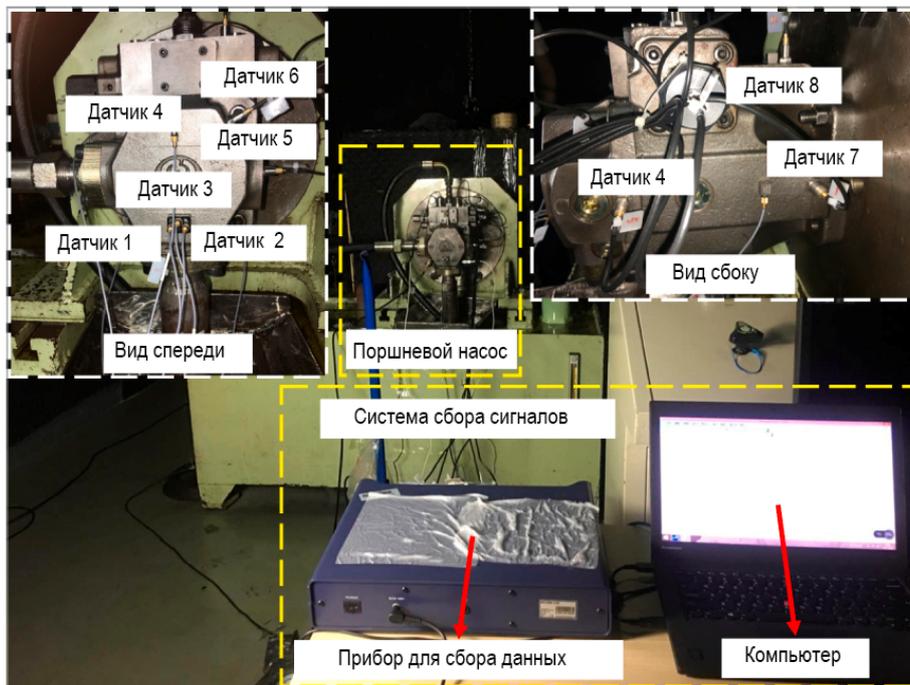


Рис. 5. Применяемое оборудование для проведения эксперимента [11]

С целью решения этой проблемы в данной статье предлагается метод определения местоположения неисправных частотных диапазонов, основанный на улучшенном алгоритме быстрой спектральной корреляции (Fast-SC). Он применен для анализа исходного сигнала вибрации для создания изображения с циклической спектральной корреляцией. Затем отображается новый индикатор, называемый спектральной энтропией, усиленной эксцессом (KESE), для определения местоположения полос частот неисправности из всей полосы частот спектра, тем самым выделяются импульсы, возбуждаемые неисправностью. Индикатор KESE чувствителен к информации о неисправности в спектральной корреляции и может отделить полосы частот неисправности от всех имеющихся частот. Результаты диагностики численного моделирования были подтверждены при проведении трех серий экспериментальных случаев неисправностей.

В подавляющем большинстве научных публикаций проводится оценочная точность диагностики технического состояния гидравлических машин. В статье [12] представлена методика сравнения экспериментальных данных для диагностики неисправностей на основе сигналов вибрации. Авторы критически анализируют получаемые данные с вибрационных датчиков и предлагают алгоритмическое руководство по проверке результатов экспериментов.

Анализ статей, обзор которых проведен, показал, что большинство исследований в области вибрационной диагностики гидравлического оборудования направлены на улучшение точности получаемых результатов, упрощение и ускорение их обработки. Ведутся работы в области сбора данных для автоматизации диагностики и увеличения сходимости результатов экспериментов. Также разрабатываются различные уникальные методики обработки полученных сигналов, целью которых является улучшение текущих методик измерения и оценки техниче-

ского состояния гидравлического оборудования. Основные трудности, с которыми сталкиваются авторы, связаны с обработкой сигнала после измерения, фильтрацией сигнала от посторонних шумов.

На основе вышеуказанных методов планируется разработка методики для диагностики технического состояния элементов гидропривода в условиях производственной эксплуатации. В каждой гидросистеме есть генератор импульсов давления, есть вращающиеся (совершающие возвратно-поступательное движение) элементы, которые могут быть источником вибрации в различных диапазонах, гидронасосы, гидроцилиндры. Исходя из этого, можно сделать предположение, что амплитуда и частота колебаний могут являться диагностическими сигналами при их детальном рассмотрении и обработке полученного сигнала [14].

В ходе проведения исследовательской работы по изучению возможности осуществления оценки технического состояния гидросистем строительных и дорожных машин планируется использовать прибор для измерения вибрации «Диана-8» с датчиками типа ВК-310А [15, 16]. Изначально планируется расположить датчики на элементах гидросистемы в нескольких плоскостях для получения вибросигнала в различных плоскостях. В последующем извлечь спектры, провести анализ полученных результатов. Измерение сигналов вибрации на заведомо исправных машинах будет служить неким эталоном, с которым в дальнейшем можно проводить сравнение при оценке технического состояния отдельных элементов гидравлических машин и гидросистемы в целом. Это даст возможность создать методику оценки технического состояния технологических машин во время выполнения производственных циклов, что позволит сократить количество внезапных отказов.

Список литературы

1. Пираматов У.А., Пугин К.Г. Совершенствование методов прогностического обслуживания гидропривода путем определения ресурса элементов гидропривода // Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-практической конференции. – Белгород, 2019. – С. 166–169.
2. Пираматов У.А., Пугин К.Г. Повышение эффективности существующих методов диагностирования гидропривода строительно-дорожных машин // Техника и технология транспорта. – 2019. – № 5 (13). – С. 20.
3. Пугин К.Г., Пираматов У.А. Совершенствование методов диагностирования гидросистем гидрофицированных машин // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник материалов III Национальной научно-практической конференции. – Пермь, 2020. – С. 49–53.
4. Piramatov U.A., Pugin K.G. Improving the efficiency of existing methods of diagnosing the hydraulic drive of road-building machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference Interstroyemh – 2019. ISM 2019. – 2020. – P. 012007.
5. Пираматов У.А., Пугин К.Г. Корректировка методов диагностирования гидравлических систем строительно-дорожных машин // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 5. – С. 37–41.
6. Helwig N., Klein S., Schütze A., Identification and quantification of hydraulic system faults based on multivariate statistics using spectral vibration features // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 120. – P. 1225–1228.
7. An intelligent fault diagnosis approach based on Dempster-Shafer theory for hydraulic valves / J. Xiancheng, Y. Ren, H. Tang, C. Shi, J. Xiang // Measurement. – 2020. – Vol. 165. – P. 108129.
8. Tang H., Fu Z., Huang Y., A fault diagnosis method for loose slipper failure of piston pump in construction machinery under changing load // Applied Acoustics. – 2021. – Vol. 172. – P. 107634.
9. He Yu, Hongru Li, Yaolong Li, A novel improved full vector spectrum algorithm and its application in multi-sensor data fusion for hydraulic pumps // Measurement. – 2019. – Vol. 133. – P. 145–161.
10. He Yu, Hongru Li, Yaolong Li, Vibration signal fusion using improved empirical wavelet transform and variance contribution rate for weak fault detection of hydraulic pumps // ISA Transactions. – 2020. – Vol. 107. – P. 385–401.

11. Chaoang Xiao, Hesheng Tang, Yan Ren, A fault frequency bands location method based on improved fast spectral correlation to extract fault features in axial piston pump bearings // *Measurement*. – 2021. – Vol. 171. – P. 108734.

12. Thomas Walter Rauber, Antonio Luiz da Silva Loca, Francisco de Assis Boldt, An experimental methodology to evaluate machine learning methods for fault diagnosis based on vibration signals // *Expert Systems With Applications*. – 2020. – P. 130–139.

13. Fast feature selection using hybrid ranking and wrapper approach for automatic fault diagnosis of motor pumps based on vibration signals / F. de Assis Boldt, T.W. Rauber, F.M. Varejão, M.P. Ribeiro // *IEEE 13th international conference on industrial informatics*. – 2015. – P. 127–132.

14. Чистоклетов А.А., Щелудяков А.М. Результаты сравнительного анализа плавности переключения передач автоматической коробки автомобилей при их эксплуатации в городских условиях // *Грузовик*. – 2019. – № 12. – С. 29–33.

15. Основы измерения вибрации [Электронный ресурс]. – URL: http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml (дата обращения: 14.06.2021).

16. Диана-8: восьмиканальный анализатор вибросигналов [Электронный ресурс]. – URL: <https://vibrocenter.ru/diana8.htm> (дата обращения: 16.06.2021).

References

1. Piramatov U.A., Pugin K.G. Sovershenstvovanie metodov prognosticheskogo obsluzhivaniia gidroprivoda putem opredeleniia resursa elementov gidroprivoda. [Improvement of predictive maintenance methods for a hydraulic drive by determining the resource of hydraulic drive elements]. *Energo-resursosberegaiushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoi i stroitel'noi otrasliakh. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Belgorod, 2019, pp. 166–169.

2. Piramatov U.A., Pugin K.G. Povyshenie effektivnosti sushchestvuiushchikh metodov diagnostirovaniia gidroprivoda stroitel'no-dorozhnykh mashin. [Improving the efficiency of existing methods for diagnosing the hydraulic drive of road construction machines]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta*, 2019, no. S (13), pp. 20.

3. Pugin K.G., Piramatov U.A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniia gidrosistem gidrofitsirovannykh mashin [Improvement of diagnostic methods for hydraulic systems of hydraulic machines]. *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo. Sbornik materialov III Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Perm, 2020, pp. 49–53.

4. Piramatov U.A., Pugin K.G. Improving the efficiency of existing methods of diagnosing the hydraulic drive of road-building machines. V sbornike: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference Interstroyemh – 2019, ISM 2019, 2020, pp. 012007.

5. Piramatov U.A., Pugin K.G. Korrektyrovka metodov diagnostirovaniia gidravlicheskiikh sistem stroitel'no-dorozhnykh mashin [Correction of diagnostic methods for hydraulic systems of road construction machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2019, no. 5, pp. 37–41.

6. Helwig N., Klein S., Schütze A., Identification and quantification of hydraulic system faults based on multivariate statistics using spectral vibration features. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 120, pp. 1225–1228.

7. Xiancheng J., Ren Y., Tang H., Shi C., Xiang J., An intelligent fault diagnosis approach based on Dempster-Shafer theory for hydraulic valves. *Measurement*, 2020, vol. 165, 108129.

8. Tang H., Fu Z., Huang Y., A fault diagnosis method for loose slipper failure of piston pump in construction machinery under changing load. *Applied Acoustics*, 2021, vol. 172, 107634.

9. He Yu, Hongru Li, Yaolong Li, A novel improved full vector spectrum algorithm and its application in multi-sensor data fusion for hydraulic pumps. *Measurement*, 2019, vol. 133, pp. 145–161.

10. He Yu, Hongru Li, Yaolong Li, Vibration signal fusion using improved empirical wavelet transform and variance contribution rate for weak fault detection of hydraulic pumps. *ISA Transactions*, 2020, vol. 107, pp. 385–401.

11. Chaoang Xiao, Hesheng Tang, Yan Ren, A fault frequency bands location method based on improved fast spectral correlation to extract fault features in axial piston pump bearings. *Measurement*, 2021, vol. 171, 108734.

12. Thomas Walter Rauber, Antonio Luiz da Silva Loca, Francisco de Assis Boldt, An experimental methodology to evaluate machine learning methods for fault diagnosis based on vibration signals. *Expert Systems With Applications*, 2020, pp. 130–139.

13. de Assis Boldt F., Rauber T.W., Varejão F. M. & Ribeiro M. P. Fast feature selection using hybrid ranking and wrapper approach for automatic fault diagnosis of motor pumps based on vibration signals. *IEEE 13th international conference on industrial informatics*, 2015, pp. 127–132.

14. Chistokletov A.A., Shcheludjakov A.M. Rezultaty sravnitel'nogo analiza plavnosti perekliucheniia peredach avtomaticheskoi korobki avtomobilei pri ikh ekspluatatsii v gorodskikh usloviakh [The results of a comparative analysis of the smoothness of gear shifting of an automatic transmission of cars during their operation in urban conditions]. *Gruzovik*, 2019, no. 12, pp. 29–33.

15. Osnovy izmereniia vibratsii., available at: http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml (accessed 14 June 2021).

16. Diana-8: vos'mikanal'nyi analizator vibrosignalov, available at: <https://vibrocenter.ru/diana8.htm> (accessed 16 June 2021).

Получено 21.07.2021

Об авторах

Чистоклетов Александр Александрович (Пермь, Россия) – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: blade9595@mail.ru).

Пугин Константин Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные технологии», Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова (Россия, 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23), доктор технических наук, профессор, кафедра «Специальности водного транспорта и управления на транспорте», Волжский государственный университет водного транспорта (Пермский филиал) (Россия, 614060, г. Пермь, бул. Гагарина, 33).

About the authors

Alexander A. Chistokletov (Perm, Russian Federation) – Perm National Research Polytechnic University, post-graduate student (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: blade9595@mail.ru).

Konstantin G. Pugin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Building Technologies, Perm State Agrarian University of Technology named after Academician D.N. Pryanishnikov (23, Petropavlovskaya st., Perm, 614990, Russian Federation), Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Specialties of Water Transport and Transport Management, Volga State Academy of Water Transport, Perm Branch (33, Gagarina st., Perm, 614060, Russian Federation).