

УДК (UDC) 534.87 / 654.92 / 658.58

АКУСТИЧЕСКАЯ КАРТИНА ЗАПУСКА ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ
КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯACOUSTIC PICTURE OF STARTING SCREW COMPRESSORS AS A DIAGNOSTIC
PARAMETER OF TECHNICAL CONDITIONПундик М.А.¹, Пичахчи А.В.², Сидоров В.А.³
Pundik M.A.¹, Pichakhchi A.V.², Sidorov V.A.³¹ – Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского
(Донецк, ДНР, Россия)² – Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (Макеевка, ДНР, Россия)³ – Донецкий национальный технический университет (Донецк, ДНР, Россия)¹ – Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky
(Donetsk, DPR, Russian Federation)² – Donbass National Academy of Construction and Architecture (Makeevka, DPR, Russian Federation)³ – Donetsk National Technical University (Donetsk, DPR, Russian Federation)

Аннотация. Появление новых возможностей по фиксации и анализу шума позволяет использовать визуализацию и анализ звуковых колебаний в качестве диагностических признаков исправности компрессорного агрегата в период запуска - наиболее информативного этапа проявления зарождающихся повреждений. Применение винтовых компрессоров в настоящее время является наиболее рациональным из-за отсутствия ударных процессов, возможности длительной эксплуатации с минимальным объемом операций по техническому обслуживанию, эффективному решению вопросов управления режимами работ, минимальными динамическими нагрузками при запуске и др. Наибольшее распространение нашли винтовые компрессоры с частотой вращения приводного двигателя 3000 об/мин и мощностью 100...300 кВт. Обеспечение длительной работы винтовых компрессоров требует обоснованного принятия решений для восстановления работоспособности на базе данных о фактическом состоянии отдельных элементов механизма. Методы исследования представлены в виде практического анализа уровня шума и виброускорения винтовых компрессоров. Получены акустические и вибрационные параметры запуска агрегата, представлены информационные частоты повреждения основных узлов, а также, частотно-временная спектрограмма запуска. Результаты проведенных акустических исследований запуска компрессорного агрегата, состоящего из винтовых компрессоров фирмы «Sabroe» SAB-163 и SAB-330, составляют основное содержание данной работы. Они позволяют сделать вывод о необходимости реализации трёхуровневой диагностики роторных механизмов для предотвращения внезапных отказов компрессорного агрегата.

Ключевые слова: шум акустический, параметры диагностические, компрессор винтовой.

Annotation. The emergence of new opportunities for fixing and analyzing noise allows us to perform visualization and analysis of sound vibrations as diagnostic signs of the serviceability of the compression unit during the start-up period, the most informative stage of the manifestation of incipient damage. The use of screw compressors, at present, is the most rational due to the absence of shock processes, the possibility of long-term operation with a minimum amount of maintenance operations, the effective solution of issues of managing work schedules, minimal dynamic loads at startup, etc. Screw compressors with a frequency of rotation of the drive motor 3000 rpm and a power of 100...300 kW have found the greatest distribution. Ensuring long-term operation of screw compressors requires reasonable decision-making to restore operational capability on the basis of data on the actual condition of individual elements of the mechanism. The research methods are presented in the form of a practical analysis of the noise level and vibration acceleration of screw compressors. Acoustic and vibration parameters of the unit start-up were obtained, information frequencies of damage to the main nodes were presented, as well as a time-frequency spectrogram of the start-up. The results of the conducted acoustic studies of the start-up of the compressor unit consisting of Sabroe screw compressors SAB - 163 and SAB - 330 constitute the main content of this work, which allow us to conclude that it is necessary to implement three-level diagnostics of rotary mechanisms to prevent sudden failures of the compression unit.

Keywords: acoustic noise, diagnostic parameters, screw compressor

<i>Дата получения статьи:</i>	10.10.2023	†	<i>Date of manuscript reception:</i>	10.10.2023
<i>Дата принятия к публикации:</i>	05.12.2023	†	<i>Date of acceptance for publication:</i>	05.12.2023
<i>Дата публикации:</i>	25.12.2023	†	<i>Date of publication:</i>	25.12.2023

Сведения об авторах:

Пундик Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского (ДонНУЭТ)»,
e-mail: mihailpundik93@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-9488-7209

Пичахчи Александр Владимирович – ассистент ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА)»,
e-mail: pichakhchi.a.v@yandex.ru.

ORCID: 0009-0004-2302-0845

Сидоров Владимир Анатольевич – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ)»,
e-mail: sidorov_va58@mail.ru.

ORCID: 0000-0001-6794-7838

Authors' information:

Mihail A. Pundik – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky (DonNUET),
e-mail: mihailpundik93@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-9488-7209

Aleksandr V. Pichakhchi – Assistant at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA),
e-mail: pichakhchi.a.v@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-2302-0845

Vladimir A. Sidorov – Doctor of Technical Sciences, Professor of Donetsk National Technical University (DonNTU),
e-mail: sidorov_va58@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6794-7838

1. Введение

В гипотезе об эволюционном развитии человека от пещерного жителя до пользователя смартфона звук, на каждом этапе, является одним из основных параметров обеспечения безопасности, передачи информации, музыкальном восприятии и др. Шумы механизмов в этом перечне занимают одно из первых мест – различение шума приближающейся опасности, изменения в характере работы определяются субъективно, однако обеспечивают определенную информацией.

В исследованиях, обзор которых приведен в [1], в качестве диагностических параметров работающего оборудования исследовались акустические и вибрационные физические поля. Эти работы были посвящены созданию принципов виброакустической диагностики механизмов, определению границ категорий технического состояния, разработке аппаратуры для виброконтроля. Одновременно проводились прикладные исследования по изучению изменения состояния элементов механизма, в том числе, подшипников качения [2], зубчатых передач [3] и др. Рассмотрение вопросов вибрации стало основным содержанием справочника [4]. Результаты исследований, связанных с разработкой принципов диагностирования роторного механического оборудования, работающего в длительном режиме, с использо-

ванием параметров вибрации и спектрального анализа нашли отражение в работе [5]. В [6] рассматривается необходимость комплексного подхода к оценке технического состояния механизмов при использовании взаимодополняющих диагностических параметров.

Акустическая картина работающего механизма на первых этапах была единственным источником информации о техническом состоянии. Использование технических стетоскопов было развитием данного метода диагностирования, развивая уровень субъективного индивидуального восприятия шумов. Акустическая диагностика механизмов [7-9] была одним из первых направлений при формировании технической диагностики как науки. Этому способствовала универсальность данного метода и применимость в различных областях знаний [10-14]. При этом отмечалось, что волновая картина звука имеет сложный интерференционный характер.

Это послужило основной причиной активного развития методов виброметрии позволивших выполнять локализацию повреждений и проводить объективную оценку уровня механических колебаний приборными методами, заняв приоритетное положение и получив широкое развитие в виде портативных виброметров, анализаторов вибрации и сборщиков данных, стационарных систем.

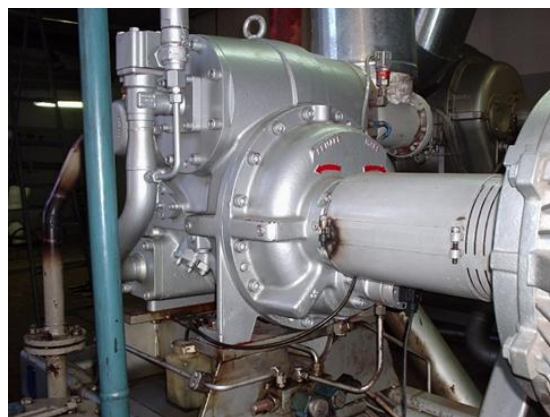
В последние годы благодаря развитию электронных технологий наметилась тенденция к использованию шума как диагностического параметра при оценке состояния электрических и автомобильных двигателей [15-17]. Возможности современных подходов к регистрации, анализу и формированию акустических сигналов обеспечивают диагностику значительными массивами данных, обработка которых представляет важную проблему [18-22].

2. Основная часть

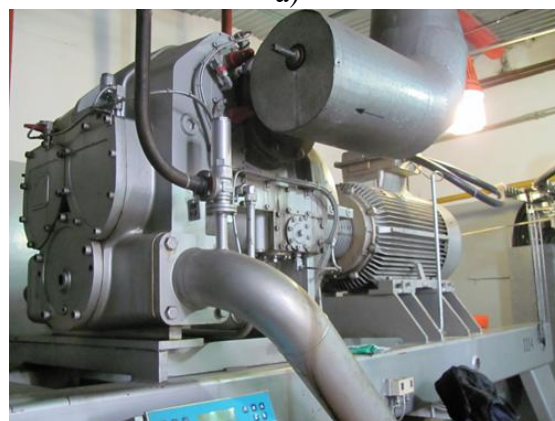
В настоящее время появляются новые возможности по фиксации и анализу шума в виде доступных диктофонов (Olympus), компьютерных программ для визуализации и анализа звуковых колебаний (Sonic Visualiser), шумомеров. При использовании этого оснащения было проведено исследование информативности звуковых шумов при оценке технического состояния винтовых компрессоров. В качестве объекта исследования использовался двухступенчатый компрессорный агрегат, состоящий из винтовых компрессоров фирмы «Sabroe» SAB-163 [23] и SAB-330 [24]. Исследовался период запуска как наиболее информативный в диагностическом плане этап проявления зарождающихся повреждений.

В конструкции указанных маслозаполненных винтовых компрессоров вращение от привода сообщается одному из роторов - ведущему. Крутящий момент к ведомому ротору передается через уплотнитель, которым служит масло. Компрессорное масло, впрыскиваемое внутрь винтового блока, обеспечивает отсутствие контакта между двумя роторами, а также смазывание их подшипников и отвод тепла, выделяющегося при сжатии. Масло затем выделяется из воздушно-масляной смеси встроенной в компрессор системой сепарации, охлаждается и возвращается в винтовой блок (рис. 1).

Основные технические данные, связанные с определением информативных частот возможных повреждений компрессоров, приведены в табл. 1. Валы компрессора SAB-163 установлены на подшипниках качения



а)



б)

Рис. 1. Компрессорный агрегат:
а) винтовой компрессор SAB-163;
б) винтовой компрессор SAB-330

(табл. 2), валы компрессора SAB-30 установлены на подшипниках скольжения.

Различение шумов повреждений данных винтовых компрессоров может быть доступно человеку. Однако при работающем компрессорном агрегате тональность шумов практически не различима. Задача решается относительно просто при наличии анализатора вибрации, что требует временных затрат по проведению измерений и опыта квалифицированного специалиста при постановке диагноза. Первым уровнем предупреждения об отклонении от номинального (исходного) является технического состояния изменение характера шума при запуске, обосновать это изменение при помощи ранее перечисленных инструментов является целью исследования.

Для изменения уровней звука, скорректированных по шкале А (дБА), использовался цифровой шумомер. Наиболее информативным при диагностировании является пере-

Таблица 1

Частоты вращения валов компрессоров

Компрессор	Число зубьев ведущего вала	Частота вращения ведущего вала, об/мин (Гц)	Число зубьев ведомого вала	Частота вращения ведомого вала, об/мин (Гц)	Зубцовая частота, Гц
SAB-163	6	3000 (50)	4	4500 (75)	300
SAB-330	4	3000 (50)	6	2000 (33,3)	200

Таблица 2

Информативные частоты повреждений подшипников качения компрессора SAB-163

Подшипник	Частота вращения вала, Гц	Повреждения наружного кольца, Гц	Повреждения внутреннего кольца, Гц	Повреждения тел качения, Гц	Повреждения сепаратора, Гц
NU 2312 ECP	50	260	390	120	20
QJ 312 N2	50	215	335	102	20
NU 2311 EC	75	387	588	175	30
QJ 311 N2	75	324	501	156	30

ходной процесс. Поэтому первым уровнем исследования стал процесс измерения уровня звука при запуске компрессоров. Точка измерения располагалась на уровне 1 м на равном удалении от компрессоров. Вначале включался маслонасос компрессора SAB-163, затем двигатель компрессора с последующим переключением схемы соединения обмоток, затем происходило включение компрессора SAB-330 и выход на заданный режим работы. Каждый из этих этапов имеет характерные отличия по амплитуде и стабильности шумов, что позволяет после накопления статических данных построить эталонный образ исправного механизма. Установлена недостаточная дискретизация фиксации процесса запуска с периодичностью 1,0 с. Исходя из преобладающей частоты вращения 50 Гц для построения синусоиды обороной частоты необходима периодичности 2 мс, а для фиксации состояния винтовой пары- минимально 500 мкс. При этом появляется возможность идентифицировать отклонения в работе электромеханической системы, системы автоматического регулирования и технологической системы без детализации причин и без постановки точного диагноза (рис. 2).

Измерения, выполненные по шкале С (дБС), показали некоторые отличия по этапам запуска (рис. 3). Следует отметить, что



Рис. 2. Изменение уровня шума по этапам запуска компрессорного агрегата

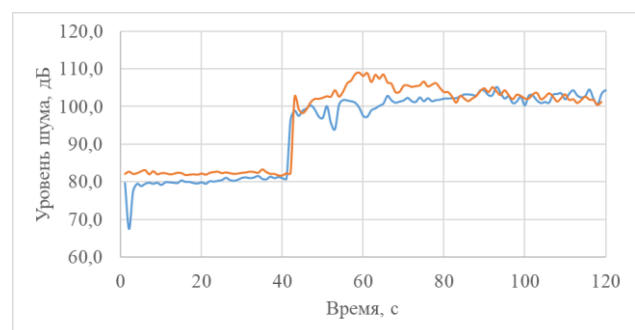


Рис. 3. Изменение уровня шума по этапам запуска компрессорного агрегата (синий график – шкала дБА; желтый график – шкала дБС)

каждый запуск имеет свои особенности, связанные с отличиями внешних условий и человеческим фактором. Запуск компрессора, имеющего неисправности, точно идентифицируется опытным машинистом и должен

найти отражение в изменении звуковой картины запуска.

Диагностические симптомы в данном случае аналогичны симптомам анализа временной формы вибрационного сигнала (рис. 4): амплитуда и стабильность повторения, основная форма и др. Это позволяет с еди-

ных позиций проводить анализ временных реализаций звуковых характеристик на указанных этапах (рис. 5). При этом преимущества анализа спектрограммы пиковой частоты при отображении переходных процессов становятся очевидными.

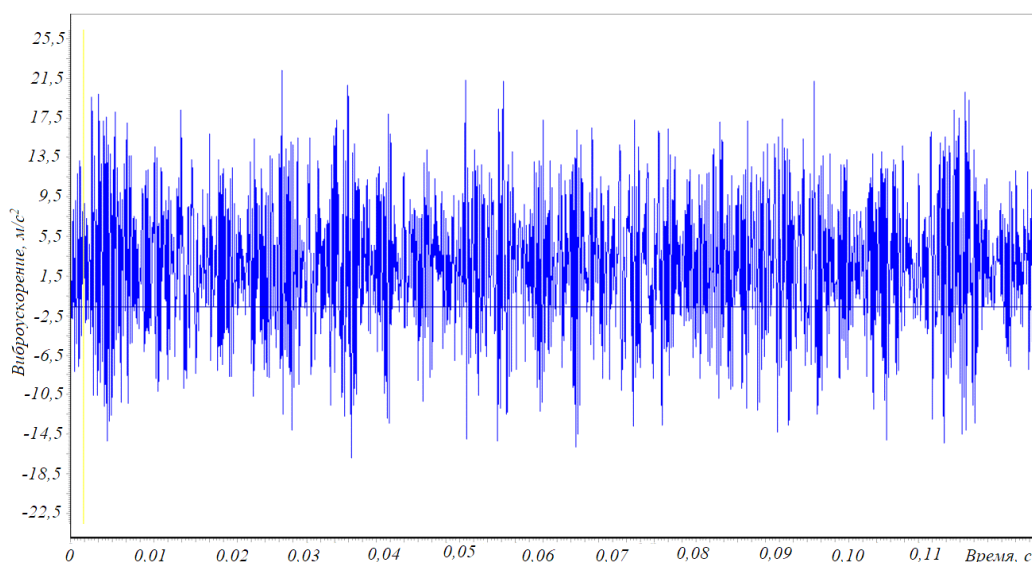


Рис. 4. Временная реализация виброускорения подшипника ведомого вала компрессора SAB-163

3. Заключение

Проведенные исследования указывают на необходимость реализации трёхуровневой системы диагностирования:

- ранние отклонения без точной идентификации могут быть зафиксированы по изменению звуковой картины при запуске;
- идентификация повреждений и определение трендов их развития оптимальна при использовании виброметрии, включая изме-

рение общего уровня, анализ спектров, огибающей и временной реализации вибрационного сигнала;

- определение причин повреждения проводится после разборки компрессора при изучении видов износа на деталях компрессора.

Анализ изменения звуковой картины требует использования математического аппарата обработки данных, что составляет направление дальнейших исследований.

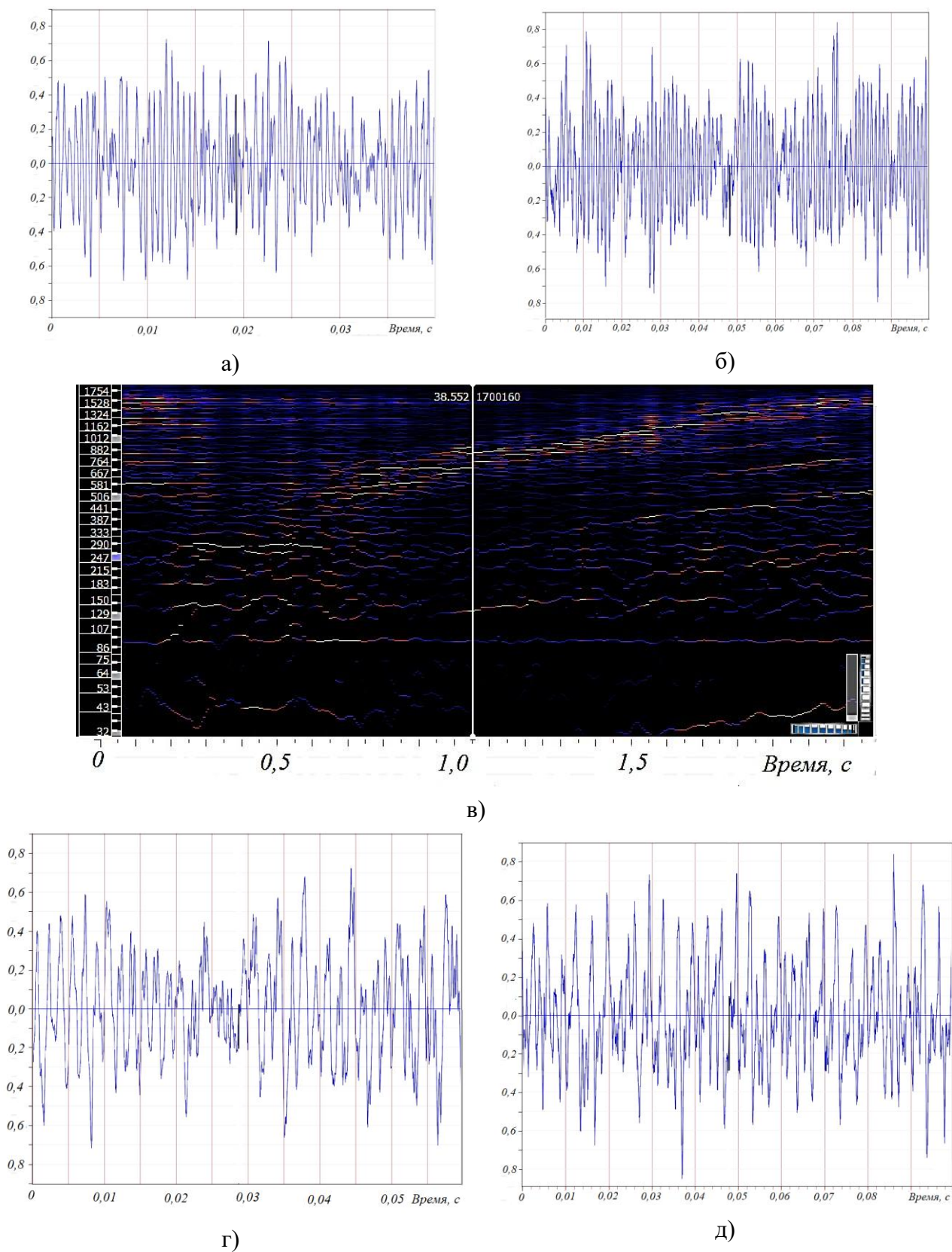


Рис. 5. Временные реализации звукового сигнала по этапам запуска компрессорного агрегата: а - работа маслонасоса; б - включение двигателя компрессора SAB-163; в - изменение спектрограммы пиковой частоты при запуске двигателя SAB-163; г - момент переключения фаз; д - включение двигателя компрессора SAB-330

Список литературы

1. Генкин М.Д.Ю Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов Москва: Машиностроение, 1987. 288 с.
2. Явленский А.К., Явленский К.Н. Теория динамики и диагностики систем трения качения. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 184 с.
3. Миникаев А.Ф., Долговская О.В., Пронин В.А. К вопросу протечек компримируемой среды в рабочей части однороторного винтового компрессора (ВКО) с окружной формой зуба // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 43-46.
4. Вибрации в технике: Справочник: в 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э. Э. Лавендела. 1981. 509 с.
5. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва: Машиностроение, 1996. 276 с.
6. Cowan R.S., Winer W.O. Machinery Diagnostics / Czichos H. (Ed.). Handbook of Technical Diagnostics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. 387–410 pp.
7. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. Москва: Машиностроение, 1971. 223 с.
8. Артоболовский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. Москва: Наука, 1979. 295 с.
9. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / М. Д. Генкин, Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова, Е. И. Хомяков. – Москва : Наука, 1984. – 119 с.
10. Физическая акустика / под ред. У. Мэзона. Москва: Мир, 1966-1970. 8 т.
11. Булатова Ж.М. Волкова Е.А., Дубров Е.Ф. Акустический каротаж. Ленинград: Недра. Ленингр. отд-ние, 1970. 264 с.
12. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. Москва: Наука, 1991. 303 с.
13. Архипов А.Г. Разработка метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля: спец. 05.15.14 «Технология и техника геологоразведочных работ»: автореферат дис. ... кандидата технических наук / Архипов Алексей Германович. –

References

1. Genkin M. D. *Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mehanizmov* [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 288 p. (In Russian)
2. Jawlensky A.K. *Teoriya dinamiki i diagnostiki sistem treniya kacheniya* [Theory of dynamics and diagnostics of rolling friction systems]. Leningrad: Izd-vo Leningr. Un-ta, 1983. 184 p. (In Russian)
3. Minikaev A.F. On the issue of leaks of the compressed medium in the working part of a single-rotor screw compressor with a circumferential tooth shape. *Vestnik Mejdunarodnoi akademii holoda*, 2016, No. 3, pp. 43-46. (In Russian)
4. *Vibratsii v tekhnike* [Vibrations in technology]: Handbook. v 6 t. T. 4. *Vibracionnie processi i mashini*. 1981. 509 p. (In Russian)
5. Shirman A.R. *Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mehanicheskogo oborudovaniya* [Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment]. Moscow, Mashinostroenie, 1996. 276 p. (In Russian)
6. Czichos H. Handbook of Technical Diagnostics. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013. 387-410 pp.
7. Pavlov B.V. *Akusticheskaya diagnostika mehanizmov* [Acoustic diagnostics of mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 223 p. (In Russian).
8. Artobolevskij I. I. *Vvedenie v akusticheskuyu dinamiku mashin* [Introduction to Acoustic Dynamics of Machines]. Moscow, Nauka, 1979. 295 p. (In Russian).
9. Genkin M.D. *Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayuschih defektov* [Vibroacoustic diagnostics of incipient defects]. Moscow, Nauka. 1984. 119 p. (In Russian).
10. Physical acoustics. Moscow, Mir. 1966-1970. 8 vol.
11. Bulatova Zh.M. [Acoustic logging]. – Leningrad, Nedra, 1970. 264 p. (In Russian).
12. Gusev V. E. *Lazernaya optoakustika* [Laser optoacoustics]. Moscow, Nauka,

Санкт-Петербург, СПГГИ, 1993. 21 с.

14. Лямшев Л. М. Радиационная акустика. Москва: Наука: Изд. фирма «Физ.-мат. Лит», 1996. 301 с.

15. Дрейзин В.Э., Касем М.М., Сабельников Д.С. Акустическая диагностика автомобильных двигателей. Анализ возможностей и теоретические и практические предпосылки // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №4. С. 48-56.

16. Касем М.М. Системный анализ акустических шумовых сигналов автомобильных двигателей для определения их технического состояния: спец. 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)»: дис. ... кандидата технических наук / Касем Муаммар Мохаммед Салех. Курск, 2009. 144 с.

17. Куделин Н. В. Определение состояний электродвигателя и анализ акустических шумов // Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2018. №3 (19).

18. Рыбочкин А.Ф., Яковлев А.И. Диагностирование состояний объектов по издаваемому ими акустическому шуму // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 7(99). С. 89-101.

19. Савельев С.В., Мохсен Ш.А.И., Рыбочкин А.Ф. Программа для анализа и кодирования акустических шумов // Свидетельство на программу № 2012617781.

20. Кинтцель Т. Руководство программиста по работе со звуком. Москва: ДМК Пресс, 2000. 432 с.

21. Касем М.М., Дрейзин В.Э.. Программа для предварительной обработки записей шумов автомобильных двигателей с целью построения сигналы диагностики их состояний // Свидетельство о официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009612173.

22. Жернаков С. В. Нейросетевые технологии для диагностики технического состояния авиационных двигателей // Информационные технологии. 2007. № 8. С. 22-29.

23. Компрессор SAB-163. [Электронный ресурс] // Cooltech. Холодильное компрессорное оборудование. – Режим доступа: <https://coolref.ru/catalog/spare-parts/screw/sab-163/>

24. Компрессор SAB-330 [Электронный ресурс] // HOS BV. – Режим доступа:

1991. 303 p. (In Russian).

13. Arkhipov A. G. *Razrabotka metoda uskorennykh ispitaniy almaznogo porodorazruayuschego instrumenta na osnove spektralnogo analiza akusticheskogo polya* [Development of a method for accelerated testing of diamond rock cutting tools based on spectral analysis of the acoustic field]. St. Petersburg, SPGGI, 1993. 21 p. (In Russian).

14. Lyamshev L. M. *Radiacionnaya akustika* [Radiation acoustics]. Moscow, Nauka, 1996. 301 p. (In Russian).

15. Dreizin V. E. Acoustic diagnostics of automobile engines. Analysis of capabilities and theoretical and practical prerequisites. *Pribori i sistemi. Upravlenie, kontrol, diagnostika*, 2009, No.4, pp. 48-56. (In Russian).

16. Kassem M.M. *Sistemnyy analiz akusticheskikh shumovih signalov avtomobilnih dvigatelei dlya opredeleniya ih tehnikeskogo sostoyaniya* [System analysis of acoustic noise signals of automobile engines to determine their technical condition]. Kursk. 2009. 144 p. (In Russian).

17. Kudelin N.V. *Opredelenie sostoyanii elektrodvigatelya i analiz akusticheskikh shumov* [Determination of electric motor states and analysis of acoustic noise]. *Auditorium*, 2018, No.3 (19). (In Russian).

18. Rybochkin A.F. Diagnosis of the states of objects based on the acoustic noise they emit. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2011, No.7 (99), pp. 89-101. (In Russian).

19. Savelyev S.V. *Programma dlya analiza i kodirovaniya akusticheskikh shumov* [Program for analysis and coding of acoustic noise]. The Certificate for program No. 2012617781. (In Russian).

20. Kintzel T. *Rukovodstvo programmista po rabote so zvukom* [Programmer's Guide to Working with Sound Text]. Moscow, DMK Press, 2000. 432 p. (In Russian)

21. Kasem M.M. *Programma dlya predvaritelnoi obrabotki zapisei shumov avtomobilnih dvigatelei s celyu postroyeniya signali diagnostiki ih sostoyanii* [Program

<https://www.hosbv.com/product/3075/compressors/Sabroe-SAB-330-L.html>.

† for preliminary processing of noise recordings of automobile engines in order to construct diagnostic signals for their states]. The Certificate of official computer programs No. 2009612173. (In Russian).

† 22. Zhernakov S.V. Neural network technologies for diagnosing the technical condition of aircraft engines. *Informacionnie tehnologii*, 2007, No. 8, pp. 22-29. (In Russian).

† 23. Kompessor SAB-163 (website: <https://coolref.ru/catalog/spare-parts/screw/sab-163/>)

† 24. Kompessor SAB-330 (website: www.hosbv.com/product/3075/compressors/Sabroe-SAB-330-L.html).