

УДК 534.647:621.515.4

## Обзор методов вибрационного диагностирования винтовых компрессоров

Д-р техн. наук В. А. СИДОРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>sidorov\_va@ukr.net

Донецкий национальный технический университет

М. А. ПУНДИК<sup>2</sup>, канд. техн. наук В. В. КАРНАУХ<sup>3</sup>,

канд. техн. наук Д. К. КУЛЕШОВ<sup>4</sup>

<sup>2</sup>mihailpundik@gmail.com, <sup>3</sup>posco0629@gmail.com, <sup>4</sup>kuleschov\_denis@mail.ru

Донецкий национальный университет экономики и торговли имени М. Туган-Барановского

*Целью проводимого исследования явилось методологическое объединение особенностей диагностирования механической части винтовых компрессоров, с рассмотрением элементов конструкции, средств измерения вибрации и методов вибрационного контроля технического состояния. На основании анализа литературных источников проведено структурирование особенностей диагностирования механизмов с использованием ГОСТ ISO 1816-1-97. В изложенном материале приведены практические примеры анализа спектрограмм виброускорения и виброскорости. Составлена схема возможного пути прохождения вибрационного сигнала от источника на корпус герметичного вертикального винтового компрессора. Обозначены фиксированные точки измерения вибрационного сигнала. Результатом данной работы является обоснование выбора направлений дальнейших исследований в области вибрационного анализа. Составлены требования к индивидуальному диагностированию герметичных вертикальных винтовых компрессоров, которые включают в себя решение вопросов: оценки технического состояния по общему уровню вибрации на основе моделирования развития повреждений; распознавания технического состояния по спектральным картинкам при потере масляного слоя между винтами; учет степени затухания вибрационного сигнала на информационных частотах возможных повреждений.*

**Ключевые слова:** винтовой компрессор, вибрация, виброакустическая диагностика, точки измерения вибрации, спектральный анализ, анализ временного сигнала, герметичный вертикальный винтовой компрессор.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 04.03.2019, принята к печати 20.06.2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-3-29-37

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Сидоров В. А., Пундик М. А., Карнаух В. В., Кулешов Д. К. Обзор методов вибрационного диагностирования винтовых компрессоров // Вестник Международной академии холода. 2019. № 3. С. 29–37.

## Review of methods for vibration diagnostics of screw compressor

D. Sc. V. A. SIDOROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>sidorov\_va@ukr.net

Donetsk National Technical University

M. A. PUNDIK<sup>2</sup>, Ph. D. V. V. KARNAUKH<sup>3</sup>, Ph. D. D. K. KULIESHOV<sup>4</sup>

<sup>2</sup>mihailpundik@gmail.com, <sup>3</sup>posco0629@gmail.com, <sup>4</sup>kuleschov\_denis@mail.ru

Donetsk National University of Economics and Trade named after M. Tugan-Baranovsky

*The aim of the work is the methodological unification of all the features of diagnosing mechanical part of screw compressors, with the consideration of all the features of the design, vibration measurement tools, and methods of vibration control of the technical state. A literature review is carried out which structures all the features of diagnosing mechanisms using ISO 1816-1-97 State Standard. In the material presented practical examples of the analysis of the acceleration and vibration velocity spectrograms are given. A scheme of the possible path of the vibration signal from the source to the body of a sealed vertical screw compressor is drawn up. Fixed points of measurement of the vibration signal are indicated. The result of this material is the justification and direction of further research in the field of vibration analysis. The requirements for individual diagnostics of sealed vertical screw compressors, which includes the solution of the following issues: assessment of the technical condition of the overall level of vibration on the basis of modeling the development of damage, recognition of the technical condition of the spectral patterns with the loss of the oil layer between the screws; and taking into account the degree of attenuation of the vibration signal at the information frequencies of possible damage are formulated.*

**Keywords:** screw compressor, vibration, vibroacoustic diagnostics, vibration measurement points, spectral analysis, time signal analysis, sealed vertical screw compressor.

**Article info:**

Received 04/03/2019, accepted 20/06/2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-3-29-37

Article in Russian

**For citation:**

Sidorov V. A., Pundik M. A., Karnaukh V. V., Kulieshov D. K. Review of methods for vibration diagnostics of screw compressor. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 3. p.29–37.

**Введение**

Техногенная безопасность сложных технических систем обеспечивается безотказностью отдельных компонентов. Одним из таких компонентов является механическое оборудование, представленное компрессорами в системах кондиционирования и охлаждения: поршневыми, винтовыми, спиральными и др. 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.

Преобладание процедур измерения над процедурами контроля является особенностью диагностирования механических систем. Наиболее информативным диагностическим параметром для механизмов роторного типа является измерение параметров вибрации, базирующееся на фундаментальной работе [1]. Теоретическое решение вопросов виброметрии позволило использовать полученные результаты при оценке технического состояния механических систем. В качестве диагностических параметров исследовались акустические и вибрационные физические поля [2...5]. Эти работы посвящены разработке принципов виброакустической диагностики механизмов, определению границ категорий технического состояния, разработке аппаратуры для виброконтроля. Одновременно проводятся прикладные исследования по изучению изменения состояния элементов механизма: подшипников качения [6, 7], зубчатых передач [8, 9].

Рассмотрение вопросов вибрации стало основным содержанием справочника «Вибрация в технике» под редакцией Челомея В. Н. [10]. Разработка принципов диагностирования роторного механического оборудования, работающего в длительном режиме с использованием параметров вибрации и спектрального анализа — основное содержание работ Русова В. А., Ширмана А. Р., Гольдина А. С., Баркова А. В., Барковой Н. А. и др. [11–18]. В работах Коллакота Р. А., Голуба Е. С. и др. рассматривается необходимость комплексного подхода к оценке технического состояния механизмов при использовании взаимодополняющих диагностических параметров [19–22].

Реализация теоретических положений, развитие элементной базы привели к появлению портативных

средств для измерения вибрации [23], анализаторов вибрации [24], стационарных систем [25, 26]. Необходимо отметить появление большого перечня стандартов по технической диагностике [27, 28] и по нормированию параметров вибрации, среди которых наибольшее распространение получил ГОСТ ИСО 10816–1–97. «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях» [29].

**Постановка задачи**

ГОСТ ИСО 10816–1–97 определяет основные требования к проведению измерений параметров виброскорости, но не может методологически объединить все особенности диагностируемых механизмов. В данной работе предполагается рассмотреть особенности конструкции современных винтовых компрессоров, средства измерения вибрации, методы вибрационного контроля состояния.

Целью настоящего исследования является формирование направления дальнейших разработок в области вибрационного анализа герметичных вертикальных винтовых компрессоров.

**Методика исследования**

Решение поставленной задачи проводится с помощью данных, представленных в литературных источниках, с использованием практических частных случаев.

Винтовой компрессор — это механизм [30], состоящий из пары роторов сложной объемной винтовой конфигурации вращающихся в корпусе, имеющем окна всасывания и нагнетания (рис. 1). Роторы имеют различное число зубьев, что определяет снижение или повышение частоты вращения ведомого ротора. Нагрузка от роторов воспринимается осевыми и радиальными подшипниками. В маслозаполненных винтовых компрессорах крутящий момент от привода через соединительную муфту или ременную передачу сообщается только одному из роторов — ведущему. Синхронизирующая передача между роторами отсутствует. К ведомому ротору вращающий момент передается через демпфирующий элемент, 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. От степени износа рабочей части поверхности винтов зависит производительность винтовых компрессоров.

Смазывание жидким маслом обеспечивает: отсутствие металлического контакта между зубьями роторов,

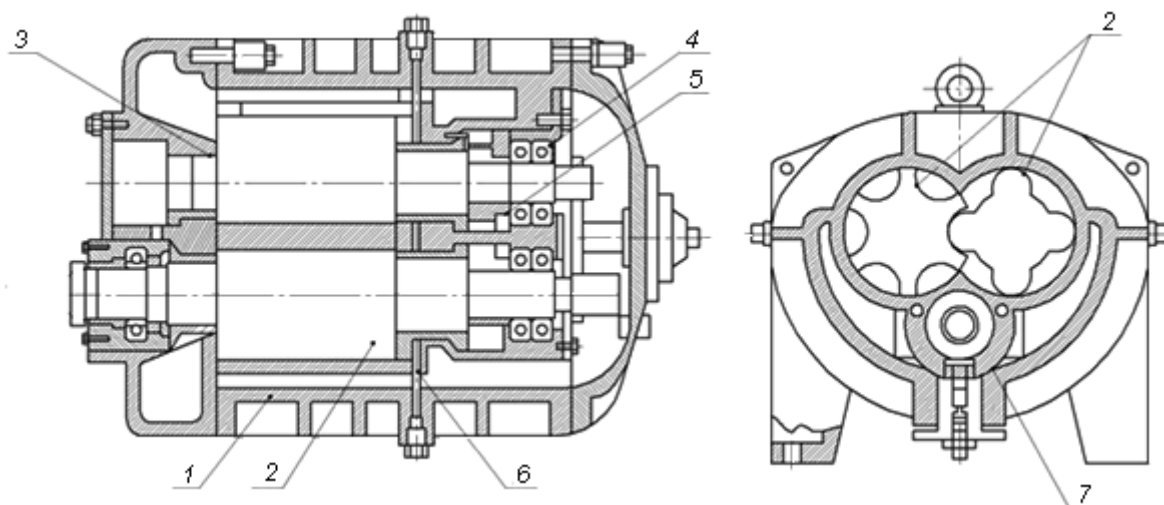


Рис. 1. Общий вид винтовой компрессорной установки: 1 — корпус компрессора; 2 — роторы компрессора; 3 — подшипники скольжения; 4 — радиально-упорные шарикоподшипники; 5 — разгрузочный поршень; 6 — сменная торцевая подставка

Fig. 1. General view of screw compressor unit: 1 — compressor housing; 2 — compressor rotors; 3 — sliding bearings; 4 — angular contact ball bearings; 5 — unloading piston; 6 — replaceable end stand

уменьшение коэффициента трения подшипников, отвод тепла и продуктов износа из зоны трения. На протяжении всего процесса сжатия, в рабочую камеру компрессора впрыскивается масло, которое имеет постоянную начальную температуру 30...45 °С.

Большинство повреждений приводят к изменению картины механических колебаний. Поэтому, вибрационный контроль является одним из наиболее информативных методов, при техническом диагностировании винтового компрессора. Достоверность поставленных диагнозов, определяется выбором контрольных точек, аппаратурой измерения, выбранным методом вибрационного анализа и критериями для определения категорий технического состояния.

Точки измерения вибрации определяются требованиями ГОСТ ИСО 10816-1-97. Согласно данному стандарту, на каждой подшипниковой опоре необходимо провести измерения в трех направлениях: вертикальном, поперечном и осевом. Для оценки технического состояния, горизонтально установленного винтового компрессорного агрегата, потребуется провести измерения в 6-ти контрольных точках, схемы расположения которых, отдельно для двигателя и компрессора показаны на рис. 2.

Следует учитывать следующие рекомендации:

- установка датчика проводится максимально близко к подшипнику;
- необходимо обеспечить плотное прилегание датчика к поверхности объекта;
- нельзя устанавливать датчик на кожухах двигателя, защитных щитках.

Измерение вибрационных параметров в настоящее время осуществляется, в основном, за счет преобразования механических колебаний в электрический сигнал при помощи пьезоэлектрических датчиков. Температурный диапазон измерения 30...80 °С. Частотный диапазон определяется амплитудно-частотной характеристикой датчика и способом крепления. Наиболее оперативное крепление, при помощи магнита, снижает верхний частотный диапазон до 5000 Гц. Крепление при помощи

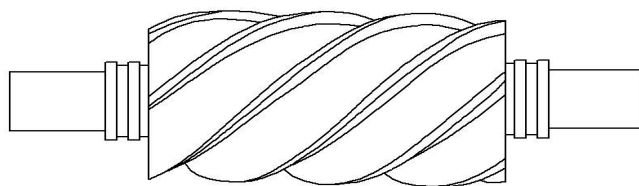


Рис. 2. Геометрический профиль рабочего винта

Fig. 2. Geometric profile of the working screw

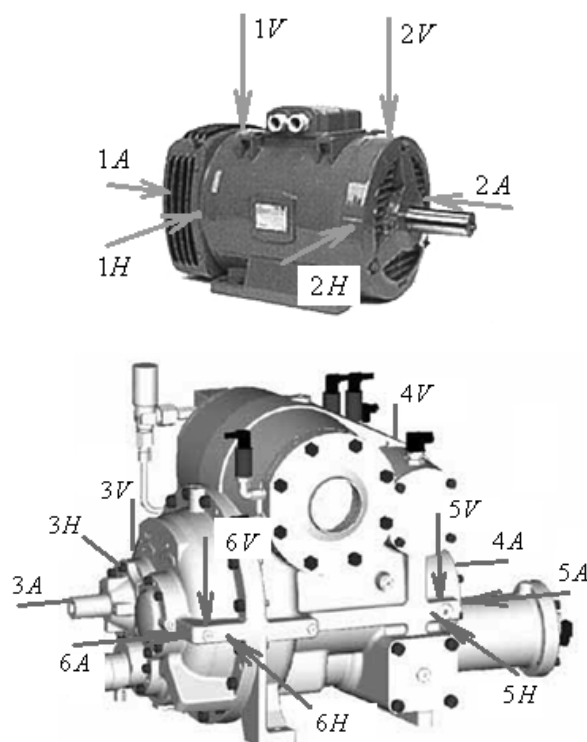


Рис. 3. Схемы расположения контрольных точек измерения вибрации для двигателя и компрессора на горизонтально установленном винтовом компрессорном агрегате

Fig. 3. Location of control vibration measurement points for engine and compressor on a horizontally mounted screw compressor unit

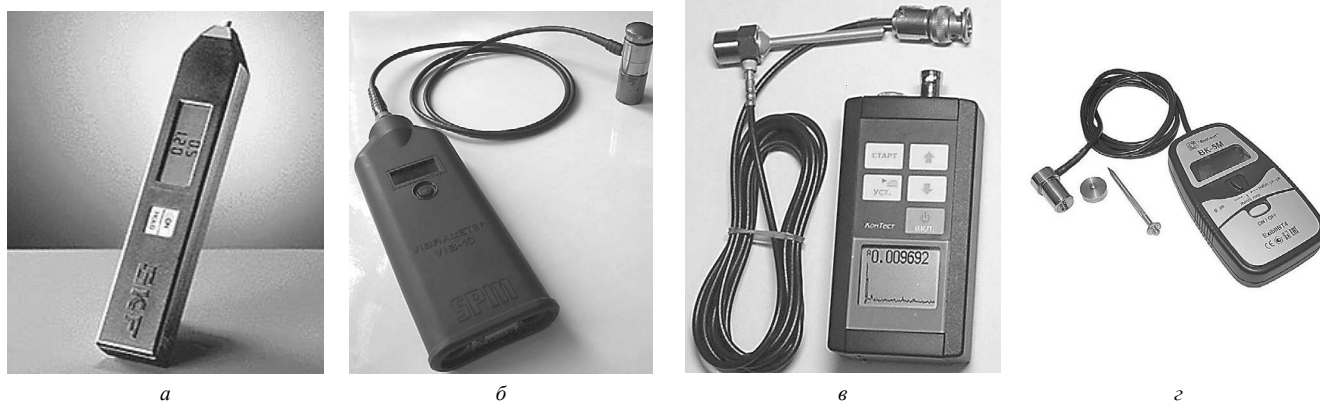


Рис. 4. Портативные приборы: а — виброметр Vibration Penplus CMVP 50 SKF; б — виброметр VIB-10; в — виброметр 107B; г — виброметр BK-5M

Fig. 4. Portable device: а — Vibration Penplus CMVP 50 SKF vibrometer; б — VIB-10 vibrometer; в — 107B vibrometer; г — BK-5M vibrometer

шпильки требует предварительных работ по подготовке мест измерения.

Средства технического диагностирования, используемые для диагностики механического оборудования, по уровню решаемых задач и приборной реализации можно разделить на портативные, анализаторы и встроенные системы.

Портативные средства реализуют измерение одного или нескольких диагностических параметров. Характеризуются малыми габаритами (рис. 4). Преимущества: быстрота процесса измерения, простое обслуживание и управление, оперативное и наглядное получение информации в виде одиочного результата, низкая стоимость. Область применения — оперативный контроль технического состояния оборудования работниками ремонтных служб и технологическим персоналом.

Анализаторы позволяют выполнить детальный анализ диагностических параметров. Полученная информация позволяет обнаружить повреждения на ранней стадии развития (рис. 5). Переносной прибор предназначен для сбора и предварительного анализа, а компьютер и программное обеспечение — для спектрального анализа и обзора трендов. Применение анализаторов оправдано при специализации процессов контроля, высокой квалификации специалистов, необходимости обеспечения качества проводимых измерений. Область применения — специализированные подразделения промышленных

предприятий по экспертизе технического состояния, наладке механического оборудования.

Встроенные системы используются при необходимости постоянного контроля технического состояния оборудования. Основные задачи: защита оборудования от ненормативных режимов работы, мониторинг технического состояния, диагностирование состояния оборудования, использование комплекса диагностических параметров. Основные направления развития: контроль комплекса диагностических параметров; использование персональных компьютеров при обработке однотипной информации; блочный принцип построения; универсальность. В настоящее время для диагностирования вибрационного состояния винтовых компрессоров встроенные системы не используются.

Общий уровень вибрации позволяет определить категорию технического состояния механизма в целом и отдельных элементов. В исправном состоянии винтовые компрессоры являются полностью уравновешенными, имеют малый уровень вибрационных параметров и могут работать на легком или податливом фундаменте. Источниками вибрации винтовых компрессорных агрегатов являются вынуждающие силы электромагнитного, механического и аэрогидродинамического происхождения. Основными источниками вибрации механического происхождения являются роторы электродвигателя и компрессора, а также их подшипники.

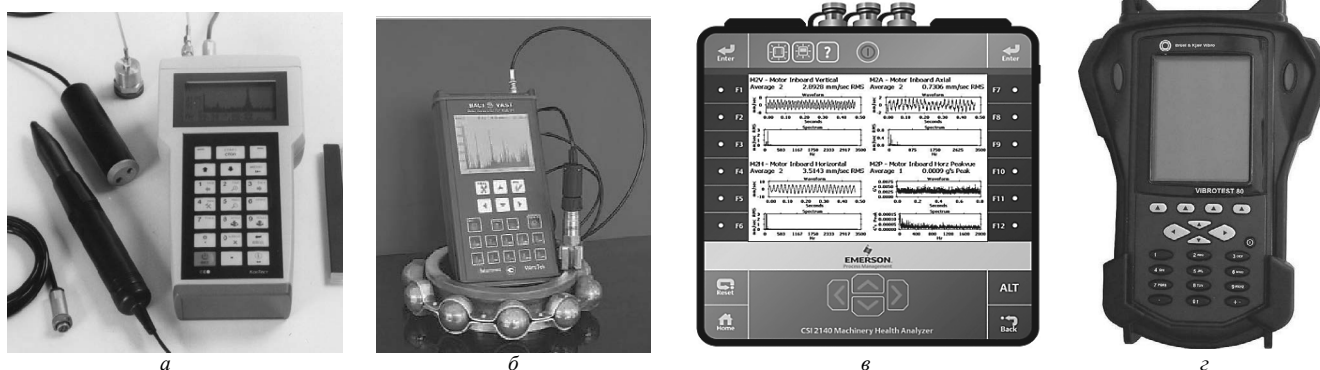


Рис. 5. Анализаторы вибрации: а — 795M; б — CD-21; в — VIBROTEST 80; г — Emerson

Fig. 5. Vibration analyzers: а — 795M; б — CD-21; в — VIBROTEST 80; г — Emerson

Общий уровень вибрации винтового компрессора оценивается параметрами:

- размахом виброперемещения (*S*) в частотном диапазоне 10...500 Гц;
- среднеквадратичным значением виброскорости (*V*), измеренным в частотном диапазоне 10...1000 Гц;
- пиковым и среднеквадратичным значениями виброускорения (*A*, ПИК, СКЗ) измеренными в частотном диапазоне 10...4000 Гц.

Стандарт ГОСТ ИСО 10816-1-97 рекомендует оценивать состояние механизма по значениям среднеквадратичного значения виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц. Уровень виброскорости винтовых компрессоров мощностью 250 кВт регламентируются в части I, приложением Б, в котором для класса машин II, устанавливается максимально допустимое значение виброскорости — 7,1 мм/с, зафиксированное в любом из трех взаимно перпендикулярных направлений.

Допустимые значения виброскорости для двигателя более жесткие, в соответствии с ГОСТ 20815–93 «Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и выше. Измерение, оценка и допустимые значения» [31] и составляют 2,8 мм/с в жестко закрепленном состоянии, для категории машин *N* (нормальные относительно требований по вибрации) и частоте вращения свыше 1800 об/мин.

Аксиомы при анализе общего уровня вибрации: меньше значения виброскорости соответствуют лучшему техническому состоянию; большие значения виброскорости указывают на повышенную податливость подшипниковой опоры в данном направлении или большие действующие силы; направление больших значений виброскорости определяет характер повреждения.

Вибрационная картина идеальной подшипниковой опоры включает [32]: значения виброскорости в осевом направлении минимальны; значения виброскорости в горизонтальном направлении максимальны; значения виброскорости в горизонтальном направлении превышают на 20% значения в вертикальном направлении.

В требованиях руководящих документов установлено проводить измерение вибрации компрессорного агрегата на номинальной нагрузке. Опыт эксплуатации показывает, что для исправного компрессора изменение уровня нагрузки практически не влияет на значения параметров вибрации. Возникающие повреждения, особенно связанные с регулировкой производительности, делают компрессор более чувствительным к изменению нагрузки.

Актуальным на данный момент является вопрос об анализе технического состояния винтовых компрессоров и энергетических машин в целом по среднему квадратичному параметру виброускорения. Необходимо отметить отсутствие ГОСТ и рекомендаций к зонам технического состояния оборудования. Возможно использование следующих рекомендаций [32], относительно соотношения пикового и среднеквадратичного значений виброускорения в частотном диапазоне 10...5000 Гц:

1. Хорошее состояние — пиковое значение не превышает 10,0 м/с<sup>2</sup>.
2. Удовлетворительное состояние — среднеквадратичное значение не превышает 10,0 м/с<sup>2</sup>.
3. Плохое состояние наступает при превышении 10,0 м/с<sup>2</sup> среднеквадратичным значением.
4. Если пиковое значение превышает 100,0 м/с<sup>2</sup> — состояние становится аварийным.

Спектральный анализ позволяет более точно идентифицировать характер повреждения по соотношению составляющих вибрационного сигнала [32]: оборотной частоты, гармоник и субгармоник, зубцовых и негармонических частот, модуляций и «белого шума», резонансов и электромагнитных составляющих. Определение информативных частот возможных повреждений проводится по общеизвестным формулам кинематического взаимодействия механических элементов [11...18] и для винтового компрессора с 6-ю винтами на ведущем и 4-ю винтами на ведомом роторе, установленном на подшипниках NU 2311 и NU 2312 приведены в таблице.

Пример спектра виброскорости, зафиксированный для исправного состояния показан на рис. 6. Отмечено,

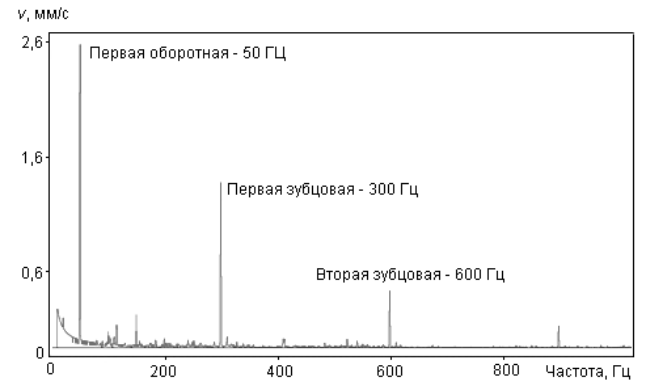


Рис. 6. Спектр виброскорости для исправного состояния компрессора  
Fig. 6. Vibration velocity range for operational condition of the compressor

Информативные частоты повреждений винтового компрессора  
Informative the frequency of damage of the screw compressor

Оборотная ведущего ротора, Гц	Оборотная ведомого ротора, Гц	Субгармоники ведущего ротора, Гц	Субгармоники ведомого ротора, Гц	Зубцовая частота, Гц
50	75	25; 16,6; 12,5...	37,5; 25; 18,75...	300
Подшипниковые частоты				
Подшипник	Повреждения сепаратора, Гц	Повреждения тел качения, Гц	Повреждения внутреннего кольца, Гц	Повреждения наружного кольца, Гц
NU 2311	20	116,4	392	258
NU 2312	30	180	585	390

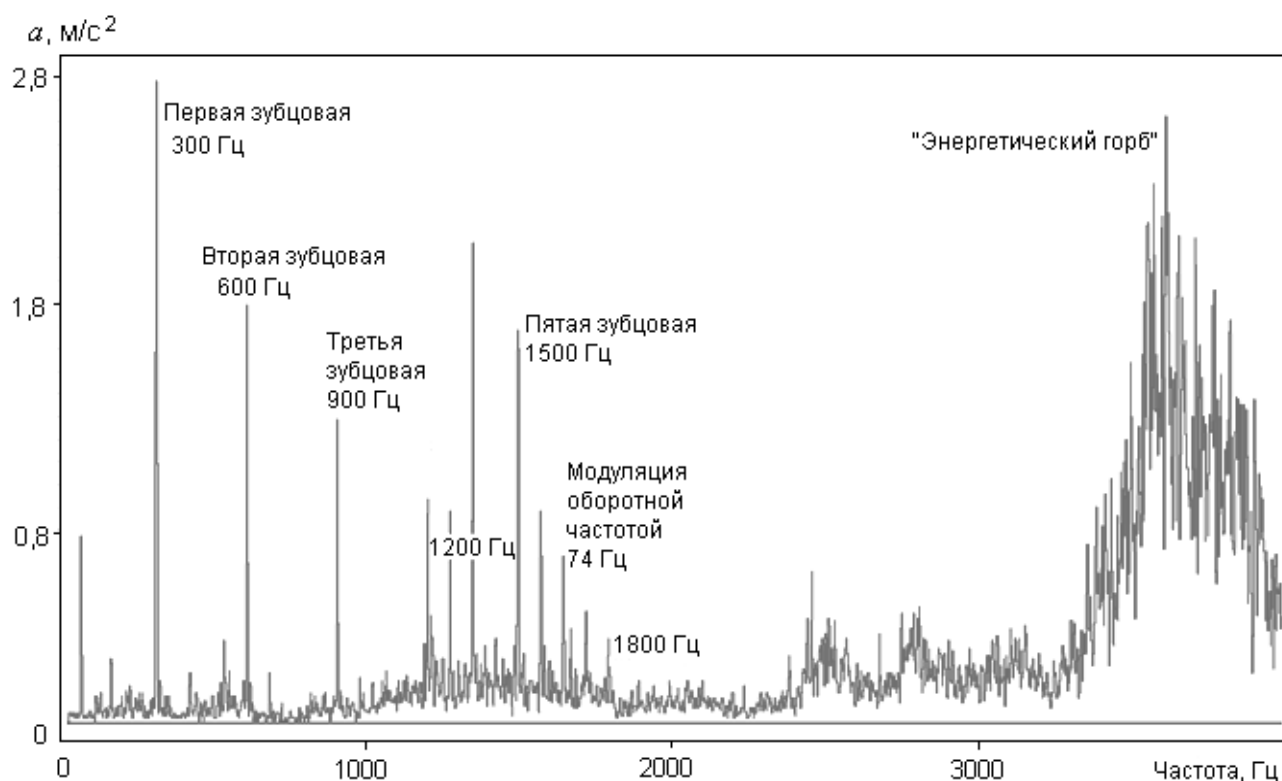


Рис. 7. Спектр виброускорения, зафиксированный для начальной стадии развития повреждений

Fig. 7. The spectrum of vibration acceleration recorded for the initial stage of damage development

преобладание оборотной частоты вращения (50 Гц), присутствие убывающих первой (300 Гц), второй (600 Гц) и третьей зубцовой (900 Гц) частот. Значение максимальной составляющей — 2,6 мм/с.

Анализ спектров виброускорения показывает уровень развития повреждений в первую очередь подшипников качения. Пример спектра виброускорения, зафиксированный для начальной стадии развития повреждений

показан на рис. 7. Частотный диапазон 10...4000 Гц. Число линий 1600, усреднение — линейное 4. Зафиксировано преобладание первой зубцовой частоты (300 Гц), серия гармонических частот: вторая зубцовая (600 Гц), третья зубцовая (900 Гц), четвертая зубцовая (1200 Гц) — с убыванием, пятая зубцовая (1500 Гц) с увеличением амплитуды и шестая зубцовая (1800 Гц), модуляция колебаний в диапазоне 1000...2000 Гц частотой вращения быстро-

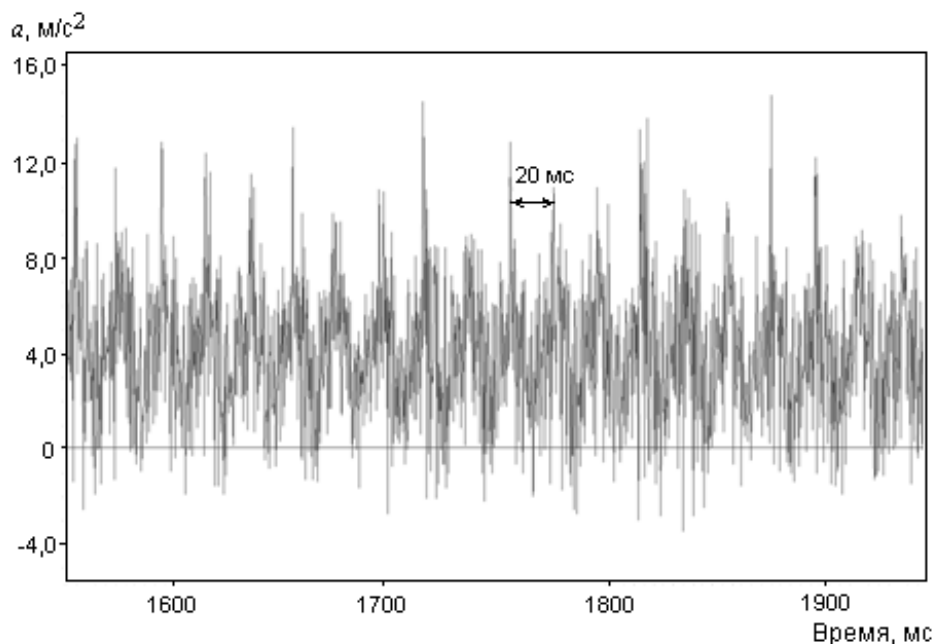


Рис. 8. Временная реализация сигнала виброускорения

Fig. 8. Temporary realization of vibration acceleration signal

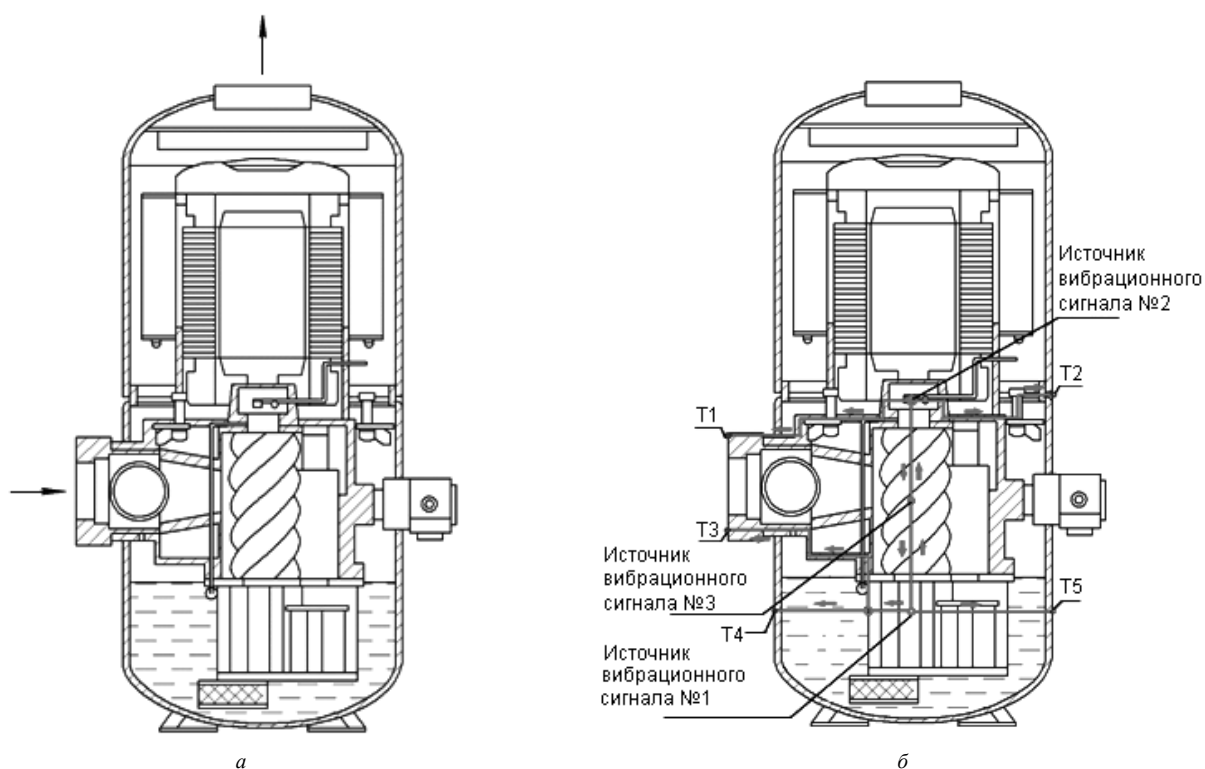


Рис. 9. Вертикальный герметичный винтовой компрессор: а — общий вид; б — возможный путь прохождения вибрационного сигнала

Fig. 9. Vertical hermetic screw compressor: а — general view б — a possible way to pass the vibration signal

ходного вала (74 Гц), «энергетический горб» в диапазоне 3300...4000 Гц. Значение максимальной составляющей — 2,8 м/с<sup>2</sup>.

Одним из признаков наличия значительных повреждений является присутствие в спектре виброускорения составляющих со значениями свыше 9,8 м/с<sup>2</sup>.

Анализ временного сигнала позволяет уточнить техническое состояние и обнаружить случайные проявления повреждений. Интервал между измерениями — 300 мкс, количество измерений — 16000, режим — без усреднений.

Реализация, показанная на рис. 8, соответствует размаху колебаний около 14,0 м/с<sup>2</sup>, с периодом 20 мс — частотой вращения вала двигателя.

Дополнительные методы вибрационного анализа — анализ огибающей, измерение ударного импульса, кепстральный и корреляционный анализ требуют специальной подготовки мест измерения вибрации, анализаторов вибрации высокого уровня и специалистов соответствующей квалификации. Данные методы могут быть рекомендованы для проведения специальных исследований.

### Заключение

Направление дальнейших исследований в области вибрационного анализа связано с появлением в составе систем для кондиционирования воздуха герметичных вертикальных винтовых компрессоров (рис. 9, а). Механизм, находящийся внутри герметичного корпуса, затухание вибрационного сигнала, фиксированные точки измерения вибрации требуют разработки индивидуального алгоритма диагностирования. Этот алгоритм должен включать решение вопросов:

- оценка технического состояния по общему уровню вибрации на основе моделирования развития повреждений;
- распознавание технического состояния по спектральным картинам при потере масляного слоя между винтами;

- учет степени затухания вибрационного сигнала на информационных частотах возможных повреждений.

Данная схема (рис. 9, б) предполагает возможный путь прохождения вибрационного сигнала от источников. Источником вибрационного сигнала № 1 и № 2, являются подшипниковые узлы, от которых сигнал проходит по жестко закрепленным конструкциям на корпус компрессора. Нарушение режима подачи смазки и отсутствие масляной пленки между роторами винтового компрессора приводит к схватыванию винтовых пар и появлению трения между роторами, что в свою очередь приводит к появлению вибрационного сигнала № 3. Фиксируемые точки измерения вибрационного сигнала Т1, Т2, Т3 определяются в зависимости от пути прохождения сигнала и жесткости места установки датчика. Точки Т4 и Т5 принимают вибрационный сигнал от источника № 3, с учетом того, что на процесс затухания вибрационного сигнала начинает влиять масло в масляной ванне, которое до момента выхода на режим винтового компрессора, будет постоянно изменять свои теплофизические параметры.

В результате исследования структурирована последовательность проведения технической диагностики герметичных вертикальных винтовых компрессоров по спектральному анализу составляющих вибрационного сигнала.

Предложена схема возможного пути прохождения вибрационного сигнала с указанием рекомендованных фиксируемых точек контроля.

## Литература

## References

1. Иорш И. И. Виброметрия. М.: 1963. 771 с.
2. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов. М.: Машиностроение, 1971. 224 с.
3. Артоболевский И. И., Бобровницкий Ю. Н., Генкин М. Д. Введение в акустическую диагностику машин. М.: Наука, 1979. 296 с.
4. Балицкий М. А. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. М.: Наука, 1984. 256 с.
5. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
6. Явленский А. К., Явленский К. Н. Теория динамики и диагностики систем трения качения. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 184 с.
7. Рагульскис К. М., Юркаускас А. Ю. Вибрация подшипников / Под ред. К. М. Рагульскиса. Л.: Машиностроение, 1985. 119 с.
8. Миникаев А. Ф., Долговская О. В., Пронин В. А. К вопросу протечек компримируемой среды в рабочей части однопоршневого винтового компрессора (ВКО) с окружной формой зуба // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 43–46.
9. Рэндалл Р. Новый метод модулирования дефектов зубчатых колес // Труды ASME. Конструирование и технология машиностроения. 1988. т. 104. № 2. С. 1–11.
10. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.) М.: Машиностроение, 1981.
11. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М.: Машиностроение, 1996. 276 с.
12. Русов В. А. Спектральная вибродиагностика. Пермь, 1996. 174 с.
13. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 2000. 344 с.
14. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. 169 с.
15. Костюков В. Н., Науменко А. П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 108 с.
16. Баркова Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2003. 160 с.
17. Alena Bilošová, Jan Biloš. Vibration diagnostics. Ostrava 2012. P. 114.
18. Барков А. В., Баркова Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. СПб.: СПбГМТУ, 2004. 156 с.
19. Horst Czichos. Handbook of Technical Diagnostics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. 387–410 pp.
20. Коллакот Р. А. Диагностирование механического оборудования: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1980. 281 с.
21. Коллакот Р. А. Диагностика повреждений. М.: Мир, 1989. 512 с.
22. Голуб Е. С., Мадорский Е. З., Розенберг Г. Ш. Диагностирование судовых технических средств: Справочник. М.: Транспорт, 1993. 150 с.
23. Сидоров В. А., Серебров Л. М., Серебров Б. Л. Портативные средства технической диагностики. // Оборудование и инструмент для профессионалов. 2007. № 3 (89) С. 82–85.
1. Iorish I. Vibrometry. Moscow: 1963. 771 p. (in Russian)
2. Pavlov B. V. Acoustical diagnosis of mechanisms. Moscow: Mechanical Engineering, 1971. 224 p. (in Russian)
3. Artobolevsky I. I., Bobrovnikskii Yu. N., Genkin M. D. Introduction to acoustic diagnostics machines. Moscow: Science, 1979. 296 p. (in Russian)
4. Balitsky M. M. Vibroacoustic diagnostics of emerging defects. Moscow: Science, 1984. 256 p. (in Russian)
5. Genkin M. D., Sokolova A. G. Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms. Moscow: Mechanical Engineering, 1987. 288 p. (in Russian)
6. Jawlensky A. K., Jawlensky K. N. The theory of the dynamics and diagnosis systems of rolling friction. Leningrad. 1983. p. 184. (in Russian)
7. Ragulskis K. M., Jurkauskas A. Y. Vibration bearings. Leningrad: Mechanical Engineering, 1985. 119 p. (in Russian)
8. Minikayev A. F., Dolgovskaya, O. V., Pronin V. A. To the question of leaks of compressible medium in the working part of single screw compressor (ASD) with a peripheral tooth form. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2016. No. 3. p. 43–46. (in Russian)
9. Randall R. New method of modulating gear defects. Proceedings of ASME. Kon-strairway and mechanical engineering technology 1988. vol. 104. No. 2. P. 1–11. (in Russian)
10. Vibration in engineering: Handbook. In 6 vol. / Ed. the Chelomey: V. N. Moscow. 1981. (in Russian)
11. Shirman A. R., Soloviev A. B. Practical vibration diagnostics and monitoring of mechanical equipment. Moscow: Mechanical Engineering, 1996. 276 p. (in Russian)
12. Russov V. A. Spectral vibration diagnostics. Perm, 1996. 174 p. (in Russian)
13. Goldin A. S. Vibration of rotating machines. Moscow: Mechanical Engineering, 2000. 344 p. (in Russian)
14. Barkov A. V., Barkova N. A. Azovtsev A. Yu., Monitoring and diagnosis of rotating machines by vibration: SPb.: Ed. SpbGMTU Center, 2000. 169 p. (in Russian)
15. Kostyukov V. N., Naumenko A. P. Practical basics of vibroacoustic diagnostics of machinery. Omsk: Publishing house OmGTU, 2002. 108 p. (in Russian)
16. Barkova N. Ah. Introduction to vibroacoustic diagnostics of rotary machines and equipment: tutorial. SPb.: Ed. SpbGMTU Center, 2003. 160 p. (in Russian)
17. Alena Bilošová, Jan Biloš. Vibration diagnostics. Ostrava 2012. P. 114.
18. Barkov A. V., Barkova N. A. Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis. SPb.: SPbSMTU, 2004. 156 p. (in Russian)
19. Horst Czichos. Handbook of Technical Diagnostics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. 387–410 pp.
20. Collacot R. A. mechanical equipment Diagnosis: translation with English. Leningrad. 1980. 281 p. (in Russian)
21. Collacot R. A. Diagnostics of damages: Per. from English. Moscow: Mir, 1989. 512 p. (in Russian)
22. Golub E. S., Madorsky E. Z., Rosenberg G. S. Diagnostics of ship technical means: reference Book. Moscow: Transport, 1993. 150 p. (in Russian)
23. Sidorov V. A., Serebrov L. M., Serebrov B. L. Portable means of technical diagnostics. *Equipment and tools for professionals*. 2007. No. 3 (89) p. 82–85. (in Russian)



24. Сидоров В. А. Сотников А. Л. Выбор средств технического диагностирования // Мир техники и технологий. 2004. № 7. С. 48–50.
25. Astashev V., Krupenin V. Efficiency of vibration machines. Engineering for rural development. Jelgava, 24.–26.05.2017. p. 108–113.
26. Ключев В. В. и др. Технические средства диагностирования: Справочник. М.: Машиностроение, 1989. 671 с.
27. ГОСТ 27518–87. Техническая диагностика. Диагностирование изделий. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1988. 20 с.
28. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика и контроль технического состояния изделий. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 23 с.
29. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. Минск: Изд-во стандартов, 1998. 18 с.
30. Ротационные и винтовые компрессоры. [Электронный ресурс]: [http://www.trans-service.org/ru.php?section=info&page=s\\_s\\_u&subpage=sud\\_holod\\_13](http://www.trans-service.org/ru.php?section=info&page=s_s_u&subpage=sud_holod_13)
31. ГОСТ 20815–93. Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и выше. Измерение, оценка и допустимые значения.
32. Сидоров В. А. Информационные основы вибromетрии. // Мир техники и технологий. 2013. № 1. С. 46–54.
24. Sidorov V. A. and Sotnikov A. L. Choice of means of technical diagnosing. *World of engineering and technology*. 2004. No. 7. P. 48–50. (in Russian)
25. Astashev V., Krupenin V. Efficiency of vibration machines. Engineering for rural development. Jelgava, 24.–26.05.2017. p. 108–113.
26. Klyuyev V. V. ets. Technical means of diagnostics: Reference book. Moscow: Mechanical Engineering, 1989. 671 p. (in Russian)
27. State Standard 27518–87. Technical diagnostics. Diagnosis of products. General requirements. Moscow: publishing house of standards, 1988. 20 p.
28. State Standard 20911–89. Technical diagnostics and control of the technical condition of the products. Terms and definitions. Moscow: publishing house of standards, 1990. 23 p.
29. State Standard ISO 10816 1 97. Vibration. Monitoring of the state of machines by the results of vibration measurements on non-rotating parts. Part 1. General requirements. Minsk: Publishing house of standards, 1998. 18 p.
30. Rotary and screw compressors. [Electronic resource]: [http://www.trans-service.org/ru.php?section=info&page=s\\_s\\_u&subpage=sud\\_holod\\_13](http://www.trans-service.org/ru.php?section=info&page=s_s_u&subpage=sud_holod_13)
31. State Standard 20815–93. Electric rotating Machines. Mechanical vibration of some types of machines with a height of the axis of rotation of 56 mm and above. Measurement, evaluation, and the valid values.
32. Sidorov V. A. Informational basis of vibrometry. *World of technology*. 2013. No. 1. P. 46–54.

### Сведения об авторах

#### Сидоров Владимир Анатольевич

д. т. н., профессор Донецкого национального технического университета, 83001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Артема, 58, [sidorov\\_va@ukr.net](mailto:sidorov_va@ukr.net)

#### Пундик Михаил Александрович

ассистент, Донецкий национальный институт экономики и торговли имени М. Туган-Барановского, 83050, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Щорса, 31, [mihailpundik@gmail.com](mailto:mihailpundik@gmail.com)

#### Карнаух Виктория Викторовна

к. т. н., доцент, Донецкий национальный институт экономики и торговли имени М. Туган-Барановского, 83050, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Щорса, 31, [posso0629@gmail.com](mailto:posso0629@gmail.com)

#### Кулешов Денис Константинович

к. т. н., доцент, Донецкий национальный институт экономики и торговли имени М. Туган-Барановского, 83050, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Щорса, 31, [kuleschov\\_denis@mail.ru](mailto:kuleschov_denis@mail.ru)

### Information about authors

#### Sidorov Vladimir Anatolyevich

D. Sc., Professor of Donetsk National Technical University, 83001, Donetsk People's Republic, Donetsk, Artema str., 58, [sidorov\\_va@ukr.net](mailto:sidorov_va@ukr.net)

#### Pundik Mihail Aleksandrovich

Assistant, Donetsk National University of Economics and Trade named after M. Tugan-Baranovsky, 83050, Donetsk People's Republic, Donetsk, str. Shchors, 31, [mihailpundik@gmail.com](mailto:mihailpundik@gmail.com)

#### Karnaukh Viktoria Viktorovna

Ph. D., Associate Professor, Donetsk National University of Economics and Trade named after M. Tugan-Baranovsky, 83050, Donetsk People's Republic, Donetsk, str. Shchors, 31, [posso0629@gmail.com](mailto:posso0629@gmail.com)

#### Kuleshov Denis Konstantinovich

Ph. D., Associate Professor, Donetsk National University of Economics and Trade named after M. Tugan-Baranovsky, 83050, Donetsk People's Republic, Donetsk, str. Shchors, 31, [kuleschov\\_denis@mail.ru](mailto:kuleschov_denis@mail.ru)