

УДК 629.7.036

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА  
СОСТОЯНИЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ  
ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА BCL527/A**

**Ю ЯНЪЯН**

*Китайская Чжэцзянская нефтехимическая компания,  
Остров Юйшань, город Чжоушань, провинция Чжэцзян,  
Китайская Народная Республика*

**А. Б. НЕВЗОРОВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Г. В. ПЕТРИШИН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Основной задачей системы вибрационного мониторинга вращения вала центробежного компрессора BCL527/A является контроль температуры втулки подшипника центробежного агрегата и смещения вала. Результаты мониторинга состояния и диагностики неисправностей в режиме реального времени позволили установить соответствие между вибрационной неисправностью и основными характеристиками спектра SG8000. Установлено, что температура опорной площадки увеличилась из-за низкого давления масла на неприводном конце центрифуги. После регулировки давления масла температура опорной площадки вернулась к норме. Показано, что результаты исследования дисбаланса ротора, завихрение масляной пленки и колебания масляной пленки агрегата в ходе единичных и нагрузочных испытаний и последующего запуска позволяют предсказать механические неисправности поршневого компрессора установки гидрокрекинга дизельного топлива.*

**Ключевые слова:** мониторинг, диагностика, дисбаланс ротора, вибрация, оценка, компрессорная установка.

**APPLICATION OF STATE MONITORING TECHNOLOGY  
IN TROUBLESHOOTING OF CENTRIFUGAL  
COMPRESSOR BCL527/A**

**Y. YANYANG**

*China Zhejiang Petroleum and Chemical Company,  
Yushan Island, Zhoushan City, Zhejiang Province,  
People's Republic of China*

**A. B. NEVZOROVA**

*Educational institution "Sukhoi State Technical University  
of Gomel", the Republic of Belarus*

**G. V. PETRISHIN**

*Educational institution "Sukhoi State Technical University  
of Gomel", the Republic of Belarus*

*The main task of the vibration monitoring system for the rotation of the BCL527/A centrifugal compressor shaft is to control the temperature of the bearing sleeve of the centrifugal unit and the displacement of the shaft.*

*The results of real-time fault monitoring and diagnostics made it possible to establish the correspondence between the vibration fault and the main characteristics of the SG8000 spectrum. The temperature of the support pad was found to have increased due to the low oil pressure at the non-lead end of the centrifuge. After adjusting the oil pressure, the temperature of the support platform returned to normal. The article shows that the results of the rotor imbalance study, oil film swirling and unit oil film vibrations during single and load tests and subsequent start-up allow to predict mechanical failures of the piston compressor of the diesel fuel hydrocracking unit.*

**Keywords:** monitoring, diagnostics, rotor imbalance, vibration, evaluation, compressor unit.

### **Введение**

Компрессорная техника является основным оборудованием нефтеперерабатывающих и химических предприятий [1], [2]. Выход из строя центробежного компрессора может привести к большим экономическим потерям и серьезным авариям с точки зрения безопасности производства [3]. Поэтому необходимо развивать систему мониторинга состояния и диагностики неисправностей для своевременного и точного определения проблем в работе центробежного агрегата (ЦА) [4]. Обеспечение безопасных и оптимальных условий эксплуатации компрессоров является основной целью технологических установок. Подход к техническому обслуживанию оборудования значительно изменился за последние несколько десятилетий, перейдя от первоначального подхода с ремонтным вмешательством после отказов (т. е. корректирующим обслуживанием) к профилактическому с заменой деталей в фиксированное рабочее время [5]. Более поздние разработки привели к прогностическому подходу, основанному на наблюдении механических параметров [6].

### **Развитие системы мониторинга состояния в различных странах**

Обычно применяемые прогностические методы в разных странах связаны со считыванием вибрационных параметров и, в более общем плане, с механическими индикаторами установки, в основном с вибрациями и температурами. Наблюдение за ними помогает избежать опасных условий эксплуатации, которые могут привести к нежелательным, нестандартным, а иногда к серьезным последствиям [7].

Более тщательная оценка состояния ЦА может быть получена из исследования ее производительности. Во многих случаях проблемы ЦА носят прогрессирующий характер и вносят потери в производительность и эффективность даже без наличия механических повреждений, которые могут указывать на кумулятивную модель поведения, такую как скачок напряжения компрессора. Такие модели могут в конечном итоге привести к серьезным повреждениям оборудования. Анализ производительности может помочь, так как важно понять, как оборудование работает за пределами механических показателей [8], [9].

При таком подходе ожидаемая производительность машины обеспечивает фундаментальную индикацию состояния работоспособности всего ЦА. Сниженная производительность ЦА является самым ранним внешним показателем наличия проблемы. Для этого необходимо создать виртуальную модель в качестве эталонного базового уровня для оценки производительности ЦА. Эту парадигму подхода иногда называют «цифровым двойником». Анализ производительности является количественным подходом, который может быть использован в качестве основы для новых систем технического обслуживания оборудования.

В последние годы ведутся интенсивные разработки систем мониторинга (контроля) состояния сложных технических объектов. Но эти разработки, как правило, идут параллельно развитию систем автоматического управления, и лишь при создании новых поколений сложных объектов делаются попытки объединить средства управления и мониторинга в единую систему, придав ей новые функции – диагностики состояния.

Технология мониторинга и диагностики состояния в основном включает механизм неисправности устройства, извлечение признаков неисправности, метод авто-

матического мониторинга, интеллектуальный метод диагностики, систему мониторинга диагностики неисправностей, систему удаленного мониторинга и т. д. [10].

Система мониторинга состояния успешно применяется на международном уровне, различными компаниями, например, система DM2000 – Bentley; интеллектуальная система диагностики – Westinghouse; интеллектуальный анализатор BR0P0RT41VP4KVL – SPM в Швеции и Shank в Германии; система System2 – B&K в Дании; система онлайн-мониторинга SG8000 – Шеньянской фабрикой воздухоувок в Китае и др. [11], [12].

С помощью системы онлайн-мониторинга, разработанной и внедренной компаниями в разных странах, и с помощью развитых сетевых ресурсов собираются данные о работе ЦА в режиме реального времени и создают базу данных о работе и диагностике установки. Благодаря этому специалисты могут более точно оценить причину проблемы или возможную тенденцию возникновения неполадок в работе устройства.

Цель работы – анализ данных состояния центробежного агрегата BCL527/A по датчикам скорости, температуры, смещения и вибрации вала с применением метода мониторинга состояния и диагностики неисправностей в режиме реального времени для обоснования формируемых управляющих решений о его работоспособности.

#### **Постановка задачи**

Центробежный агрегат установки гидрокрекинга дизельного топлива мощностью 3,5 млн тонн в год в рамках проекта интеграции нефтепереработки и нефтехимии мощностью 40 млн тонн в год компании Zhejiang Petrochemical Co., Ltd. включает в себя центрифугу BCL527/A, паровую турбину NK40/45, станцию смазочного масла, систему конденсации пара на выходе паровой турбины и т. д. [13].

Функция BCL527/A заключается в обеспечении около 100 Вт м<sup>3</sup>/ч водорода реакционной части установки для получения светлых нефтепродуктов при переработке под давлением водорода нефтяного сырья, имеющего молекулярную массу более высокую, чем получаемые целевые продукты.

Принцип работы заключается в использовании паровой турбины для приведения во вращение ротора компрессора через муфту. Газовая среда вращается вместе с крыльчаткой на роторе, и газ под действием центробежной силы из крыльчатки поступает в спираль, а затем в крыльчатку следующей ступени для продолжения сжатия.

Важные параметры центробежной компрессорной установки включают: температуру среды на входе и выходе, расход среды, давление на выходе, скорость, вибрацию ротора паровой турбины и центрифуги, температуру втулки подшипника, смещение вала и т. д. Для контроля осевого положения и радиальной вибрации ротора на его валу установлены датчики смещения и вибрации. Датчики смещения обычно устанавливаются на стороне упорного подшипника ротора, а датчики вибрации – с обеих сторон ротора, два датчика с каждой стороны расположены под углом около 90°. Зонды работают по принципу вихревых токов. Если вибрация и смещение превышают пороговое значение, устройство подаст сигнал тревоги или отключит блокировку.

Центробежный агрегат BCL527/A оснащен двумя датчиками скорости, шестью датчиками смещения вала, восемью датчиками вибрации вала и шестнадцатью датчиками температуры.

#### **Анализ методов диагностики**

##### **Объем мониторинга состояния и диагностики неисправностей**

Система мониторинга состояния ЦА BCL527/A использует систему SG8000 [15], разработанную компанией Shenyang Blower Group Co., Ltd., которая позволяет опре-

делить конкретную неисправность устройства и провести ее количественный анализ. Рассмотрим основные параметры мониторинга состояния.

*Вибрация ротора.* Так как большой ЦА относится к машинному оборудованию, то вибрация его ротора будет находиться в диапазоне средних частот (от 250 до 1500 Гц). Вибрации этого диапазона могут возникать при распространении низкочастотных колебаний, вызванных неуравновешенностью ротора.

*Амплитуда.* По величине амплитуды вибрации можно судить либо об исправности, либо о наличии проблемы, и насколько она серьезна и т. д.

*Фаза* – это знак различия вибраций в пространственно-временных отношениях. Основная функция заключается в сравнении разницы азимутов или разницы во времени между различными вибрациями, что часто играет ключевую роль в различении различных типов неисправностей с одинаковой частотой и сравнении вибрации одного и того же компонента относительно другого компонента.

*Частота* – это признак характеристик вибрации. Она может быть использована для определения типа неисправности вибрации.

*Положение оси* – это положение оси относительно центра гнезда подшипника, которое изменяется с изменением масляной пленки и удельной нагрузки. Иногда положение оси будет сильно колебаться из-за дисбаланса самого ротора. В принципе, можно выделить три оси, от взаимного расположения которых зависят параметры вибрации агрегата, возбуждаемые его ротором: ось вращения, ось инерции и геометрическая ось. Минимальная вибрация оказывается в том случае, если три оси совпадают.

*Критическая скорость.* При запуске устройства вибрация будет постепенно усиливаться с увеличением скорости. Когда скорость агрегата приближается к пороговой скорости, вибрация агрегата достигает максимального значения, а затем вибрация быстро уменьшается с увеличением скорости. Эта скорость при максимальной вибрации устройства является критической скоростью устройства. Когда устройство запускается, оно часто устанавливает схему быстрого прохождения критической скорости.

**Метод мониторинга состояния и диагностики неисправностей состояния SG8000** содержит множество диагностических системных карт, обеспечивающих основу для анализа неисправностей устройства. Они в основном делятся на две категории: обычная и отключения. Обычная, или карта устойчивого состояния, связана с работой оборудования и не содержит информации о запуске и выключении.

Карта запуска и отключения представляет собой атлас для анализа переходных процессов, связанных с запуском и выключением оборудования. Такая карта включает диаграммы: формы волны, тренда, спектра, траектории оси, полярных координат и т. д.

**Метод анализа вибрации** является эффективным методом контроля состояния и диагностики неисправностей ЦА на основе сравнения спектральных характеристик системы после обработки вибрационного сигнала. Определить причины изменений параметров вибрации, обнаруживаемых системой мониторинга, крайне сложно. Состояние вала, рабочего колеса, муфты, изменение расхода среды, температура масла и давление масла – все эти факторы могут вызывать вибрацию. Однако SG8000 может использовать свою огромную библиотеку системных карт для сравнения и анализа данных об аномальной вибрации и своевременного определения типа неисправности. Неисправность вибрации соответствует основным характеристикам спектра SG8000, как показано в табл. 1.

Таблица 1

## Соответствие между вибрационной неисправностью и основными характеристиками спектра SG8000

Распространенные неисправности по вибрации	Характеристики SG8000 по атласу состояния
Несбалансированность	Спектр формы волны: синусоидальная волна; высокий уровень LX. Диаграмма тренда: значение вибрации велико, и тренд повышается медленно или быстро. Диаграмма Боде: фазовая мутация или медленное изменение
Неотцентрированность	Диаграмма спектра: в основном 2x или 1x и 2x; диаграмма траектории оси: форма «8»
Масляная пленка	Спектр формы волны масляной пленки: близок к 0,5x; карта положения оси: положение оси явно меняется
Режим разгона и выбега	Спектр пневматических сигналов: менее 0,5x. Диаграмма Боде: частотная характеристика изменения между запуском и выключением
Трение	Траектория оси трения: обратная прецессия

**Результаты контроля состояния SG8000 в центробежной установке BCL527/A**

**Дисбаланс ротора при единичном испытании паровой турбины.** Во время ввода на предприятии в эксплуатацию одной турбины установки гидрокрекинга дизельного топлива в августе 2021 г. возникла проблема с большой вибрацией вала турбины. В течение всего процесса, когда турбина прогревалась на низких скоростях, таких как 600 об/мин, 2900 об/мин и т. д., отклик каждого канала вибрации был на 15 мкм ниже, и эта тенденция была относительно стабильна. При этом фаза 1x канала via71004 на стороне выхлопа турбины колеблется. В процессе увеличения скорости с 2900 до 9600 об/мин вибрация увеличивалась синхронно со скоростью, однако при 65 мкм вибрация в основном была стабильна. Согласно карте корреляция в этом интервале в основном равна 1x. Когда скорость стабильна, фаза 1x относительно стабильна, и диапазон вращения осевой дорожки постепенно расширяется. Тенденция вибрации турбины при первом запуске со скоростью и орбита прецессии вала показана на рис. 1.

Установлено, что существует проблема дисбаланса ротора в паровой турбине. Во время проверки на месте ввода в эксплуатацию обнаружено, что диск противовеса, используемый при вводе в эксплуатацию паровой турбины, может привести к дисбалансу ротора из-за прогиба стального уплотнения. Система уплотнений паровой турбины предназначена для исключения поступления атмосферного воздуха в вакуумную систему через концевые уплотнения цилиндров, а также для предупреждения выхода пара в атмосферу из цилиндров с избыточным его давлением в них. После остановки положение стального уплотнения на пластине противовеса на соединительном конце турбоагрегата необходимо откорректировать по месту и запустить турбину вновь.

Было проведено три старта и получены следующие результаты:

- когда скорость вращения превышает 2900 об/мин, вибрация повышается синхронно с увеличением скорости вращения;
- составляющая возрастающей частоты в основном составляет 1x;
- форма волны в основном синусоидальная;
- траектория оси эллиптическая с большим диапазоном вихрей;

- при первом запуске устройства происходит однократное колебание фазы на низкой скорости (600 об/мин);
- вибрация соединительной концевой противовесной пластины явно снизилась после третьего запуска;
- на диаграмме Боде нарастание вибрации и скорость показывают синхронную взаимосвязь.

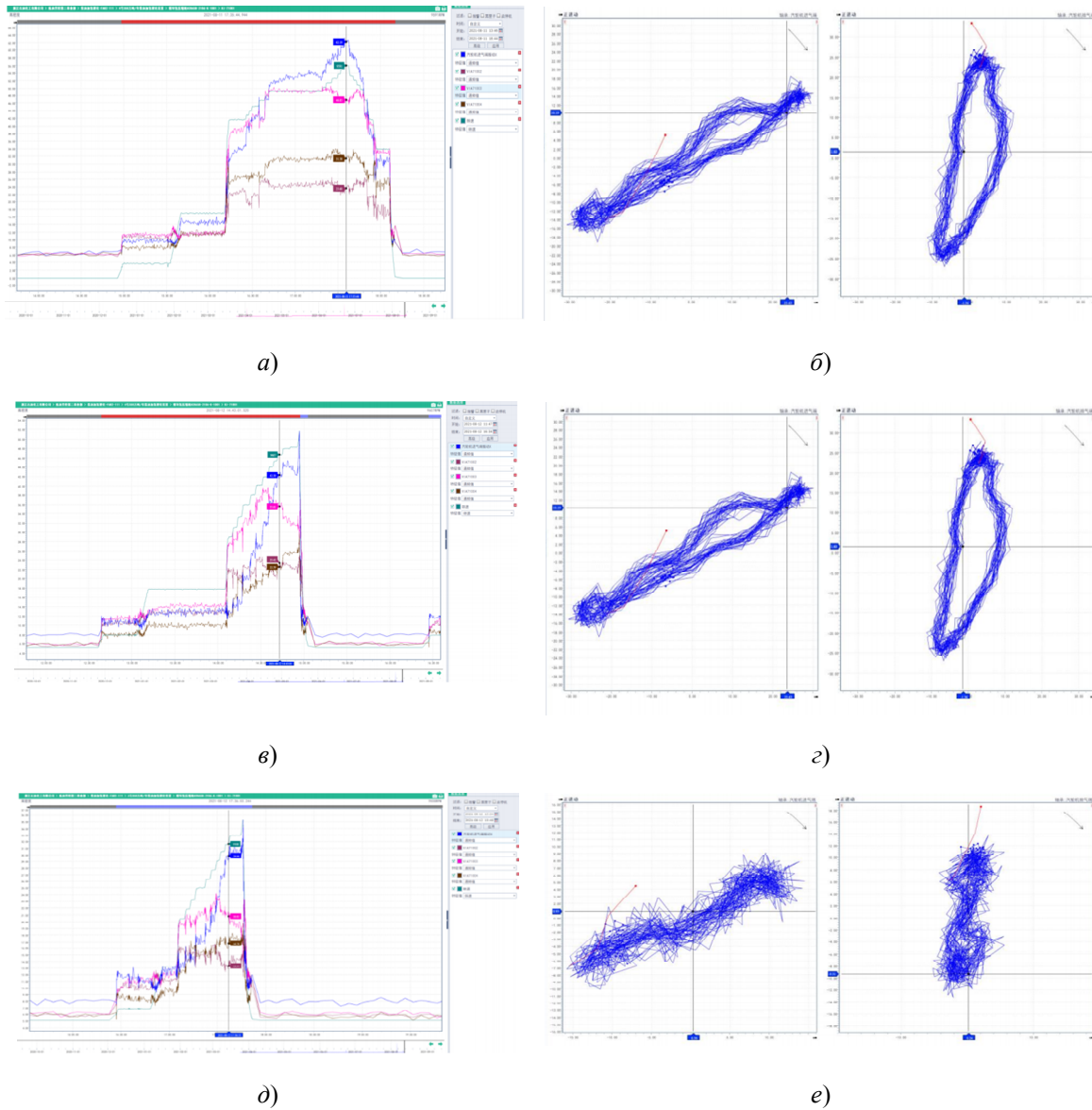


Рис. 1. Характерные спектры вибрации турбины (а, в, д) и исходные орбиты прецессии вала (б, г, е) при первом, втором и третьем запусках и увеличении скорости с 2900 до 9600 об/мин

Таким образом, благодаря оперативному мониторингу и диагностике неисправностей при первом запуске делается вывод о том, что ротор разбалансирован. Однако, согласно спектру, дисбаланс ротора не является такой простой проблемой, как изгиб вала. Вероятно, это вызвано внешними причинами, такими как изменение положения пластины противовеса на соединительном конце паровой турбины или дисбаланс ротора. Второй и третий ввод в эксплуатацию выполняется последовательно без останова, проверяется оценка дисбаланса ротора турбины, вызванного баланси-

ровочным диском. Это позволяет избежать проблемы задержки запуска ЦА путем прямого определения причины дисбаланса ротора и включения турбины в рабочий режим эксплуатации.

**Мониторинг состояния при проведении нагрузочных испытаний центробежного агрегата.** В конце испытания одной турбины дисбаланс ротора ЦА не был полностью устранен, но вибрация была значительно снижена за счет удаления пластины противовеса. Во время нагрузочного испытания ЦА в азотных условиях чрезмерная вибрация паровой турбины была устранена и при дальнейшей эксплуатации центрифуги вибрация была в пределах нормы.

**Мониторинг состояния при запуске и эксплуатации центробежного агрегата.** В процессе нормальной эксплуатации устройства BCL527/A система мониторинга состояния работает в режиме реального времени. В течение трех месяцев после официального запуска ЦА работает в пределах эксплуатационного режима, лишь с небольшими колебаниями температуры втулки подшипника. Установлено, что температура опорной площадки увеличилась из-за нижнего давления смазочного масла на неприводном конце центрифуги. После регулировки давления масла температура опорной площадки вернулась к норме. Траектория оси центрифуги при нормальной работе показана на рис. 2.

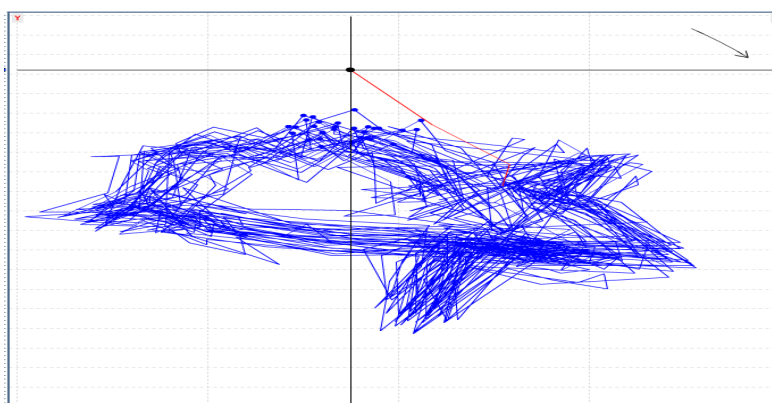


Рис. 2. Траектория оси центрифуги при нормальной работе

### Заключение

Показано, что система мониторинга состояния и диагностики неисправностей является важным средством обеспечения стабильной работы крупных ЦА, а также может своевременно и эффективно оценивать тенденцию состояния работы и причины их неисправностей.

Установлена причина неисправности ротора по разбалансировке при первом запуске по характерному спектру вибрации турбины. Она была вызвана внешними факторами, такими как изменение положения пластины противовеса на соединительном конце паровой турбины с дисбалансом ротора. Нагрузочные испытания позволили снизить вибрацию за счет корректировки положения пластины противовеса. При последующих запусках ЦА вошел в нормальный режим эксплуатации.

В настоящее время система SG8000, разработанная Shenyang Blower Group, имеет богатый опыт в мониторинге состояния крупных агрегатов, а также проводит регулярную техническую подготовку для технических специалистов пользователей, что является ключом к обеспечению хорошей работы и использованию системы мониторинга состояния и диагностики неисправностей агрегатов в процессе их эксплуатации на объектах нефтеперерабатывающих и химических предприятий.

**Литература**

1. Контроль состояния оборудования опасных производств : ГОСТ 32106–2013. – Введ. 2014–11–01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 10 с.
2. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация стационарных поршневых компрессоров : ГОСТ Р 56233–2014. – Введ. 2015–12–01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 20 с. – Режим доступа: <http://comracs.ru/tags/?tag=41#ixzz7HaHr0KTf>.
3. Хурамшина, Р. А. Параметрическая диагностика технического состояния центробежного нагнетателя в эксплуатации / Р. А. Хурамшина // Вестн. Дагест. гос. техн. ун-та. Техн. науки. – 2017. – Т. 44, № 4. – С. 72–86. – DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-72-86.
4. Костюков, В. Н. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2002. – 108 с.
5. Li, Y. Research on the fault mechanism and fault feature extraction technology of rotating machinery / Y. Li // Beijing University of Chemical Technology, 2007.
6. Qu, L. Principle of holographic diagnosis of mechanical faults / L. Qu // Beijing. Science Press, 2007.
7. Gao, Z. Application of vibration analysis in fan fault diagnosis / Z. Gao, X. Cheng // China Cement. – 2020. – № 10. – P. 104–106.
8. Analysis and treatment of the cause of vibration failure of air-cooled fan unit / D. Yang [et al.] // Power construction. – 2013. – Vol. 34, № 5. – P. 86–91.
9. Song, C. Application of vibration monitoring technology to diagnose fan faults / C. Song, C. Zhang // Equipment management and Maintenance. – 2011. – № 10. – P. 48–49.
10. Donald, E. Bentley Fundamentals of Rotating Mechanical Diagnostics Translated by Yao Hongliang / E. Donald // Machinery Industry Press, 2014. – P. 39–61.
11. Effectiveness of Condition Monitoring on Screw Compressors Jim Townsend, Ph.D. // International Journal of Engineering Inventions. – Vol. 8, Iss. 3 [March 2019]. – P. 41–51.
12. Bi, Z. Vibration monitoring and abnormal vibration analysis of cracking air compressor unit // Ethylene industry. – 2013. – № 42 (03). – P. 55–58.
13. Li, H. The diesel hydrogenation unit K-102 steam turbine emits high steam to realize steam recycling and utilization / H. Li // Petrochemical technology. – 2019. – Vol. 26, № 34. – P. 24.
14. Li, W. Transformation of diesel hydrofining unit B4-R1 steam turbine / W. Li // Petrochemical equipment technology. – 2015. – Vol. 36, № 4. – P. 23–24.
15. Shenyang Drum Measurement and Control Company. SG8000 large-scale rotating machinery online monitoring and analysis system user manual, 2015.

Получено 05.02.2022