

УДК 621.165; 621.438; 621.224

Н.Г. ШУЛЬЖЕНКО, Ю.Г. ЕФРЕМОВ, В.И. ЦЫБУЛЬКО, А.В. ДЕПАРМА

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ТУРБОАГРЕГАТОВ

Описываются созданные измерительные средства и технологии диагностирования вибрации роторных агрегатов. Приводятся примеры использования разработанных стационарных и мобильных аппаратных средств и технологий диагностирования различных турбоагрегатов. Выполнено сравнение результатов диагностирования вибросостояния турбоагрегата T250/300-240 с использованием диагностического модуля с данными экспертной оценки его вибросостояния. Дана оценка вибросостояния турбоагрегата K-200-130 и выработаны рекомендации по снижению уровня вибрации в подшипниках. Результаты использованы электрогенерирующими предприятиями.

Ключевые слова: технологии диагностики, вибрация, средства регистрации, турбоагрегат.

Введение

Проблема повышения надежности и безопасности эксплуатации энергоблоков с минимальными затратами может решаться путем использования средств и новейших информационных технологий диагностирования вибрационного состояния с определением опасных неисправностей. В соответствии с Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей и ГОСТ 25364-97, ГОСТ 27165-97 необходимо контролировать вибрационное состояние мощных турбоагрегатов (ТА) не только по параметрам вибрации опор, а и по параметрам вибрации вала. Автоматизированными системами вибрационной диагностики (АСВД), удовлетворяющие этим требованиям, оснащено не более 10 % всех турбоагрегатов электростанций Украины. Остальные 90 % существующих штатных АСВД турбоагрегатов осуществляют контроль вибросостояния только по параметрам вибрации опор. Разработка и внедрение технических средств получения информации о вибрационном состоянии агрегатов ТЭС и ТЭЦ, а также технологии диагностирования повышенной вибрации с использованием достижений компьютерных технологий является важной задачей, актуальность которой возрастает для агрегатов, обработавших парковый ресурс.

Результаты исследований

В ИПМаш НАН Украины создана и внедрена на 4-х блоках мощностью 300 МВт (Киевская ТЭЦ-5, Харьковская ТЭЦ-5, Запорожская ТЭС) автоматизированная система вибродиагностики турбоагрегата [1]. Методическое, программное

обеспечение и аппаратные средства этих систем совершенствуются и обновляются. С использованием достижений микропроцессорных технологий разработаны и созданы стационарные устройства (на базе микроконтроллера ATmega88) контроля механических величин: частоты вращения ротора, осевого сдвига и относительного удлинения ротора, теплового расширения цилиндра, вибрации (биения, искривления) ротора и вибрации опор. Устройства состоят из вихретокового преобразователя (датчика), модуля формирования механической величины с цифровым индикатором и импульсным источником электропитания. Эти устройства удовлетворяют требованиям действующих стандартов, не уступают аналогичным устройствам известных фирм, а по отдельным метрологическим и эксплуатационным характеристикам превосходят их. Датчики помехоустойчивы к воздействию электромагнитных полей и не требуют настройки на металл объекта, на тип и длину кабеля линии связи и не чувствительны к боковому металлу [2].

Датчики допускают одиночные и многократные ударные (импульсные) нагрузки, не вызывающие деформацию корпуса. Выходной сигнал без промежуточных устройств передается по одной экранированной жиле (типа МГШВЭ) на расстояние до 200 м и более. Надежность датчиков подтверждена их многолетней опытной эксплуатацией на большом числе электростанций Украины и СНГ.

Основные характеристики измерительных устройств с бесконтактными вихретоковыми датчиками:

– измеритель размаха относительных виброперемещений от 10 до 1000 мкм в диапазоне частот 1-1000 Гц с погрешностью не более 5 %;

– измерители относительных перемещений в диапазоне 0-5,0 мм или 0-10,0 мм, или 0-30,0 мм с погрешностью не более 5 %;

– измеритель частоты вращения в диапазоне 3-9999 об/мин. Погрешность измерения частоты вращения до 4000 об/мин не более ± 1 об/мин, свыше 4000 об/мин не более ± 2 об/мин.

Устройство контроля вибрации опор работает в диапазоне измерения СКЗ виброскорости 0,5-16,0 мм/с с дискретностью 0,1 мм/с. Рабочий диапазон частот измерения СКЗ виброскорости 10–1000 Гц.

Разработанные стационарные устройства контроля и анализа механических величин агрегатов имеют: однотипное схемотехническое решение функциональных преобразователей, что удобно для серийного производства; усилитель-преобразователь ЧМ сигнала с токовихревого датчика (быстродействующий ОУ типа LF357); нормирующий усилитель аналогового сигнала (LF356, ОР27); фильтр НЧ с частотой среза 1 кГц (LMV358); модульный импульсный источник питания (PPM05-A-12ZLF), который позволяет работать как от сети переменного тока, так и от резервных источников (АКБ постоянного тока); модуль промышленного интерфейса RS485, протокол MODBUS RTU (MAX13412).

Все устройства однотипные, различие между ними заключается в установке соответствующего программного обеспечения в микроконтроллер и в подключении соответствующего датчика. Аппаратные средства контроля механических величин и диагностики вибрационного состояния оборудования могут использоваться как автономные измерительные средства, так и в составе диагностических и исследовательских комплексов.

На основании проведенных исследований и опыта эксплуатации АСВД ТА, для осуществления диагностирования вибросостояния турбоагрегата выявлены основные причины и признаки виброопасных дефектов и установлена взаимосвязь между ними с учетом влияния режимных факторов. Степень влияния режимных факторов на вибрационное состояние ТА учитывается методом переменных коэффициентов [3]. Для повышения достоверности формирования диагностических массивов и трендов вибропараметров в АСВД ТА используется процедура предварительной обработки исходных сигналов, которая направлена на подавление шумов и выбросов, удаление возможных сбоев при оцифровке, фильтрацию и нормирование сигналов. Выявление и анализ медленно изменяющейся деформации скручивания валопровода осуществляется по сигналам от размещенных меток вдоль вала в виде углуб-

лений путем периодического мониторинга угла скрутки [4]. Контроль деформации скручивания валопровода осуществляется разработанным в ИП-Маш НАНУ экспериментальным устройством – фазометром.

Для вероятностной оценки появления виброопасных неисправностей и нештатных ситуаций сформирована информационно-диагностическая технология и создано программно-методическое и математическое обеспечение. Процесс поиска и выявления виброопасных дефектов выполняется по характерным диагностическим признакам и сформированным диагностическим массивам в соответствии с разработанным программно-алгоритмическим обеспечением информационно-диагностического модуля [5].

Диагностирование виброопасных неисправностей ТА проводится как в автоматизированном, так и в диалоговом режиме, что дает возможность углубленного изучения вибросостояния ТА при непосредственном участии эксперта (пользователя).

Применение разработанной методики оценки вибрационного состояния турбоагрегата Т250/300-240 и выявления виброопасных неисправностей рассмотрим по данным вибрационных и технологических параметров, полученных при помощи разработанно АСВД ТА.

Используя созданный блок автоматизированной обработки информации, по этим данным был сформирован массив вибропараметров (значения амплитуд и фаз спектральных составляющих, их отношения и т.д.). Блоком формирования диагностического массива получен массив относительных показателей проявления вибропризнака (Z). Значения Z для опоры 5 приведены в табл. 1. Результат обработки диагностических массивов интерпретатором в виде оценки наличия дефекта приводится в табл. 2.

Результаты, полученные модулем диагностирования, совпадают с проведенным экспертным анализом. Экспертный анализ трехсуточных трендов вибрационных и технологических параметров показывает, что:

– амплитуды оборотной гармонической составляющей виброперемещения роторов и виброскорости опор соседних с муфтовым соединением в опорах 5 и 6 соизмеримы;

– фазы оборотных гармонических составляющих в одноименных направлениях на подшипниках 5 и 6 противоположны (с погрешностью не больше 30°). При этом фаза на 7 опоре близка к фазе на 6 опоре т.е. преобладает кососимметричная оборотная составляющая вибрации.

Таблица 1

Значения относительных показателей проявления вибропризнаков

Признак по вибропараметрам вала	Z ₅ , %
Наличие первой оборотной гармонической составляющей в спектре виброперемещения вала	100
Амплитуда кососимметричной оборотной составляющей больше симметричной	67
Соизмеримость амплитуд оборотной составляющей виброперемещения вала в опоре перед муфтой и после муфты	42
Разность фаз оборотной составляющей виброперемещения вала в опоре перед муфтой и в опоре после муфты больше 100 градусов	100
Наличие в спектре вибрации вала субгармонических составляющих	0
Наличие второй оборотной гармонической составляющей в спектре виброперемещения вала	33
Амплитуда первой оборотной гармонической составляющей виброперемещения вала меняется при изменении активной мощности генератора	100

Таблица 2

Результаты диагностирования турбоагрегата Т250/300-240

Название дефекта	Оценка наличия дефекта, %			
	по вибро-параметрам вала		по вибро-параметрам опор	
	опора №		опора №	
	5	6	5	6
коленчатость вала	65	67	56	61
излом оси вала	55	58	49	55

Эти вибропризнаки являются характерными для повреждений соединения полумуфт в случае, когда преобладает дефект типа "коленчатость". Зависимость амплитуды вибрации от изменения мощности генератора, а также наличие второй гармонической и ВЧ составляющих виброскорости на опорах 5 (рис. 1) и 6 указывает на то, что имеет место раскрытие (дыхание) полумуфты, т.е. имеются признаки присущие дефекту "излом оси". Следовательно, имеет место комбинированный дефект в соединении полумуфты. Результаты, полученные, модулем автоматизированного диагностирования совпадают с проведенным экспертным анализом.

Разработанная технология диагностирования виброопасных неисправностей ТА позволяет выявить, прежде всего, появление виброопасных неисправностей и дефектов, таких как: поперечная трещина в роторе, сосредоточенный дисбаланс ротора, механический прогиб ротора, тепловой прогиб ротора, коленчатость вала, излом оси вала, повреждение в муфтовых соединениях, нарушение устойчивости движения валопровода в подшипниках скольжения.

Для оперативной и периодической оценки вибросостояния роторных агрегатов, не охваченных стационарными системами виброконтроля, а также для проведения специальных диагностических процедур (контурный обход, балансировка), в ИПМаш НАН Украины разработан мобильный измерительный комплекс на базе нетбука.

Технические средства комплекса включают средства измерения параметров механических колебаний (виброперемещений вала и опор подшипни-

ков) и средства автоматизированного сбора, регистрации, обработки, отображения, сохранения и архивирования данных о параметрах агрегата.

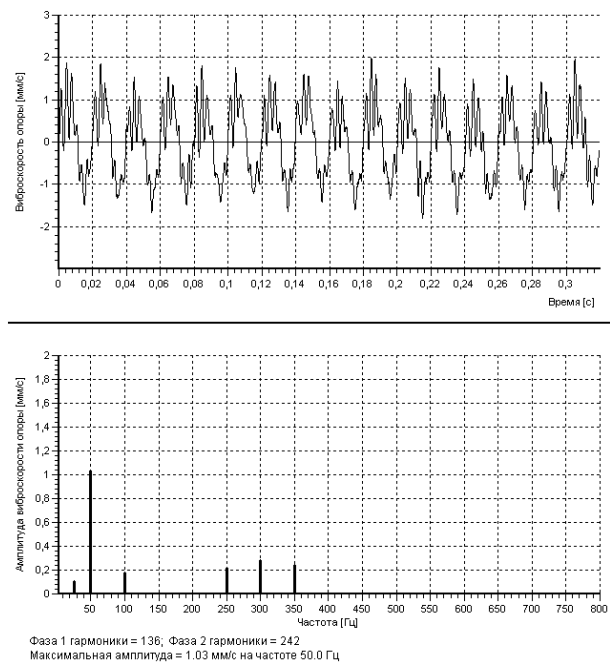


Рис. 1. Виброскорость опоры № 5 и ее спектральные составляющие

Данные о виброперемещении вала в виде нормированных аналоговых сигналов формируются в системе по сигналам бесконтактных вихретоковых датчиков и соответствующих им функциональных преобразователей [2]. Данные о виброскорости опор

в виде нормированных аналоговых сигналов формируются в системе по сигналам контактных вихретоковых датчиков и соответствующих им функциональным преобразователям [2]. Для приема, регистрации, сбора, обработки, отображения, сохранения и архивирования данных о параметрах уравниваемого ротора используется нетбук с внешней платой АЦП/ЦАП.

Мобильный измерительный комплекс обеспечивает:

- одновременное измерение и регистрацию сигналов относительного виброперемещения ротора, виброскорости подшипниковых опор и сигнала от метки на валу для синхронизации измерений и обработки сигналов вибрации (максимальное количество измерительных аналоговых каналов – 32);

- определение и визуализацию размаха относительного виброперемещения ротора, среднее квадратическое значение (СКЗ) виброскорости опоры;

- определение и визуализацию спектральных характеристик вибрации ротора и опор в диапазоне 3-1000 Гц с шагом 1,5 Гц;

- сигнализацию о превышении допустимых величин параметров вибрации ротора и опор;

- визуализацию вибросигналов (виброперемещения и виброскорости) и траекторий движения вала в плоскости подшипника и фазовых траекторий опор подшипников;

- расчеты пробной и уравнивающей симметричной и кососимметричной системы грузов уравнивания (вес и угол установки);

- векторное сложение (разложение) уравнивающих грузов по углам ротора и вдоль ротора;

- представление неуравновешенности в виде модуля веса и угла или в виде векторов в графической форме;

- формирование выбеговых и пусковых характеристик турбоагрегата (ТА);

- визуализацию, печать и архивирование полученных результатов;

- постанализ записанной информации.

Для оценки вибросостояния турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ с генератором ТГВ-200М, разработки рекомендаций по снижению уровня вибрации и определения причин разрушений вкладыша подшипника первой опоры проведены виброисследования с использованием мобильного измерительного комплекса. Измерение и регистрация параметров вибрации опор проводилось параллельно по 5 каналам с синхронизацией от фазовой метки. Осциллограммы виброскорости регистрировались при номинальной нагрузке ТА. Повышенная вибрация наблюдалась на опоре № 1 в осевом направлении измерения и на опорах № 6, № 7 в поперечном направлении. Наибольший вклад в СКЗ виброскорости

опоры в осевом направлении вносит первая оборотная гармоническая составляющая виброскорости, а на опорах № 6, № 7 в поперечном направлении – первая и вторая оборотная гармонические составляющие виброскорости опоры. Повышенная вибрация на опорах генератора вызвана электромагнитными силами статора генератора, о чем свидетельствует высокий уровень 100 Гц составляющей в спектре виброскорости.

Для определения причин повышенной вибрации первой опоры была выполнена оценка влияния режимов работы на вибросостояние агрегата. Для этого непрерывно, в течение нескольких часов, на различных режимах работы ТА (разгрузка от номинальной мощности до 130 МВт, работа при нагрузке 130 МВт, нагружение от 130 МВт до номинальной нагрузки и работа на скользящих параметрах) проводилось измерение и запись виброскорости на опоре № 1 по трем ортогональным направлениям (вертикальному, поперечному и осевому) и на опоре № 2 в вертикальном и поперечном направлениях.

Повышенный уровень осевой вибрации на первой опоре зависит от паропотока и парораспределения. При работе ТА на скользящих параметрах относительное изменение СКЗ виброскорости опоры 1 в вертикальном направлении больше по отношению к СКЗ виброскорости в поперечном и осевом направлениях, что косвенно указывает на рост вибрации вала в вертикальном направлении. Причинами, вызывающими осевую вибрацию на опоре № 1, может быть: неравномерность и пульсация паропотока, эксплуатационная расцентровка опор № 1, № 2 под воздействием нагрева фундамента, тепловой прогиб ротора цилиндра высокого давления (ЦВД), дефекты в жесткой муфте ротора высокого давления (РВД) – ротора среднего давления (РСД), виброактивность опорного узла 1. Для уточнения причин, вызывающих осевую вибрацию на опоре № 1, были проведены замеры виброперемещения вала в расточке подшипника № 1.

Уровень вибрации вала в опоре № 1 сопоставим с зазором в подшипнике (размах виброперемещения достигает 800 мкм и более в поперечном направлении и 250-300 мкм в вертикальном направлении). Из графика виброперемещения вала в вертикальном направлении (рис. 2) видно, что синусоида в нижней части полуволны имеет "срез", что может указывать на задевание ротора о нижний вкладыш подшипника. Спектр виброперемещения вала обогащен высокочастотными составляющими. На рис. 2 видны 100, 150, 200 Гц спектральные составляющие виброперемещения вала, что также подтверждает предположение о задевании ротором баббита вкладыша подшипника. На рис. 3 изображена траектория относительного движения шейки вала в расточке подшипника опоры № 1.

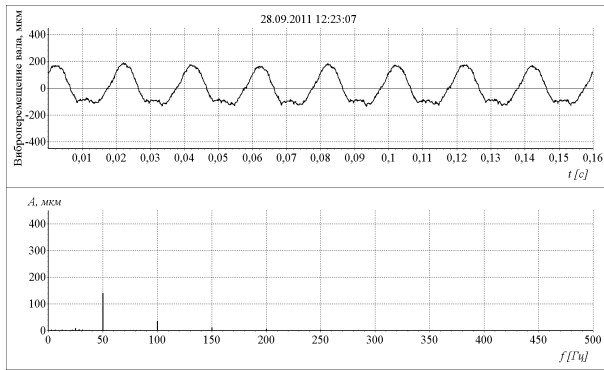


Рис. 2. Виброперемещение вала (опора № 1)

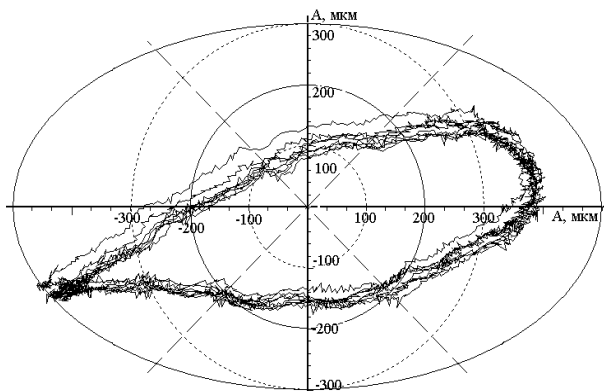


Рис. 3. Траектория относительного движения центра вала в расточке подшипника (опора № 1)

Траектория приближенная, т.к. виброперемещение по двум составляющим фиксировалось последовательно, а не одновременно, кроме того, на ее вид влияли погрешности установки датчика при измерениях.

Такой же спектр, обогащенный высокочастотными составляющими, наблюдается и по опоре. На осциллограммах видны резкие пики в сигнале, которые затем затухают. Особенно явно такие пики на-

блюдались при работе ТА на скользящих параметрах (рис. 4).

Разрушение вкладыша подшипника первой опоры, очевидно, происходит из-за значительной вибрации ротора ЦВД (и касания его о вкладыш), которая может быть вызвана его неуравновешенностью, тепловым прогибом, пульсацией давления в регулирующих клапанах, колебаниями стула и, возможно, трещиной в роторе. Для уточнения диагноза необходимы дополнительные исследования вибрации не только опор, но и вала во всех опорах, что нельзя выполнить на работающем агрегате с помощью мобильного диагностического комплекса. Кроме того, необходимо наблюдение за трендами вибропараметров вала и траекториями движения шейки ротора в расточке подшипника не только на опоре №1, но и остальных опорах. Значительная осевая вибрация первой опоры, возникает вследствие влияния вибрации вала и касания его о вкладыш подшипника и поддерживается неуравновешенными нагрузками от паропотока и его пульсацией, виброактивностью первой опоры, кручением и осевыми деформациями ригеля, тепловыми расширениями первой рамы фундамента и вибрацией стула. Осевая вибрация первой опоры не является основной причиной разрушения вкладыша подшипника первой опоры, хотя и способствует этому. Рекомендовано уменьшить неуравновешенность паропотока и его пульсацию при подаче на регулируемую ступень. Провести дефектоскопию и балансировку ротора ЦВД а также провести работы по укреплению ригеля фундамента для исключения опрокидывания стула и расцентровки опор. Также предложено установить штатную систему вибродиагностики для обеспечения непрерывного наблюдения за трендами вибропараметров роторов и опор и своевременного предупреждения развития нештатных ситуаций.

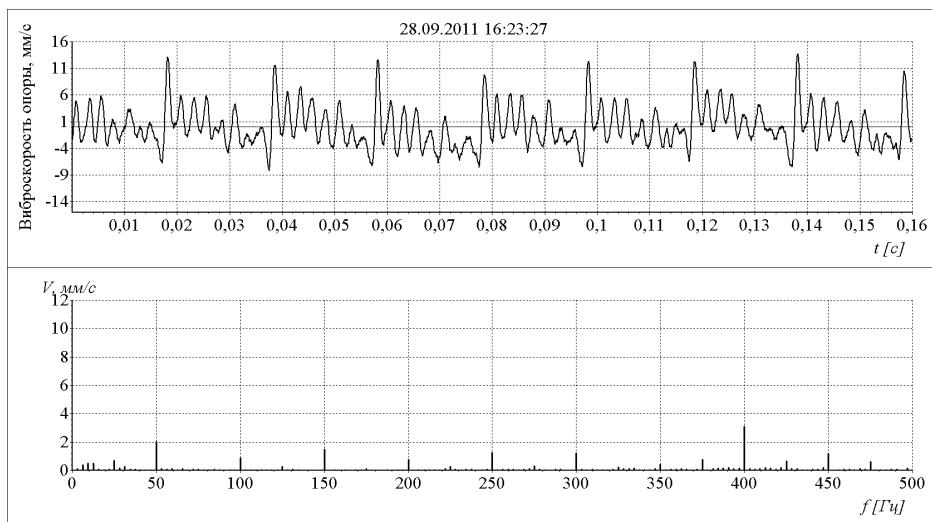


Рис. 4. Виброскорость опоры №1 (вертикальная составляющая) при работе ТА на скользящих параметрах

Предложенные стационарные и мобильные средства вибродиагностики с разработанным методическим и программным обеспечением вибродиагностического модуля могут быть адаптированы под нужды Заказчика. Опыт эксплуатации предложенных аппаратных средств и методического обеспечения подтверждает возможности более широкого применения и дальнейшего их развития для решения задач повышения надежной работы эксплуатации энергетического и транспортного оборудования.

Литература

1. Шульженко, Н.Г. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований) [Текст]: моногр. / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Б.Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 370 с.
2. Помехоустойчивые измерители вибрации и

их применение в динамике машин [Текст] / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, Ю.Г. Ефремов и др. // Вібрації в техніці та технологія. – 2005. – № 2. – С. 105–107.

3. Shulzhenko, N.G. Influence of operational modes of a powerful turboset on its vibrational state [Text] / N.G. Shulzhenko, Yu.G. Efremov // Transactions of the Institute of fluid-flow Machinery: selected papers from the International Conference on Turbines of Large Output. – Gdańsk, 2003. – P. 147–153.

4. Методика определения параметров крутильных деформаций роторов турбоагрегатов [Текст] / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, В.И. Цибулько, Ю.Г. Ефремов // Датчики и системы. – 2004. – № 1. – С. 30–31.

5. Інформаційні технології та вимірювальні засоби діагностування турбоагрегатів [Текст] / М.Г. Шульженко, Ю.Г. Єфремов, В.Й. Цибулько, О.В. Депарма // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – № 45. – С. 445–451.

Поступила в редакцію 30.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр. К.В. Аврамов, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТУРБОАГРЕГАТІВ

М.Г. Шульженко, Ю.Г. Єфремов, В.Й. Цибулько, О.В. Депарма

Описуються створені вимірювальні засоби й технології діагностування вібрації роторних агрегатів. Приводяться приклади використання розроблених стаціонарних і мобільних апаратних засобів і технологій діагностування різних турбоагрегатів. Виконано порівняння результатів діагностування вібростану турбоагрегату Т250/300-240 з використанням діагностичного модуля з даними експертної оцінки його вібростану. Дано оцінку вібростану турбоагрегату ДО-200-130 і вироблені рекомендації зі зниження рівня вібрації в підшипниках. Результати використані електрогенеруючими підприємствами.

Ключові слова: технології діагностування, вібрація, засоби реєстрації, турбоагрегат.

APPLICATION OF METHODS AND MEANS OF VIBRATION DIAGNOSTICS FOR THE ESTIMATION OF RELIABILITY OF WORK OF TURBINE SETS

N.G. Shulzhenko, Yu.G. Efremov, V.I. Tsybulko, A.V. Deparma

The created measuring means and production engineering of diagnosing of vibration of rotor units are presented. Examples of use of the developed stationary and mobile hardware and production engineering of diagnosing of different turbine sets are resulted. Comparison of results of diagnosing of vibration state of turbine set T250/300-240 with use of the diagnostic module with data of its expert estimation of vibration state is executed. The estimation of vibration state of turbine set K-200-130 is given. Recommendations about decrease of the level of vibration in bearings are produced. Results are used by the electrogenerating factories.

Key words: diagnostic production engineering, vibration, registration means, the turbine-driven set.

Шульженко Николай Григорьевич – д-р техн. наук, проф., зав. отделом вибрационных и термочностных исследований, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Ефремов Юрий Геннадиевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Цибулько Вадим Иосифович – Главный конструктор, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Депарма Александр Вадимович – Главный электроник, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.