



Шульженко Н. Г.  
Ефремов Ю. Г.  
Цыбулько В. И.  
Депарма А. В.

**Институт проблем  
машиностроения  
им. А. Н.Подгорного  
НАН Украины**

УДК.539.3:534.1

## ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ПРИЧИН ПОВЫШЕННОЙ ВИБРАЦИИ ТУРБОАГРЕГАТОВ

*Викладається технологія безперервного автоматизованого аналізу й діагностування вібраційного стану потужних турбоагрегатів ТЕС і ТЕЦ для виявлення причин зміни вібрації й попередження розвитку позаштатних ситуацій.*

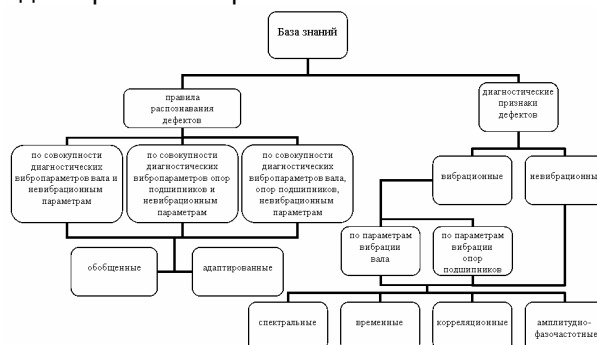
*The developed technologies of the analysis of a vibrating state of powerful turbine units of thermal power stations and the created computerized systems of the continuous automated analysis of vibration for revealing of the reasons of change of vibration and preventions of development of unforeseen situations which are introduced on power blocks are described.*

Для осуществления автоматизированного диагностирования вибросостояния турбоагрегата необходимо выявить основные причины и признаки виброопасных дефектов и установить взаимосвязи между параметрами состояния и параметрами получаемых сигналов (отзывами) с учетом влияния режимных факторов. Для этого необходимо совершенствование и развитие технических средств получения первичных данных их обработки, а также методологии распознавания основных неисправностей. На базе предыдущих разработок аппаратных средств, методического и программного обеспечения автоматизированных систем вибродиагностики (АСВД) турбоагрегатов (ТА) [1-5] авторами усовершенствованы и разработаны новые измерительные средства и информационная технология вибродиагностирования турбоагрегатов, которая описывается в данной работе.

Поиск и выявление виброопасных дефектов выполняется по характерным диагностическим признакам и сформированным диагностическим массивам в соответствии с разработанным программно-алгоритмическим обеспечением информационно-диагностического модуля. Функционально модуль включает базу знаний (БЗ), базу данных (БД), блок обработки информации, блок формирования диагностического массива, блок распознавания (интерпретатор) и пользовательский интерфейс. Интерпретатор, БЗ и пользовательский интерфейс составляют оболочку информационно-диагностического модуля. В базе знаний содержатся описания

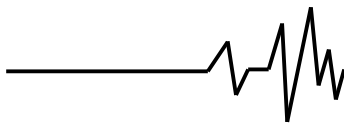
признаков и правила распознавания дефектов. Структура БЗ дана на рис. 1. Диагностические признаки подразделяются на спектральные, временные (тренды), корреляционные (взаимосвязи вибрационных и не вибрационных параметров, а также параметров между собой), амплитудно-фазочастотные.

Правила распознавания подразделяются на обобщенные и адаптированные. Обобщенные правила составлены на основании результатов математического моделирования, натурных испытаний и опыта эксплуатации. Адаптированные правила составлены для конкретного типа турбоагрегатов путем адаптации обобщенных правил на основании полученных и накопленных экспериментальных данных и из опыта эксплуатации. При проведении диагностирования приоритет имеет адаптированное правило.



**Рис. 1. Структура базы знаний  
информационно-диагностического модуля**

База данных имеет три уровня (рис. 2). Первый уровень содержит осциллограммы (мгновенные значения виброперемещений вала и виброскорости опор подшипников),



временные реализации технологических и вибрационных параметров (размахи виброперемещений вала и СКЗ виброскорости опор) и зависимости вибрационных параметров от частоты вращения ТА. Второй уровень содержит информативные компоненты (спектральные, временные, корреляционные, амплитудно-фазочастотные), сформированные по данным первого уровня, блоком обработки информации. Третий уровень содержит значения диагностических признаков, сформированные блоком формирования диагностического массива по данным второго уровня.

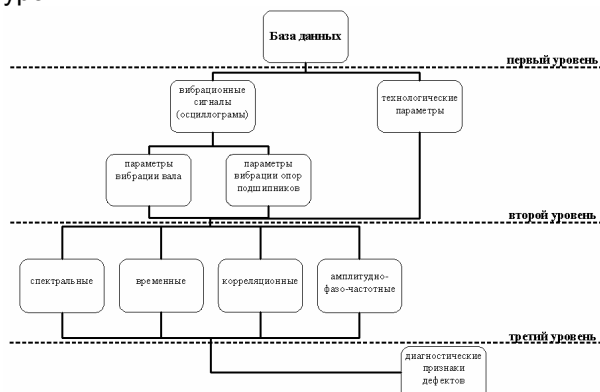


Рис. 2. Структура базы данных информационно-диагностического модуля

Чувствительность алгоритма оценки появления виброопасных неисправностей ТА зависит от уровня начальных значений вибропараметров (виброперемещения вала и СКЗ виброскорости опор). Начальные значения вибропараметров выбирались в пределах, не более 0,5 от тех значений, при которых разрешается эксплуатация ТА без ограничения срока [6–8]. Начальные значения для размахов виброперемещения вала выбрано 60 мкм, для СКЗ виброскорости опор – 2 мм/с, а для амплитуд спектральных составляющих виброперемещения вала – 10 мкм, виброскорости опор – 1 мм/с.

Методика автоматизированной оценки появления виброопасных неисправностей турбоагрегата состоит в следующем. Временные реализации вибрационных и технологических параметров обрабатываются соответствующим программным модулем с использованием известных [9–12] и разработанных ранее методов [13, 14]. Вычисленные информативные компоненты запоминаются на втором уровне БД и подаются на вход блока формирования диагностического массива.

Информативные компоненты содержат неоднородные данные и представляются в числовой и логической шкале. Для

формирования диагностического массива информативные компоненты формализуются (приводятся к безразмерным значениям в диапазоне от 0 до 1,0).

Рассмотрим, например нечеткое множество  $\Psi$ , описывающее изменение относительной амплитуды оборотной составляющей виброперемещения вала  $d_1$ . Функция принадлежности  $\mu_{\Psi}(d_1)$ , построенная для  $\Psi$ , характеризует наличие и степень изменения амплитуды указанной оборотной составляющей виброперемещения вала. Используя  $\mu_{\Psi}(d_1)$ , можно формализовать ответ на вопрос, есть ли изменение вибропараметра (рис. 3). Если  $d_1$  изменился на 50 % и более, то пользуясь графиком  $\mu_{\Psi}(d_1)$ , имеем однозначный ответ "да", т.е.  $\mu_{\Psi}(d_1)=1$ . При меньших значениях  $d_1$  значение  $\mu_{\Psi}(d_1)$  изменяется в диапазоне от 0 до 0,99.

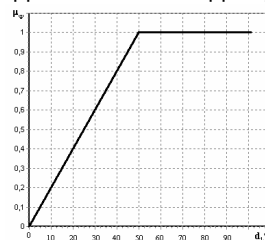


Рис. 3. График функции принадлежности для нечеткого множества  $\Psi$

Заметим, что один и тот же признак при идентификации разных дефектов, может иметь разные функции принадлежности  $\mu$ . Функции принадлежности описаны в БЗ для всех характерных признаков виброопасных дефектов.

Функции принадлежности, весовые коэффициенты и базовые значения могут уточняться в процессе обучения алгоритма диагностирования и на основе экспертных оценок. Снижение уровня начальных значений вибропараметров позволяет изменять чувствительность алгоритма по распознаванию дефектов. Очевидно, что при этом должны ужесточаться требования к средствам измерения по их точности и надежности.

Полученные значения диагностических признаков запоминаются на третьем уровне БД и подаются на вход интерпретатора. В интерпретаторе, в цикле по всем дефектам, вычисляется значение вероятности появления данного дефекта, с применением правил распознавания БЗ соответствующей совокупности диагностических признаков.

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). После запуска информационно-диагностического модуля, пользователь (используя интерфейс программы, изображенный на рис. 4) выбирает номер опоры ТА, определяет по какой совокупности признаков и параметров будет проведено диагностирование дефектов и проводит оценку по каждому признаку самостоятельно. Результаты диагностирования выводятся в текстовый файл в табличном виде, где указываются номер опоры, по которой выдается диагноз, а также значения вероятности появления (развития) диагностируемых дефектов.

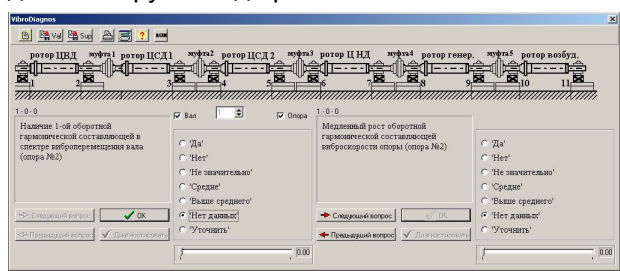


Рис. 4. Интерфейс информационно-диагностического модуля

Применение разработанной методики оценки вибрационного состояния турбоагрегата Т250/300-240 и выявления виброопасных неисправностей рассмотрим по данным вибрационных и технологических параметров, полученных АСВД ст. бл. № 3 Харьковской ТЕЦ-5.

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 таблице 1. Результат обработки диагностических массивов интерпретатором в виде оценки наличия дефекта приводится в таблице 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.

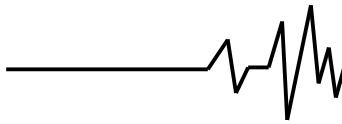
Таблица 1  
Значения относительных показателей проявления вибропризнаков

Признак по вибропараметрам вала	Z <sub>5</sub> , %
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

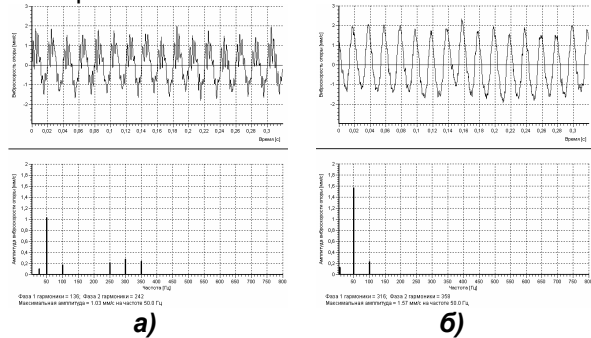
Таблица 2  
Результаты диагностирования турбоагрегата Т250/300-240

Название дефекта	Оценка наличия дефекта, %			
	по вибропараметрам вала		по вибропараметрам 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 так же наличие второй гармонической и ВЧ составляющих виброскорости на опорах 5 и 6 (рис. 4) 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.



**а) б)**  
**Рис. 4. Виброскорость опоры и ее спектральные составляющие:**  
**а) – опора 5; б) – опора 6**

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

Информационно-диагностический модуль допускает расширение и дополнение новыми признаками, правилами и дефектами. Для этого необходимо в БЗ добавить описание нового дефекта, диагностические признаки и правила для его идентификации. При этом логика интерпретатора остается прежней.

Внедрение разработанной информационной технологии и технических средств диагностирования агрегатов ТЭС и ТЭЦ позволит повысить безопасность эксплуатации ТА и продлить срок их эксплуатации. Изготовление и оснащение агрегатов АСВД осуществляется ИПМаш НАН Украины совместно с ЗАО "НПО Аэрокосмоэкология Украины" и отвечает требованиям нормативных документов и современному мировому уровню развития в этой области.

#### Литература

1. Шульженко Н.Г. Задачи термочности, вибродиагностики и ресурса энергетических агрегатов: монография / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтовский, Б.Ф. Зайцев. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – 444 с.

2. Аппаратурное обеспечение систем непрерывного вибромониторинга роторных агрегатов / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, Ю.Г. Ефремов и др. // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 7. – С. 35–38.

3. Методическое обеспечение систем непрерывного мониторинга и анализа параметров колебаний для диагностирования вибрационного состояния роторных агрегатов / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, Ю.Г. Ефремов и др. // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 9. – С. 34–40.

4. Обеспечение надежности и ресурса энергетических турбоагрегатов использованием системы диагностики вибраций и предупреждения нештатных ситуаций / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, Ю.Г. Ефремов и др. // Энергетика и электрификация. – 2004. – № 5. – С. 41–43.

5. Анализ и диагностирование вибрационного состояния мощных турбоагрегатов / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, Ю.Г. Ефремов и др. // Энергетика та електрифікація. – 2006. – № 11. – С. 30–38.

6. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила / ОЕП "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики". – Київ, 2003. – 597 с.

7. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. – Взамен ГОСТ 25364–88; введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 6 с.

8. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации валопроводов и общие требования к проведению измерений: ГОСТ 27165–97. – Взамен ГОСТ 27165–86; введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 8 с.

9. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес, Л. Энноксон. – М.: Мир, 1982. – 428 с.

10. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

11. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер. с англ. / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с., ил.

12. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

13. Influence of operational modes of a powerful turboset on its vibrational state / N.G. Shulzhenko and 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.

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