

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА и НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 3, 2002

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Международная ассоциация «Сварка»

Издается с января 1989 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

| | |
|--|----|
| ИВАНОВ О.В., ЛЯНЗБЕРГ В.П. Техническая диагностика подшипников качения | 3 |
| ИГУМЕНЦЕВ Е.А., МАРЧУК Я.С., ГЕТЬМАНЕНКО С.В. Нормирование вибрации газоперекачивающих агрегатов | 7 |
| ГЕЛЬМАН Л.М. Сравнительный анализ диагностических эффективностей Фурье-компонент и преобразования Хартлея | 12 |
| НУСРАТОВ О.К. Позиционно-бинарный алгоритм анализа и идентификации периодических кривых | 14 |
| МАРТЫНОВСКИЙ В.А. Использование спектра огибающей высокочастотной вибрации для диагностики подшипников качения | 17 |
| ЕРМАК Е.М. Методика уточнения характеристик жесткости узловых и опорных связей стального каркаса «крановых» цехов на основе динамических испытаний | 22 |

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

| | |
|---|----|
| ТРОИЦКИЙ В.А., РАДЬКО В.П., ШЕВЧЕНКО И.Я., ФЕДОРЯК П.В., ДЗЫГАНСКИЙ А.И. Электромагнитоакустические приборы для неразрушающего контроля металлоконструкций и элементов изделий, эксплуатируемых в космосе | 26 |
| СТОРОЖЕНКО В.А., МЕЛЬНИК С.И., ЧУМАКОВ А.Г. Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии теплозащитных покрытий | 31 |
| СЕБКО В.П., СУЧКОВ Г.М. Исследование применяемости вихревого контроля металлообъектов с помощью моделирования дефектов | 35 |
| ТОЖИЕВ Р.Ж., РАХИМОВ Н.Р., МАХМУДОВ К.Г., РУЗМАТОВ Ш.К. Неразрушающий контроль качественных параметров металлических поверхностей на основе оптоэлектронных датчиков | 38 |
| НАЙДА С.А. Акустотермометрия жидких объектов с помощью пьезоприемников мегагерцевого диапазона | 41 |
| МАКЕЕВ Ю.Г., МОТОРНЕНКО А.П. Измерение электрических параметров диэлектриков в микроволновом диапазоне | 49 |
| КОЛБИН И.Б., ГОРБЕНКО В.Н., ТОЛПУХИЙ М.М. Стандартные образцы предприятия с вертикальными цилиндрическими отражателями: возможность их применения вместо образцов с зарубками | 53 |

КАЧЕСТВО И БЕЗОПАСНОСТЬ

| | |
|---|----|
| БОНДАРЕНКО Ю.К. Проблеми забезпечення якості продукції та їх вирішення в законодавчій сфері України | 54 |
|---|----|

ХРОНИКА

| | |
|--|----|
| Шекеро Л.А. Участие делегации УО НКТД в 8-й Европейской конференции по неразрушающему контролю | 57 |
| Наши поздравления! | 62 |

| | |
|---------------|----|
| РЕКЛАМА | 63 |
|---------------|----|

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Б. Е. ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
З. А. Майдан (отв. секр.),
И. П. Белокур,
Ю. К. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, Э. Ф. Гарф,
А. А. Грузд, Ю. Б. Дробот,
Н. Н. Зацепин, В. И. Иванов,
О. М. Карпаш, В. В. Клюев,
Л. М. Лобанов, А. А. Лебедев,
В. К. Лебедев, Г. Г. Луценко,
Н. В. Новиков, Е. С. Переображенев,
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,
В. Н. Учанин, А. И. Степаненко,
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,
А. Ф. Улитко, Т. М. Швец,
И. Я. Шевченко,
А. В. Шимановский

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (044) 261-58-81, 269-26-23
Факс: (044) 268-04-86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://www.nas.gov.ua/pwj>

Научные редакторы

Ю. Н. Посыпайко, А. А. Грузд

Редактор

Г. В. Ольшевская

Электронная верстка

И. Р. Наумова, А. И. Сулима,
Н. Н. Приймаченко,
И. В. Петушков

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень
утверженных ВАК Украины
изданий для публикации трудов

Журнал издается при содействии:

Технического комитета по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»



УНСТ
Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

Nº 3, 2003

Founded in January, 1989

*The National Academy of Sciences of Ukraine
The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine
International Association «Welding»*

CONTENTS

TECHNICAL DIAGNOSTICS

| | |
|---|----|
| <i>IVANOV O.V., LYANZBERG V.P.</i> Technical diagnostics of rolling-contact bearings | 3 |
| <i>IGUMENSTEV E.A., MARCHUK Ya.S., GETMANENKO S.V.</i> Rating of vibrations in gaspumping units | 7 |
| <i>GELMAN L.M.</i> Comparative analysis of diagnostic effectiveness of Fourier components and Hartley transformations | 12 |
| <i>NUSRATOV O.K.</i> Position-binary algorithm of analysis and identification of periodic curves | 14 |
| <i>MARTYNOVSKY V.A.</i> Use of the spectrum of high-frequency vibration envelope for diagnostics of rolling-contact bearings | 17 |
| <i>ERMAK E.M.</i> Procedure of more precise determination of rigidity characteristics of nodal and support connections in a steel frame of «crane» shops based on dynamic testing | 22 |

NONDESTRUCTIVE TESTING

| | |
|---|----|
| <i>TROITSKY V.A., RADKO V.P., SHEVCHENKO I.Ya., FEDORYAKA P.V., DZYGANSKY A.I.</i> Electromagnetoacoustic instruments for nondestructive testing of metal structures and elements of items operating in space | 26 |
| <i>STOROZHENKO V.A., MELNIK S.I., CHUMAKOV A.G.</i> Optimisation of the modes of thermal flaw detection of thermal barrier coatings | 31 |
| <i>SEBKO V.P., SUCHKOV G.M.</i> Investigation of applicability of eddy current control of metal objects using defect simulation | 35 |
| <i>TOZHIEV R.Zh., RAKHIMOV N.R., MAKHMUDOV K.G., RUZMATOV Sh.K.</i> Nondestructive control of quality parameters of metal surfaces based on optoelectronic transducers | 38 |
| <i>NAIDA S.A.</i> Acoustothermometry of liquid objects using piezoelectronic receivers of megahertz range | 41 |
| <i>MAKEEV Yu.G., MOTORnenko A.P.</i> Measurement of electric parameters of dielectrics in the microwave range | 49 |
| <i>KOLBIN I.B., GORBENKO V.N., TOPCHII M.M.</i> Standard factory samples with vertical cylindrical reflectors: ability to apply them instead of notched samples | 53 |

QUALITY AND SAFETY

| | |
|---|----|
| <i>BONDARENKO Yu.K.</i> Problems of product quality assurance and solving them in the legal sphere in Ukraine | 54 |
|---|----|

NEWS

| | |
|---|----|
| <i>SHEKERO L.A.</i> Participation of the delegation of US of NDTTD in 8th European Conference on Nondestructive Testing | 57 |
| Congratulations | 62 |

| | |
|--------------------------|----|
| ADVERTISING | 63 |
|--------------------------|----|

BOARD OF EDITORS

**Editor-in-Chief
B. E. Paton**

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, E. F. Garf,
A. A. Gruzd, Yu. B. Drobot,
V. I. Ivanov, O. M. Karpass,
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,
G. G. Lutsenko,
N. V. Novikov, E. S. Pereverzev,
P. P. Prokhorchenko, V. P. Radko,
I. Ya. Shevchenko,
A. I. Stepanenko, V. A. Strizhalo,
A. Ya. Teterko,
V. N. Uchanin, A. F. Ulitko,
T. M. Shvets, N. N. Zatsepin,
A. V. Shimanovsky

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680,
Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 261 58 81,
261 54 03, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://www.nas.gov.ua/pwj>

Scientific editors

Yu. N. Posypaiko, A. A. Gruzd

Editor G. V. Olshevckay

Electron galley

I. R. Naumova, A. I. Sulyma,
N. N. Priymachenko,
I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001



ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

О. В. ИВАНОВ, В. П. ЛЯНЗБЕРГ

Рассмотрены методы контроля и диагностики подшипников качения, основанные на измерении параметров вибрации. Описаны базирующиеся на этих методах приборы контроля.

Methods of control and diagnostics of rolling-contact bearings based on measurement of vibration parameters are considered. Instrumentation for implementation of these methods is described.

Подшипники качения являются самым распространенным и наиболее уязвимым элементом любого роторного механизма. Они осуществляют пространственную фиксацию вращающихся роторов и воспринимают основную часть статических и динамических усилий, возникающих в механизме. Поэтому техническое состояние подшипников является важнейшей составляющей, определяющей работоспособность механизма в целом.

Для повышения ресурса и надежности оборудования, сокращения затрат, связанных с ремонтом и простоями, необходима система точного диагностирования текущего технического состояния подшипников качения. В связи с этим широкое распространение во всем мире получили методы контроля и диагностики, базирующиеся на измерении параметров вибрации. Это обусловлено тем, что вибрационные сигналы несут в себе информацию о состоянии механизма и подшипниках в частности. Теория и практика анализа вибросигналов настолько отработана, что можно получить достоверную информацию о текущем техническом состоянии не только подшипника, но и его элементов.

В настоящее время в практике используются четыре метода оценки технического состояния подшипников качения: ПИК-фактора, прямого спектра, спектра огибающей и ударных импульсов. Рассмотрим подробнее каждый из них.

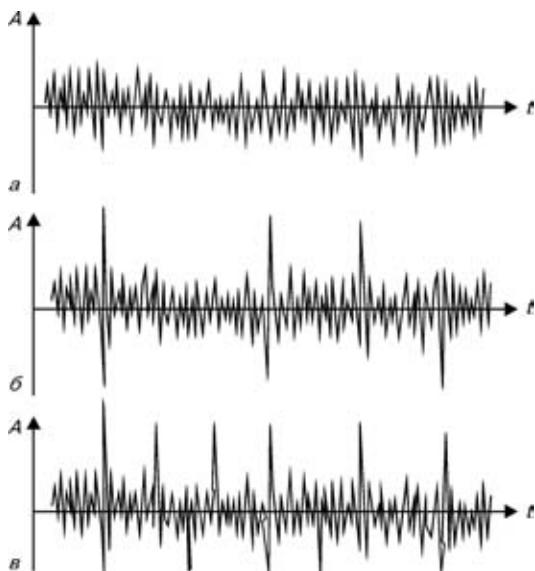


Рис. 1. Характер вибросигналов в процессе работы подшипника, полученных методом ПИК-фактора

© О. В. Иванов, В. П. Лянзберг, 2002

Метод ПИК-фактора. Для контроля технического состояния подшипников данным методом необходимо иметь обычный виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала: среднеквадратичное значение (СКЗ) уровня вибрации, т. е. энергию вибрации; пиковую амплитуду (ПИК) вибрации (положительную, отрицательную или полный размах — значения не имеет). Отношение двух этих параметров ПИК/СКЗ называется ПИК-фактором.

В осциллограмме нового хорошо смазанного подшипника присутствует стационарный сигнал шумового характера (рис. 1, а). С течением времени, по мере образования дефектов на деталях подшипника, в сигнале начнут появляться отдельные короткие амплитудные пики, соответствующие моментам соударения дефектов (рис. 1, б). В дальнейшем с развитием дефекта вначале возрастает амплитуда пиков, затем постепенно увеличивается и их количество (рис. 1, в). Например, появившийся на одном из шариков дефект создает впоследствии забоину на кольце, которая переносится на другой шарик; дефекты шариков начинают вырабатывать сепаратор и т. д. до полного разрушения.

Результаты измерений параметров вибросигналов показаны на рис. 2. Вначале по мере появления и развития дефекта возрастает функция ПИК, а СКЗ изменяется очень мало, поскольку отдельные очень короткие амплитудные пики практически не приводят к изменению энергетических характеристик сигнала. В дальнейшем по мере увеличения амплитуд и количества пиков начинает увеличиваться энергия сигнала, возрастает СКЗ вибрации. Отношение ПИК/СКЗ из-за временного сдвига между ними имеет явно выраженный максимум на

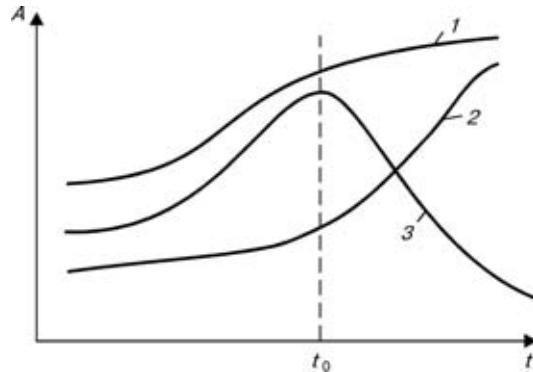


Рис. 2. Изменение во времени параметров вибросигнала: 1 — ПИК; 2 — СКЗ; 3 — ПИК/СКЗ (ПИК-фактора)



временной оси. На этом и основывается метод ПИК-фактора. Экспериментально установлено, что момент прохождения функции ПИК-фактор через максимум t_0 (рис. 2) соответствует остаточному ресурсу подшипника порядка 2–3 недель.

Основным достоинством этого метода является его простота (для реализации нужен обычный виброметр общего уровня).

Недостатки метода — слабая помехозащищенность и необходимость проведения многократных измерений в процессе эксплуатации. Установить датчик непосредственно на наружной обойме подшипника практически невозможно, поэтому сигнал вибрации характеризует не только подшипник, но и другие узлы механизма, что в данном случае рассматривается как помехи. Чем дальше установлен датчик от подшипника и сложнее кинематика самого механизма, тем меньше достоверность метода. Кроме того, получить оценку состояния по одному замеру невозможно.

Метод прямого спектра. Для контроля технического состояния подшипников по данному методу необходим анализатор спектра вибрации (виброанализатор). Метод базируется на анализе спектра вибрации — выявлении периодичности (частоты) появления амплитудных всплесков (рис. 1, *в*). Вибрационный сигнал анализируется узкополосным виброанализатором, и по частотному составу спектра (рис. 3) можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника. Каждому дефекту на элементах подшипника (тelaх качения, внутреннем и наружном кольце, сепараторе) соответствуют свои частоты, которые зависят от кинематики подшипника и скорости его вращения. Наличие той или иной частотной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта, а амплитуда этой составляющей — о глубине дефекта.

К достоинствам метода следует отнести: высокую помехозащищенность (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же частотах, что и дефекты подшипника); высокую информативность метода; возможность оценки состояния элементов подшипника (тел качения, внутреннего и наружного кольца, сепаратора), поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

Недостатки метода: высокая стоимость, если использовать виброанализатор только для конт-

роля подшипников; малая чувствительность к зарождающимся и слабым дефектам в связи с тем, что в большинстве случаев подшипники являются маломощными источниками вибрации. Небольшой скол на шарике или дорожке не в состоянии заметно качнуть механизм так, чтобы можно было увидеть частотную составляющую в спектре. И только при достаточно сильных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться в спектре.

Этот метод используется достаточно широко, особенно профессионалами, и дает хорошие результаты.

Метод спектра огибающей. Для контроля технического состояния подшипников по данному методу необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации. Метод базируется на анализе высокочастотной составляющей вибрации и выявлении модулирующих ее низкочастотных сигналов.

Из рис. 1 видно, что высокочастотная часть сигнала меняет свою амплитуду во времени, т. е. она модулируется каким-то более низкочастотным сигналом. Выделение и обработка этой информации и составляют основу метода. Рассмотрим подшипник с зарождающимся дефектом (скол, трещина и т. д.) на наружной обойме. При ударе тел качения о дефект возникают высокочастотные затухающие колебания, которые будут повторяться (модулироваться) с частотой, равной частоте перекатывания тел качения по наружному кольцу. Именно в этом модулирующем сигнале содержится информация о состоянии подшипника.

Установлено, что наилучшие результаты достигаются в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала, получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить узкополосную фильтрацию сигнала, выбрать основную (несущую) частоту в диапазоне от 4 до 32 кГц и анализировать модуляцию этого сигнала. Для этого отфильтрованный сигнал детектируется, т. е. выделяется модулирующий сигнал (его еще называют огибающим), который подается на узкополосный виброанализатор. В результате получаем спектр интересующего нас модулирующего сигнала, или спектр огибающей, что и дало название методу.

Обработка сигнала очень сложна, но результат того стоит. Дело в том, что небольшие дефекты подшипника не в состоянии вызвать заметной вибрации в области низких и средних частот. В то же время для модуляции высокочастотных вибрационных шумов энергии возникающих ударов оказывается вполне достаточно. Таким образом, метод обладает очень высокой чувствительностью. При отсутствии дефектов спектр огибающей представляет собой почти горизонтальную волнистую линию (рис. 4, *а*). При появлении дефектов над уровнем линии сплошного фона начинают возвышаться дискретные составляющие, частоты которых однозначно просчитываются по кинематике и оборотам подшипника (рис. 4, *б*). Частотный состав спектра огибающей позволяет идентифицировать наличие дефектов, а превышение соответствующих состав-

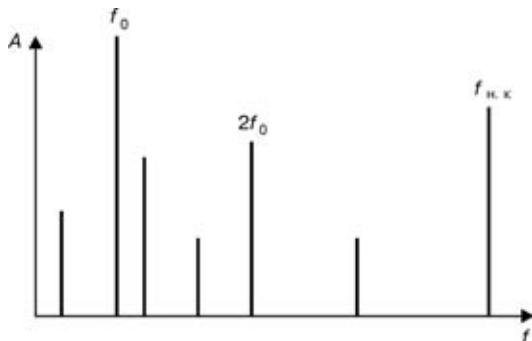


Рис. 3. Частотный сигнал, полученный методом прямого спектра при анализе дефектов подшипника: f_0 — частота вращения; $f_{n,k}$ — частота перекатывания тел качения по наружному кольцу



Сравнительные характеристики методов по пятибалльной системе

| № п/п | Параметр | Оценка метода | | | |
|-------|---|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | | ПИК-фактора | прямого спектра | спектра огибающей | ударных импульсов |
| 1 | Диагностика зарождающихся дефектов | — | * | ***** | **** |
| 2 | Диагностика развитых дефектов | ** | *** | ***** | ***** |
| 3 | Оценка состояния по результатам однократного измерения | — | ** | ***** | **** |
| 4 | Оценка состояния по результатам периодического или постоянного контроля | *** | *** | ***** | **** |
| 5 | Разделение состояния подшипника по кинематике и смазке | — | — | — | **** |
| 6 | Определение дефектов (тела качения, дорожки, сепаратора и т. д.) | — | *** | *** | — |
| 7 | Помехозащищенность | * | ** | ***** | **** |

ляющих над фоном однозначно характеризует глубину каждого дефекта.

Достоинствами этого метода являются высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность, недостатком — высокая стоимость (необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации).

Описанный метод очень широко используется профессионалами в стационарных системах контроля технического состояния оборудования.

Метод ударных импульсов. Он основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел. Ускорение частиц материала в точке удара вызывает волну сжатия, которая распределяется в виде ультразвуковых колебаний. Ускорение частиц материала в начальной фазе удара зависит только от скорости столкновения и не зависит от соотношения размеров тел. Период времени мал, и заметной деформации не происходит. Величина фронта волны является мерой скорости столкновения (удара) двух тел. Во второй фазе удара поверхности двух тел деформируются, энергия движения отклоняет тело и вызывает в нем колебания.

Для измерения ударных импульсов используется пьезоэлектрический датчик, на который не

оказывают влияние фон вибрации и шум. Вызванная механическим ударом фронтальная волна сжатия возбуждает в нем затухающие колебания (рис. 5). Пиковое значение амплитуды этого затухающего колебания прямо пропорционально скорости удара. Поскольку затухающий переходный процесс очень хорошо определяется и имеет постоянную величину затухания, то его можно отфильтровать от других сигналов, т. е. от сигналов вибрации. Измерение и анализ затухающего переходного процесса — основа метода ударных импульсов. Наблюдаемый процесс аналогичен тому, как отзыается на удары камертон — он всегда звенит на своей собственной частоте. Так и подшипниковые узлы от соударения дефектов «звенят» на своей частоте, которая практически всегда находится в диапазоне 28...32 кГц. В отличие от камертона эти колебания очень быстро затухают, поэтому на осциллограммах они выглядят как импульсы, что и дало название методу. Результаты измерений очень легко нормировать по скорости соударения зная геометрию подшипника и его обороты. Амплитуды ударных импульсов однозначно связаны со скоростью соударения и глубиной дефектов. Поэтому по амплитудам ударных импульсов можно достоверно диагностировать наличие дефектов и их глубину.

К числу достоинств этого метода относятся высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность. Он довольно прост и дешев в реализации — существуют простые портативные приборы. Однако существует одно ограничение, связанное с конструктивным исполнением механизма. Поскольку речь идет об измерении ультразвуковых волн колебаний, которые очень сильно затухают на границах разъемных соеди-

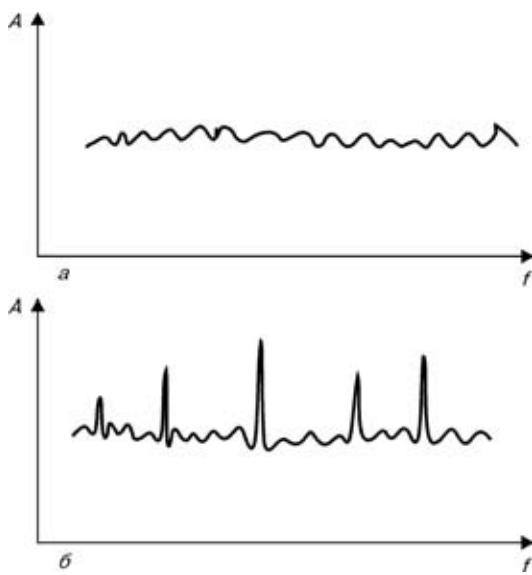


Рис. 4. Спектр огибающей при отсутствии (а) и появлении (б) дефектов на подшипнике



Рис. 5. Осциллограмма подшипника при его диагностировании методом ударных импульсов



Рис. 6. Анализатор спектра вибрации 795М

нений, то для точности измерений необходимо, чтобы между наружным кольцом подшипника и местом установки датчика существовал сплошной массив металла. В большинстве случаев это не вызывает проблем.

Метод широко используется профессионалами, прост и доступен обслуживающему персоналу.

Приборы контроля. Фирма «Сервис технологических машин» совместно с НПП «Контест» производит и поставляет приборы — анализатор спектра вибрации 795М и тестер состояния подшипников 77Д11. Оба прибора сертифицированы (сертификат соответственно № УА-М1/1-676-99 и УА-М1/1-677-99).

Анализатор спектра вибрации 795М (рис. 6) — малогабаритный, автономный, микропроцессорный виброизмерительный прибор с двойным питанием (от внутренних аккумуляторов или от сетевого блока питания БП-05). Он предназначен для измерения и спектрального анализа параметров вибрации, балансировки и наладки механизмов роторного типа. Прибор позволяет измерять динамические сигналы с последующей их записью в энергонезависимую память, просматривать, анализировать и передавать их в базу данных на персональный компьютер. Он может работать как автономный анализатор, а также как коллектор данных в системе прогнозируемого обслуживания оборудования совместно с программным обеспечением. Использование прибора обеспечивает объективный контроль текущего технического состояния механизмов, исключающий аварийные остановки, и позволяет технически обоснованно определить необходимые сроки, объем и содержание ремонтных и наладочных работ, контролировать качество их выполнения.

Анализатор спектра вибрации 795М применяется в следующих случаях:



Рис. 7. Тестер состояния подшипников 77Д11

измерения параметров вибрации (виброускорения, виброскорости, виброперемещения) работающего оборудования;

спектрального анализа сигнала вибрации (частотная область);

анализа формы сигнала (временная область);

бесконтактного измерения частоты вращения с помощью оптического инфракрасного таходатчика;

динамической балансировки роторов в собственных опорах, на эксплуатационных режимах (плоскостей коррекции — до 8, точек контроля вибрации — до 14);

измерения амплитудно- и фазово-частотных характеристик вибрации механизма при режимах разгона/выбега;

анализа спектра огибающей вибросигнала для обнаружения и идентификации зарождающихся дефектов подшипников;

измерения амплитуды ударного ускорения вынужденной высокочастотной вибрации (31 кГц), вызванной ударными импульсами для определения технического состояния подшипников качения.

Индикатор вибродиагностический 77Д11 (рис. 7) — малогабаритный микропроцессорный прибор, предназначенный для измерения уровня высокочастотной вибрации (31 кГц), создаваемой ударными импульсами в работающих механизмах, что позволяет без остановки оборудования определять состояние подшипников качения, качество их смазки и монтажа, а также состояние насосов высокого давления, форсунок дизелей, клапанов поршневых компрессоров и т. п. Методики измерения разработаны в ЦНИИ Морского флота (г. Санкт-Петербург). Использование прибора не требует специальной подготовки обслуживающего персонала, а его применение на уровне производственных участков позволяет получать оперативную информацию, исключающую аварийные остановки оборудования.

НПП «Контест», фирма «СТМ»,
Николаев

Поступила в редакцию
27.03.2002



НОРМИРОВАНИЕ ВИБРАЦИИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Е. А. ИГУМЕНЦЕВ, Я. С. МАРЧУК, С. В. ГЕТЬМАНЕНКО

Разработана статистическая модель нормирования общего уровня вибрации газоперекачивающих агрегатов. Предельные уровни вибрации, при которых ремонт агрегата не требуется, установлены посредством критерия Неймана – Пирсона. Получена плотность распределения вероятности случайной вибрации агрегатов и рассчитаны предельные уровни виброскорости корпусов подшипников ГПА-10. В качестве предельных значений использованы моменты первого и второго порядка полученного распределения.

A statistical model was developed of rating the general level of vibration in gas-pumping units. Limit levels of vibration not requiring plant repair, are established on the basis of Neuman-Person criterion. The density of probability distribution of random vibration of plants was derived and limit levels of vibration rate of the cases of GPA 10 bearings were calculated. Moments of the first and second order of the derived distribution were used as the limit values.

Важной задачей при эксплуатации газотурбинных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) является правильная сравнительная оценка интенсивности вибрации, замеряемой на корпусах подшипников (штатные точки замеров устанавливают согласно регламенту измерений). Если оцениваемая вибрация имеет переменную случайную амплитуду, то однозначная сравнительная оценка опасности той или иной реализации не всегда может быть получена без введения специальных критериев сравнения. В настоящей работе в качестве измеряемого и оцениваемого параметра вибрации принимается виброскорость, которая имеет связь с прочностью конструкции [1]. Под бездефектным агрегатом подразумевается ГПА, структура которого обеспечивает безаварийную эксплуатацию, а вибрация является естественным состоянием (всегда есть уровень вибрации, который можно рассматривать как безопасный, нормальный).

Нормы вибрации вырабатывались, исправлялись и уточнялись главным образом эмпирическим способом [2], на основании опыта эксплуатации, анализа работы агрегатов с повышенным уровнем вибрации, виброобследований, ремонта и дефектации ГПА на компрессорных станциях. Между тем, как следует из существа задачи, необходимы и теоретические подходы к ее решению с использованием аппарата теории вероятности и математической статистики. Применение совместно с результатами экспериментальных исследований вероятностных методов открывает возможность теоретического обоснования существующих норм вибрации и разработки новых, более прогрессивных конструктивных решений.

В зависимости от диагностической модели техническое состояние ГПА может быть оценено методами статистических решений, которые требуют для описания технического состояния ГПА определения допустимого значения вибрации V_n [3]. Однако в большинстве случаев определение V_n путем прямого диагностического эксперимента невозможно из-за высокой стоимости работ. Другой путь решения этой задачи заключается в проведении пассивного диагностического эксперимента по результатам виброобследований большого числа

© Е. А. Игуменцев, Я. С. Марчук, С. В. Гетьманенко, 2002

(парка) работающих ГПА. Тогда на основании известного распределения уровня вибрации V можно найти ее предельное значение V_n с конечной вероятностью P_V , при которой не превышается заданный минимальный уровень A и не требуется ремонт ГПА. Статистический подход определения величины V_n дает два пути [3]. Первый основан на текущих показаниях вибрации машин, находящихся в хорошем состоянии, с определением величины V_n для вероятности, не превышающей заданный нижний уровень A :

$$P_V = P_V(V > V_n) = \int_{V_n}^{\infty} p_V(V) dV \leq A, \quad (1)$$

где $p_V(V)$ — плотность вероятности вибрации (виброскорости) парка ГПА.

Таким образом минимизируется уровень ненужного ремонта ГПА (рис. 1). Однако использование этого метода ограничивается тем, что не учитывается влияние на величину V_n вероятности хорошего состояния машины P_x в зависимости от проведенных ремонтов.

Второй путь основан на статистическом критерии (лемме) Неймана – Пирсона, согласно которому, зная лишь плотность вероятности вибрационного сигнала p_V , полученного при пассивном эксперименте на находящихся в хорошем состоянии ГПА, минимизируется вероятность выхода из строя ГПА путем определения оптимального значения

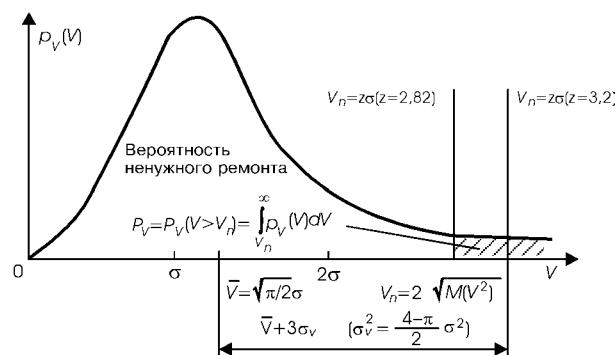


Рис. 1. Определение предельного уровня вибрации V_n на основе закона распределения Рэлея случайной виброскорости парка агрегатов в нормальном состоянии

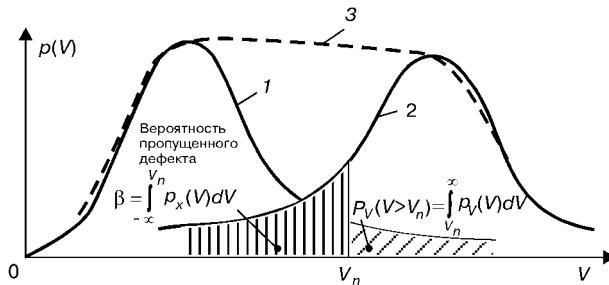


Рис. 2. Выбор гипотезы о ненужном ремонте на основе критерия Неймана – Пирсона: 1 — плотность вероятности нормальной работы $p_V(V)$; 2 — плотность вероятности отказа $p_x(V)$; 3 — совместная плотность вероятности отказа $p(V)$

заранее заданного уровня A для величины V_n . Оптимальное значение заданного уровня A можно определить путем отбора критерия для простой гипотезы H : «Ремонт не нужен». С ней конкурирует альтернативная простая гипотеза H_1 : «Поломка не произойдет, если вовремя отремонтировать ГПА». Критическая область значений величины V_n проверяет простую гипотезу H на уровне значимости A (рис. 2). Согласно лемме Неймана – Пирсона для предельной величины можно записать

$$\int_{V_n}^{\infty} p_V(V) dV / \int_{V_n}^{\infty} p_x(V) dV \leq A. \quad (2)$$

Здесь $P_x = \int_{V_n}^{\infty} p_x(V) dV$, $p_x(V)$ — соответственно

вероятность и плотность вероятности хорошего состояния ГПА (поломка не произойдет). Следует отметить, что вероятность хорошего состояния ГПА P_x связана с незамеченной (пропущенной) неисправностью равенством (рис. 2)

$$P_x = 1 - \beta = 1 - \int_{-\infty}^{V_n} p_x(V) dV. \quad (3)$$

Соотношение (2) можно усилить, предположив [3], что общая вероятность тревоги поломки ГПА (совместная вероятность P_x и P_V) должна равняться заданному допускаемому уровню A для критической области величины V_n , при которой ремонт не требуется:

$$P_x \int_{V_n}^{\infty} p_V(V) dV = A. \quad (4)$$

Складывая левые и правые части (2) и (4), получаем

$$\frac{2 - \beta^2}{2} \int_{V_n}^{\infty} p_V(V) dV \leq A. \quad (5)$$

Прежде чем определить V_n из неравенства (5), получим V_n как случайную переменную величину для различных V по неравенству Чебышева из выражения (1) в виде

$$P_V(V - \bar{V} \geq t\sigma_V) \geq t\sigma_V \leq \frac{1}{2t^2}, \quad V_n - \bar{V} = t\sigma_V > 0, \quad (6)$$

где $P_V(V - \bar{V} \geq t\sigma_V)$ — вероятность превышения V предельного значения $V_n = \bar{V} + t\sigma_V$; t — число, характеризующее порядок отклонения среднеквадратичных значений σ_V от среднего значения \bar{V} . Учитывая, что знак равенства в (5), (6) минимизирует отказ и оптимизирует величину V_n , и объединяя эти соотношения, получаем

$$t = \frac{V_n - \bar{V}}{\sigma_V} = \sqrt{\frac{2 - \beta^2}{4A}}. \quad (7)$$

Здесь среднее и среднеквадратичное значения вибрации (виброскорости) парка агрегатов вычисляются по известным формулам математической статистики

$$\bar{V} = \frac{\sum_{k=1}^n V_k}{n}, \quad \sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (V_k - \bar{V})^2}{n-1}}. \quad (8)$$

Для определения V_n из уравнения (7) необходимо задать минимальный уровень A . Других рекомендаций, кроме того, что минимальный уровень A должен быть достаточно мал, нет. Поэтому для определенности, вводя дополнительные ограничения $A = KP_V$ и $P_V = \beta$, получаем

$$K = \frac{2 - \beta^2}{4\beta t^2}, \quad (9)$$

где K — коэффициент запаса поломок, когда принимается гипотеза [3] о том, что ремонт не нужен ($K = 1\dots 3$ — обычные поломки; $K = 3\dots 10$ — поломки с опасными последствиями).

Соотношение (9) позволяет по известному расположению плотности вероятности вибрации парка агрегатов $p_V(V)$ с помощью таблицы квантилей подобрать t и β таким образом, чтобы гипотеза H принималась, т. е. коэффициент K соответствовал формуле (9), а затем рассчитать по уравнению (7) предельное значение V_n .

В качестве математической модели вибрации ГПА рассмотрим процесс, состоящий из суммы гармоники и вибрационного шума [1] гармоника + шум» (рис. 3,

a): $G_r = V_r^2/2 = \sigma_r^2$, $\sigma_{\text{ш}}^2 = \int_0^f Gdf = Gf$, $\sigma^2 = \sigma_r^2 + \sigma_{\text{ш}}^2$.

Такая модель достаточно проста, хорошо аппроксимирует большинство реальных вибрационных процессов и позволяет получить необходимые аналитические соотношения между значениями вибрации. Предположив, что в контролируемой полосе частот $f < 1000$ Гц [2] спектральная плотность шума постоянна (рис. 3, *a*), представим выражение для общего уровня (среднеквадратичного значения) виброскорости отдельного агрегата [1] в виде

$$V = \sqrt{\sigma_{\text{ш}}^2 + V_r^2/2}, \quad (10)$$



где $\sigma_{\text{ш}}^2$ — среднеквадратичное значение шума; $\sigma_{\text{ш}}^2 = V_{\text{r}}^2/2$, V_{r} — соответственно дисперсия и амплитуда гармонической вибрации.

В работе [4] установлено, что случайная амплитуда гармонической составляющей виброскорости парка ГПА V_{r} имеет плотность распределения Рэлея или «ХИ-распределение» с двумя степенями свободы ($m = 2$). Аналогично можно показать, что дисперсия шума $\sigma_{\text{ш}}^2$ также имеет распределения «ХИ-квадрат» с двумя степенями свободы. Кроме того, известно, что распределение «ХИ-квадрат» с $m = 2$ соответствует экспоненциальному распределению. Тогда плотность распределения квадрата общего уровня вибрации парка агрегатов $y = V^2$ является композицией двух экспоненциальных распределений с различными дисперсиями (σ_{r}^2 и $\sigma_{\text{ш}}^2$) и может быть представлена в таком виде:

$$p(y) = \frac{1}{2(\sigma_{\text{r}}^2 - \sigma_{\text{ш}}^2)} \left[\exp\left(-\frac{y}{2\sigma_{\text{r}}^2}\right) - \exp\left(-\frac{y}{2\sigma_{\text{ш}}^2}\right) \right]. \quad (11)$$

Вводя соотношения $\alpha = \sigma_{\text{r}}/\sigma_{\text{ш}}$, $\sigma^2 = \sigma_{\text{r}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2 = \sigma_{\text{ш}}^2(\alpha^2 + 1)$ и переходя от плотности распределения квадрата общего уровня вибрации y к плотности вероятности общего уровня вибрации V с дисперсией σ^2 , получаем следующее «виброраспределение»:

$$\begin{aligned} p_V(V) &= \frac{\alpha^2 p_1(V) - p_2(V)}{\alpha^2 - 1}, \quad p_1(V) = \frac{V}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{V^2}{2\sigma^2}\right); \\ p_2(V) &= \frac{V\alpha^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{V^2\alpha^2}{2\sigma^2}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $p_1(V)$ и $p_2(V)$ являются распределениями Рэлея с дисперсиями соответственно σ^2 и σ^2/α^2 .

Рассмотрим предельные случаи. При большом отношении «сигнал–шум» ($\alpha \rightarrow \infty$) распределение (12) переходит в распределение Рэлея. Если гармоника и шум соизмеримы ($\alpha = 1$), то формулы (12) соответствуют «ХИ-распределению» с четырьмя степенями свободы ($m = 4$). Модель вибрации на рис. 3, б состоит из нескольких гармоник, соизмеримых с шумом:

$$\begin{aligned} G_1 &= V_1^2/2 = \sigma_1^2, \quad \sigma_{\text{ш}}^2 = \int_0^n G df = Gf, \\ G_n &= V_n^2/2 = \sigma_n^2, \quad \sigma^2 = \sum_{k=1}^n G_k + \sigma_{\text{ш}}^2. \end{aligned}$$

Тогда степень свободы в «ХИ-распределении» связана с числом гармоник n равенством $m = 2(n + 1)$. При большом числе гармоник «ХИ-распределение» переходит в распределение Гаусса. Если гармоническая вибрация отсутствует и процесс является гауссовым белым шумом, то распределение общего уровня вибрации описывается распределением Рэлея.

Воспользуемся «виброраспределением» для вычисления величины β :

$$\begin{aligned} \beta &= \int_{V_n}^{\infty} p_V(V) dV = \frac{\alpha^2 \beta_1 - \beta_2}{\alpha^2 - 1}, \quad \beta_1 = \int_{V_n}^{\infty} p_1(V) dV, \\ \beta_2 &= \int_{V_n}^{\infty} p_2(V) dV. \end{aligned} \quad (13)$$

Интегралы в выражениях для β_1 и β_2 вычисляем с помощью таблицы квантилей распределения Рэлея для безразмерного предельного уровня вибрации $z = V_n/\sigma$; $z_1 = V/\sigma$; $z_2 = V_n\alpha/\sigma$. Связь между параметрами t и z в распределении Рэлея получим из первой части равенства (7), используя вероятностные моменты распределения Рэлея $\bar{V} = \sqrt{\pi/2}\sigma$, $\sigma^2 = (2 - \pi/2)\sigma^2$, в виде

$$t = \frac{\sqrt{2}z - \sqrt{\pi}}{\sqrt{4 - \pi}}. \quad (14)$$

Следует отметить, что для больших значений V_n ($z > 2,8$), а именно такие значения мы будем испытывать для вычисления K , интеграл $\beta_2 \approx 0$, так как значение z_2 в α раз больше z_1 ($\alpha > 1,6$) и при $\beta_1 = 0,02$ $\beta_2 = 0$. Подставив формулы (13) и (14) в (9), получим окончательное выражение для K :

$$K = \frac{[2(\alpha^2 - 1)^2 - \alpha^2 \beta_1^2](4 - \pi)}{4(\alpha^2 - 1)\alpha^2 \beta_1(2z^2 - 2\sqrt{2\pi}z + \pi)}. \quad (15)$$

Экспериментальное определение отношения «сигнал–шум» α , входящего в соотношение (15),

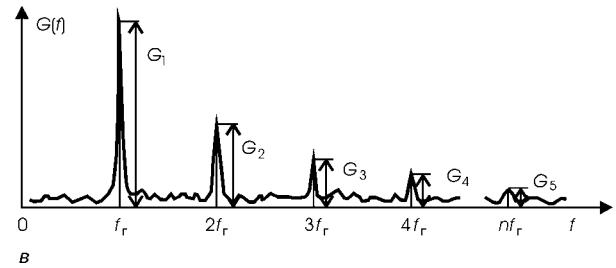
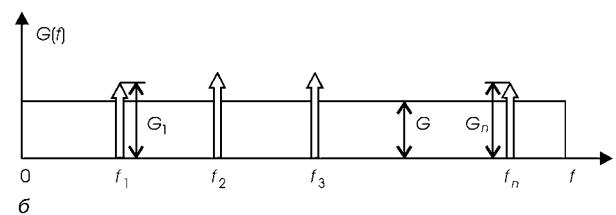
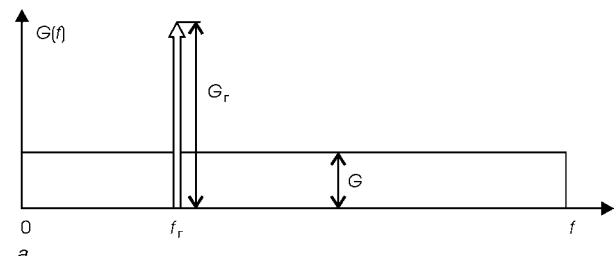


Рис. 3. Спектральная плотность виброскорости моделей вибрации: а — «гармоника + шум»; б — «гармоники в шуме»; в — сумма узкополосных процессов



Предельные значения виброскорости корпусов подшипников ГПА-10

| Параметр | Номер точки измерения | | | | |
|---|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 3* | 4* | 5 | 6* |
| Среднеквадратичное значение виброскорости парка ГПА, мм/с | 3,9 | 4,5 | 5,0 | 4,7 | 5,0 |
| Коэффициент гармоник b , с/мм | 0,120 | 0,118 | 0,114 | 0,117 | 0,114 |
| Коэффициент шума a^2 | 1,05 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Отношение «сигнал – шум» α^2 | 2,70 | 2,90 | 3,92 | 3,00 | 3,92 |
| Коэффициент запаса поломок K : | | | | | |
| I вариант | 2,73 | 2,82 | 3,20 | 2,90 | 3,20 |
| II вариант | 6,36 | 6,56 | 7,47 | 6,76 | 7,47 |
| Предельные значения виброскорости V_n , мм/с: | | | | | |
| I вариант | 11,0 | 12,7 | 14,0 | 13,0 | 14,0 |
| II вариант | 12,5 | 14,5 | 16,0 | 15,0 | 16,0 |
| Предельные нормы виброскорости [2], мм/с | 30 | — | — | 30 | — |

* Дополнительные точки измерений (по сравнению с заводскими нормами [2]) в соответствии с [5]

требует применения аппаратуры спектрального анализа. Однако если воспользоваться теоретической зависимостью между амплитудой первой роторной гармоники виброскорости и общим уровнем вибрации [4], то для набора статистических данных по среднеквадратичному значению σ виброскорости парка ГПА можно использовать обычный виброметр. Соотношение между величинами V и V_g получено для модели вибрации (рис. 3, в), спектр которой представляет сумму узкополосных случайных процессов:

$$G_1 = a^2 V_g^2 / 2 = a^2 \sigma_g^2, \quad \sigma_{\text{III}}^2 = (a^2 - 1) \sigma_g^2 + \sum_{k=2}^n G_k, \\ \sigma^2 = \sigma_g^2 + \sigma_{\text{III}}^2.$$

При этом [4]

$$V = \sqrt{\frac{a^2 V_g^2 + b^2 V_g^4}{2}}, \quad (16)$$

где b — коэффициент шума, теоретический и экспериментальный способ определения которого приведен в работе [4].

Выражение коэффициента a в зависимости от $\alpha = \sigma_g / \sigma_{\text{III}}$ представлено в работе [1] в следующем виде:

$$a = \sqrt{\frac{(\alpha^2 + 1)(8e/\pi)^{(\alpha^2 + 1)^{-1/2}}}{\alpha^2 + 2}}. \quad (17)$$

Записав выражение для дисперсии шума $\sigma_{\text{III}}^2 = \sigma^2 - V_g^2 / 2$ и вычисляя величину V_g^2 из квадратного уравнения, составленного из соотношения (16) при $V = \sigma$, представим зависимость «сигнал – шум» в виде

$$\alpha^2 = \frac{2}{2(a^2 - 1) + (\sqrt{a^4 + 8\sigma^2 b^2} - a^2)}. \quad (18)$$

Применение полученного соотношения (15) покажем на примере расчета предельных значений общего уровня вибрации корпусов подшипников газоперекачивающего агрегата ГПА-10, эксплуати-

руемого на компрессорных станциях ДК «Укртрансгаз». В качестве предельных значений выберем два варианта оценок.

Первый вариант:

$$V_n = 2\sqrt{M(V^2)}, \quad (19)$$

где $M(V^2)$ — математическое ожидание квадрата виброскорости (начальный момент второго порядка).

Второй вариант:

$$V_n = \bar{V} + 3\sigma_V. \quad (20)$$

Оценка (19) предложена в работе [4], а (20) — так называемое правило «трех сигма» — в работе [5]. По первому и второму варианту параметры «виброраспределения» t, z, β_1 соответственно равны 2,4; 2,82; 0,02 и 3; 3,22; 0,0055. Результаты расчетов предельных среднеквадратичных значений виброскорости представлены в таблице. Статистические экспериментальные данные получены при виброиспытании в эксплуатационных условиях парка агрегатов ГПА-10 в количестве 310 шт. Измерение виброскорости проводилось на корпусах подшипников в шести точках двигателя в соответствии с действующей методикой [5]. Использовались обычные виброметры и аппаратура спектрального анализа фирмы «Брюль и Кьер». Для сравнения приведены предельные значения существующих норм вибрации [2], замеренной в штатных точках измерений (точки 2, 5).

Из таблицы следует, что предельные значения V_n по двум вариантам расчетов удовлетворяют гипотезе H («Ремонт не нужен»). При этом по первому варианту $K \leq 3$, и в случае ошибки в принятии гипотезы H произойдут обычные поломки. По второму варианту $3 < K \leq 10$, и в случае ошибки в принятии гипотезы H произойдут поломки с опасными последствиями. Оценка по первому варианту безопаснее и предпочтительнее оценки по второму варианту. Существующие предельные нормы вибрации (см. таблицу) намного выше предлагаемых расчетных. Такие значения уровней вибрации снижают ресурс агрегатов и могут приводить к оста-



новкам и авариям на различной стадии их эксплуатации, что и наблюдается в действительности на компрессорных станциях [5].

Дальнейшую градацию норм вибрации с оценкой «Требует принятия мер» можно получить в соответствии с рекомендациями Международных стандартов ISO 2372, UDI 2056 и существующих норм [2], уменьшая предельный уровень V_n в 2,5 раза (8 дБ). Затем следующую градацию норм «Допустимо» получим, уменьшая V_n на 2·8 = 16 дБ. В некоторых случаях [2] класс состояния разбивается на две части по 4 дБ в каждой, что в сумме соответствует 8 дБ, т. е. ранее рассмотренному классу.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрено применение нового подхода к нормированию общего уровня виброскорости по статистическим данным виброобследований большого парка ГПА, что позволяет установить научно обоснованные нормы вибрации для отдельных точек измерений вибрации на агрегате. Примененный подход реализован с помощью критерия Неймана – Пирсона и обобщает традиционные методы нормирования, базирующиеся на рекомендациях ISO.

2. Приведены числовые примеры, основанные на полученной плотности вероятности виброскорости парка ГПА, которые показывают, что в качестве оценки предельных уровней вибрации следует использовать правило «трех сигма». Установлено,

что предпочтительней применять оценку, равную удвоенному корню квадратному из центрального момента второго порядка случайной виброскорости парка ГПА.

3. Существующие нормы и предельные уровни вибрации агрегата ГПА-10 «Волна» значительно выше расчетных, т. е. для надежной эксплуатации при таких нормах требуются дополнительные затраты. Приведение норм к расчетным значениям позволит продлить ресурс ГПА и их безаварийную эксплуатацию без дополнительных затрат.

1. Костин В. И. Сравнительная оценка интенсивности вибрации с переменной во времени амплитудой эквивалентным значением виброскорости гармонических колебаний // Пробл. прочности. — 1974. — № 9. — С. 103–107.
2. Нормы вибрации. Оценка интенсивности вибрации газоперекачивающих агрегатов в условиях эксплуатации на компрессорных станциях Министерства газовой промышленности. — М: ВНИИГазпром, 1985. — 17 с.
3. Cempel C. Determination of vibration symptom limit value in diagnostics of machinery // Maintenance Management Internat. — 1985. — № 5. — С. 297–304.
4. Игуменцев Е. А., Костин В. И. Нормирование вибрации газотурбинных ГПА // Пробл. прочности. — 1989. — № 2. — С. 121–122.
5. Игуменцев Е. А., Работягов В. И., Шмидт В. В. Методика вибродиагностики технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГПА-10 и ГПА-10-01 в условиях эксплуатации на компрессорных станциях газовой промышленности // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 1. — С. 11–20.

Укр. инж.-пед. академия, Харьков,
УМГ «Киевтрансгаз»

Поступила в редакцию
04.03.2002

НОВАЯ КНИГА

В. А. Троицкий. Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. — Киев: Феникс. — 2002. — 300 с.

Рассмотрены элементы теории и практические вопросы магнитопорошкового контроля, происхождение различного рода ошибок. Освещены вопросы технологии контроля, выбора эталонов, подбора режимов намагничивания, организации работ.

Приведены примеры контроля различных металлоконструкций, трубопроводов и резервуаров, теплообменных установок и деталей машин.

Теоретический раздел книги относится ко всем магнитным методам. Здесь показаны пути уменьшения влияния размагничивающего фактора, эффективного намагничивания деталей сложной геометрии. Рассмотрены процессы перемагничивания детали как разветвленной магнитной цепи.

Рассчитана на инженерно-технических работников, дефектоскопистов и может быть полезна студентам вузов.



По вопросу приобретения книги обращайтесь по адресу:
03680, Украина, г. Киев-150, ул. Боженко, 11,
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ.
Тел. (044) 227-26-66.



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТИВНОСТЕЙ ФУРЬЕ-КОМПОНЕНТ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРТЛЕЯ

Л. М. ГЕЛЬМАН

Приведено сравнение предложенных новых диагностических признаков (действительной и мнимой компонент преобразования Фурье) с диагностическим признаком, основанным на преобразовании Хартлея, для диагностики гауссовых сигналов. Показано, что отношение правдоподобия признака, основанного на преобразовании Хартлея, не является даже частным случаем отношения правдоподобия предложенных диагностических признаков, а диагностическая эффективность новых признаков выше, чем основанного на преобразовании Хартлея. Рекомендовано рассматривать компоненты преобразования Фурье как базисные диагностические.

Comparison is made of the proposed new diagnostic features (actual and fictitious components of the Fourier transformation) with the diagnostic features based on Hartley transformation for diagnostics of Gaussian signals. It is shown that the relationship of the likelihood of the feature based on Hartley transformation is not even a particular case of likelihood ratio of the proposed diagnostic features, and diagnostic effectiveness of the new features is higher than that based on Hartley transformation. It is recommended to consider the components of Fourier transformation as the basic diagnostic components.

Новый подход к формированию диагностических признаков предложен [1, 2] для случаев, когда одно- и многомерное преобразование Фурье используются для распознавания образов, а также технической диагностики. Он заключается в одновременном использовании двух новых диагностических признаков: действительной и мнимой компонент преобразования Фурье. Показано [1, 2], что этот подход является более общим, чем подходы, основанные на использовании спектральной плотности мощности сигналов и фазы преобразования Фурье. Установлено, что предложенный подход обеспечивает более высокую эффективность диагностики, чем подход, основанный на спектральной плотности мощности, являющийся частным случаем предложенного подхода.

В последнее время особую важность для обработки сигналов, распознавания образов и технической диагностики приобрело преобразование Хартлея [8–9]. Оно подобно преобразованию Фурье, но в вычислительном отношении является менее быстрым, чем быстрое преобразование Фурье.

Цель настоящего сообщения — сравнение эффективности диагностики, обеспечиваемой с помощью предложенного в работах [1, 2] подхода, и диагностики, проведенной с помощью преобразования Хартлея, для гауссовых диагностируемых сигналов.

Теоретический анализ. Рассмотрим двухклассовую диагностику стационарных гауссовых узкополосных центрированных сигналов $X(t)$ с различными дисперсиями $\sigma_{X_j}^2$ и идентичными нормированными автокорреляционными функциями для диагностируемых гипотез H_j , $j = 0, 1$. Диагностическая информация содержится в коротком преобразовании Фурье на частоте ω_x . Предложенный подход заключается в одновременном использовании действительной и мнимой компонент короткого преобразования Фурье как диагностических признаков:

© Л. М. Гельман, 2002

$$X_R = \int_0^{t_1} x(t) \cos \omega_x t \, dt, \quad (1)$$

$$X_I = \int_0^{t_1} x(t) \sin \omega_x t \, dt, \quad (2)$$

где t_1 — длительность сигнала.

Диагностический признак, основанный на коротком преобразовании Хартлея, может быть представлен в виде

$$X_H = \int_0^{t_1} x(t) (\cos \omega_x t + \sin \omega_x t) \, dt = X_R + X_I. \quad (3)$$

Отношения правдоподобия признаков (1)–(3) запишем соответственно в такой форме:

$$L_0(X_R, X_I) = \ln \frac{W(X_R, X_I | H_1)}{W(X_R, X_I | H_0)}, \quad (4)$$

$$L_h(X_H) = \ln \frac{W(X_H | H_1)}{W(X_H | H_0)}, \quad (5)$$

где $W(X_R, X_I | H_1)$, $W(X_H | H_1)$ — соответственно условные двумерные и одномерные плотности распределения вероятностей признаков согласно выражениям (1)–(3) для гипотез H_j .

Используя работу [1], представим отношение правдоподобия (4) для рассматриваемой диагностики в виде

$$L_0 = AX_R^2 + BX_I^2 + C, \quad (6)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{R_0}^2} - \frac{1}{\sigma_{R_1}^2} \right), \quad B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{R_0}^2} - \frac{1}{\sigma_{I_1}^2} \right), \quad C = \ln \frac{\sigma_{R_0} \sigma_{I_1}}{\sigma_{R_1} \sigma_{I_0}},$$

σ_{R_j} , σ_{I_j} — соответственно среднеквадратичные отклонения признаков X_R и X_I для гипотезы H_j .

Используя данные, приведенные в работе [10], получаем $\sigma_{R_1}/\sigma_{R_0} = \sigma_{I_1}/\sigma_{I_0} = \sigma_{X_1}/\sigma_{X_0}$.



С помощью уравнений (1)–(3) найдем отношение правдоподобия (5) для диагностического признака, основанного на преобразовании Хартлея, в виде

$$L_h = DX_H^2 + E = D(X_R^2 + X_I^2 + 2X_RX_I) + E, \quad (7)$$

где

$$D = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{R_0}^2 + \sigma_{I_0}^2} - \frac{1}{\sigma_{R_1}^2 + \sigma_{I_1}^2} \right), \quad E = \frac{1}{2} \ln \frac{\sigma_{R_0}^2 + \sigma_{I_0}^2}{\sigma_{R_1}^2 + \sigma_{I_1}^2}.$$

Очевидно различие между отношениями правдоподобия (6) и (7). Отношение правдоподобия (7) не является даже частным случаем отношения правдоподобия (6).

Сравним диагностическую эффективность признаков (1), (2) и признака (3), использовав критерий Фишера

$$F_0 = \frac{[m(L_0/H_1) - m(L_0/H_0)]^2}{\sigma^2(L_0/H_1) + \sigma^2(L_0/H_0)}, \quad (8)$$

$$F_h = \frac{[m(L_h/H_1) - m(L_h/H_0)]^2}{\sigma^2(L_h/H_1) + \sigma^2(L_h/H_0)}, \quad (9)$$

где m и σ^2 – соответственно операторы математического ожидания и дисперсии.

Используя формулы (1)–(3), (6)–(9), получаем после преобразований, что выигрыш G в диагностической эффективности признаков (1)–(2) по сравнению с признаком (3) равен 2 для произвольных дисперсий сигнала и дисперсий признаков (1)–(2), где $G = F_0/F_h$.

Таким образом, предлагаемые признаки (1), (2) обеспечивают существенно более высокую диагностическую эффективность, чем признак (3), основанный на преобразовании Хартлея.

ВЫВОДЫ

1. Проведено сравнение диагностической эффективности новых признаков, действительной и мнимой составляющих преобразования Фурье, и диагностического признака, основанного на преобразо-

вании Хартлея, для диагностики стационарных гауссовских сигналов.

2. Показано, что:

отношение правдоподобия признака, основанного на преобразовании Хартлея, не является даже частным случаем отношения правдоподобия предлагаемых признаков;

диагностическая эффективность предлагаемых признаков существенно выше диагностической эффективности признака, основанного на преобразовании Хартлея; это согласуется с данными из ранее опубликованных работ.

Поэтому мы рекомендуем рассматривать компоненты Фурье-преобразования как наиболее базисные диагностические признаки.

1. Gelman L., Braun S. The optimal usage of the Fourier transform for pattern recognition // Mech. Systems Signal Process. — 2001. — № 15, № 3. — P. 641–645.
2. Гельман Л. М., Удовенко Л. Н. Оптимальное использование преобразования Фурье для технической диагностики // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 13–16.
3. Гельман Л. М., Удовенко Л. Н. Новые признаки, основанные на преобразовании Фурье, для диагностики и распознавания образов. // Там же. — 2001. — № 3. — С. 27–28.
4. Gelman L. M., Braun S. G., Petrunin I. V. The optimal usage of the Fourier transform for condition monitoring and diagnostics // Proc. of the Intern. Conf. on Condition Monitoring, Swansea, UK, 2001. — P. 350–357.
5. Gelman L. M., Petrunin I. V. New generic optimal approach for vibroacoustical diagnostics and prognostics, key note paper // Proc. of the Nat. Symp. on Acoustics, Vellore, India, 2001. — Vol. 2. — P. 10–21.
6. Crack diagnostics via Fourier transform: real and imaginary components vs. power spectral density / L. M. Gelman et al. // Proc. of 3rd Intern. Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, USA, 2001. — P. 1382–1389.
7. Diagnostics via Fourier transforms: real and imaginary components vs. polar presentation / L. M. Gelman, S. G. Braun, A. A. Miropolsky, I. V. Petrunin // Proc. of 4th Intern. Conf. on Acoustic and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, CETIM, Senlis, France, 2001.
8. Bracewell R. N. Assessing the Hartley transform, IEEE Trans. Acoust. // Speech Signal Process. — 1990. — № 38. — P. 2174–2176.
9. Saatcilar R., Ergintav S., Canitez N. The use of the Hartley transform in geophysical applications // Geophysics. — 1990. — P. 1488–1495.
10. Gel'man L., Sadovalova V. Optimization of the resolving power of spectrum analyzer when detecting narrowband signals // Telecommun. Radio Engin. — 1980. — № 11. — P. 94–96.

Нац. техн. ун-т Украины «Киев. политехн. ин-т»

Поступила в редакцию
16.01.2002



ПОЗИЦИОННО-БИНАРНЫЙ АЛГОРИТМ АНАЛИЗА И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КРИВЫХ

О. К. НУСРАТОВ

Предлагается позиционно-бинарный (ПБ) алгоритм анализа и идентификации циклических кривых, отображающих техническое состояние объекта. Показано, что высокая разрешающая способность ПБ разложения и простота реализации обеспечивают более эффективное его применение, чем спектрального разложения, для диагностики процессов, описываемых периодическими кривыми с крутыми перепадами уровней сигнала.

A positional-binary (PB) algorithm of analysis and identification of cyclic curves representing the technical condition of the object is proposed. It is shown that the high resolution of PB decomposition and simplicity of its implementation provide its more effective application than that of spectral decomposition, for diagnostics of processes described by periodic curves with abrupt gradients of signal levels.

Для описания циклических сигналов $x(t)$ с периодом T при диагностике технического состояния системы на практике часто используется метод спектрального анализа [1]. С этой целью исходный сигнал разлагается на гармонические составляющие в соответствии с выражением

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t), \quad (1)$$

т. е. функция $x(t)$ с периодом T представляется в виде разложения в ряд по ортогональным функциям $\sin n\omega t$ и $\cos n\omega t$ как сумма элементарных периодических кривых.

Требуемая степень достоверности обеспечивается условиями неравенства

$$\sum_{i=1}^N \lambda^2(i\Delta t) \leq S, \quad (2)$$

где $\lambda^2(i\Delta t)$ — квадраты отклонений между суммой правой части равенства (1) и отсчетами сигнала $x(t)$ в моменты дискретизации $t_0, t_1, \dots, t_n, \dots$ с шагом Δt ; S — допустимая величина среднеквадратичного отклонения; $N = T/\Delta t$.

Однако реальные сигналы ряда технологических систем и объектов имеют сложную форму с крутыми фронтами на отдельных участках кривой. Поэтому для адекватного описания этих кривых с использованием спектрального разложения необходимо большее количество гармонических составляющих, что приводит к существенному увеличению количества применяемых информативных признаков и усложнению процесса диагностики [2].

Предлагается ПБ алгоритм формирования пространства признаков и идентификации кривых с периодом T , позволяющий одновременно с уменьшением количества используемых информативных признаков повысить степень достоверности полученных результатов и упростить процедуру диагностики.

С этой целью исходный циклический сигнал в виде некоторой кривой $x(t)$, форма которой характеризует состояние системы, дискретизируется с заданным интервалом Δt и разлагается на ПБ составляющие $q_0(t), q_1(t), \dots, q_k(t), \dots, q_m(t)$. Раз-

рядность двоичного кода, необходимого для бинарного разложения, определяется максимально возможной амплитудой сигнала $x(i\Delta t) > 2^n$, где $n \geq \log_2(x_{\max}/\Delta x)$, Δx — шаг дискретизации. При этом в каждой из позиций q_k образуются (широко-импульсные сигналы) временные интервалы, длительность которых определяется количеством единиц, последовательно образуемых в данной позиции, а паузы образуются за счет следующих последовательно нулевых составляющих. Разложение исходного сигнала на ПБ составляющие проводится в процессе его аналого-цифрового преобразования и не требует дополнительных аппаратных средств [3]. При изменении состояния объекта и соответствующем изменении формы кривой $x(t)$ длительность временных интервалов в позициях q_k изменяется соответственно, поскольку меняются сочетания нулей и единиц в соответствующих позициях.

Таким образом, если изменение состояния объекта приводит к изменению формы кривой на величину, большую, чем шаг дискретизации Δx , то это изменение отображается на параметрах двоичной последовательности $q_k(i\Delta t)$, образуемых в каждой из позиций. Выбором шага дискретизации можно обеспечить необходимую чувствительность ПБ разложения к изменениям формы кривой, что позволяет при необходимости обнаружить даже небольшие изменения в состоянии объекта и прогнозировать возможность появления тех или иных неисправностей или аварийных ситуаций.

Составляющие ПБ разложения можно использовать в качестве информативных признаков в задаче распознавания кривых, отображающих ход циклических процессов.

Рассмотрим процесс формирования информативных признаков с помощью ПБ разложения сигнала на примере анализа ваттметrogramm, представляющих собой кривую мощности W на валу электродвигателя глубинного нефтяного насоса за период его работы $\Phi = 360^\circ$. На рис. 1, *a* изображена ваттметrogramma, соответствующая нормальной бездефектной работе насоса. Для разложения этой кривой на ПБ составляющие при амплитуде сигнала, равной 25 единицам, потребуется $k \geq \log_2 25$, т. е. $k = 5$ двоичных разрядов q_4, q_3, \dots, q_0 . Результат



разложения на ПБ составляющие приведен на рис. 1, б. Как видно, частота встречаемости 1 и 0 и соответственно ширина единичных интервалов и нулевых пауз при заданном шаге дискретизации в позициях q_k определяются двоичным кодом амплитудного значения сигнала в моменты дискретизации. При этом в позициях q_k (например, в позиции q_3) образуются временные интервалы, соответствующие двоичной последовательности вида 1.1, 5.0, 4.1, 2.0, 2.1, 11.0, 5.1, 5.0, 5.1, 9.0, 7.1, где первые цифры означают длительность интервала, а вторые определяют, единицам или нулям соответствует этот интервал. Аналогичные широтно-импульсные сигналы и соответствующие им двоичные последовательности образуются и в других позициях.

На рис. 2, а изображена ваттметрограмма, соответствующая появлению неисправности вида «утечка в нагнетательном клапане» насоса. Как видно из рис. 2, б, в результате разложения этого сигнала на ПБ составляющие в позициях q_k образуется отличная от предыдущей последовательность временных интервалов и соответствующих им бинарных составляющих. Так, в той же позиции q_3 образуются временные интервалы и соответствующие им бинарные составляющие вида 8.0, 5.1, 7.0, 6.1, 6.0, 5.1, 15.0, 4.1, существенно отличающиеся от бинарных составляющих для случая «нормальная работа» насоса. Аналогичные изменения происходят и в других позициях.

Ваттметрограмма, изображенная на рис. 3, а, соответствует неисправности вида «утечка в приемном клапане» глубинного нефтяного насоса. Временные интервалы, образованные в соответствующих позициях, и бинарные составляющие (рис. 3, б), здесь также существенно отличаются от соответствующих

величин, полученных для кривых на рис. 1, а и 2, а. При этом в позиции q_3 образуется последовательность вида 5.1, 3.0, 4.1, 4.0, 3.1, 5.0, 5.1, 9.0, 3.1, 3.0, 8.1, 4.0.

Таким образом, любые изменения технического состояния объекта или его технологических параметров, вызвавших изменение сигнала на величину, большую, чем шаг дискретизации, будут отражаться на длительности временных интервалов, а соответственно — и на бинарных составляющих в позициях q_k , что позволяет использовать эти бинарные составляющие в качестве информативных признаков.

С целью классификации видов неисправностей, соответствующих изменению формы кривой, воспользуемся таблицей, в которой приведено количество единиц, образуемых в каждой позиции. В столбце $\alpha_{n,p}$ таблицы представлено количество единиц для случая «нормальная работа», в столбце $\alpha_{y,n}$ — «утечка в нагнетательном клапане», в столбце α_p — разность единиц в этих позициях, $\alpha_p = \alpha_{n,p} - \alpha_{y,n}$. Аналогичные данные приведены для случая «утечка в приемном клапане»: $\alpha_p = \alpha_{n,p} - \alpha_{y,p}$.

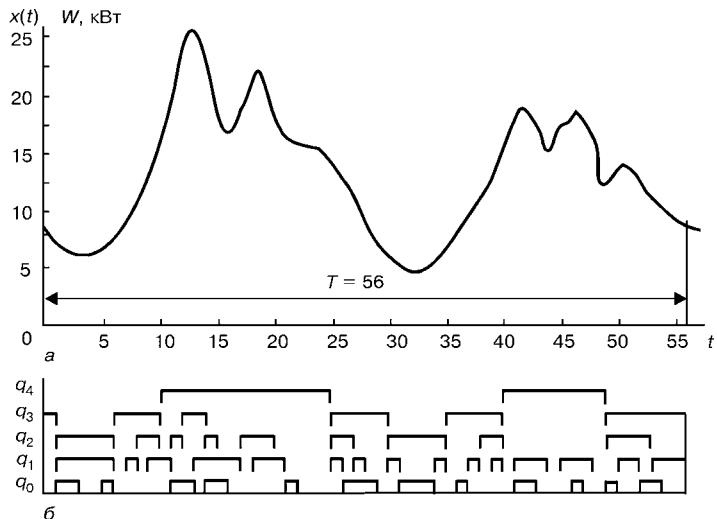


Рис. 1. Ваттметрограмма (а) и соответствующие ей ПБ составляющие (б) при нормальной работе насоса

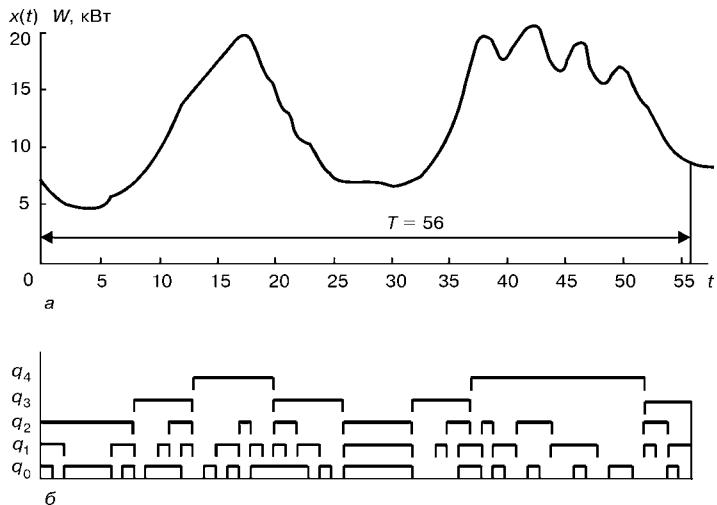


Рис. 2. Ваттметрограмма насоса (а) и соответствующие ей ПБ составляющие (б) для случая «утечка в нагнетательном клапане»

Каждая из позиций q_k имеет свой вес: чем больше индекс позиции q_k , тем больше его относительный и соответственно диагностический вес. При анализе данных таблицы можно сделать вывод о том, что возможно отнести текущие кривые, отображающие ход процесса, к одному из состояний системы, т. к. разность единиц α_p в каждой строке таблицы характеризует текущую кривую относительно кривой при «нормальной работе» системы.

С учетом диагностического веса каждой из позиций запишем выражение для разделения на классы неисправностей в виде

$$D = \sum_{k=0}^{n-1} (q_{k_i} - q_{k_j}) 2^k = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_p \cdot 2^k. \quad (3)$$

Здесь q_k , q_{k_j} — количество единиц в таблице соответственно для случая «нормальная работа» системы и для текущей кривой; k — количество позиций, используемых для бинарного разложения исходного сигнала; $k = 0, \dots, n-1$; α_p — разность единиц в позициях таблицы.

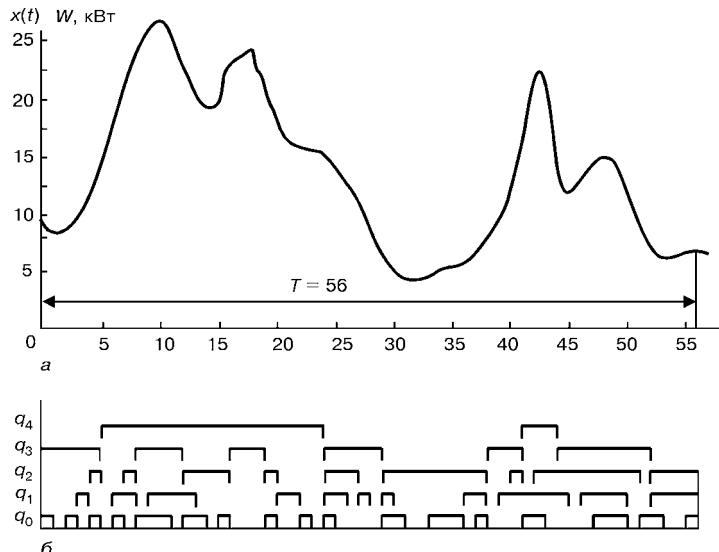


Рис. 3. Ваттметрограмма насоса (а) и соответствующие ей ПБ составляющие (б) для случая «утечка в приемном клапане»

Позиционно-бинарные составляющие при утечке в нагнетательном (I) и приемном (II) клапанах

| Позиция q_k | I | | | II | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| | $\alpha_{\text{н.п}}$ | $\alpha_{\text{у.н}}$ | α_p | $\alpha_{\text{н.п}}$ | $\alpha_{\text{у.н}}$ | α_p |
| q_4 | 24 | 22 | 2 | 24 | 22 | 2 |
| q_3 | 24 | 20 | 4 | 24 | 28 | -4 |
| q_2 | 25 | 27 | -2 | 25 | 33 | -8 |
| q_1 | 32 | 30 | 2 | 32 | 29 | 3 |
| q_0 | 21 | 31 | -10 | 21 | 27 | -6 |

Используя данные таблицы, определим по выражению (3) при $T = 56\Delta t$ значение числового показателя $D_{\text{у.н}}$ для случая «утечка в нагнетательном клапане»:

$$D_{\text{у.н}} = (2 \cdot 2^4) + (4 \cdot 2^3) + (2 \cdot 2^1) + (-10 \cdot 2^0) = 50.$$

Аналогично по данным таблицы для случая «утечка в приемном клапане»

$$\begin{aligned} D_{\text{у.п}} = & (2 \cdot 2^4) + (-4 \cdot 2^3) + (-8 \cdot 2^2) + (3 \cdot 2^1) + \\ & + (-6 \cdot 2^0) = -32. \end{aligned}$$

В результате анализа ряда реальных кривых и проведенных вычислительных экспериментов выявлено, что при изменении величины утечки в нагнетательном клапане насоса пропорционально ей изменяется и значение показателя $D_{\text{у.н}}$, оставаясь при этом положительной величиной. При изме-

нении величины утечки в приемном клапане также пропорционально изменяется значение показателя $D_{\text{у.п}}$, оставаясь при этом отрицательной величиной. Для других видов неисправностей значение показателя D варьируется в иных пределах числовых значений.

С целью идентификации состояния системы по всем классам неисправностей используются результаты ПБ разложения для эталонных неисправностей, хранящихся в памяти. По результатам сравнения данных, образующихся в каждой позиции и соответствующих текущему состоянию системы, с эталонными проводится выявление и классификация неисправностей.

Требуемая разрешающая способность алгоритма к изменениям формы кривой обеспечивается за счет выбора шага дискретизации и соответственно разрядности позиционных сигналов q_k . Так, например, при двухкратном уменьшении шага дискретизации Δx ($T = 112\Delta t$) для приведенных кривых разрядность q_k увеличивается всего лишь на единицу, а при 4-кратном ($T = 224\Delta t$) — лишь на две единицы. При этом значения $D_{\text{у.н}}$, $D_{\text{у.п}}$ становятся равными: для $T = 112\Delta t$ — $D_{\text{у.н}} = 185$, $D_{\text{у.п}} = -132$; для $T = 224\Delta t$ — $D_{\text{у.н}} = 699$, $D_{\text{у.п}} = -535$.

Таким образом, высокая разрешающая способность ПБ разложения и простота его реализации создает возможность раннего обнаружения изменений в поведении объекта и способствует повышению достоверности диагностики. Максимально возможная чувствительность ПБ алгоритма к изменениям формы кривой определяется по существу разрешающей способностью АЦП. Увеличением разрядности q_k на единицу удается в два раза уменьшить шаг дискретизации Δx , что равносильно двухкратному уменьшению среднеквадратичного отклонения S , тогда как для достижения аналогичной чувствительности с применением спектрального разложения иногда требуется дополнительно использовать десятки или даже сотни гармоник. При этом алгоритм ПБ разложения реализуется с помощью простых программных и стандартных аппаратных средств.

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 236 с.
2. Алиев Т. А. Основы экспериментального анализа. — М.: Машиностроение, 1997. — 271 с.
3. Алиев Т. А., Нурсратов О. К. Алгоритмы анализа циклических сигналов // Автоматика и вычисл. техника, Латвия, Рига. — 1998. — № 2. — С. 68–74.

Институт кибернетики АН Азербайджана,
Баку

Поступила в редакцию
23.04.2001



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА ОГИБАЮЩЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

В. А. МАРТЫНОВСКИЙ

Рассмотрена диагностика подшипников с обнаружением и идентификацией дефектов по сигналу вибрации подшипника, в основном, высокочастотной. Показано, что анализ спектра огибающей высокочастотной вибрации позволяет выявлять дефекты сборки, а также оценивать уровень и прогнозировать развитие дефектов на самой ранней стадии их развития.

The paper deals with diagnostics of bearings with detection and identification of defects by the bearing vibration signal, mainly, high frequency. It is shown that analysis of the spectrum of the envelope of high-frequency vibration allows revealing assembly defects, as well as evaluation of the level and forecasting defect propagation at the earliest stage of their propagation.

Практические задачи диагностики подшипников качения в процессе их эксплуатации решаются, как правило, одним из трех основных способов. В первом используются алгоритмы обнаружения дефектов по росту температуры подшипникового узла, во втором — по появлению в смазке продуктов износа, а в третьем — по изменению свойств вибрации (шума). Наиболее полная и детальная диагностика подшипников с обнаружением и идентификацией дефектов на ранней стадии их развития выполняется по сигналу вибрации подшипника, в основном, высокочастотной.

Природа вибраций подшипников качения.

Подшипник качения является источником сил двух основных видов — кинематических и сил трения. У части дефектных подшипников качения иногда появляется и третий вид сил — ударного типа. Вибрация, создаваемая подшипником качения, характеризуется следующими основными частотами.

1. Частотой перекатывания f_n тел качения по наружному кольцу (наличие этой составляющей вибрации определяется тем, что вал «подпрыгивает» на каждом теле качения):

$$f_n = f_c Z = \frac{1}{2} f_{\text{в.р.}} \left(1 - \frac{d_{\text{т.к.}}}{d_c} \cos \alpha \right) Z \approx 0,4 f_{\text{в.р.}} Z,$$

где $f_{\text{в.р.}}$ — частота вращения ротора; f_c — частота вращения сепаратора; $d_c \approx (d_n + d_b)/2$ — диаметр сепаратора (диаметр окружности, проходящей через центры тел качения), d_n, d_b — наружный и внутренний диаметры подшипника; $d_{\text{т.к.}}$ — диаметр тела качения; α — угол контакта тел качения с дорожками качения; Z — число тел качения.

2. Частотой перекатывания f_b тел качения по внутреннему кольцу (эта составляющая вибрации появляется, если вал (внутреннее кольцо подшипника) не идеально круглый, а, например, имеет локальный износ; тогда вал «проваливается» на каждом теле качения, когда оно попадает в зону износа)

$$f_b = (f_{\text{в.р.}} - f_c)Z = \frac{1}{2} f_{\text{в.р.}} \left(1 + \frac{d_{\text{т.к.}}}{d_c} \cos \alpha \right) Z \approx 0,6 f_{\text{в.р.}} Z.$$

При этом всегда $f_n + f_b = Z f_{\text{в.р.}}$.



ловлен первоначальный большой интерес к анализу низкочастотной вибрации для диагностики подшипников. Однако следует отметить и ряд недостатков, присущих диагностике по составляющим низкочастотного спектра вибрации.

1. *Сложность выделения составляющих вибрации, указывающих на наличие дефектов.* Из-за слабого затухания при распространении низкочастотной вибрации она приходит к точке измерения от всех узлов механизма, соседних машин и даже от проходящего вблизи транспорта. Обычно низкочастотная часть спектра вибрации сильно «затемнена» наличием большого числа составляющих как от контролируемой машины, так и от другого оборудования. При этом часть составляющих, не принадлежащих диагностируемому узлу машины, может совпадать по частоте с его составляющими, что значительно затрудняет обнаружение и идентификацию дефектов.

2. *Сложность обнаружения зарождающихся дефектов.* Это обусловлено тем, что на низких частотах механизм колеблется как единое целое, и для того, чтобы его раскачать, нужны довольно большие силы, что характерно для развитых дефектов, а дефекты в начальной стадии их развития практически не проявляются в низкочастотной области спектра.

3. *Невозможность диагностики по однократным измерениям.* При анализе низкочастотных составляющих решение о наличии дефектов принимается исходя из отличия уровней составляющих вибраций от их эталонных значений, полученных для исправных объектов. Однако такой прием может эффективно использоваться при постоянном мониторинге уровня вибрации контролируемой машины или оборудования, но не позволяет оценить их техническое состояние по однократным измерениям. Это обусловлено тем, что абсолютные значения уровней низкочастотных составляющих даже для однотипных машин одного выпуска могут отличаться во много раз. Поэтому эталонные уровни низкочастотных составляющих вибрации у каждой машины свои.

4. *Наличие возможных резонансов диагностируемой машины.* Составляющие спектра уровня вибраций, возникающие в машине при появлении того или иного вида дефекта, могут совпасть с часто имеющимися в низкочастотной области резонансными частотами собственных колебаний отдельных узлов машин, что приводит к резкому росту уровня вибрации на соответствующей частоте. Это обстоятельство также может существенно исказить результаты диагноза или даже привести к ложным заключениям.

На средних частотах, в отличие от низких, машина колеблется уже не как единое целое. В этом случае ее можно представить в виде системы с распределенными параметрами. Отличительной особенностью вибрации на средних частотах является наличие большого числа собственных форм колебаний не только целой машины или оборудования, но и отдельных их узлов, что затрудняет определение амплитуд вынуждающих сил по результатам измерения амплитуды колебаний на оп-

ределенной частоте. Это усложняет выделение диагностической информации, заложенной в пространственных характеристиках вибрации. Поэтому параметры вибрации в области средних частот редко используются в качестве диагностических. Исключением является случай, когда у исправного объекта одна из составляющих вибрации в области средних частот отсутствует и появляется лишь при наличии определенного вида дефекта.

Затруднения при выделении диагностической информации из низко- и среднечастотной вибрации, возможные ее искажения и сложность локализации дефекта — все это определяет повышенный интерес к высокочастотной вибрации. Одним из определяющих преимуществ использования этой области частот является быстрое затухание высокочастотной вибрации в процессе ее распространения, что позволяет «увидеть» только диагностируемый узел. В области высоких частот проявляется действие сил трения и микроудары в подшипнике качения, возбуждающие не гармонические колебания, а случайные. На первый взгляд, в высокочастотной области спектра диагностическая информация практически отсутствует в отличие от низкочастотной области, богатой гармоническими составляющими, непосредственно связанными с конструктивными параметрами диагностируемых узлов, а также наличием определенных видов дефектов. Но оказывается, что силы трения, возбуждающие высокочастотную случайную вибрацию, стационарны только при отсутствии дефектов. В бездефектных узлах трения стационарна и случайная высокочастотная вибрация — ее мощность постоянна во времени. При наличии дефектов силы трения, а также мощность вибрации изменяются во времени, т. е. появляется модуляция мощности высокочастотной вибрации (рис. 1).

Глубину модуляции t случайного амплитудно-модулированного сигнала вибрации $x(t)$ можно определить в процентах, используя среднее значение огибающей:

$$m = \frac{\bar{x}_{\max}(t) - \bar{x}_{\min}(t)}{\bar{x}_{\max}(t) + \bar{x}_{\min}(t)} \cdot 100 \%,$$

где $\bar{x}_{\max}(t)$, $\bar{x}_{\min}(t)$ — соответственно максимальное и минимальное значение огибающей сигнала.

При изменении вида дефекта частота модуляции изменяется. Чем больше степень развития дефекта, тем больше глубина модуляции. Следовательно, частота модуляции определяет вид дефекта, а глубина модуляции — степень его развития (рис. 2).

Таким образом, наиболее полная информация содержится в огибающей высокочастотного сигнала (рис. 3). По ней можно наблюдать за развитием одновременно всех имеющихся дефектов по уровню превышения отдельных гармонических составляющих на определенных частотах над фоном. Таким образом, появляется возможность определения глубины модуляции для каждого из имеющихся дефектов. Это позволяет определять степень развития всех дефектов и идентифицировать их вид. Следовательно, можно прогнозировать состояние ди-

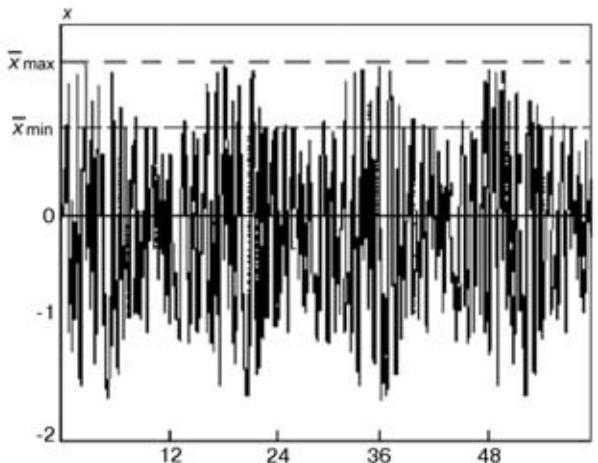


Рис. 1. Случайный амплитудно-модулированный сигнал

агностируемого узла, так как каждый вид дефекта имеет свою скорость развития. В таблице приведены диагностические признаки дефектов подшипников качения, т. е. частоты составляющих спектра огибающей высокочастотной вибрации. Одиннадцать видов перечисленных дефектов определяются методом огибающей, и только недостаток или избыток смазки, а также ухудшение ее свойств обнаруживаются по изменению общего уровня высокочастотной вибрации.

К достоинствам метода анализа параметров модуляции высокочастотной случайной вибрации, т. е. спектрального метода огибающей, следует отнести следующие.

1. *Возможность локализации дефекта.* Она определяется свойством высокочастотной вибрации быстро затухать при распространении, что позволяет оценивать техническое состояние именно того узла, вблизи которого установлен датчик вибрации. По этой же причине спектр огибающей высокочастотной вибрации не «затемнен» составляющими от других узлов контролируемой машины или оборудования, что повышает достоверность диагноза.

2. *Высокая чувствительность.* При спектральном анализе низко- и среднечастотной вибраций для достоверного обнаружения развитых дефектов нужны относительно большие силы, возбуждающие вибрацию, в то же время в случае высокочастотной вибрации для изменения ее параметров требуются гораздо меньшие силы. Поэтому наличие даже зарождающихся дефектов приводит к появлению модуляции высокочастотной вибрации контролируемого узла, а следовательно, к появлению гармонических составляющих в спектре огибающей этой вибрации.

3. *Высокая достоверность определения вида и величины каждого из дефектов.* Если сравнивать метод огибающей со спектральными методами анализа низко- и среднечастотной вибраций, то высокая достоверность определяется использованием не абсолютных значений составляющих вибрации, как при спектральном анализе, а относительных (парциальных глубин модуляции). При изменении уровня вибрации, например, из-за изменения коэффициента усиления или изменения чувствительнос-

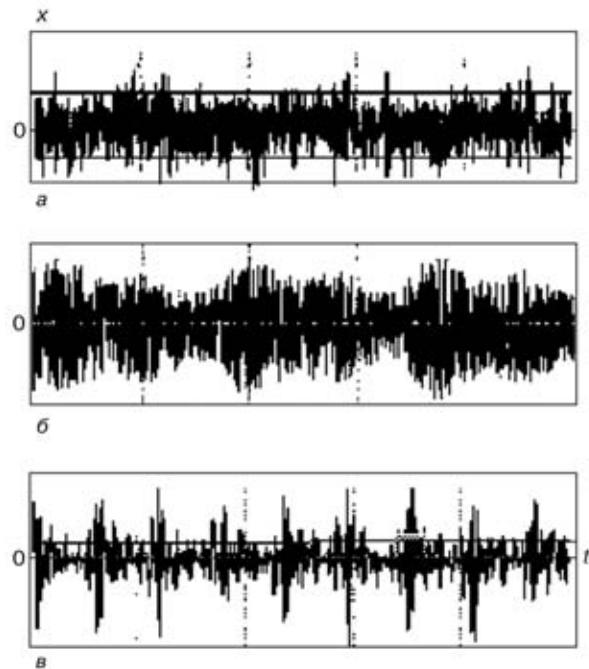


Рис. 2. Временные сигналы высокочастотной вибрации подшипников качения: *а* — исправного; *б* — с износом поверхности трения; *в* — с раковиной на поверхности качения

ти датчика, глубина модуляции, обусловленная появлением дефекта, остается неизменной. В отличие от известного метода анализа высокочастотной вибрации, названного методом резонансной демодуляции, где рассматриваются собственные колебания контролируемого узла, при использовании метода огибающей анализируются вынужденные колебания, полностью передающие характеристики колебательных сил и тем самым — свойства и отличительные признаки дефектов, что также по-

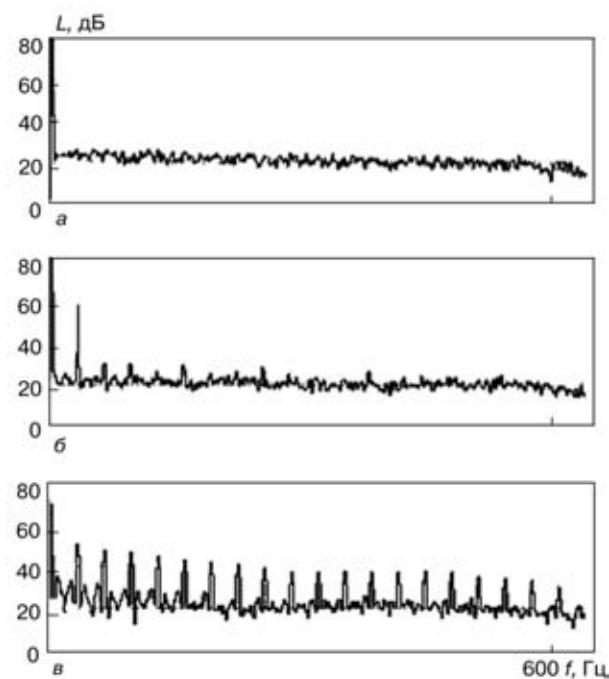


Рис. 3. Спектры огибающей сигналов высокочастотной вибрации подшипников качения: *а* — исправного; *б* — с износом поверхности трения; *в* — с раковиной на поверхности качения



ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Частоты составляющих спектра огибающей сигнала вибрации, используемых для обнаружения и идентификации дефектов подшипников качения по однократным измерениям вибрации

| Порядковый номер | Вид дефекта | Частота основных признаков | Частота дополнительных признаков |
|------------------|---|--|--|
| 1 | Обкатывание наружного (неподвижного) кольца | $f_{\text{в.р}}$ | Нет роста ВЧ |
| 2 | Неоднородный радиальный натяг | $2kf_{\text{в.р}}$ | »» |
| 3 | Перекос наружного (неподвижного) кольца | $2f_{\text{n}}$ | — |
| 4 | Износ наружного кольца | f_{n} | Рост ВЧ |
| 5 | Раковины, трещины на наружном кольце | kf_{n} | »» |
| 6 | Износ внутреннего кольца | $kf_{\text{в.р}}$ | »» |
| 7 | Раковины, трещины на внутреннем кольце | $kf_{\text{в}}$ | $kf_{\text{в.р}}, k_1 \pm k_2 f_{\text{в.р}}$ |
| 8 | Износ тел качения и сепаратора | kf_{c} | $k(f_{\text{в.р}} - f_{\text{c}})$, рост ВЧ |
| 9 | Раковины, сколы на телах качения | $2kf_{\text{т.к}}$ | $2k_1 f_{\text{т.к}} \pm k_2 f_{\text{c}}$, рост ВЧ |
| 10 | Сложный (составной) дефект | $kf_{\text{n}} + kf_{\text{c}}$ или $kf_{\text{n}} + k_1 f_{\text{в}}$ или $kf_{\text{n}} + kf_{\text{в.р}}$ или $kf_{\text{n}} + f_{\text{в.р}}/k_2$ | Рост ВЧ |
| 11 | Прокальзывание кольца | $kf_{\text{в.р}}, k > 10$; рост ВЧ | Нет других составляющих |
| 12 | Дефект смазки | Рост ВЧ | Нет сильных дефектов поверхности качения |
| 13 | Неидентифицированный дефект | Рост других гармонических составляющих | |

Примечание. ВЧ — высокочастотная область спектра вибрации; $k = 1, 2, 3, \dots$; $k_1 = 1, 2, 3, \dots$; $k_2 = 1, 2, 3, \dots$.

вышает достоверность идентификации вида дефекта и степени его развития.

4. *Возможность постановки диагноза и прогноза по однократным измерениям вибрации.* Она обусловлена использованием относительных измерений, т. е. измерений глубин модуляции высокочастотной вибрации. Знание предельных глубин модуляции, характеризующих каждый из возможных сильных дефектов, и скоростей развития каждого вида дефекта позволяет не только определять вид и степень развития каждого дефекта, но и прогнозировать время безаварийной работы контролируемого узла без предварительного построения эталонов. Исключение составляет только дефект смазки, для определения которого создается эталон (или по нескольким первым измерениям, обычно по трем, или по группе однотипных машин, обычно менее пяти).

Таким образом, метод огибающей высокочастотной вибрации позволяет обнаружить, идентифицировать и прогнозировать состояние подшипников качения с дефектами, сопровождающимися появлением модуляции высокочастотной вибрации из-за изменения сил трения, а также высокочастотных импульсов из-за возникновения микроударов. Метод анализа высокочастотной вибрации, обусловленной только наличием микроударов, получивший название «метод ударных импульсов», широко известен еще с 1968 г. Основной вклад в развитие этого метода принадлежит фирме SPM. Оказывается, что наличие даже зарождающихся дефектов в подшипнике приводит к появлению высокочастотных импульсов, а следовательно, увеличению пикировых уровней в высокочастотном сигнале вибрации (при этом его среднеквадратичные уровни в общем случае могут даже оставаться неизменными). Таким образом, отношение пикирового и среднеквадратичного значений, которое называется пик-фактором, может служить диагностическим признаком. В случае отсутствия ударных импульсов значение пик-фактора высокочастотной вибрации

расширения подшипника качения меньше пяти, а при наличии ударных импульсов этот показатель может быть выше десяти.

Метод ударных импульсов и реализующие его достаточно простые приборы, измеряющие пик-фактор (или некоторые его модификации, например, крест-фактор и т. п.) вибрации в диапазоне частот выше 25 кГц, широко используются для контроля состояния подшипников качения. Этот метод является чувствительным даже к зарождающимся дефектам, однако не все дефекты в подшипниках качения сопровождаются появлением ударных импульсов. Так, дефекты, не приводящие к продавливанию слоя смазки (например, дефекты монтажа), не могут быть обнаружены методом ударных импульсов. Но хорошо известно, что дефекты сборки в значительной степени влияют на ресурс подшипников качения. Ввиду того, что ударные импульсы могут появляться при различных видах дефектов, а также и при изменении качества смазки, рассматриваемый метод не дает возможности идентифицировать вид дефекта. Кроме того, метод ударных импульсов не позволяет осуществлять долгосрочный прогноз ввиду невозможности определять вид дефекта, поскольку различные дефекты имеют разные скорости развития. Следовательно, метод ударных импульсов позволяет контролировать состояние подшипников качения, но не диагностировать его.

Из всех приведенных методов наиболее эффективным и чувствительным методом диагностики подшипников качения является метод анализа спектра огибающей его высокочастотной вибрации. Однако если подшипник находится в стадии деградации и в нем имеется целый ряд развитых дефектов, модуляция его высокочастотной вибрации приобретает случайный характер в результате суперпозиции многих модуляционных процессов. В этом случае высокочастотная вибрация вновь становится стационарным процессом с постоянной во времени мощностью. Поэтому для того, чтобы по одиночным



измерениям обнаружить и предаварийные состояния подшипников, наиболее целесообразно, кроме метода огибающей, использовать и спектральный анализ их низко- и среднечастотной вибраций. В этом случае окончательный диагноз ставится по результатам совместного спектрального анализа вибрации (при этом эталон может быть построен по группе однотипных машин, обычно из пяти машин) и спектрального анализа огибающей ее высокочастотных составляющих.

Следует отметить, что диагностические признаки, характеризующие вид дефекта подшипника или определенное сочетание дефектов, могут определенным образом изменяться в зависимости от вида нагрузки, действующей на подшипник. Можно выделить четыре основных вида нагрузки:

- 1) радиальную статическую на одну точку поверхности качения (на одно тело качения, например, подшипник качения в машине горизонтального исполнения);

- 2) ту же на две противоположные точки поверхности качения, например, в подшипнике с перекосом наружного кольца;

- 3) ту же на все тела качения, например, в машине вертикального исполнения или с осевым поджатием подшипника;

- 4) вращающуюся, действующую на одно тело качения, например, подшипник качения в машине с неуравновешенным ротором или боем вала.

Кроме возможного изменения нагрузки на вращающийся узел существует еще целый ряд особенностей, которые следует учесть при постановке диагноза и прогноза.

1. Часть диагностических признаков, используемых для идентификации одного вида дефекта, может совпадать с диагностическими признаками другого вида, что требует дополнительного оценивать вероятность правильного определения вида каждого дефекта.

2. Возможно изменение частоты вращения подшипника, которая определяет значения всех без исключения частот подшипниковой вибрации и кратных им частот.

3. Возможны ошибки при определении конструктивных характеристик диагностируемого узла, например, числа тел качения или диаметров поверхностей качения в определенном типе подшипника, что искажает расчетные значения ряда подшипниковых частот, а следовательно, и диагностических признаков.

4. Характеристик сопрягаемых узлов (например, их дефектов) на нагрузки, передаваемые на диагностируемый подшипник, что в свою очередь может изменить свойства процессов, модулирующих вибрацию подшипника.

Учет всех перечисленных особенностей приводит к тому, что для постановки только одного диагноза следует проанализировать более пятисот



Рис. 4. Простейшая переносная система диагностики врачающегося оборудования производства АО ВАСТ: 1 — сборщик данных — анализатор СД-12; 2 — персональный компьютер типа Notebook; 3 — интерфейсный кабель для обеспечения связи между анализатором и компьютером; 4 — датчик вибрации

различных признаков и параметров, а это возможно при использовании систем диагностики с искусственным интеллектом.

Технические средства для диагностики подшипников качения по вибрации. Диагностика технического состояния по вибрации широко и очень эффективно используется на практике. Можно выделить системы диагностики и прогноза состояния роторного оборудования, разработанные АО ВАСТ (г. Санкт-Петербург) совместно с фирмой Vibro Tek, Inc. Они позволяют оценивать техническое состояние не только подшипников качения, основные методы диагностики которых были рассмотрены выше, но и такие узлы, как подшипники скольжения, роторы, механические передачи, в т. ч. зубчатые и ременные, машины постоянного тока, синхронные машины, асинхронные двигатели, насосные агрегаты, компрессоры, турбины и т. д.

Структура простейшей переносной системы автоматической диагностики вращающегося оборудования показана на рис. 4. Для машин, частота вращения которых в момент измерения вибрации точно неизвестна, используется, кроме датчика вибрации, еще и датчик оборотов ротора.

ВЫВОДЫ

Анализ спектра огибающей высокочастотной вибрации является эффективным методом диагностики подшипников качения, позволяющим:

- 1) выявлять дефекты сборки;
- 2) выявлять, оценивать уровень дефектов эксплуатации и прогнозировать их развития, причем на самой ранней стадии их развития.

Такой анализ рационально проводить с использованием компьютерных программ автоматической диагностики.



МЕТОДИКА УТОЧНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ И ОПОРНЫХ СВЯЗЕЙ СТАЛЬНОГО КАРКАСА «КРАНОВЫХ» ЦЕХОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Е. М. ЕРМАК

Приведена методика экспериментального определения и статистического обоснования характеристик жесткости узлов стального каркаса промышленных зданий по фактическим значениям изгибающих моментов от испытательной нагрузки.

The paper presents the procedure of experimental determination and statistical substantiation of the characteristics of rigidity of a steel frame in industrial buildings by actual values of bending moments due to test load.

Традиционное представление узловых сопряжений и опорных креплений элементов одноэтажных промышленных зданий посредством расчетных моделей с идеализированными предельными характеристиками жесткости («шарнир» или «заделка»), в определенных условиях проектирования или эксплуатации конструкций может ориентировать на неточное распределение усилий. Поэтому в общем случае при формировании расчетных схем таких сооружений необходимо вносить уточнения по вопросу моделирования узловых и опорных связей.

Теоретическое определение характеристик жесткости, вернее, упругой податливости элементов каркаса в узлах, является очень трудной задачей. Кроме рассмотрения и описания сложного пространственного характера напряженно-деформированного состояния в зоне узлов, нужно учитывать еще и случайную природу параметров, от которых эти характеристики зависят, в том числе факторы износа в условиях эксплуатации. Это дает основание полагать, что достаточно достоверную информацию о характеристиках фактической жесткости узловых и опорных связей конструкций можно получить только из опыта, путем проведения натурных испытаний.

В данной статье изложена методика динамических испытаний с обоснованием характеристик жесткости рамных и опорных узлов стального каркаса «крановых» цехов на основе статистического анализа. Приведем основные допущения и положения этой методики, а также порядок ее реализации.

1. Жесткость узлов каркаса оценивается по значению изгибающего момента в узле при воздействии соответствующей нагрузки. Узел считается жестким, если в процессе измерений значение изгибающего момента равно теоретическому, полученному на расчетной модели с абсолютно жесткими узловыми связями. Уменьшение фактического усилия по сравнению с указанным расчетным свидетельствует о некоторой упругой податливости узловых связей. Если же, согласно измерениям, изгибающий момент оказывается равным нулю или близким к нему, то узел считается «шарнирным».

2. Жесткость узлов каркаса определяется при воздействии вертикальной нагрузки на колонны каркаса от мостовых кранов. Показатели жесткости

(или податливости) узлов зависят и от характера нагружения. Они могут быть разными, например, при воздействии вертикальных и горизонтальных нагрузок, поскольку меняется характер работы соединительных элементов. Обосновать правомерность данного допущения можно тем, что нагрузка от веса крана с грузом является наиболее удобной для постановки натурного эксперимента и наиболее значимой для оценки эксплуатационных качеств сооружений, получивших название «крановых» цехов.

3. В процессе испытаний используется тензометрический способ измерений.

4. Запись осцилограмм усилий проводится от движущейся испытательной нагрузки в поперечных сечениях колонн каркаса. Это дает возможность установить связь между усилиями в разных сечениях конструкции, а также характер их изменения в зависимости от положения испытательной нагрузки, передаваемой мостовыми кранами.

5. Если тензодатчики, установленные в поперечных сечениях колонны, объединить в мост [2], то можно получить записи осцилограмм изгибающих моментов M , значения которых в этом случае вычисляются по формуле

$$M_{ij} = y_{ij} m_i W_i^{\text{пл}}, \quad (1)$$

где y_{ij} — отклонение осцилограммы усилия в поперечном сечении i -й колонны в момент времени j движения крана, от нулевой линии, мм; m_i — масштаб записи, кг/ $\text{см}^2\cdot\text{мм}$; $W_i^{\text{пл}}$ — плечевой момент сопротивления, см 3 , $W_i^{\text{пл}} = I_i/h_d$, h_d — расстояние между датчиками, установленными на противоположных поясах (ветвях) колонны.

Таким образом, имея осцилограммы и результаты тарировки, можно по формуле (1) определить изгибающие моменты в исследуемых поперечных сечениях конструкции, а затем, сопоставляя эти данные с расчетными усилиями, установить степень защемления колонны в «рамном» и «опорном» узлах.

6. Эти вычисления можно упростить с помощью некоторой безразмерной функции, зависящей от отношения измеренных усилий. Используем известную особенность эпюры изгибающих моментов от нагружения колонны крановой нагрузкой — наличие двух нулевых точек соответственно в подкра-



новом и надкрановом элементе. Характерный вид такой эпюры и ее нулевые точки O_B и O_H показаны на рис. 1.

Допустим, что выполняются такие условия:

известны (после расшифровки осциллограмм) значения изгибающих моментов в четырех разных поперечных сечениях 1–4 колонны (рис. 1, а);

эпюра изгибающих моментов на надкрановом и подкрановом участках колонны начертена по прямым линиям.

Тогда положение нулевых точек этой эпюры может быть найдено из следующих соотношений (рис. 1, б):

$$K_{1-2} = \frac{z_{1-2}}{z_{1-2} + z_B}, \quad K_{3-4} = \frac{z_{3-4}}{z_{3-4} + z_H}, \quad (2)$$

где K_{1-2} и K_{3-4} — безразмерные функции изгибающих моментов. Они определяются по результатам испытаний:

$$K_{1-2} = \frac{M_2 - M_1}{M_2}, \quad K_{3-4} = \frac{M_3 - M_4}{M_3}. \quad (3)$$

7. Отметим, что положение нулевых точек эпюры изгибающих моментов не меняется при различном направлении действия испытательной нагрузки относительно колонны как объекта испытаний, т. е. оно не зависит от нагрузки.

Вероятные смещения нулевых точек и соответственно изменения отношения изгибающих моментов можно объяснить только влиянием факторов случайной природы, в том числе:

характеристик упругого защемления колонны в «рамном» и «опорном» узлах;

уровня давлений на колонну, передаваемых колесами крана, которые не могут считаться строго определенными [3];

случайных неточностей измерений.

Поэтому для достоверности результатов испытаний параметры распределения усилий нужно рассматривать и определять как статистические характеристики. Будем считать величины K_{1-2} и K_{3-4} случайными функциями неслучайного аргумента — времени, или иначе — положения испытательной нагрузки относительно колонны. Осциллографическая запись усилий дает возможность получить статистическую информацию для определения доверительных значений K_{1-2} и K_{3-4} и далее — оценки жесткости узловых упругих связей.

8. Допускаем, что значения случайных величин K_{1-2} и K_{3-4} распределены по нормальному закону.

9. Вероятностные характеристики случайных величин K_{1-2} и K_{3-4} определяются путем обработки материалов экспериментальных исследований. Имея осциллограммы усилий для исследуемых поперечных сечений колонны, следует нанести на них последовательный ряд сечений с определенным шагом и измерить соответствующие ординаты.

Шаг сечений должен быть выбран таким, чтобы их количество j было достаточным для получения доверительных значений числовых характеристик случайных величин K_{1-2} и K_{3-4} .

математического ожидания

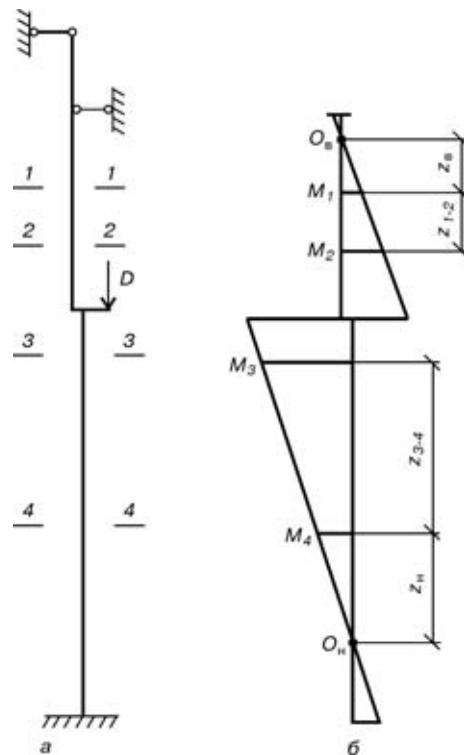


Рис. 1. Расчетная схема колонны (а) и общий вид эпюры изгибающих моментов в стержне колонны от крановой нагрузки D (б)

$$\tilde{K}_{1-2} = \frac{\sum K_{1-2}^j}{m}, \quad \tilde{K}_{3-4} = \frac{\sum K_{3-4}^j}{m} \quad (4)$$

и дисперсии

$$\bar{D}_{1-2} = \frac{\sum (K_{1-2}^j - \tilde{K}_{1-2})^2}{m}, \quad \bar{D}_{3-4} = \frac{\sum (K_{3-4}^j - \tilde{K}_{3-4})^2}{m}. \quad (5)$$

Результаты их вычислений удобно представить в табличной форме.

10. Имея статистически обоснованные значения K_{1-2} и K_{3-4} , по формулам (2) можно установить положение нулевых точек и построить эпюру распределения фактических усилий в колонне.

По экспериментальным значениям изгибающих моментов в поперечных сечениях, близких к «рамному» и «опорному» узлам, а также по результатам сравнения их с теоретическими, рассчитанными на моделях с идеализированными и упругими характеристиками узловых соединений, можно судить о следующем:

точности использованных расчетных моделей;

степени упругого защемления колонны «узловыми» упругими связями;

необходимости корректировки расчетных моделей в этом отношении.

Используя изложенную выше методику динамических испытаний, проверим точность расчетной модели двухпролетной поперечной рамы каркаса сборочного цеха (ПО «Запорожтрансформатор») в отношении характеристик жесткости рамного и опорного узлов колонны среднего ряда (рис. 2, а).

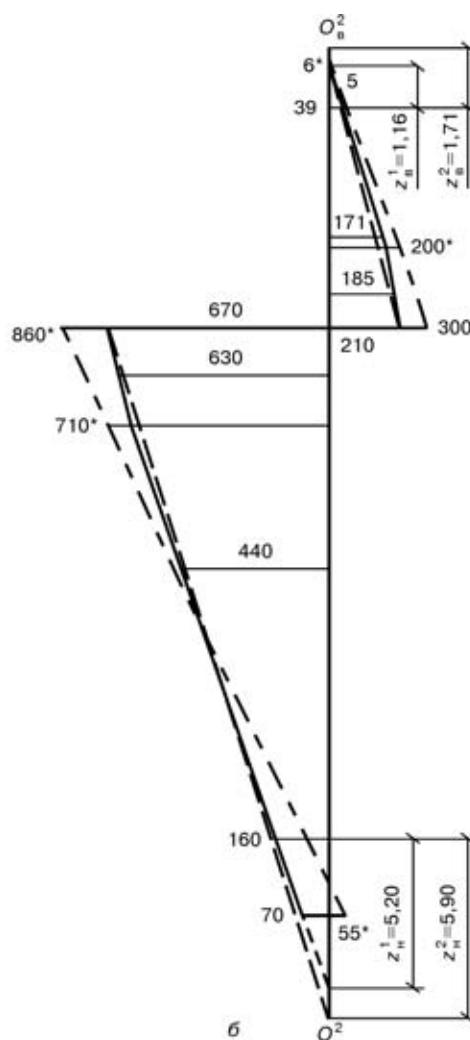
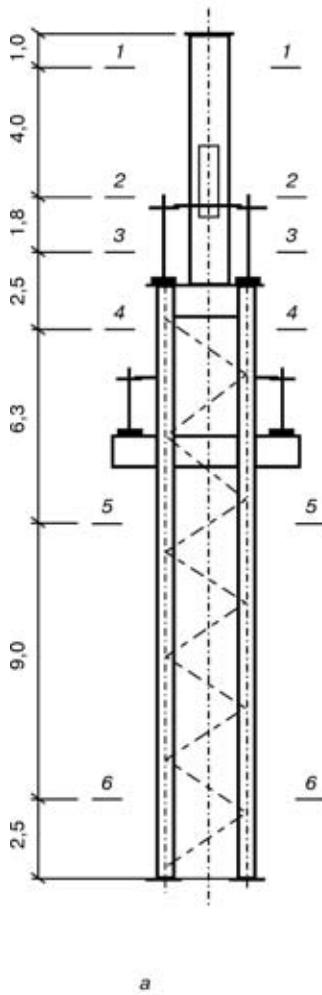


Рис. 2. Схема колонны — объекта испытаний (а) и соответствующие эпюры изгибающих моментов M , кН·м, от испытательной нагрузки, установленные экспериментально и расчетным путем (отмечены звездочкой) (б); 1–6 — сечения, в которых устанавливали тензодатчики (расстояния z указаны в метрах)

Их конструктивное оформление выполнено таким образом, что опорный узел по проекту должен обеспечивать жесткое защемление колонны, а в верхнем узле она считается не закрепленной от поворота (стропильные фермы — левая и правая

— установлены симметрично на оголовок колонны сверху).

Работу выполняем в следующей последовательности.

1. Устанавливаем тензодатчики в шести поперечных сечениях колонны — по 4 в каждом сечении (рис. 2, а);

2. Записываем осциллограммы изменения изгибающих моментов в этих сечениях от испытательной нагрузки (вес одного мостового крана верхнего яруса, который перемещался вдоль цеха). В качестве регистрирующего прибора применяли осциллограф Н-700 с чувствительными шлейфами.

3. Для определения числовых характеристик случайных величин K используем две осциллограммы (№ 1, 2), записанные на данном объекте в разное время (рис. 3). Каждая из них дает информацию об изменении усилий в четырех сечениях: первая — в сечениях 1, 2, 4, 6, вторая — 1, 3, 5, 6 (рис. 2, а).

Эти сечения выбираем и объединяем в указанные группы с учетом переломов эпюр изгибающих моментов M , связанных с включением в работу колонны «внешних» упругих связей, моделирующих продольные диски тормозных конструкций [1]. Шаг сечений на осциллограммах принимаем равным 2 мм, что в данном масштабе соответствует длине пути крана 0,5 м.

4. Масштаб осциллограмм m , $\text{кг}/\text{см}^2 \cdot \text{мм}$, устанавливаем по тарировке каждого шлейфа в отдельности (при условии, что другие шлейфы-вибраторы включены в свои цепи).

Результаты тарировки (на базе деформаций тарировочной балки) приведены в таблице.

5. Для определения изгибающих моментов в исследуемых сечениях колонны вычисляем плече-

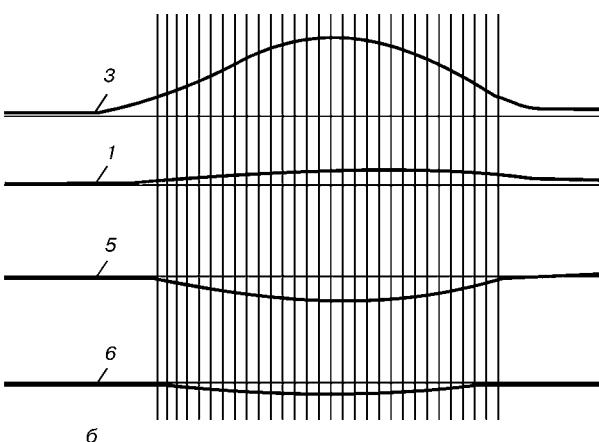
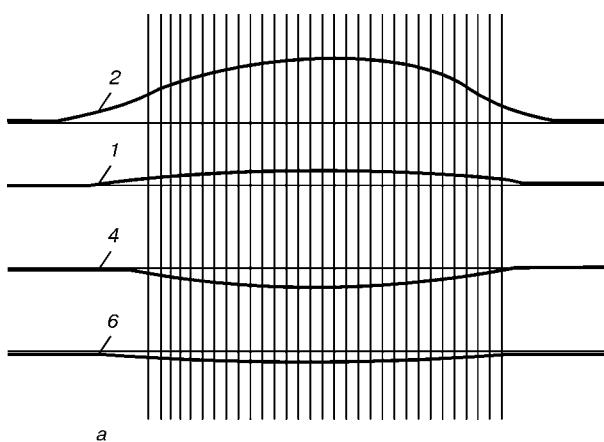


Рис. 3. Осциллограммы № 1 (а) и 2 (б), записанные для сечений 1–6 колонны среднего ряда каркаса (см. рис. 2, а)



вые моменты сопротивления ($W_{1,3}^{\text{пл}} = 6950 \text{ см}^3$, $W_2^{\text{пл}} = 6750 \text{ см}^3$; $W_{4,5,6}^{\text{пл}} = 5700 \text{ см}^3$) и измеряем соответствующие ординаты осциллограммы (отклонения ее от нулевой линии, мм).

Максимальные изгибающие моменты, согласно формуле (1):

по результатам первых испытаний (осциллограмма № 1)

$$M_1^1 = 2,5 \cdot 22,2 \cdot 6950 \text{ кг}\cdot\text{см} = 38,6 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_2 = 1225 \cdot 20,5 \cdot 6750 \text{ кг}\cdot\text{см} = 171,0 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_4 = -6,7 \cdot 16,3 \cdot 5700 \text{ кг}\cdot\text{см} = -627,0 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_6^1 = -1,75 \cdot 16,3 \cdot 5700 \text{ кг}\cdot\text{см} = -161,0 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

по результатам вторых испытаний (осциллограмма № 2)

$$M_1^2 = 39,2 \text{ кН}\cdot\text{м}; M_3 = 185,0 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_5 = -440,0 \text{ кН}\cdot\text{м}; M_6^2 = -159,6 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Отметим, что значения величин M_1 и M_6 , которые вычислялись дважды, совпали достаточно точно.

6. Безразмерные статистические величины K_j определяем из следующих выражений:

$$K_{1-2} = \frac{M_2 - M_1}{M_2} = 1 - \frac{y_1^1 m_1^1 W_1^{\text{пл}}}{y_2^2 m_2^2 W_2^{\text{пл}}} = 1 - 1,11 \frac{y_1^1}{y_2^2};$$

$$K_{1-3} = \frac{M_3 - M_1^2}{M_3} = 1 - 0,91 \frac{y_1^2}{y_3^2};$$

$$K_{4-6} = 1 - \frac{y_6^1}{y_4^1}; K_{5-6} = 1 - 0,82 \frac{y_6^2}{y_4^2}.$$

Для выборки y_{ij} ($i = 1, 2, 4, 5$; $j = 1, \dots, 30$) по данным осциллограммы № 1 вычисляем, согласно (4) и (5), числовые характеристики случайных величин K_{1-2} и K_{4-6} : $\tilde{K}_{1-2} = 0,783$; $\tilde{K}_{4-6} = 0,732$; $D_{1-2} = 0,008$; $D_{4-6} = 0,005$.

Аналогично по данным осциллограммы № 2 $\tilde{K}_{1-3} = 0,768$; $\tilde{K}_{5-6} = 0,638$; $D_{1-3} = 0,003$; $D_{5-6} = 0,001$.

7. Из соотношения (2) определяем расстояния до нулевых точек эпюры изгибающих моментов ($z_{\text{в}}^1 = 1,20 \text{ м}$; $z_{\text{в}}^2 = 1,73 \text{ м}$; $z_{\text{в}}^1 = 5,64 \text{ м}$; $z_{\text{в}}^2 = 5,14 \text{ м}$) и строим эпюру изгибающих моментов M в стержне

Укр. гос. академия жел.-дор. транспорта,
Харьков

Определение масштаба осциллограмм усилий путем тарировки шлейфов-вибраторов

| Номер шлейфа-вибратора | Номер сечения колонны | Масштаб m , кг/ $\text{см}^2\cdot\text{мм}$, осциллограммы | |
|------------------------|-----------------------|---|---------|
| | | № 1 | № 2 |
| 8Г | 1 | 22,2 | 18,6 |
| 9Г | 2 | 20,5 | Не опр. |
| | 3 | Не опр. | 20,5 |
| 10Г | 4 | 16,3 | Не опр. |
| | 5 | Не опр. | 17,0 |
| 11Г | 6 | 16,3 | 14,0 |

колонны по экспериментальным данным (рис. 2, б). Для сравнительного анализа на рис. 2, б приведена эпюра изгибающих моментов, полученная при расчете поперечной рамы на испытательную нагрузку (значения отмечены звездочкой).

Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

1. Узел сопряжения стропильных ферм и колонны среднего ряда каркаса обеспечивает некоторое незначительное защемление указанных элементов; при вертикальной крановой нагрузке экспериментальные значения изгибающих моментов в оголовке колонны малы ($M_{\text{в}} = 5,0 \text{ кН}\cdot\text{м}$) и достаточно точно учитываются расчетной моделью ($M_{\text{в}}^* = 6,0 \text{ кН}\cdot\text{м}$).

2. В зоне опорного узла колонны при испытаниях выявлено существенное отличие (по значению и знаку) экспериментальных изгибающих моментов от расчетных, что, по-видимому, связано с отсутствием учета упругих деформаций фундамента и основания (грунты II категории просадочности). В этом отношении расчетная модель данного объекта нуждается в корректировке.

1. Ермак Е. М. Оптимизация расчетной модели стального каркаса одноэтажных промышленных зданий // Сб. тр. Междунар. конф. «Металлостроительство-96», Донецк – Макеевка, 1996. – Т. 1. – С. 28–29.
2. Семенец Г. Л., Ильевский А. В., Левкин С. В. К методике изучения действительной работы металлических пролетных строений мостов // Тр. ХИИТА. – М.: Транспорт, 1973. – Вып. 128. – С. 43–46.
3. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / А. И. Кикин, А. А. Васильев и др. – М.: Стройиздат, 1984. – 302 с.
4. Ренский А. Б. Деформативность и прочность фланцевых сопряжений ферм с колоннами в стальных каркасах производственных зданий // Сб. науч. тр. МИСИ. – М., 1953. – Вып. 22. – С. 16–58.

Поступила в редакцию
12.07.2002



ЭЛЕКТРОМАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В КОСМОСЕ

В. А. ТРОИЦКИЙ, В. П. РАДЬКО, И. Я. ШЕВЧЕНКО, П. В. ФЕДОРЯКА, А. И. ДЗЫГАНСКИЙ

Рассмотрены структурные схемы приборов и преобразователей электромагнитно-акустического (ЭМА) метода для НК металлоконструкций и элементов изделий, эксплуатируемых в космосе. Описана базовая теория ЭМА преобразователя. Приведены результаты экспериментальных исследований по отработке методических вопросов неразрушающего контроля ЭМА методом пластин и сварных соединений.

Block diagrams are considered of instruments and transducers for electromagnetic-acoustic (EMA) method for NDT of metal structures and components of products operated in space. The basic theory of EMA transducer is described. The paper presents the results of experimental investigations on optimizing the procedural issues of NDT of plates and welded joints by EMA method.

Кратко остановимся на рассмотрении базовой теории ЭМА преобразования [1, 2]. Электромагнитоакустическое возбуждение ультразвука основано на двух физических явлениях: действии силы Лоренца в токопроводящих материалах и магнитострикции в ферромагнитных материалах [1, 2].

Рассмотрим ЭМА преобразование, обусловленное силами Лоренца. Катушка, помещенная у поверхности объекта контроля, передает высокочастотный импульсный электромагнитный сигнал. В приповерхностном слое толщиной δ (рис. 1) наводится вихревой ток $j(z, t)$ и создается электрическое поле $E(z, t)$. Когда прикладывается постоянное магнитное поле, нарушается равновесие, что приводит к возникновению силы, действующей на электроны. Это — сила Лоренца, выражаемая следующей зависимостью:

$$\mathbf{F}(z) = (\mathbf{j}(z) \times \mathbf{B}_0) / n_0, \quad (1)$$

где n_0 — плотность электронов.

Для индукции B_0 , направленной по оси OX , продольная сила Лоренца приводит к вариации плотности заряда электронов вдоль направления OZ . Внутреннее электрическое поле $E(z)$, ориентированное вдоль оси OZ , должно существовать для поддержания нейтральности заряда. Его ионы совершают колебания сжатия-растяжения с амплитудой ξ_z . Для индукции B_0 , действующей вдоль оси OZ , токи $j(z, t)$ направлены вдоль OY , а сила Лоренца — по направлению OX . Силы Лоренца возбуждают силы сдвига вдоль оси OX , что приводит к появлению поперечных колебаний с амплитудой ξ_x . Таким образом, для этих двух поляризаций волновое уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - s^2 \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{|\mathbf{j} \times \mathbf{B}_0|}{d}, \quad (2)$$

где d — плотность металла; s — скорость ультразвуковой (УЗ) волны.

Известно [1, 2], что при $d \ll 1$ и на расстоянии $z \gg \delta$ волновое уравнение имеет следующее решение:

$$|\xi| = \frac{BB_0}{\mu_0 ds \omega (1 + \beta^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

где $\beta = q^2 \delta^2 / 2$; q — волновое число.

Коэффициент преобразования η электромагнитоакустического преобразователя (ЭМАП) — отношение возбуждаемой акустической мощности P к электромагнитной мощности Q , прикладываемой к поверхности объекта контроля, — определяется выражением

$$\eta = \frac{P}{Q} = \frac{2B_0^2}{\mu^2 (ds \omega \delta)}. \quad (4)$$

На частоте 10 МГц для волн сжатия в алюминии при индукции $B_0 = 1$ Т коэффициент преобразования $\eta = 5,7 \cdot 10^{-5}$.

В неферромагнитных материалах силы Лоренца вносят основной вклад в генерирование (возбуждение) ультразвука. В ферромагнитных материалах к этим силам добавляются силы, обусловленные магнитострикционным эффектом. Согласно этим принципам, ЭМАП должен состоять из средств создания постоянного подмагничивающего поля или электромагнита и спирали проводов (катушки) с протекающим по ней импульсным переменным током возбуждения, создающим переменное магнитное поле в изделии.

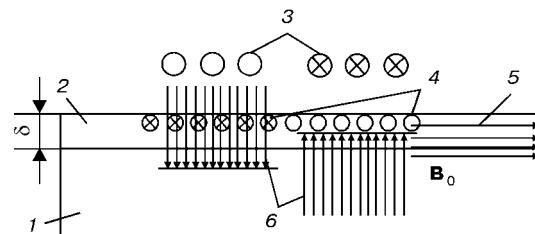


Рис. 1. Схема ЭМА излучения и приема УЗ волн: 1 — объект контроля; 2 — приповерхностный слой; 3 — катушка, в которой протекает высокочастотный импульсный ток с частотой требуемых УЗ колебаний; 4 — вихревые токи (показано направление их распространения); 5 — индукция B_0 постоянного подмагничивания; 6 — направления излучения и приема УЗ волны



На рис. 2 показано поперечное сечение ЭМАП, излучающего и принимающего поперечные УЗ волны. ЭМАП состоит из трех основных элементов: постоянного магнита (самарий-кобальтового диска), передающей и принимающей спиральной катушки. При достижении достаточной плотности кольцевых переменных вихревых токов в вертикальном магнитном поле возникают радиально колеблющиеся силы Лоренца в приповерхностном слое толщиной порядка 0,1 мм. Эти силы действуют как источник ультразвука внутри металла объекта контроля. Прием сигналов осуществляется в обратной последовательности.

Рассмотрим схему прибора, в которой используется ЭМА преобразование, обусловленное силами Лоренца. Он работает следующим образом (рис. 3). Генератор зондирующих импульсов 1, управляемый микропроцессорным блоком 5, вырабатывает высоковольтный импульс, который подается на катушку ЭМАП, возбуждающего и принимающего поперечные волны. Постоянное и высокочастотные поля создаются соответственно самарий-кобальтовым магнитом и высокочастотной катушкой. Отраженный от противоположной поверхности сигнал, принятый катушкой преобразователя 2, подается на вход измерительного усилителя 3. Коэффициент усиления 3 задается микропроцессорным блоком 5 так, чтобы его выходной сигнал находился в заданных пределах оптимальной работы блока АЦП 4. Оцифрованный сигнал с выхода блока АЦП 4 записывается в специальную область блока памяти 7. Микропроцессорный блок 5 осуществляет обработку данных в памяти в соответствии с различными режимами работы толщиномера, передачу информации в блок индикации 6, запоминание результатов измерения в блоке памяти 7 и передачу их в персональный компьютер через стандартный интерфейс RS 232. Выбор различных режимов работы толщиномера проводится оператором с помощью блока клавиатуры 8.

Рассмотрим устройство и работу дефектоскопа, в котором для возбуждения и приема УЗ колебаний используются магнитострикционный и магнитоупругий эффекты. Для реализации условий возбуждения УЗ колебаний в контролируемом изделии возбуждаются два вида поля — квазистационарное и высокочастотное. Первое необходимо для выбора участка с максимальной производной магнитострикционной постоянной по напряженности намагничивающего поля. Длительность квазистационарного поля должна быть такова, чтобы обеспечить возбуждение и прием отраженных УЗ волн от дефектов, находящихся в рабочем участке.

Квазистационарное и высокочастотное поля создаются соответственно электромагнитом и высокочастотной катушкой, которые находятся в преобразователе. Две обмотки электромагнита, выполненные идентично на U-образном ленточном сердечнике, работают поочередно через такт импульсов синхронизации. Для того, чтобы уменьшить притяжение преобразователя к изделию, поля, соз-

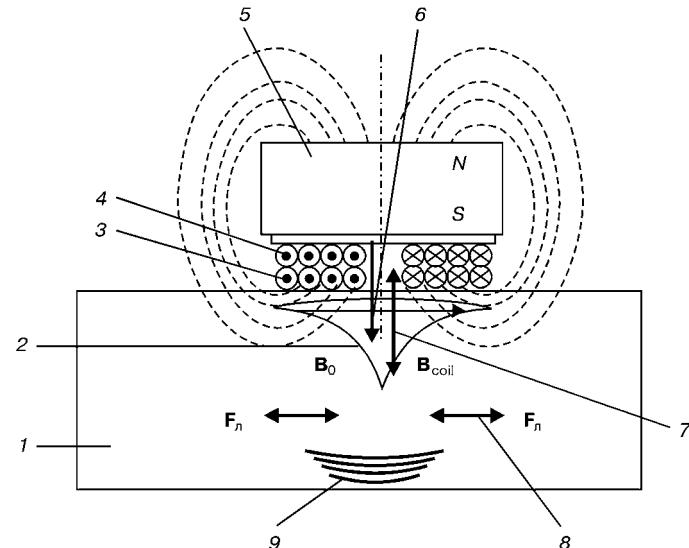


Рис. 2. Схема возбуждения-приема поперечных волн ЭМАП (показано поперечное сечение): 1 – алюминиевый образец (объект контроля); 2 – вихревые токи (показано направление распространения); 3 – принимающая катушка; 4 – передающая катушка; 5 – самарий-кобальтовый магнит; 6 – магнитная индукция B_0 , создаваемая самарий-кобальтовым магнитом; 7 – индукция B_{coil} переменного магнитного поля, наводимого током в катушке; 8 – силы Лоренца F_L ; 9 – поперечная волна (волна сдвига)

даваемые обмотками электромагнита, направлены встречно. Высокочастотная катушка намотана на диэлектрическом каркасе и размещается между полюсами электромагнита. Ее намотка выполнена с шагом, равным половине длины возбуждаемой волны. В соседних витках направления протекаемого тока противоположны. При контроле высокочастотная катушка преобразователя и полюса электромагнита располагаются на поверхности изделия.

Процесс возбуждения и приема УЗ колебаний происходит следующим образом: на одну из обмоток электромагнита подается импульс тока трапециoidalной формы длительностью порядка сотен микросекунд. В момент, когда ток в обмотке электромагнита достигает максимального значения, на высокочастотную катушку подается радиоимпульс длительностью порядка нескольких микросекунд с частотой заполнения, равной частоте возбуждения УЗ колебаний. В результате взаимодействия квазистационарного и высокочастотного полей с контролируемым изделием на поверхности последнего за-

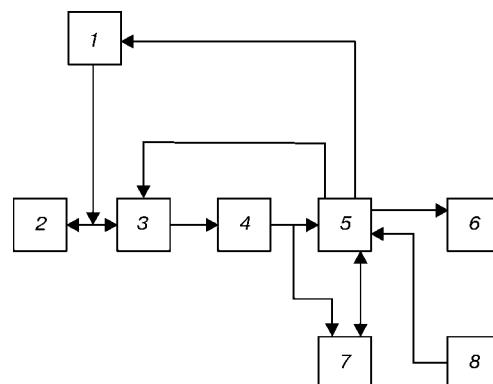


Рис. 3. Структурная схема прибора с использованием ЭМАП (обозначения см. в тексте)



Рис. 4. Внешний вид ЭМАП для возбуждения и приема попечечных волн

счет эффекта магнитострикции возникают упругие магнитострикционные напряжения, распределение которых на поверхности аналогично бегущей волне. Эти напряжения приводят к возникновению объемных волн, которые при определенных условиях трансформируются в волны Лэмба, имеющие смещения по всему сечению листа, или поперечные волны SH-поляризации.

Отражаясь от внутренних дефектов или граней изделия, УЗ колебания вновь попадают в зону действия преобразователя. Колебания частиц среды при распространении УЗ колебаний в квазипостоянном поле, создаваемым преобразователем за счет магнитоупругого эффекта, приводят к появлению на поверхности контролируемого изделия ЭДС, которая воспринимается высокочастотной катушкой и преобразуется в импульс электрических колебаний с частотой заполнения, равной частоте УЗ колебаний.

Дефектоскоп реализует эхо-импульсный метод контроля. В основу способа определения им расстояний положен метод измерения временного интервала между излучаемым (зондирующим) и отраженным импульсами. Прибор может работать в двух режимах синхронизации в зависимости от того, какой электронный блок является задающим — БЭ-1 или БЭ-2. Измерение расстояния до дефекта можно проводить только во втором режиме.

В первом режиме дефектоскоп работает следующим образом. Синхроимпульс, который вырабатывается блоком предусилителя и синхронизатора, запускает один из тиристоров формирующей линии блока генератора импульсов. Формирующая линия разряжается на одну из обмоток электромагнита преобразователя, в которой формируется импульс тока трапециoidalной формы. В момент, когда ток в обмотке электромагнита достигает максимального значения, синхронизатор блока предусилителя и синхронизатора вырабатывает импульс, запускающий генератор радиоимпульсов и блок БЭ-2. Генератор радиоимпульсов вырабатывает радиоимпульс, который подается на высокочастотную катушку преобразователя. В контролируемом изделии формируется волна Лэмба, которая, распространяясь по изделию, отражается от дефектов или граней контролируемого изделия, воспринимается ЭМАП и преобразуется в радиоимпульс. Пос-

ледний подается на вход предусилителя, где происходит предварительное усиление сигнала. Кроме того, предусилитель выполняет еще две функции: согласования импедансов высокочастотной катушки и входа основного усилителя БЭ-2, а также уменьшения амплитуды зондирующего импульса на входе основного усилителя с целью избежания перегрузки основного усилителя по входу.

Сигнал с выхода предусилителя поступает на вход блока БЭ-2, который используется для усиления сигнала, временной селекции сигналов от дефекта, сравнения амплитуд сигналов от дефекта с наперед заданным уровнем, а также индикации в аналоговой форме на экране ЭЛТ.

Второй режим по синхронизации реализуется, когда задающим является блок БЭ-2, и применяется в том случае, когда необходимо измерять расстояние от преобразователя до дефекта. Работа дефектоскопа во втором режиме отличается в основном режимом работы блока БЭ-2. В этом случае блок БЭ-2 переводится в режим внутренней синхронизации 100 Гц, а БЭ-1 — в режим внешнего запуска. Сигнал, отраженный от дефекта или грани изделия, принимается ЭМАП, преобразуется им в импульс электрических колебаний и подается на предусилитель. Усиленные сигналы с выхода предусилителя подаются на вход блока БЭ-2, где происходит дополнительное усиление и детектирование сигнала.

С выхода блока усилителя детектированные эхо-импульсы положительной полярности поступают на видеоусилитель, расположенный в блоке БЭ-2, а затем на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ для визуализации эхо-сигналов. Эхо-импульсы положительной полярности со второго выхода блока усилителя поступают в блок обработки сигналов. Для выделения импульса сигнала от дефекта в блоке обработки сигналов формируется строб-импульс автоматической сигнализации.

При ручном режиме контроля при наличии дефекта на цифровом индикаторе высвечивается координата дефекта в миллиметрах. В автоматическом режиме контроля выходы схемы отсчета координаты дефекта, несущие информацию о расстоянии от преобразователя до дефекта, подключаются к компьютеру, при этом цифровой индикатор глубиномера отключается.

Схема квантователя амплитуды сигнала дефекта выдает информацию о ее амплитуде, соответствующей четырем уровням этого сигнала; световая индикация уровней осуществляется светодиодами. Кроме того, имеются выходы информации об амплитуде дефекта в двоично-десятичном коде для связи с компьютером и выход пикового детектора для записи на самописец.

Состав и работа макета ультразвукового ЭМА-дефектоскопа, излучающего и принимающего волны SH-поляризации. В состав макета дефектоскопа входят следующие блоки: генератор подмагничивания, блок питания и синхронизации, генераторы запускающих и зондирующих импульсов, блок предварительного усилителя, УЗ дефектоскоп УД-10УА, ЭМАП. Последний преобразует электромагнитную энергию в акустическую и нао-

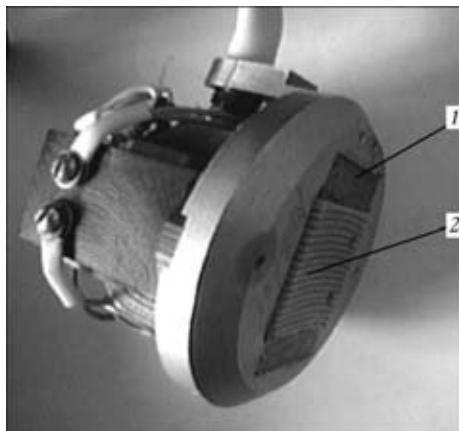


Рис. 5. Электромагнитоакустический преобразователь для излучения и приема волн Лэмба: 1 — магнитопровод для создания квазипостоянного магнитного поля; 2 — катушка для создания высокочастотного магнитного поля

борот. Он является одновременно преобразователем-излучателем и преобразователем-приемником, обеспечивающим раздельно-совмещенный режим работы. ЭМАП УЗ дефектоскопа осуществляет прием и излучение поперечных волн SH-поляризации для контроля качества стальных металлоконструкций, в частности, электросварных труб, в ручном режиме.

Основным элементами ЭМАП являются: согласующий трансформатор, высокочастотная катушка, катушка электромагнита и магнитопровод. Генератор синхронизации формирует синхроимпульсы для запуска генератора зондирующих импульсов, генератора импульсного подмагничивания и УЗ дефектоскопа УД-10УА. Сигнал от генератора запускающих импульсов подается на генератор зондирующих импульсов и ЭМАП. На обмотку последнего поступают электрические импульсы с генератора подмагничивания, при этом во время излучения и приема импульсов УЗ колебания в зазоре магнитопровода преобразователя формируется низкочастотное магнитное поле. Сигнал, принятый преобразователем, поступает на вход предварительного усилителя и блока УД-10УА, где происходит усиление электрических сигналов, их временной и амплитудный анализ и формирование на экране. В приборе УД-10УА происходит усиление электрических сигналов, их временной и амплитудный анализ, формирование на экране для визуального наблюдения сигналов и оценки их параметров.

Экспериментальные исследования. Для отработки методических вопросов НК были использованы различные типы и конструкции ЭМАП: при измерениях толщины — ЭМАП с постоянным магнитом для возбуждения и приема сдвиговых волн под углом ввода 0° (рис. 4); для НК сварных соединений и листов — ЭМАП с квазипостоянным импульсным подмагничиванием, возбуждает и принимает волны Лэмба (рис. 5), а также SH-волны (рис. 6).

Эксперименты по измерению толщины проводились на алюминиевых и стальных образцах толщиной от 1 до 200 мм (размерами 250×250 мм). Погрешность измерения толщины в диапазоне 2,5...7,0 мм составила $\pm 0,25$ мм, в диапазоне 7...200 мм — $\pm 0,1$ мм.



Рис. 6. Внешний вид ЭМАП для излучения и приема поперечных волн SH-поляризации

Влияние величины зазора между преобразователем и поверхностью контролируемого образца исследовали на образцах толщиной 10 мм с непроводящим покрытием (на основе эпоксидной смолы) толщиной 0,1...0,5 мм. Установлено, что величина зазора, определяемого непроводящим покрытием, в значительной степени влияет на амплитуду сигнала.

При толщине покрытия 0,1...0,3 мм точность измерения толщины образца была удовлетворительной и составила $\pm 0,5$ мм. При толщине покрытия 0,4...0,5 мм амплитуды эхо-сигналов от противоположной стенки образцов были недостаточны для надежного измерения толщины.

Эксперименты по обнаружению дефектов в листах и сварных соединениях с использованием волн Лэмба (моды S_0 и S_1) проводили на образцах из стали толщиной 4, 5 и 8 мм. При контроле стальных образцов размерами 100×300 мм и толщиной 4...5 мм, а также сварных соединений использовались фокусирующие ЭМАП, возбуждающие и принимающие волны Лэмба. Были обнаружены искусственные дефекты (отражатели), эквивалентные по отражательной способности щели длиной 20 мм, шириной 0,5 мм и глубиной 0,4 мм. Следует отметить, что достаточно надежно выявляли естественный дефект площадью 4 mm^2 и глубиной 0,3 мм при сканировании образца с двух сторон. В образце, выполненном в виде обечайки (диаметром 520 мм и толщиной 8 мм) со сварным швом по окружности, надежно обнаруживались непровары в корне шва на глубине 3...5 мм. Эксперименты проводили на частоте 1,25 и 2,50 МГц.

Эксперименты по обнаружению дефектов в трубах и сварных соединениях с использованием поперечных волн SH-поляризации проводили на рабочем образце из сварных труб диаметром 720 мм и толщиной 10 мм с искусственными и естественными дефектами. Перечень обнаруженных дефектов рабочего образца представлен в таблице. Таким образом, в результате экспериментов установлено:

- 1) ЭМАП, возбуждающие и принимающие сдвиговые волны под углом 0° , эффективны для измерения толщины изделий из алюминия и стали; при этом погрешность измерения толщины в диапазоне 2,5...200,0 мм не превышала $\pm 0,25$ мм, а погреш-



| № п/п | Вид дефекта | Координаты дефекта, мм | | Параметры | Примечание |
|----------|----------------|---------------------------|-----|---|--|
| | | X | Y | | |
| 1 | Округлой формы | 500 | 550 | Диаметр D = 2 мм | Обнаруживается со всех сторон (отверстие) |
| 2 | Протяженный | 670 | 200 | Длина L = 200 мм, амплитуда эхо-сигнала выше уровня настройки | Обнаруживается с двух сторон |
| 3 | » | 860 | 200 | Длина L = 210 мм, амплитуда эхо-сигнала колеблется от 1/2 до полного уровня настройки | Обнаруживается со всех сторон (расположен на продольном шве № 2) |
| 4 | » | 330 | 590 | Длина L = 230 мм, амплитуда эхо-сигнала выше уровня настройки | Обнаруживается с двух сторон |
| 5 | Непротяженный | 695 | 930 | Амплитуда эхо-сигнала выше уровня настройки | » |

ность измерения толщины образца с покрытием толщиной 0,1...0,3 мм составила $\pm 0,5$ мм;

2) ЭМАП, возбуждающие и принимающие волны Лэмба (моды S_0 и S_1) целесообразно использовать для обнаружения дефектов в листовых конструкциях и сварных соединениях; с высокой достоверностью (0,99) выявлялись искусственные дефекты (отражатели), эквивалентные по отражательной способности щели длиной 20 мм, шириной 0,5 мм и глубиной 0,4 мм, а также непровары в сварных соединениях толщиной 8 мм на глубине 3...5 мм; эксперименты проводили на частоте 1,25 и 2,50 МГц; показано, что в данном случае в качестве рабочей целесообразно использовать частоту 1,25 МГц.

3) ЭМАП, возбуждающие и принимающие горизонтально-поляризованные и поперечные волны (SH) целесообразно использовать при контроле изделий (в частности, труб и сварных соединений) с грубой поверхностью, а также при наличии остатков изоляции, инородных наслоений и элементов эксплуатируемых в космосе изделий, расположенных под обшивкой; надежно выявлялись естественные дефекты окружной формы, протяженные и непротяженные дефекты различной ориентации (см. таблицу) — достоверность контроля составляла 97 %; определены оптимальные параметры контроля: частота 1 МГц, угол ввода 75°, фокусное расстояние 230 мм.

Отметим, что основным преимуществом ЭМАП для работы в условиях космоса является возмож-

ность контроля в широком диапазоне температур ($-150\dots+170^\circ$) без использования конкретных сред и возбуждения волн различных типов, в частности, SH-поляризации (этот волна не может быть возбуждена обычным УЗ датчиком). Основное достоинство SH-волн состоит в том, что они могут быть использованы для контроля листовых конструкций и сварных соединений, находящихся под обшивкой.

Следует отметить, что с помощью ЭМАП можно реализовать, помимо большинства возможностей токовихревого контроля, следующее: контроль толщины в большом диапазоне — от 1 до 50 мм; контроль листовых сварных конструкций с большей производительностью, используя волноводное распространение, т. е. контролировать большие площади, не сканируя поверхности преобразователем, а зафиксировав его в доступном месте; автоматизацию процесса контроля с отображением информации в трех измерениях (получить А-, В-, С-, Д-сканы); контроль листовых конструкций под обшивкой, используя SH-волны.

1. Aliouane S., Hassam M. Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) Design Evaluation of their Performances // 15th World Conf. on Non-Destructive Testing, Roma, 15–21 Oct. 2000. — P 1–8.
2. Dobbs R. E. Electromagnetic generation of ultrasound // Research Techniques in Nondestructive Testing. — London; New York: Academic Press, 1973. — Vol. 2. — P. 419–441.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
22.04.2002

Дополнение к статье Колбина И. Б., Горбенко В. Н., Топчия М. М. «О необходимости внесения изменений в документы, устанавливающие порядок проведения ультразвукового контроля» (Техн. диагн. и неразруш. контроль, № 2, 2002).

В п. 2.8 даны определения основных параметров контроля (всего 10 наименований). Среди них мертвая зона и разрешающая способность по дальности и(или) фронту. Ни в одном из образцов, рекомендованных в работе [4], нет отражателей, которые позволили бы определить разрешающую способность по фронту. Что же касается лучевой разрешающей способности, измеряемой для наклонных преобразователей, то, согласно рекомендациям из работы [10], при пересчете расстояний для оргстекла, взятых из разности размеров коаксиальных цилиндрических отражателей образца СО-1 в расстоянии для низкоуглеродистых сталей, последние составляют 7,2 и 21,6 мм.

Следует отметить, что современная аппаратура позволяет довести значения лучевой разрешающей способности до 1...3 мм (в случае использования преобразователей с частотой 2,5 МГц и более). Мертвая зона современных приборов как правило меньше 3 мм (а в [4] предусматривается для ее определения только два цилиндрических отражателя — на глубине 3 и 8 мм).

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

В. А. СТОРОЖЕНКО, С. И. МЕЛЬНИК, А. Г. ЧУМАКОВ

Рассмотрена теплофизическая модель двухслойного теплозащитного покрытия с дефектами различных типов. Проведен сравнительный анализ схем проведения контроля. Решена задача оптимизации решения тепловой дефектоскопии покрытий. Предложены практические рекомендации по организации тепловизионного контроля теплозащитных покрытий.

The paper presents a thermophysical model of a two-layer thermal barrier coating with defects of various types. Comparative analysis of various schematics of control is given. The problem of optimization of the solution of thermal defectoscopy of coatings is solved. Practical recommendations are given on organizing thermovision control of thermal barrier coatings.

Постановка задачи. Известно, что для дефектоскопии теплозащитных покрытий наиболее приемлемым является тепловой метод контроля, сущность которого в полной мере согласуется с назначением, структурой и используемыми материалами объектов этого класса [1].

Теплозащитное покрытие (на примере конкретного изделия с покрытием АБН) как объект тепловой дефектоскопии (ТДС) представляет собой двухслойную пластину (рис. 1), параметры которой приведены в табл. 1.

Для покрытия АБН характерны следующие типы дефектов (рис. 1): 1 — воздушные пузырьки и инородные включения в слое металла A; 2 — то же в слое нетеплопроводящего покрытия B; 3 — воздушные расслоения и инородные включения на границе слоев.

Наличие разнородных дефектов с возможной дислокацией почти по всей толщине пластины существенно осложняет задачу оптимизации режима ТДС, поскольку для разных дефектов оптимальные значения параметров режима (максимальный температурный перепад ΔT_{\max} , время нагрева τ_h , время регистрации τ_{per}) могут оказаться разными [2]. Кроме того, теплофизическая модель объекта с дефектами, на основе анализа которой и производится оптимизация, должна быть максимально приближенной к реальному изделию, что в случае многовариантности дефектов обеспечить сложно. Например, известная подобная модель [1] ориен-

тирована не на обнаружение локальных дефектов, а на определение аномалий термического сопротивления теплозащитного слоя. Таким образом, задачей настоящих исследований являлось:

построение теплофизической модели АБН для трех типов дефектов;

анализ модели с целью получения зависимостей величины ожидаемого сигнала (температурного перепада ΔT) от параметров дефекта для каждого типа и определения оптимального режима и схемы проведения ТДС;

определение параметров порогового дефекта каждого типа;

выработка практических рекомендаций по проведению ТДС.

Теплофизическая модель теплозащитного покрытия. Схематическая теплофизическая модель изделия АБН представлена на рис. 1. В ней учтены:

теплообмен с окружающей средой на обеих внешних поверхностях и боковой поверхности (коэффициент теплоотдачи α определен, по данным [3], как $\alpha \approx 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; температура окружающей среды принята $T_0 = 20^\circ\text{C}$);

возможность проведения ТДС по различным схемам (одно- и двусторонний контроль);

ограниченность времени теплового воздействия τ_h .

Математическое описание теплофизической модели базируется на решении двумерного уравнения теплопроводности Фурье в цилиндрической системе координат

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = cp \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

и следующих граничных условиях:

$$T(\vec{r}, H) = 0, \quad \left(\alpha T - \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)_y = 0 = q(\vec{r}_{\text{нов}}, \tau). \quad (2)$$

Таблица 1. Параметры теплозащитного покрытия

| Обозначение слоя | $a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ | $\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ | $h_c, \text{ мм}$ |
|------------------|--------------------------------------|---|-------------------|
| A (сталь) | 80 | 42,0 | 2,0 |
| B (покрытие АБН) | 2 | 3,2 | 8,0 |

Примечание: a — температуропроводность; λ — теплопроводность; h_c — толщина слоя.

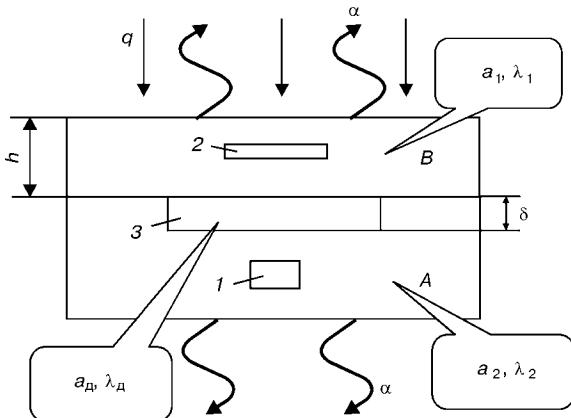


Рис. 1. Теплофизическкая модель покрытия АБН (обозначения см. в тексте)



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Таблица 2. Параметры порогового дефекта типа инородного включения

| Тип дефекта | $a \cdot 10^6$, м ² /с | λ , Вт/(м·К) | h , мм | δ , мм | R_d , мм |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------|---------------|------------|
| Воздушное включение в покрытии | 25 | 0,03 | 0,5 | 0,02 | 0,03 |
| | | | 1,0 | | |
| | | | 1,5 | | |
| Воздушное расслоение | 2,0 | 0,02 | 0,03 | | |
| | | | 0,04 | | |
| | | | 0,04 | | |
| Воздушное включение в подложке | 5,3 | 0,02 | 0,03 | | |
| | | | 7,3 | | |
| | | | 9,3 | | |

Решение уравнения осуществляется методом конечных разностей (сеточным методом), основанном на замене дифференциального уравнения теплопроводности конечно-разностным уравнением для значений температуры в узловых точках сетки.

Используется неявная схема счета, обладающая абсолютной устойчивостью и реализованная в виде оригинальной компьютерной программы «OPTIM». Рассчитанное с ее помощью температурное поле изделия с различными дефектами представлено на рис. 2. Кроме собственно решения прямой задачи нестационарной теплопроводности программа решает и задачу оптимизации режима ТДС, т. е. определения оптимальных значений (τ_u , τ_{per})_{opt} и соответствующей этому режиму величины сигнала от порогового дефекта ΔT_{max} .

Оптимизация проводится при условии ограничения максимальной температуры нагрева поверхности объекта T_{dop} . Для изделия с покрытием АБН, имеющего высокий уровень допустимых температур, принято $T_{dop} = 100$ °С. Выбранные для проведения расчетов численные значения характерных для покрытия АБН дефектов приведены в табл. 2.

При оптимизации режима контроля сопоставлялись следующие схемы проведения ТДС [4]:

A-A — нагрев и регистрация температуры со стороны металла (рис. 3, *a*);

B-B — нагрев и регистрация температуры со стороны покрытия (рис. 3, *b*);

A-B — нагрев металла, регистрация температуры на поверхности покрытия (рис. 3, *c*);

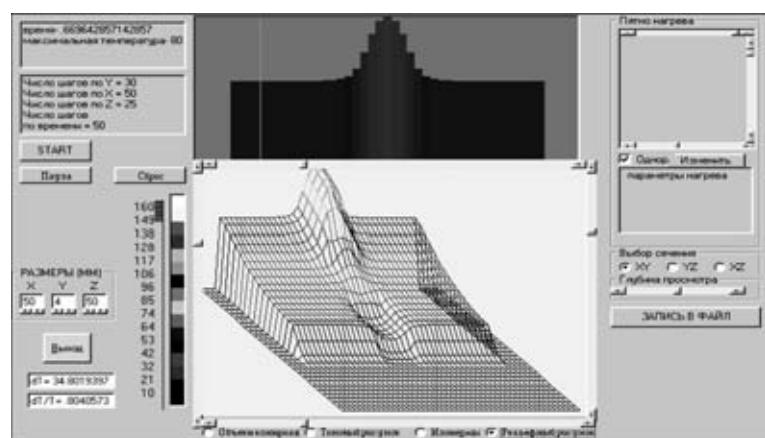


Рис. 2. Термограмма теплозащитных покрытий с дефектами

Таблица 3. Параметры режима контроля при ограничении температуры нагрева для теплозащитного покрытия с дефектами различного типа

| Размер дефекта | Оптимальная схема | Нагрев | | Регистрация | | |
|----------------------|-------------------|--------------|-------------------------------|--------------|----------------|--------------|
| | | τ_u , с | q_u , кВт/(м ²) | τ_u , с | ΔT , К | $\Delta T/T$ |
| <i>Дефект типа 1</i> | | | | | | |
| h_1 | <i>A-A</i> | 2,50 | 2534 | 2,60 | 138,3 | 1,64 |
| h_2 | | 2,85 | 2338 | 3,30 | 39,3 | 0,54 |
| h_3 | | 3,30 | 2129 | 4,10 | 12,87 | 0,18 |
| <i>Дефект типа 2</i> | | | | | | |
| h_1 | <i>B-B</i> | 46,5 | 36 | 49,0 | 1,74 | 0,024 |
| h_2 | | 40,0 | 37 | 41,0 | 3,36 | 0,041 |
| h_3 | | 10,5 | 59 | 11,0 | 8,27 | 0,100 |
| <i>Дефект типа 3</i> | | | | | | |
| δ_1 | <i>A-A</i> | 4,6 | 1696 | 5,8 | 3,68 | 0,049 |
| δ_2 | | 4,2 | 1809 | 5,2 | 5,51 | 0,074 |
| δ_3 | | 4,0 | 1871 | 5,0 | 7,64 | 0,104 |

B-A — нагрев покрытия, регистрация температуры на поверхности металла (рис. 3, *a*).

Анализ теплофизической модели. В результате решения прямой задачи нестационарной теплопроводности по упомянутой программе «OPTIM» сравнение четырех схем проведения ТДС для каждого из трех типов дефектов позволило найти оптимальные значения параметров режима контроля при ограничении температуры нагрева (уровнем 100 °С) и оптимальные схемы проведения ТДС. При этом определены ожидаемые уровни сигнала от дефектов (ΔT и $\Delta T/T$) с различными параметрами. Результаты анализа приведены в табл. 3.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Оптимальной схемой проведения ТДС для дефектов типа 1, 2 является схема односторонней ТДС, при которой контроль осуществляется с нагреваемой поверхности. При этом контроль должен выполняться со стороны того слоя, в котором находится дефект (соответственно схемы *A-A* и *B-B* для дефектов типов 1 и 2).

2. Оптимальной схемой проведения ТДС для дефектов типа 3 является схема односторонней ТДС, при которой контроль осуществляется с нагреваемой поверхности со стороны металла (*A-A*).

3. Полученные в оптимальных режимах перепады температур достаточны для выявления всех рассмотренных дефектов.

4. Использование чувствительных тепловизионных камер с разрешением по температуре не хуже 0,2 К позволит уменьшить геометрические параметры пороговых дефектов (до тех значений, при которых максимальный температурный перепад от дефекта превысит разрешение тепловизора ΔT_{tepl}).

Однако реализовать на практике рассчитанный оптимальный режим ТДС крайне сложно. Это связано с тем, что большинство источников нагрева имеют плотность мощности теплового нагрева не выше 10^5 Вт/м², что на 1...2 порядка ниже рассчитанных оптимальных уров-

Таблица 4. Параметры режима контроля при ограничении плотности тепловой мощности нагрева для теплозащитного покрытия с дефектами различного типа

| Размер дефекта | Оптимальная схема | Нагрев | | Регистрация | | |
|----------------------|-------------------|--------------|---------------|------------------|----------------|--------------|
| | | τ_n , с | T_{max} , К | τ_{per} , с | ΔT , К | $\Delta T/T$ |
| <i>Дефект типа 1</i> | | | | | | |
| h_1 | $A-A$ | 9,9 | 10,7 | 10,0 | 8,40 | 0,787 |
| h_2 | | 99,0 | 87,0 | 100,0 | 3,90 | 0,036 |
| h_3 | | 60,0 | 45,5 | 62,5 | 1,66 | 0,042 |
| <i>Дефект типа 2</i> | | | | | | |
| h_1 | $B-B$ | 90,0 | 249,5 | 92,0 | 6,37 | 0,025 |
| h_2 | | 90,0 | 249,5 | 92,0 | 11,4 | 0,045 |
| h_3 | | 86,0 | 247,5 | 88,0 | 20,28 | 0,082 |
| <i>Дефект типа 3</i> | | | | | | |
| δ_1 | $A-A$ | 112,0 | 261,6 | 115,5 | 5,14 | 0,020 |
| δ_2 | | 206,5 | 330,5 | 210,0 | 5,58 | 0,017 |
| δ_3 | | 346,5 | 440,4 | 350,0 | 5,95 | 0,013 |

ней мощности теплового нагрева для указанных дефектов (табл. 3). Поэтому алгоритм оптимизации был изменен: вместо ограничения температуры нагрева было введено ограничение плотности мощности теплового нагрева q на уровне $10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Результаты этой оптимизации приведены в табл. 4.

Сравнительный анализ данных табл. 3 и 4 приводит к следующим выводам.

1. Оптимальная схема ТДС остается та же для дефектов типа 1 ($A-A$) и 2 ($B-B$), но изменяется для дефектов типа 3 ($B-B$).

2. При этом для дефектов типа 1 перепад температур ΔT существенно уменьшается (за счет уменьшения величины q), однако остается все еще достаточным для надежного выявления дефектов.

3. Для дефектов типа 2 и 3 перепад температур ΔT увеличивается в 2...3 раза в первую очередь за счет увеличения плотности мощности теплового нагрева q и снятия ограничения на величину T_{max} , что вполне допустимо для рассматриваемых покрытий.

4. Так как температура деструкции материала покрытия достигается лишь при трудно реализуемых мощностях, а режим оптимизации с ограничением плотности тепловой мощности обеспечивает выявляемость дефектов, то для практической реализации можно рекомендовать результаты оптимизации при наличии ограничения не на температуру, а на максимальную плотность мощности теплового нагрева.

5. При этом, как показывает анализ, в большом интервале плотности мощности теплового нагрева q временные параметры оптимального режима практически не изменяются, а температурный перепад ΔT и максимальная температура нагрева меняются пропорционально величине q .

Выводы и практические рекомендации. В результате теоретического анализа объекта контроля установлено, что максимальная выявляемость каждого из трех типов дефектов, характерных для покрытия АБН, обеспечивается соответствующим режимом контроля. При этом в качестве не зависящего от типа дефекта параметра режима контроля принята плотность мощности теплового нагрева $q = 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

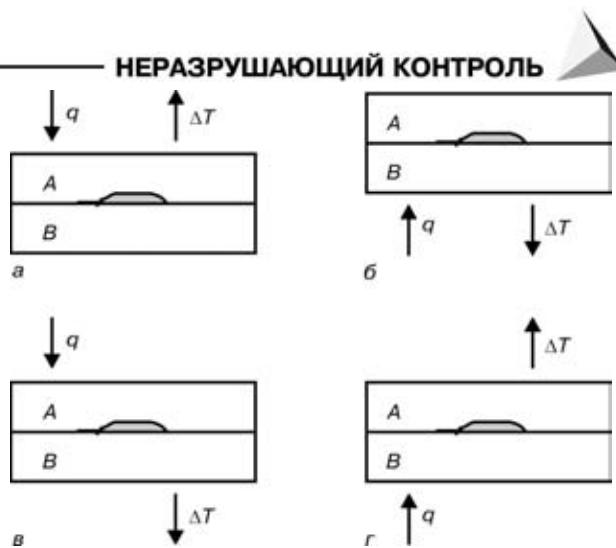


Рис. 3. Схема проведения ТДС (обозначения см. в тексте)

От типа дефекта зависит схема проведения ТДС:

для дефектов типа 2 и 3, представляющих собой соответственно воздушные или инородные включения в слое АБН или отслоения покрытия от подложки, — $B-B$, т. е. нагрев и регистрация со стороны покрытия АБН;

для дефектов типа 1 — $B-A$, т. е. нагрев со стороны покрытия АБН, а регистрация со стороны металла.

От параметров предполагаемого дефекта (глубины залегания h и раскрытия δ) зависят временные характеристики ТДС — время нагрева τ_n и регистраций τ_{per} . Таким образом, для обеспечения максимальной выявляемости каждого дефекта изделие необходимо контролировать многократно при различных τ_n и τ_{per} , что с практической точки зрения ненецелесообразно.

Обычно для получения высокой производительности ТДС изделие контролируют один раз [3] в некотором «усредненно-оптимальном» режиме. Однако для покрытия АБН однократный контроль не приемлем, поскольку схема проведения ТДС для разных типов дефекта разная ($B-A$ для типа 1 и $B-B$ для типа 2, 3). Поэтому для практики можно рекомендовать двукратный контроль покрытия АБН: по схемам $B-A$ (выявление дефектов типа 1) и $B-B$ (выявление дефектов типов 2, 3).

В качестве «усредненно-оптимального» временного режима контроля по схеме $B-A$ можно рекомендовать временные параметры, являющиеся оптимальными для дефекта с наихудшей выявляемостью (с максимальной глубиной залегания h): время нагрева $\tau_n = 60$ с и регистрации $\tau_{per} = 62,5$ с, т. е. через 2,5 с после окончания нагрева. В качестве такого же режима по схеме $B-B$ предлагается время нагрева $\tau_n = 112$ с и регистрации $\tau_{per} = 115,5$ с (через 3,5 с после окончания нагрева).

Для оценки производительности ТДС по предложенной методике могут быть использованы следующие критерии:

суммарное время контроля одного «кадра» $\tau_k = \tau_{per}$ и производительность контроля $P = S/\tau_{per}$, где S — площадь кадра (ориентировочно $20 \times 15 \text{ см}^2$).

Более строгий подход к выбору площади кадра основывается на следующих соображениях.



1. Для исключения пропуска порогового дефекта (поперечный размер l_{\min}) необходимо условие [5]

$$n = \frac{l_{\min}}{\Delta l} >> 1,$$

где Δl — линейный размер пикселя тепловизора; обычно $n = 5 \dots 10$.

2. Из этого неравенства определяется размер кадра тепловизора (регулируется расстоянием до объекта)

$$L_{x,y} = N_{x,y} \Delta l = N_{x,y} l_{\min}/n,$$

где $N_{x,y}$ — число пикселей в кадре тепловизора (соответственно по осям x и y).

3. Отсюда находится площадь кадра тепловизора

$$S = L_x L_y,$$

по которой и рассчитывается производительность ТДС.

Существенное ограничение на размеры кадра накладывается размерами поля нагрева, определя-

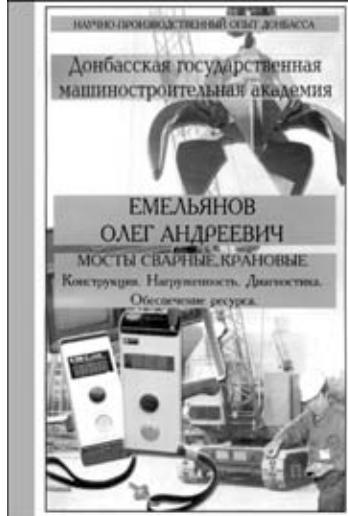
емые параметрами площадочного нагревателя. Главным условием является неравномерность нагрева, которая для выявления дефектов с пределом температур $\Delta T \geq 0,5$ °C не должна превышать 1 % в пределах кадра при обеспечении ограничения $q \geq 10^3$ Вт/м². Для этого применяют специальные конструктивные решения [3]. Обычно для исключения «краевого эффекта» площадь поля нагрева S выбирают значительно больше размеров кадра.

1. Стороженко В. А., Мельник С. И. Контроль качества теплозащитных пленочных покрытий активным тепловым методом // Тез. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Оптические, радиоволновые и тепловые методы неразрушающего контроля», Могилев, 1989. — Ч. 2. — С. 81–83.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1976. — Кн. 1. — 391 с.
3. Стороженко В. А., Вавилов В. П., Волчек А. Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. — Киев: Техника, 1988. — 127 с.
4. ГОСТ 23483–79. Неразрушающий контроль. Методы теплового вида. Общие требования. — М., 1979.
5. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля. Справочник. — М.: Машиностроение, 1991. — 240 с.

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники,
ФГУГ «ММПП», Москва

Поступила в редакцию
04.06.2002

НОВАЯ КНИГА



О. А. Емельянов. Мосты сварные, крановые. Конструкция. Нагруженность. Диагностика. — Краматорск: Донбас. гос. машиностр. академия, 2002. — 332 с.

Рассмотрены повреждения, возникающие при эксплуатации сварных крановых мостов. Показано, что причина их — не низкая прочность сварных соединений, а снижение требований к точности изготовления, недостаточные сведения об условиях эксплуатации и нагруженности, рациональности конструкции сварных узлов моста и его схемно-компонентного решения. Показано влияние различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, а также двухчастотных нагрузок и вторичных напряжений на техническое состояние сварных мостов.

В книге изложены следующие основные вопросы: итоги применения и недостатки сварных крановых мостов, а также пути совершенствования их конструкций; результаты теоретических и экспериментальных исследований силового взаимодействия колеса крана с рельсом и влияние его на процесс формирования горизонтальных и вертикальных реакций; физическая модель продольного и поперечного скольжения при качении колес по рельсу; причины и механизм образования «перекосной» силы при движении крана; энергетические аспекты силового взаимодействия кранов с путями и эстакадами и процессы накопления усталостных повреждений; пути снижения реактивных нагрузок на краны и эстакады и анализ «ходовых качеств» кранов в зависимости от конструктивного исполнения (шарнирных соединений в мосту, крутильной жесткости главных и концевых балок, мест установки приводных и не приводных ходовых колес) и многое другое.

Монография предназначена для специалистов, занимающихся исследованием, проектированием, диагностикой, эксплуатацией и ремонтом грузоподъемных кранов, а также студентов старших курсов вузов по специальности ПТМ.

По вопросу приобретения книги обращайтесь по адресу:
84313, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72, Емельянов О. А.
тел. (0026) 41 75 73; 41 71 40



УДК 620. 179.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЯЕМОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛООБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ

В. П. СЕБКО, Г. М. СУЧКОВ

Выполнены модельные исследования выявляемости дефектов поверхности типа протяженных пропилов и сквозных отверстий, а также реальных дефектов металлов. Установлено, что вихретоковый (ВТ) контроль наиболее целесообразно использовать для выявления и оценки глубины трещины производственного и эксплуатационного происхождения. Обнаруживаются надежно локальные дефекты типа каверн и другие участки с уменьшенной толщиной металла. Практически абсолютно определяются дефекты типа плен и закатов, но для оценки степени их опасности необходимо соединять ВТ контроль с операциями зачистки. Наиболее эффективен ВТ контроль для обнаружения дефектов под слоем краски и других покрытий.

Model investigations have been performed of the detectability of surface defects of the type of extended saw cuts and through-thickness holes, as well as actual defects of metals. It is established that eddy current (EC) control is the most suitable to detect and evaluate the depth of the crack of a production or service origin. Defects of the type of cavities and other areas of a reduced metal thickness are reliably detected. Defects of the type of films and rolls are detected practically 100 %, but to evaluate the degree of their criticality it is necessary to combine EC control with the cleaning operations. The most effective is EC control to detect defects under a layer of paint or other coatings.

Одним из наиболее распространенных методов контроля качества изделий является ультразвуковой (УЗ) [1]. С точки зрения потенциальных возможностей он позволяет обнаруживать как поверхностные, так и внутренние дефекты. Максимальная выявляемость для этого метода имеет место при ориентации наибольшей поверхности развития дефекта нормально направлению распространения УЗ пучка, другие дефекты обнаруживаются плохо или не обнаруживаются совсем. Серьезные проблемы возникают при выявлении дефектов типа плен, тонких закатов и других (например, на внутренней и внешней поверхности трубы). Часто волнистость поверхности отечественных новых, а также использовавшихся труб вообще не дает возможности проводить их дефектоскопию из-за акустических помех, обусловленных допустимыми неровностями и нарушениями акустического контакта между преобразователем и телом трубы. Низкие и высокие температуры также не позволяют проводить качественный УЗ контроль. Нужна дорогочная очистка поверхности металла от жировых пятен, грязи, остатков краски и других покрытий, окалины и т. п.

Устранить в значительной мере отмеченные выше недостатки позволяет использование вихретоковых (ВТ) методов контроля. Суть их заключается в воздействии на поверхность металла электромагнитным полем, измерении параметров этого поля и оценке по их значениям качества изделия [2]. Возбуждение и измерение параметров электромагнитного поля выполняют вихретоковыми преобразователями (ВТП), которые могут работать через воздушный зазор, достигающий иногда 20 мм [3].

Известные ВТП, применяемые для контроля качества поверхности, можно разделить на два основных типа: динамические и накладные (вращающиеся). Первый обычно применяют для контроля плоских поверхностей или имеющих в сечении форму круга [4]. Второй используют для контроля

криволинейных участков поверхностей (на рельсах, трубах и др.). На результаты оценки качества труб известными накладными преобразователями существенным образом влияют неоднородности электропроводности и ферромагнитных свойств, наличие пятен окалины [5]. Правда, этот недостаток становится преимуществом при измерении физико-механических характеристик металла.

Некоторые специалисты считают, что среди ВТП динамические (ВТПД) имеют лучшую выявляемость поверхностных дефектов в сравнении с накладными (ВТПН). В то же время дефектоскопы с ВТПД сложны по конструкции и аппаратному исполнению, имеют значительные габариты и массу. Их стоимость иногда превосходит стоимость ВТПН в десятки раз.

На результаты работы ВТПН оказывают влияние неоднородность электромагнитных свойств поверхности металла, а также колебания технологического зазора между преобразователем и изделием, степень износа протектора, перекосы преобразователя и т. д. Тем не менее из-за простоты реализации и практического использования, небольшой массы и габаритов накладные преобразователи нашли широкое применение в разных областях промышленности [2–3]. В настоящее время появились новые вихретоковые дефектоскопы с ВТПН, способные компенсировать влияние на результаты контроля колебаний величины технологического зазора, перекосов, неоднородностей электромагнитных свойств металла. Найдены технические решения по устранению краевого эффекта. По чувствительности новые ВТПН не хуже ВТПД. Так, нами разработаны ВТПН для контроля роликов и колец подшипников подвижного состава железнодорожного транспорта, которые надежно выявляют поверхностные дефекты глубиной более 0,05 мм, длиной более 2 мм и раскрытием 0,01 и даже менее (частота ВТПН – 3...5 МГц).

Наиболее часто встречающимся и очень ответственным объектом контроля являются трубы. По-

© В. П. Себко, Г. М. Сучков, 2002

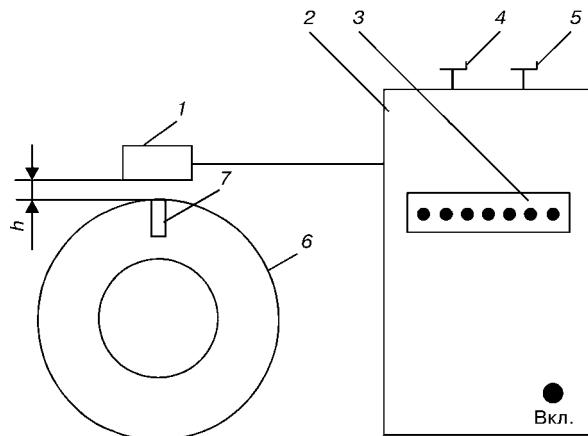


Рис. 1. Схема контроля моделей дефектов типа пропил в теле трубы: 1 – ВТПН; 2 – дефектоскоп; 3 – индикатор глубины дефекта; 4 – регулятор «порог»; 5 – регулятор «масштаб»; 6 – труба; 7 – продольный пропил в теле трубы

этому исследование границ применимости ВТПН выполнено нами на образцах, отобранных из труб диаметром от 17 мм и более производства ЗАО «НИКО ТЫОБ», завода им. Ленина, а также листа производства ОАО «МК Азовсталь» и чугунных валков производства ОАО «Лутугинское объединение по производству прокатных валков». Трубы с толщиной стенок от 1 до 20 мм были изготовлены из обычных и легированных сталей, алюминия, меди. Кроме того, использовались образцы прутков диаметром более 20 мм из бронзы и латуни. Исследована внешняя и внутренняя поверхности труб (специальной подготовке эти поверхности не подвергали). Таким образом, состояние поверхности образцов отвечало поставочному. На поверхности образцов были естественные дефекты разных типов, а также изготовленные искусственным образом в виде пазов и отверстий с разными размерами и разной ориентацией. Все измерения выполняли с помощью малогабаритных микропроцессорных дефектоскопов «Малыш», ВД-12НФМ, -87НД, -26Н и «Дюймовочка» с накладными ВТПН.

Наиболее значительное влияние на эксплуатационные характеристики изделий имеют дефекты типа трещин, которые находятся в зоне действия циклических погрузок. Поэтому на начальной стадии была исследована выявляемость традиционно устанавливаемых стандартами [6] искусственных дефектов в виде пропилов с заданным раскрытием, глубиной и длиной. В работе [6] установлена ориентация пропилов вдоль образующей тру-

бы (рис. 1). Такое положение обусловлено ограничениями УЗ метода контроля.

Результаты исследований выявляемости с помощью ВТ дефектоскопа «Малыш» пропилов разной глубины на образцах с разным состоянием поверхности приведены на рис. 2. Чувствительная рабочая зона ВТПН составляла $2 \times 3 \text{ мм}^2$, частота тока преобразователя выбрана равной 250 кГц. На поверхности образцов наносили пропил с минимальной глубиной 0,1 мм, раскрытием 0,2 мм и длиной около 30 мм. Перемещая ВТПН вдоль и поперек дефекта, находили максимальное значение амплитуды информационного сигнала. Затем пропил углубляли и повторяли измерения. Из приведенных результатов видно, что выявляемость поверхностных дефектов начинает от глубины 0,1 мм (по обработанной поверхности) и 0,2 мм (по катаной поверхности) вполне достаточна для оценки качества значительного сортамента изделий. Аналогичные исследования выполнены для алюминия и его сплавов, меди, латуни, бронзы, чугуна, нержавеющей стали нескольких марок и др. На всех перечисленных материалах минимально возможная выявляемость дефектов в виде пропилов составляла 0,1...0,2 мм. Во всех случаях в зависимости от глубины пропилов дефекты различались по амплитуде полезных сигналов только до глубины 3,0 мм – дефекты с большей глубиной давали одинаковый по амплитуде сигнал. Аналогичные результаты получены для моделей дефектов в виде пропилов, произвольно ориентированных относительно образующей трубы и прутков.

Другой часто встречающейся моделью искусственного дефекта для настройки ВТ дефектоскопа является сквозное отверстие заданного диаметра в теле трубы, выполненное перпендикулярно поверхности. Результаты выявляемости дефектов такого типа приведены на рис. 3. Измерения выполнены ВТПН с рабочей частотой 220 кГц на образце из алюминия. Из приведенных данных следует, что начиная с отверстия диаметром 1 мм модели дефектов такого типа обнаруживаются надежно, при этом амплитуда полученного полезного сигнала возрастает до диаметра 4 мм. Видно, что насыщение сигнала ВТПН не происходит и имеется достаточный запас для определения размера обнаруженного дефекта. Установлено, что на изделиях из алюминия чувствительность к моделям дефектов типа отверстие выше, чем на стальных.

Большое значение для практики имеет факт выявления дефектов в виде каверн коррозионного или эрозионного происхождения, которые, уменьшая толщину стенки трубы, могут привести к ее последующему разрыву и значительным материальным потерям (например, разрушению обсадной трубы в скважине). Промоделировать такие дефекты возможно сверлением на заданную глубину нормально поверхности трубы с заданным диаметром. Результаты исследования таких моделей дефектов дают неоднозначный результат. Наибольшее значение амплитуды полезного сигнала дает дефект небольшой глубины 0,1...0,2 мм, но с большим диаметром. В то же время даже сквозное отверстие диаметром 1,2...1,5 мм дает меньшее значение ам-

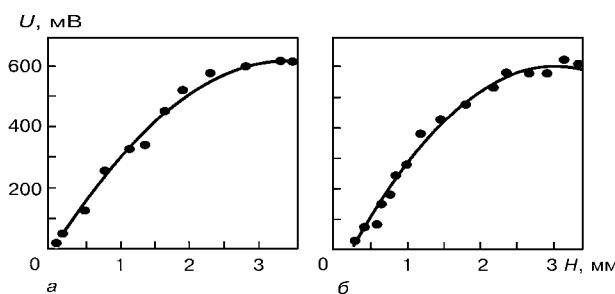


Рис. 2. Зависимость амплитуды выходного напряжения ВТПН от глубины модели дефектов типа пропил на образцах с разным состоянием поверхности



плитуды информационного сигнала. Полученные результаты подтверждаются аналогичными выводами американских коллег [7].

Еще большей неоднозначностью отличается результат выявления дефектов типа плены. Модель дефекта в виде электропроводной неферромагнитной пленки размером $2 \times 2 \text{ мм}^2$ и толщиной 0,15 мм, закрепленной на поверхности металла, дает такой же сигнал, как и пропил глубиной около 2 мм.

Анализ исследований образцов с естественными дефектами позволил установить следующее. Вихреветковые дефектоскопы надежно выявляют дефекты типа трещин разного характера, причем амплитуда информационного сигнала значительно зависит от глубины (развитие трещины под любым углом к поверхности металла) естественного дефекта. Большую амплитуду сигнала при той же глубине дает древовидная (внутрь металла) трещина. Практически абсолютную выявляемость обеспечивают ВТ дефектоскопы в отношении линейно-протяженных, паукоподобных, извилистых, древовидных (по поверхности) трещин и волосовин.

В практическом применении ВТ дефектоскопы пригодны для оценки глубинного параметра трещин. Эффективным будет контроль изделий, узлов, деталей, конструкций и т. п., которые в процессе эксплуатации подвержены влиянию нагрузок разного типа; впервые выпускаемых материалов; изделий, склонных к образованию трещин (через деформацию, закалку, старение и т. п.). ВТ контроль незаменим при обнаружении дефектов поверхности под слоем краски, загрязнений, покрытий.

Дефекты типа каверн, углублений и других локальных утончений на поверхности металла обнаруживаются уверенно с частичной оценкой глубины их развития. В этом случае ВТ контроль эффективен для изделий, находящихся в эксплуатации и подвергаемых коррозионному, эрозионному или другому влиянию, приводящему к появлению локальных объемных дефектов. Абсолютную выявляемость обеспечивают ВТ дефектоскопы при обнаружении поверхностных дефектов семейства плен, закатов и др. Однако эти дефекты не всегда представляют опасность для эксплуатации изделий. Часто при незначительном развитии в глубину металла их удаляют путем зачистки. Поскольку

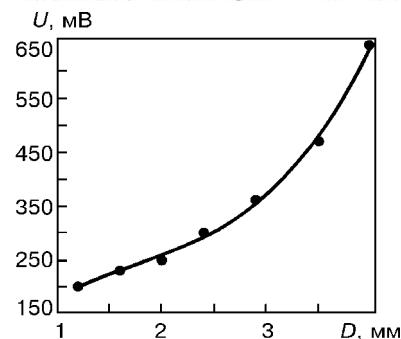


Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного напряжения ВТПН от диаметра модели дефектов типа сквозного отверстия в алюминиевом образце

глубину развития таких дефектов через высокую амплитуду информационного сигнала оценить невозможно, следует соединять ВТ контроль с операциями зачистки. Такой контроль эффективен также при выявлении дефектов на изделиях ответственного назначения (ракетнокосмическая, авиационная, военная техника).

В завершение необходимо отметить, что в отдельности ВТ и УЗ методы контроля не могут обеспечить выявление всего спектра дефектов изделий. Для обеспечения гарантии качества изделий, поставляемых потребителям, целесообразно применять оба метода контроля.

1. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М: Машиностроение, 1981. — 240 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филипов и др.; Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 488 с.
3. Учинин В. Н., Черленевский В. В. Вихреветковый дефектоскоп для обнаружения поверхностных трещин // Физические методы и средства контроля сред, материалов и изделий. — 1999. — С. 108–110.
4. Дорофеев А. Л. Электроиндуктивная дефектоскопия. — М.: Машиностроение, 1967. — 232 с.
5. Рюмин В., Глабец С. Вихреветковый дефектоскоп ВД-26Н // Методы и приборы контроля качества. — 1997. — № 1. — С. 96–97.
6. ГОСТ 633-80. Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. — Изд-во стандартов, 1992. — 39 с.
7. О'Коннор М. Что еще не так просто при вихреветковом контроле теплообменных труб // В мире неразруш. контроля. — 2001. — № 4. — С. 46.

Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т»

Поступила в редакцию
20.04.2002



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ

Р. Ж. ТОЖИЕВ, Н. Р. РАХИМОВ, К. Г. МАХМУДОВ, Ш. К. РУЗМАТОВ

Предложен для определения качественных параметров металлических поверхностей оптоэлектронный метод, основанный на измерении светового потока, отраженного от поверхности контролируемого объекта, и его сравнении с аналогичной характеристикой эталона. Рассмотрены два принципиальных схемотехнических решения.

An optoelectronic method is proposed for determination of qualitative parameters of metallic surfaces, which is based on measurement of the light flow reflected from the surface of the controlled object, and its comparison with a similar characteristic of the standard. Two basic system engineering solutions are given.

Контроль качества — это самая массовая технологическая операция в машиностроении, ибо ни одна деталь не может быть изготовлена без измерения ее технических характеристик. В связи с требованием неуклонного повышения надежности новой техники резко увеличивается трудоемкость контрольных операций. Например, в развитых странах затраты на контроль качества составляют в среднем 1,5...3,5 % себестоимости выпускаемой продукции, а в отдельных так называемых научноемких отраслях — до 20 % [1]. Указанные затраты быстро окупаются, так как благодаря НК на всех этапах изготовления и приемки радикально повышается качество продукции, увеличивается ее надежность.

Одним из аспектов применения методов НК является определение качественных параметров металлических поверхностей. К числу таких параметров можно отнести зернистость, шероховатость, дефектность, цветность и т. д. Предлагаемый нами оптоэлектронный метод их исследования представляется, с нашей точки зрения, перспективным благодаря простоте, удобству, технологичности и быстроте выполнения. Нами разработан ряд оптоэлектронных приборов для НК различных веществ и материалов [2, 3].

К методам, применяемым в настоящее время для оценки качества поверхностей, можно отнести интерференционные, теневые, светового сечения, профилографические, растровые муаровые, интегральные рефлексометрические [4]. Они применяются в приборах контроля топографии поверхностей и объемных поверхностных дефектов. Эти приборы можно разбить на три класса:

1) для контроля шероховатостей поверхностей — при этом проводится интегральная оценка поверхностных дефектов;

2) для контроля и измерения поверхностных дефектов и микрорельефа — при этом контролируются отдельные дефекты изделия и измеряется глубина дефектов;

3) для контроля плоскостности в основном полированных поверхностей — этими приборами обнаруживаются такие дефекты, как однородный изгиб, завалы, сложный изгиб (коробление), сколы.

По типу измерения их можно разделить на приборы непосредственного измерения и приборы

© Р. Ж. Тожиев, Н. Р. Рахимов, К. Г. Махмудов, Ш. К. Рузматов, 2002

сравнения. В абсолютном большинстве методов аппаратную основу приборов составляют микроскопы различных конструкций. При этом количественная и качественная оценка замеряемых параметров проводится визуально. К тому же следует отметить, что размеры контролируемой поверхности ограничены техническими возможностями микроскопов и определяются в основном размером свободного хода (до 90 мм) и полем зрения микроскопа (до 8 мм).

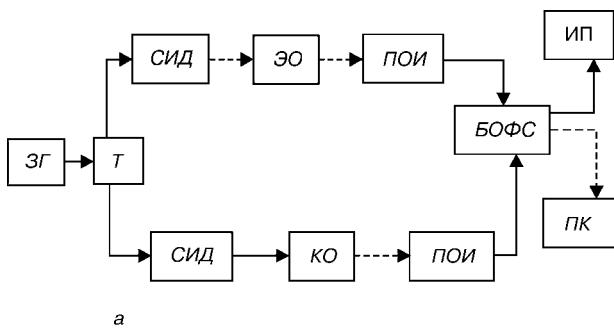
Предлагаемый метод относится к объективным методам спектрально-фотометрического анализа в широком диапазоне волн. При этом возможно использование различных приставок со стандартными спектральными приборами. Данный метод основан на принципе сравнения качественных параметров исследуемого объекта с эталоном, в качестве которого могут применяться образцовые стандартизованные меры шероховатости и дефектности. Теоретические и экспериментальные исследования метода зеркальной составляющей отраженного потока для шероховатой поверхности со случайнym распределением элементов профиля позволяют применить этот метод для определения шероховатости металлических поверхностей с R_z до 0,2 мм [5].

Основной измеряемой оптической характеристикой при использовании данного метода выступает интенсивность светового потока, отраженного от поверхности контролируемого объекта (КО), которая сравнивается с соответствующим параметром эталона. При этом измеряемой электрической характеристикой выступает сила тока или напряжение на приемнике оптического излучения (ПОИ). Они определяются следующим образом [4]:

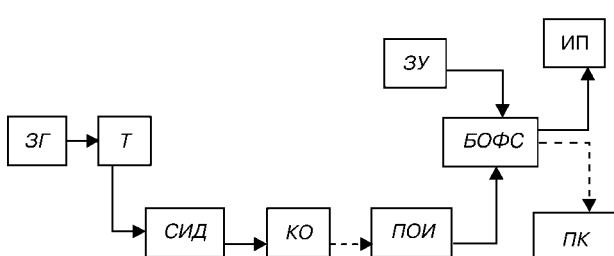
$$U_{\Phi} = S_{VE_e} E_e, \quad I_{\Phi} = S_{IE_V} E_V,$$

где U_{Φ} , I_{Φ} — соответственно напряжение фотосигнала и фототок; S_{VE_e} и S_{IE_V} — соответственно вольтовая чувствительность к облученности и токовая чувствительность к освещенности; E_e и E_V — соответственно облученность и освещенность.

При исследовании цветности определяющей выступает монохроматическая чувствительность ПОИ, а других параметров — интегральная чувствительность.



а



б

Рис. 1. Схемотехнические решения метода НК параметров металлической поверхности на основе оптоэлектронных датчиков: ЗГ — задающий генератор; Т — триггер; СИД — светоизлучающий диод; КО — контролируемый образец; ЭО — эталонный образец; ПОИ — приемник оптического излучения; ЗУ — запоминающее устройство; БОФС — блок обработки фотосигнала; ИП — измерительный прибор; ПК — компьютер

Таким образом, идея данного метода заключается в измерении интенсивности отраженного от КО светового потока светоизлучающего диода (СИД) или потока излучения и сравнении его с эталонными показателями. При этом возможны два принципиальных схемотехнических решения.

Первое — с непосредственным сравнением параметров КО и эталона (рис. 1, а). Как видно, при данном схемотехническом решении происходит одновременное снятие показаний с КО и эталона и сравнение их в блоке обработки фотосигнала (БОФС). Далее обработанный сигнал в виде отношения сигналов (реального и эталонного) поступает либо на измерительный прибор (ИП), который представляет его в удобном для восприятия виде (например, в виде осциллографа), либо в ПК для хранения и дальнейшей обработки.

Принципиальное неудобство данного решения заключается в технологической сложности согласования одновременной работы двух оптоэлектронных пар СИД — ПОИ с двумя объектами. Поэтому данный вариант приемлем для калибровки прибора.

Второе — сравнение измеряемого параметра КО с банком данных запоминающих устройств (ЗУ) (рис. 1, б). При таком схемотехническом решении результирующий сигнал с ПОИ может сопоставляться не с одним сигналом от эталонного образца, а с любым из ряда образцовых, хранящихся в ЗУ. Далее, как и в первом варианте, оба сигнала или их разность подаются на ИП или ПК. Удобство данного решения в том, что работает только одна оптоэлектронная пара СИД — ПОИ, а сопоставление полученного сигнала с рядом эталонных позволяет быстро и с достаточной точностью опреде-

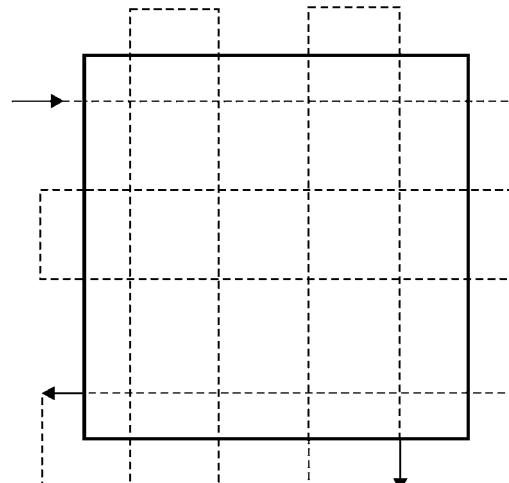
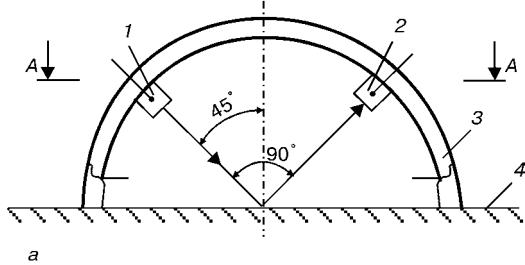
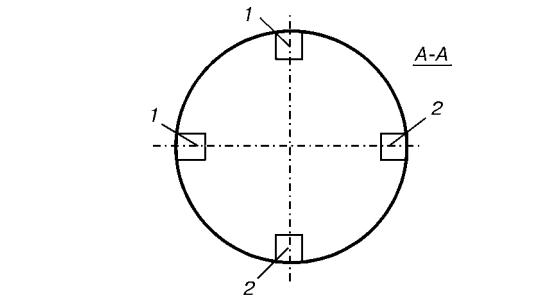


Рис. 2. Блок оптопар (а) и схема его перемещения по контролируемой поверхности (б): 1 — СИД; 2 — ПОИ; 3 — кольцевой кожух; 4 — КО

лить количественные значения параметров и отнести их к тому или иному классу (зернистости, шероховатости и т. п.).

В качестве оптоэлектронной пары для данного метода представляется целесообразным использование отражательных оптронов с открытым каналом. Применение оптронов связано с целым рядом преимуществ: согласованностью элементов по спектральным и электрическим характеристикам, высокими быстродействием ($t_{\text{пер}} \sim 40 \dots 50 \text{ нс}$) и направленностью излучения СИД оптрана, согласованностью по конструктивно-технологическим признакам [4].

Нами предлагается оптоэлектронное устройство для определения дефектности поверхности (рис. 2). Данное устройство может быть реализовано в одном из двух приведенных выше схемотехнических решений. Как видно, в блоке оптопары используется две оптопары с одинаковыми характеристиками (спектральными, энергетическими) по



потоку излучения и электрическими. Они работают в импульсном режиме попеременно. Оси падающего и отраженного световых потоков излучений оптопары расположены под углом 90° относительно друг друга и симметричны относительно нормали к поверхности КО в точке отражения. Кольцевой кожух блока из непористой плотной резины служит для необходимой ориентации оптопар относительно поверхности КО и световой изоляции оптического канала во избежание искажения показаний. Оси оптопар (конструктивные и оптические) перпендикулярны. В данном простейшем исполнении они позволяют получить псевдостереоскопический эффект. Применяя СИД с высокой направленностью излучения и конденсорные линзы, можно добиться уменьшения диаметра луча СИД и, как следствие, повышения разрешающей способности прибора.

Достоинства предложенного метода и данного прибора — простота применения, что позволяет использовать его непосредственно в технологическом цикле; большая площадь охвата, ограниченная лишь в принципе протяженностью линии связи «оптоэлектронный блок — блок аппаратуры»; объективность показаний, т. е. независимость их от оператора; возможность параллельной фиксации показаний в ЗУ для накопления и дальнейшей обработки. В процессе измерения блок оптопар может

перемещаться по поверхности КО в квадратно-пересеченном порядке (см. рис. 2, б) — перемещение блока может осуществляться вручную и по направляющим с помощью регулирующего механизма. Второй способ перемещения подпочтительней, так как он обеспечивает равномерность хода блока и, как следствие, — равномерность снятия показаний. Устройство с двумя оптоэлектронными парами целесообразно использовать при замере стандартизованных параметров поверхностей (зернистость, шероховатость, цветность и т. п.).

1. Клюев В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий / Справочник. — М.: Машиностроение, 1986. — 420 с.
2. Рахимов Н. Р., Касымахунова А. М., Усманов Ш. Оптоэлектронные средства неразрушающего контроля физико-химических параметров жидких сред // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 3. — С. 40–42.
3. Рахимов Н. Р., Тожиев Р. Ж., Холмурзаев А. А. Оптические устройства для определения содержания эмульсионной воды в нефти и нефтепродуктах // Матер. Первой Промышл. междунар. науч.-техн. конф. «Эффективность реализации научного и промышленного потенциала в современных условиях», Киев, 2001. — С. 180.
4. Шарупич Л. С., Тугов Н. М. Оптоэлектроника. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — С. 64–65.
5. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. — Л.: Машиностроение, 1988. — С. 100–162.

Ферганский политехн. ин-т,
Республика Узбекистан

Поступила в редакцию
24.04.2002

СТМ фирма «СЕРВИС ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН»

Производит приборы для контроля, диагностики, наладки и ремонта технологического оборудования



Анализатор спектра вибрации 795М — прибор для измерения и анализа параметров вибрации, балансировки, ремонта и наладки оборудования. Основные технические характеристики прибора ставят его в ряд современных диагностических средств, высокая разрешающая способность позволяет точно выявить любой дефект в полевых условиях, на месте эксплуатации механизма. Возможности выполнения многоплоскостной динамической балансировки в собственных опорах, измерения амплитудо-фазочастотных характеристик на режимах разгона/выбега, контроль подшипников по огибающей и методу ударных импульсов существенно расширяют возможности использования прибора при ремонте и наладке.



Работы по обслуживанию, наладке и ремонту оборудования

по фактическому состоянию.

Балансировка роторов на месте.

Лазерная выверка соосности валов и валопроводов

тел./факс: (0512) 24 31 97; e-mail: stm@aip.mk.ua;
<http://www.stmnik.narod.ru>

Индикатор вибродиагностический 77Д11 — прибор для контроля технического состояния подшипников качения методом ударных импульсов.



УДК 615.47

АКУСТОТЕРМОМЕТРИЯ ЖИДКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОПРИЕМНИКОВ МЕГАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

С. А. НАЙДА

Проведено сравнение характерных параметров методов радио- и акустотермометрии жидких объектов, полученных посредством уже созданных радиотермографов и расчетом вариантов акустотермометра с помощью апробированных в гидроакустике моделей антенн. Эти модели учитывают принципиальные различия между электромагнитными и акустическими антеннами, связанные как с граничными условиями на активных и пассивных частях антенн, так и с векторным характером электромагнитного и скалярным — акустического — полей. Отмечаются принципиальные ошибки в расчетах других авторов, не использующих модели гидроакустики.

Comparison has been made of characteristic parameters of the methods of radio and acoustothermometry of liquid objects obtained using the already developed radiothermographs and calculation of the variants of acoustothermometer using antenna models verified in hydroacoustics. These models account for the fundamental differences between the electromagnetic and acoustic antennas, related to boundary conditions in the active and passive parts of the antennas, and vector nature of the electromagnetic and scalar nature of the acoustic fields. Fundamental errors are noted in calculations of other authors, not using the hydroacoustic models.

Одним из пассивных методов контроля является акусто-эмиссионный, заключающийся в регистрации упругих волн в твердых телах, возникающих в результате локальной динамической перестройки их структуры. При этом применяются пьезопреобразователи из пьезокерамики ЦТС, а при температурах выше 300...400 °C — из ниобата лития, у которого точка Кюри около 1200 °C. Прием спектра частот сигналов выше 1 МГц считается нежелательным. Метод пассивной акустической теплолокации твердых тел (особенно таких, где затухание электромагнитных волн значительно отличается от затухания упругих колебаний, например, в металлах, различных породах), на практическое приложение которого было обращено внимание в статье [1], не используется. Первой попыткой зондирования внутренней температуры жидких объектов (воды) по их собственному тепловому излучению является работа [2], где в качестве приемника теплового излучения использовалась пьезопластина из ниобата лития с согласующим слоем. Оказалось, что точность измерения температуры значительно меньше ожидавшейся в результате применения нулевого модуляционного метода измерения. Интенсивность теплового акустического излучения твердых тел при одинаковых условиях должна быть, по оценке [2], не ниже, чем жидкостей, и легко может регистрироваться пьезоприемниками (ПП) из ниобата лития. Поэтому методы акустотермометрии могут оказаться полезными и для технической диагностики и НК, при этом частотный диапазон метода акустической эмиссии выше 1 МГц. Нулевой модуляционный метод, избавляющий от наводок, может быть использован в готовом виде. В настоящей работе проблемы акустометрии анализируются на примере жидких объектов (воды, биологической ткани), однако их решение будет полезно и для акустометрии твердых тел.

Современным направлением в ранней медицинской диагностике является пассивное функциональное изображение человеческого тела в тепловом излучении в различных диапазонах частот [3]. Наибольшую интенсивность имеет инфракрасное излу-

чение в интервале длин волн 3...14 мкм, где она доходит до 10^{-2} Вт/см², т. е. больше, чем 100 Вт со всей поверхности тела. Это излучение несет информацию о поверхностной температуре тела.

Значительно слабее радиотепловое излучение, интенсивность которого на дециметровых волнах в полосе частот сотни мегагерц составляет порядка 10^{-12} Вт/см². Характерная глубина его проникновения в биологические ткани — несколько сантиметров. Интенсивность акустического теплового излучения в полосе частот 100 кГц вблизи частоты 1 МГц равна 10^{-13} Вт/см², а глубина проникновения достигает до 10 см.

Радиояркостная температура является интегральной характеристикой, которая зависит не только от абсолютной температуры тела, но также и от распределения диэлектрических постоянных тканей, т. е. их эмиссионной способности. Поэтому для получения информации об абсолютной температуре тела и ее распределении по глубине радиотепловое излучение должно измеряться на нескольких длинах волн с различной глубиной поглощения. Длина радиоволн в теле человека в $\sqrt{\epsilon} \leq 7$ раз меньше, чем в воздухе, и составляет несколько сантиметров. Длина акустической волны в мегагерцевом диапазоне частот составляет порядка 1 мм, что позволяет получить на порядок лучшее пространственное разрешение, чем с радиотепловым излучением.

Спектры радиочастотного и акустического излучений и пороговая точность измерения температуры. Причиной как радиочастотного, так и акустического излучения тела человека является тепловое хаотическое движение его атомов и молекул. Выражения для среднего квадрата напряженности электрического поля электромагнитной волны E^2 и квадрата акустического давления p^2 можно получить непосредственно из закона излучения безграничной среды Рэлея–Джинса, являющегося частным случаем закона Планка излучения абсолютно черного тела при $hf \ll kT$ (h — постоянная Планка):

$$\varepsilon(f, T) = dI/df = (2\pi f^2/v^2)kT,$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; ε — спектральная плотность; I —



интенсивность излучения; v — скорость соответствующих волн в среде; f — частота.

После подстановки выражений для I получаем

$$E^2 = (4\pi f^2/c^3)kT\Delta f, \quad (1)$$

$$p^2 = (4\pi f^2/v_a)\rho kT\Delta f, \quad (2)$$

где c , v_a — скорость соответственно электромагнитных и акустических волн; ρ — плотность среды; $\Delta f \ll f$ — полоса частот, выделенная антенной или усилителем высокой частоты (УВЧ) из спектра шума.

Соотношения (1) и (2) используют для измерения температуры. Однако точность измерения θ/T на выходе квадратичного детектора, как известно, невысока и для «белого» шума будет

$$\theta/T = \sigma_y/y = \sqrt{2}, \quad (3)$$

где $y \equiv E^2$, p^2 , σ_y^2 — дисперсия этих величин.

Сглаживание пульсаций происходит в фильтре нижних частот (ФНЧ) — обычно RC -фильтре с постоянной времени $\tau = RC$, определяющей полосу частот $\Delta\Omega = 1/\tau$. После ФНЧ точность измерения температуры

$$(\theta/T)_{\text{пор}} = \sqrt{2\Delta\Omega/\Delta\omega} = \sqrt{2/(\tau\Delta\omega)}. \quad (4)$$

Это соотношение справедливо при условии, что шумы приемного устройства намного меньше принимаемых шумов, и определяет его пороговую точность.

Сравнительный анализ обоих методов в зависимости от используемой частоты в рабочем для каждого из них диапазоне проводился в работе [4]. Для сравнения рассматривалась простая модель биологического объекта — однородной среды с постоянной известной температурой T_0 , в которой на глубине Z имеется участок, температура которого отличается от температуры среды на величину ΔT . Задачей являлось определение величины нагрева участка ΔT , его глубины Z и положения края X . Величины ΔT и Z рассчитывали, используя двухспектральное (двухчастотное) зондирование в среде с частотнозависимым затуханием. В качестве положения границы X нагретого участка использовалась координата перемещаемого по поверхности тела датчика, где сигнал спадает вдвое. Методы характеризовали следующими параметрами: минимальным временем измерения τ и глубиной зондирования L , т. е. максимальным расстоянием, на котором можно регистрировать заданное изменение температуры ΔT в плоскости биологического объекта (ΔX) и по глубине (ΔZ).

При определении величин ΔT и Z использовали выражения для измеренной датчиком на частотах f_1 и f_2 температуры $T_1 = T_0 + \Delta T e^{-Z/\delta_1}$ и $T_2 = T_0 + \Delta T e^{-Z/\delta_2}$, где δ_1 , δ_2 — длины затухания волн. Оценивали точности определения координат Z и X , тогда как для величины ΔT она не определялась. Из приведенных выше выражений видно, что условием применения двухспектрального метода является неравенство $\Delta T e^{-Z/\delta} > \theta$, т. е. точность

определения координат в $e^{+Z/\delta}$ раз хуже, чем точность измерения самой температуры T_0 .

Вместо термина «точность» в работе [4] употреблялся термин «чувствительность» (обозначает минимальную обнаруживаемую разность температур), взятый из радиоастрономии и относящийся к абсолютной температуре. Для оценки чувствительности использовали выражения θ_R и θ_A для радио- и акустотермографии, аналогичные соотношению (4), но в которые вместо $\Delta\omega$ входит Δf . Ошибка в сторону завышения θ , если под τ понимать постоянную времени ФНЧ, составит $\sqrt{2\pi} \cong 2,5$ (250 %). Из того обстоятельства, что полоса пропускания единичного акустического датчика на три порядка хуже, следует, что его точность при одинаковой постоянной времени τ в 30 раз хуже, чем радиотермического. Компенсировать этот недостаток, по мнению авторов [4], можно используя матричный приемник — матрицу акустических датчиков из $m \times m$ элементов и квадратичное суммирование сигналов из их выходов, что якобы должно привести к уменьшению θ_A в m раз. Однако квадратичное суммирование напряжения шума приводит к одновременному увеличению его дисперсии, и в соответствии с соотношениями (3) не изменяет точности.

Отметим, что в случае электроакустических датчиков-приемников под чувствительностью понимают отношение электрического напряжения на выходе приемника к акустическому давлению. Такая чувствительность, действительно, увеличивается в m раз. В гидроакустике часто вводят в рассмотрение две величины чувствительности: по полу и по давлению. В первом случае под давлением понимают давление в плоской волне, падающей на антенну в направлении нормали к поверхности, а во втором — давление на самой поверхности антенны.

Характеристики реализованных радиотермометров. За время, прошедшее между публикациями [4] и [3], для исследований мозга был изготовлен 12-канальный радиотермометр, работающий на длинах волн в воздухе 10, 18 и 35 см. С его помощью и с контактными антennами аппликаторами получены пространственное разрешение 1...2 см и точность измерения температуры при постоянной времени 12 мс лучше, чем 0,07 °C. Аппликаторы служили для согласования электрических импедансов антенн и биологических тканей, без чего большая часть радиотеплового излучения, идущего из глубины тела, отражалась бы от его поверхности. Кроме того, их применение приводит к улучшению пространственного разрешения, так как поперечные размеры антенн одного порядка с длиной волны в тканях. С помощью этого радиотермографа было, в частности, установлено, что во время сна радиояркостная температура мозга уменьшается более чем на 1 °C, а во время гипноза правая полусфера излучает больше, чем левая.

Для визуализации радиотеплового излучения на длинах волн в воздухе 3 и 8 см использовали эллиптическое сканирующее зеркало. Объект находился в одной фокальной точке плоскости зеркала, а приемник — в другой. Поскольку харак-

теристическая глубина, с которой такое излучение выходит из тела, равна соответственно 0,3 и 1,5 мм, полученная информация должна быть довольно близкой к полученной с помощью инфракрасного изображения кожи. Однако в отличие от инфракрасного коротковолнового излучение проникает через слои эпидермы, волосы, одежду и даже через plaster-бандаж. Это создает новую возможность для мониторинга функциональной динамики кровотока в подкожных тканях. Было также получено через одежду термоизображение реакции торса на нитроглицериновый тест.

Состояние разработок акустотермометра. Что касается акустотермометрии, то глубинную температуру тела не удалось получить и до настоящего времени. Одной из причин этого, на наш взгляд, явилось отсутствие у исследователей [5–8, 13–15] понимания принципиальных различий между электромагнитными и акустическими приемными антеннами теплового излучения, связанных как с граничными условиями на активных и пассивных поверхностях антенн, так и с векторным характером электромагнитного и скалярного – акустического поля в воде. Несмотря на то, что методы расчета акустических антенн хорошо разработаны и апробированы в гидроакустике [9], в работах [5–8] они не использовались.

При экспериментальном исследовании одночастотного термометра в качестве акустической антенны использовалась пьезоэлектрическая квадратная или круглая пластина, через один или два четвертьволновых слоя нагруженная на воду, а электрически – параллельной индуктивностью L , настроенной в резонанс с емкостью заторможенного преобразователя на частоту, близкую к антирезонансной частоте. Особенностью такой антенны является то, что ее размеры значительно больше длины акустической волны в воде, поэтому такая антenna является направленной.

Известно, что радиус пространственной корреляции диффузного поля равен $\rho_k = \lambda/2$. Разобъем приемник с площадью поверхности A_0 на N независимых приемников с поверхностью каждого $\pi\rho_k^2$. Пренебрегая направленностью элементарных приемников и учитывая, что средний квадрат силы, действующей на всю поверхность, в $N = A_0/\pi\rho_k^2$ раз больше силы, действующей на один приемник, получим значение квадрата среднего по поверхности давления

$$\langle p^2 \rangle = p^2 \pi \rho_k^2 / A_0 \ll p^2. \quad (5)$$

Строгое решение задачи преобразования спектра давления тепловых акустических колебаний (2) в электрические колебания на выходе преобразователя в рамках модели дальнего поля помех антены получено в [10]. Согласно этой модели коэффициент преобразования давления в напряжение равен

$$K_{\text{ш}} = U_{\text{ш}}/p_{\text{ш}} = K_{\text{n}}(f)/\sqrt{K}, \quad (6)$$

где $K_{\text{n}}(f)$ – коэффициент преобразования в напряжение давления плоской волны, падающей на

антенну в направлении нормали к ее поверхности (чувствительность по полю), а осевой коэффициент концентрации антены с площадью A_0

$$K = 4\pi A_0 / \lambda^2. \quad (7)$$

Для пьезопластиинки с волновым акустическим сопротивлением z_0 , воздушной тыльной нагрузкой $z_1 = 0$, без, с одним или двумя четвертьволновыми слоями соответственно с $z_2 < z_3 < z_0$ или $z_2 < z_3 < z_4 < z_0$ (z_2 относится к среде) на антирезонансной частоте

$$K_{\text{n}0} = l_0/e_{33}, \quad K_{\text{n}0} = (z_3/z_2)(l_0/e_{33}), \quad (8)$$

$$K_{\text{n}0} = (z_3/z_4)(l_0/e_{33}),$$

где $l_0 = v^D/2f_0$ – толщина пьезопластины; v^D – скорость звука в ней при постоянной электрической индукции D ; e_{33} – электрическая постоянная. В соответствии с (8) слои действуют как трансформаторы давления, увеличивая $K_{\text{n}0}$. Кроме того, они расширяют полосу пропускания Δf в отсутствие демпфера. При этом, подбирая значения z_2 , z_3 , z_4 и L , можно добиться, чтобы внутри полосы выполнялось соотношение $K_{\text{n}}(f) \equiv K_{\text{n}0}$, а вне ее – $K_{\text{n}}(f) = 0$.

Из равенства (6) следует, что чем больше коэффициент концентрации антены K , тем меньше коэффициент преобразования давления теплового шума или, что то же самое, среднее во времени и по поверхности давление

$$\langle p^2 \rangle_s = p^2/K = p^2 \lambda^2 / 4\pi A_0. \quad (9)$$

Оно в π^2 раз меньше, чем в (5); π^2 равно коэффициенту концентрации элементарного приемника с диаметром λ . Подставляя (2) и (9) в выражение $U_{\text{a}} = K_{\text{ш}}^2 < p^2 > s$, получаем

$$U_{\text{a}}^2 = (z_2/A_0)kT K_{\text{n}0}^2 \Delta f. \quad (10)$$

Видно, что направленность акустической антены позволяет преобразовать спектр интенсивности (2) в «белый» шум напряжения на выходе преобразователя. При этом полоса частот, в которой $K_{\text{n}}(f) = K_{\text{n}0}$, может быть $\Delta f/f_0 \approx 1$, в результате чего точность увеличивается в 3, а интенсивность – в 10 раз.

Посмотрим, какие значения U_{a}^2 могли наблюдаться в эксперименте [5]. В нем использовалась пластина из ниобата лития LiNbO_3 размером $1 \times 1 \text{ см}^2$ ($A_0 = 10^{-4} \text{ м}^2$), имеющая частоту $f_0 = 1,3 \text{ МГц}$, и четвертьволновая пластина из хлористого калия, что, по утверждению авторов, обеспечивало довольно эффективное согласование в рабочей полосе частот $0,9 \dots 1,8 \text{ МГц}$. Возьмем из [9] значения параметров z -среза кристалла из LiNbO_3 : $\rho_0 = 4,64 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, $v^D = 7800 \text{ м}/\text{с}$ ($z_0 = \rho_0 v^D = 33,87 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}$), $e_{33} = 1,22 \text{ Кл}/\text{м}^2$, $\epsilon^s = 20,4 \cdot 10^{-11} \Phi/\text{м}$, $N_t \equiv f_0 l_0 = v^D/2 = 3650 \text{ Гц}\cdot\text{м}$, откуда $l_0 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Для материала KCl $\rho = 1,99 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c = 4,52 \cdot 10^3 \text{ м}/\text{с}$, $z = 8,95 \cdot 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}$. Подставив необходимые значения в (5) и (7), получим $K_{\text{n}0} = 13,7 \cdot 10^{-3} \text{ В}/\text{Па}$, $\sqrt{K} = 31$. Обратим



внимание, что значение емкости заторможенного преобразователя $C_0 = \varepsilon A_0 / l_0 = 72 \text{ пФ}$ очень мало, и значение параллельной индуктивности определяется емкостью соединительного кабеля.

Согласно уравнению (10) $U_a^2 = 1,1 \cdot 10^{-8}$, а $(U_a^2)^{1/2} = 104 \text{ мкВ}$. Эффективное напряжение $(\bar{U}_a^2)^{1/2}$ есть ЭДС эквивалентного генератора шумового сигнала, внутренний импеданс Z которого комплексный, а вещественная часть в полосе частот Δf будет:

$$\text{Re}Z = R(f_0) = [z_2/(4A_0)]K_{\text{п0}}^2. \quad (11)$$

Согласно теореме Найквиста она является источником собственного теплового электрического шума преобразователя с квадратом эффективного напряжения

$$U_{\text{ПЭ}}^2 = 4RkT_{\text{п}}\Delta f, \quad (12)$$

где $T_{\text{п}}$ — температура ПП. Поскольку источники напряжения шума $(U_a^2)^{1/2}$ и $(U_{\text{ПЭ}}^2)^{1/2}$ независимые, то на выходе ПП квадрат суммарного напряжения

$$U_{\Sigma}^2 = U_a^2 + U_{\text{ПЭ}}^2. \quad (13)$$

Можно показать [10], что следствием комплексной теоремы взаимности ПП как пассивного четырехполюсника в общем случае $z_1 \neq 0$ является соотношение

$$K_{\text{п}}^2(f) \cong 4R(f)A_0/(Gz_1 + z_2), \quad (14)$$

где $G = 1$, $G = (z_2/z_3)^2$, $G = (z_4/z_3)^2$ соответственно для случаев отсутствия, наличия одного или двух четвертьволновых слоев. С учетом соотношения (14)

$$U_a^2/U_{\text{ПЭ}}^2 = (T/T_{\text{п}})/(1 + Gz_1/z_2). \quad (15)$$

Отсюда следует, что при $T/T_{\text{п}} \cong 1$, отсутствии слоев и $z_1/z_2 \gg 1$, в этом случае для получения широкой полосы пропускания ПП необходимо, чтобы отношение (15) было значительно меньше единицы. Поэтому для использования в акустотермометрии такой случай не представляет интереса. При наличии же слоев и условии $Gz_1/z_2 \ll 1$ $U_a^2 \cong U_{\text{ПЭ}}^2$, а $U_{\Sigma}^2 \cong 2U_a^2$. Соответственно и точность измерения температуры θ будет в 2 раза ниже пороговой из уравнения (4).

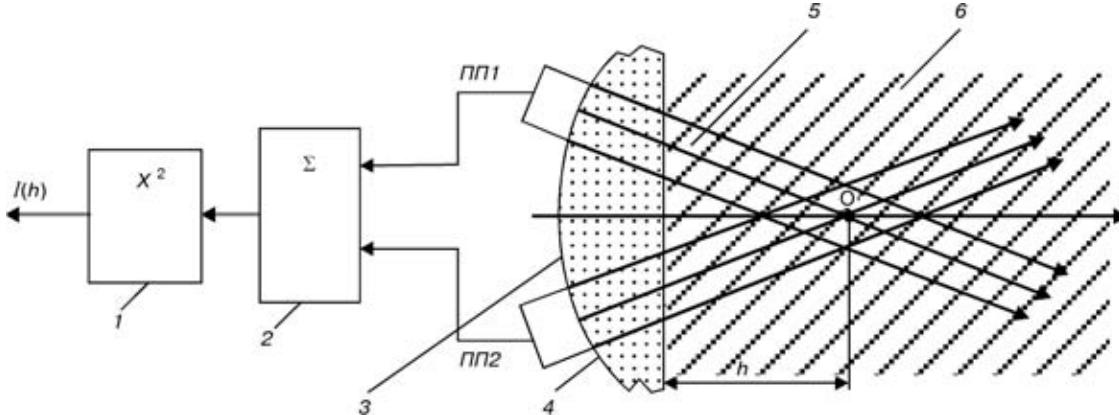
В приведенном выше примере ПП из LiNbO_3 коэффициент $G = [1,5 \cdot 10^6 / (9 \cdot 10^6)]^2 = 1/36$ и даже при $z_1/z_2 = 4Gz_1/z_2 \cong 0,1 \ll 1$, так что $(U_{\Sigma}^2)^{1/2} \cong \sqrt{2} \cdot 104 = 147 \text{ мкВ}$. Измерение этого напряжения позволяет проверить изложенную теорию с помощью одного только электронного вольтметра с достаточной полосой частот и чувствительностью. В работе [5], к сожалению, такие данные не приводятся.

Вопрос о величине U_{Σ}^2 рассматривался в [6, 7]. В статье [6] она определялась «по формуле Найквиста $U^2 = 4k\text{Re}Z_{\Sigma}\Delta f$, где $\text{Re}Z_{\Sigma}$ — действительная часть полного выходного импеданса ПП, соединенного с электрической нагрузкой. В величину Z_{Σ} вносят вклад исследуемые шумы объекта, а также собственные шумы пьезопреобразователя и демпфера». Ошибочность последнего предложения и всей фразы в том, что, как показано выше, источники обоих шумов разные. Интересно отметить, что здесь повторена ошибка работы [12], где утверждалось, что «напряжение отклика гидрофона на тепловой шум среды есть шум Найквиста сопротивления излучения нагруженного гидрофона», и измерение импедансным методом зависимости этого сопротивления от частоты принималось за измерение спектра тепловых флуктуаций давления в среде. Фактически же в [6] учитываются только собственные шумы ПП.

В статье [7] предполагается, что «ПП принимает акустическое излучение из исследуемого объекта и демпфера, который входит в ПП и температура которого T_p определяет интенсивность большей части излучения, не зависящую от температуры среды T . Меньшая часть — полезный сигнал — определяется разностью температур $T - T_p$. Большая часть выражается через действительную часть электрического импеданса $\text{Re}Z(f)$ нагруженного ПП (заметьте, здесь уже не Z_{Σ}) по формуле Найквиста, а «полезная» определяется выражением $KK_p^2(f)(z_2/A_0)(T - T_p)\Delta f$, где $p^2 = K(z_2/A_0)(T - T_p)\Delta f$ — средний квадрат звукового давления тепловых флуктуаций. Очевидно, что цель такого, по словам автора, «искусственного приема» — объяснить, не располагая соответствующей моделью, «белый» электрический шум акустического излучения на выходе ПП и малое значение его эффективного напряжения.

В работе [8], используя характеристику направленности круглой акустической антенны $\Phi(\theta) = = 2J_1(ka\theta)/(ka\theta)$, где J_1 — функция Бесселя первого порядка; $k = 2\pi/\lambda$; a — радиус антенны ($ka \gg 1$); θ — угол между нормалью к плоскости антенны и направлением приема плоской волны, для среднего квадрата тепловых флуктуаций давления (среднего и по поверхности ПП) получили выражение, совпадающее с (9) после подстановки в него (2), однако вопреки утверждению авторов [8] никак не с $p^2 = k(z^2/A_0)(T - T_p)\Delta f$ в (4). Поскольку для получения значения $U_a^2 = K_p < p^2 >_s$ нужно значение величины K_p^2 , авторы только отмечают, что преобразователь акустически идеально согласован со средой. В действительности это не обязательно — нужно взять коэффициент преобразования (чувствительность) по полулю, в котором степень отражения уже учтена.

Проблемы создания акустотермометра для функциональной диагностики человеческого тела. Особенностью такого акустотермометра является необходимость достижения высокой точности измерения внутренней температуры ($\sim 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) в реальном времени ($\sim 1 \text{ с}$). Как будет показано ниже,



Принципиальная схема устройства для определения коэффициента поглощения γ [13] (обозначения см. в тексте)

этим требованиям отвечает оптимальный вариант фокусируемого акустотермометра. С какими проблемами приходится сталкиваться при многоканальном и многоспектральном зондировании, требующем знания частотно-зависимого коэффициента поглощения, рассмотрим на примере работ, где объектом исследования являлось или предполагалось человеческое тело. Особое внимание обратим на точность измерения и ее интерпретацию авторами.

В работе [13] была поставлена задача решить основную проблему: «предложить вариант пассивной томографии (этот термин стали употреблять для многоканальной акустотермометрии), не использующей априорную информацию о коэффициенте поглощения интенсивности». Принципиальная схема устройства для определения коэффициента поглощения γ в глубине объекта с помощью выделения сигнала, выходящего из каждого участка человеческого тела, приведена на рисунке. Здесь используются следующие обозначения: ПП1, ПП2 — преобразователи; 1 — сумматор напряжений; 2 — квадратичный детектор; 3 — иммерсионная жидкость; 4, 5 — аппаратные функции (автор [13] ошибочно называет их диаграммами направленности, характеризующими только дальнюю зону или зону Фраунгофера); 6 — исследуемый объект; $I(h)$ — интенсивность суммарного сигнала на выходе квадратичного детектора; O — характерная точка области пересечения аппаратных функций. Форма поверхности ПП и иммерсионной жидкости под ними не определены. Указано, что величину h можно изменять путем одновременного перемещения ПП1 и ПП2 либо поступательно относительно поверхности объекта, либо путем их вращения (заметим, что при сферической поверхности это не приведет к изменению h). Предполагается, что определяется максимальное значение функции корреляции $J(h) = I(h) - 2I_0$, где I_0 — интенсивность сигнала с выхода каждого из преобразователей. Для функции корреляции предлагается следующее выражение:

$$J(h) = 2I_0 \int_0^{\infty} R(h, l) G(l) dl, \quad (16)$$

где

$$G(l) = \gamma(l) \exp \left[- \int_0^l \gamma(\xi) d\xi \right]. \quad (17)$$

Для того, чтобы решить интегральное уравнение (16) относительно $G(l)$, предлагается измерить функцию корреляции излучения, создаваемого тонким слоем вещества с большим коэффициентом поглощения. При данном значении h слой помещается последовательно на разных расстояниях l от границы исследуемого тела и измеряется величина $I(h, l) = 2R(h, l)$. Значение $\gamma(l)$ предлагается получить из соотношения $\gamma(l) = G(l) / [1 - \int_0^l G(\xi) d\xi]$.

Однако следует отметить, что поскольку создать такой слой в теле человека в принципе невозможно, то невозможно и определить значение γ в точке h , а следовательно, и температуру по схеме некоррелированного приема отдельным излучателем.

Обратим внимание на то, что если поверхности ПП и иммерсионной жидкости будут сферические с центром в точке $F = R$ и $F < 1/\gamma$, а диаметр ПП удовлетворяет условию $\lambda \ll d < 2\sqrt{\lambda F}$, то квадрат напряжения на электродах отдельного ПП от излучения из точки F , как и в случае фокусируемого акустотермометра [10], будет равен:

$$U_{\text{сф}}^2 = \frac{\pi z_2}{F^2} kT(F) K_{\text{пп0}}^2 \Delta f, \quad (18)$$

т. е. от площади ПП не зависит. Сумма квадратов напряжения от диффузного излучения и равного ему собственного шума ПП определяется соотношением $U_{\text{ш}}^2 = 2U_{\text{а}}^2$, где $U_{\text{а}}$ получаем из формулы (10) с заменой A_0 на S , т. е. обратно пропорциональна площади S апертуры ПП. Поскольку точность измерения температуры $T(F)$ определяется суммарным шумом, то при неравенстве $U_{\text{сф}}^2 \ll 2U_{\text{а}}^2$ (или $\pi S / F^2 \gg 2$) она равна пороговой из (4), а при обратном неравенстве — в $2F^2 / \pi S$ раз хуже. Увеличение значения m числа ПП в последнем случае ($\pi S / F^2 > 2$) будет увеличивать в m раз отношение $U_{\text{сф}}^2 / (2U_{\text{а}}^2)$, а следовательно, и точность измерения температуры, которая будет приближаться сверху к пороговой из (4). В случае же, если суммарная площадь используемых ПП



равна максимально возможной ($2\pi F^2$), а их число увеличивается, то отношение $U_{\text{сф}}^2/(2U_a^2)$ остается постоянным, а точность равна пороговой из (4). Поэтому сумматор в данном случае не нужен. Это обстоятельство существенно, так как частота единичного усиления в отечественных ОУ (на них строятся сумматоры) не превышает ~ 1 МГц.

Возможность определения пространственного распределения температуры в кисти руки методом многоспектрального зондирования экспериментально исследовалось в [14, 15]. В статье [14] кисть руки располагалась в ванне с водой с температурой $22,5 \dots 25,5$ °C на расстоянии 200 мм от ПП диаметром $d = 10$ мм. Тепловое акустическое излучение модулировалось с помощью механического обтюратора. При открытом обтюраторе ПП регистрировал суммарное излучение кисти и воды, а при закрытом — только воды, служившей температурным эталоном. Сигнал от ПП подавался через предварительный усилитель на анализатор спектра (АС) с полосой частот около 64 кГц, работающий в режиме пилообразного изменения частоты от внешнего генератора с периодом 200 с. В течение одного полупериода развертки частота линейно увеличивалась от 1,25 до 3,00 МГц, а в течение другого — уменьшалась от 3,00 до 1,25 МГц. Сигнал с выхода АС, пропорциональный акустокостной температуре T_A , непосредственно, а сигнал с выхода синхронного детектора (СД), на который подавалось опорное напряжение с обтюратора, и сигнал с АС — через фильтр низких частот (RC-цепочку) и усилитель постоянного тока, поступали на персональный компьютер. Сигнал с СД пропорционален разности акустокостных температур кисти и воды, называемой авторами инкрементом: $\Delta T_A = T_A - T_B$. Полная длительность одного цикла измерений составляла 16,5 мин, тогда как постоянная времени RC-цепочки, определяющая пороговую точность измерения температуры, равнялась 3 с. Флуктуации сигнала на выходе АС максимальны в диапазоне 1,7...2,5 МГц и спадают до нуля на частотах около 1,5 и 3 МГц (около 20 %), на что авторы не обращают внимания, а среднее значение его от частоты не зависит. Отсюда можно определить полосу частот ПП $\Delta f_{\text{ПП}} \geq 0,8$ МГц и среднюю частоту $F_{\text{ср}} = 2,1$ МГц. О недостатках в постановке эксперимента свидетельствует и большой разброс значений измерявшегося активным методом (на «просвет») на частоте $f = 2$ МГц коэффициента поглощения интенсивности $\gamma = 0,5 \pm \pm 0,3$ см⁻¹ = 0,2...0,8 см⁻¹. Авторы [14] констатируют «слабую частотную зависимость T_A и большую погрешность ее измерения, что не позволяет использовать многоспектральное зондирование для восстановления распределения температуры». Объяснить причину такой зависимости можно тем, что условия применения многоспектрального зондирования — $\Delta T > \theta_{\text{exp}}(\gamma L)$ и $L\gamma(f) > 1$, где L — толщина кисти, — не выполняются, а также тем, что доля интенсивности акустического сигнала в суммарном шуме мала.

В эксперименте [15] АС отсутствовал — на его месте находился квадратичный детектор. Мощ-

ность теплового акустического излучения регистрировалась в полосе частот $\Delta f \geq 0,8$ МГц. Выходной сигнал СД, пропорциональный разности акустокостных температур аквариума с водой ($T_B = 28,2$ °C), черного тела, кисти руки испытуемого и температуры воды, фиксировался на компьютере через каждые 3 с, равные постоянной интегрирования RC-цепочки. Кисть руки была повернута к ПП ладонью либо тыльной стороной как параллельными к ПП, так и под углом 45° поверхностями. Полное время измерений для каждого из положений руки в приводимом в статье [15] рисунке составляло 2 мин. Получено, что температура T_{Aq} черного тела, равная его термодинамической температуре: на 8 К превышает температуру аквариума, а инкремент кисти ΔT_A испытуемого составляет 4 К. Можно видеть, что флуктуации ΔT_A и ΔT_{Aq} происходят с размахом ≥ 3 К, что авторами [15] не отмечается. Они указывают, что погрешность измерения температуры определяется по ширине шумовой дорожки «как отношение среднего квадратического отклонения к корню квадратному из числа независимых измерений». Для длительности измерений 0,5 и 3 мин называются погрешности 0,3 и 0,1 К. Такая оценка, как будет показано ниже, является ошибочной.

Остановимся на вопросе точности измерения температуры на конечном интервале времени или по конечному числу N выборочных точек T_i , следуя общей теории прикладного анализа случайных величин [16]. В этом случае определяются не истинная температура T и ее дисперсия σ_T^2 , а их оценки

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad \tilde{\sigma}_T^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2, \quad (19)$$

которые также являются случайными величинами и при многократном повторении эксперимента будут изменяться. Для установления качества оценок используется их математическое ожидание $E[\tilde{X}]$, где в скобках находится оцениваемый параметр. Для указанных выше оценок

$$E[\tilde{T}] = E\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i\right] = \frac{1}{N} E\left[\sum_{i=1}^N T_i\right] = \frac{1}{N}(NT) = T,$$

$$\begin{aligned} E[\tilde{\sigma}_T^2] &= E\left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2\right] = \\ &= \frac{1}{N-1} E\left[\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2\right] = \sigma_T^2, \end{aligned} \quad (20)$$

т. е. математическое ожидание равняется оцениваемому параметру. Оценки (19) являются несмещенными. Цепь преобразований во второй формуле (20) сокращена.

Точность определения истинной температуры определяется суммой оценки дисперсии и среднеквадратичного отклонения оценки от температуры

$$\theta^2 = \tilde{\sigma}_T^2 + \tilde{\sigma}_T^2/N. \quad (21)$$

В работе [15], как указывалось выше, она ошибочно взята равной $\theta' = \tilde{\sigma}_T/\sqrt{N}$, т. е. второму значительно меньшему члену. Учитывая то, что температура T_i фиксировалась на компьютере каждые 3 с, а значения $\theta = 0,3; 0,1$ К — для времени измерений 0,5 ($N = 10$) и 3 мин ($N = 60$), получим $\tilde{\sigma}_T = 0,95; 0,88$ (≈ 1) К. Следовательно, $\theta \approx \tilde{\sigma}_T \approx 1$ К.

С учетом того, что истинное значение точности определения температуры 1 К, утверждение авторов [15], что декремент акустостояркостной температуры ладони на 0,5...1 °C (т. е. в пределах точности) больше, чем тыльной стороны, является необоснованным.

Из того, что точность измерения температуры $\pm 1,0$ К (0,3%) значительно больше пороговой $\theta_{\text{пор}} = 2T\sqrt{2}/(\Delta\omega t) = 0,2$ К, следует, что причиной расхождения является (как и в [5]) сама схема измерения. Об этом свидетельствуют также тот факт, что ширина шумовой дорожки при измерении ΔT_A кисти, когда можно ожидать нестационарных процессов в теле, и воды и черного тела одинаковая.

Ширина дорожки при измерении интенсивности шума на выходе АС равна 20 % [14], а на выходе ФНЧ [15] — 0,5 %, откуда отношение 20/0,5 = 40, что значительно больше, чем следовало бы из отношения $\sqrt{\Delta\omega_1/\Delta\omega_2} = \sqrt{800/64} = 3,5$. Тогда можно сделать вывод, что постоянная времени на выходе АС значительно меньше 3 с.

Фокусируемый акустотермометр. В работе [10] предложено использовать фокусируемый ПП с диаметром $D \gg \lambda$. Показано, что средний квадрат суммарного напряжения на выходе фокусируемого ПП при $z_1 = 0$

$$U_{\Sigma\Phi}^2 \sim U_a^2[2 + [\pi D/(2F)]^2], \quad (22)$$

где U_a^2 определяется по формуле (10), а F , D — фокусное расстояние и апертура линзы. Существенно, что линза должна быть эллиптической, т. е. безабберационной. В отличие от линзы радиотермографа, в которой объект находится в одном фокусе, а приемник — в другом, в акустической линзе в фокусе находится только интересующая область в глубине тела, а ПП — вне тела и перед поверхностью эллиптической линзы. Из требования существования вещественных значений решения уравнения эллипса, соответствующего указанному выше положению объекта и приемника, следует, что для вогнутой линзы

$$D/(2F) \leq \sqrt{(1-n)/(1+n)}, \quad (23)$$

где $n = c_{\text{ж}}/c_{\text{л}} < 1$ — показатель преломления материала линзы; $c_{\text{л}}$ и $c_{\text{ж}}$ — скорости звука в линзе и жидкости. Для двояковогнутой линзы фокусное расстояние в два раза меньше, так что отношение $D/(2F)$ — в два раза больше. Для линзы из оргстекла в воде $n = 1,5 \cdot 10^3 / 2,37 \cdot 10^3 = 0,635$ и $[\pi D/(2F)]^2 = 9 \gg 2$. При этом, как видно из (19), основной вклад в $U_{\Sigma\Phi}^2$ дает излучение из области фокуса. Отсюда, во-первых, следует, что

можно измерять абсолютную глубинную температуру тела одночастотным, одноканальным методом. Причем в отличие от двухчастотного метода, рассматривавшегося в [4], частоту нужно выбирать возможно низкую с малым затуханием, а следовательно, и большой глубиной проникновения в ткани. Во-вторых, увеличивается точность до значения пороговой, т. е. она в $2e^{\gamma F}$ раза лучше, чем при нефокусирующем ПП (здесь γ — коэффициент затухания на частотах нефокусируемого ПП). И наконец, в-третьих, интенсивность шумового сигнала на входе УВЧ значительно больше, что позволяет превысить собственные шумы усилителя.

Влияние элементов схемы на точность измерения температуры акустотермометром. В экспериментах [6, 14, 15] напряжение шумов с ПП на вход УВЧ подавалось через повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации M . Из схемотехники известно, что существует оптимальное значение M , равное

$$M_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{(U_{yc}/I_{yc})}{|Z|}} = \sqrt{R_{\text{опт}}/Z}. \quad (24)$$

Здесь U_{yc} и I_{yc} — шумовые напряжения и ток эквивалентных генераторов напряжения и тока бесшумного усилителя. При этом коэффициент шума минимальный и при $U_{yc} = MU_{\text{ПП}}$ равен $F_{\text{мин}} = 3$, а оптимальное значение квадрата напряжения шума на входе усилителя $U_{\text{вх,опт}}^2 = 4U_a^2$ (U_a^2 определяется по формуле (10)), а точность

$$(\theta/T)_{\text{мин}} = 4(\theta/T)_{\text{пор}}. \quad (25)$$

Обратим внимание, что источники величин U_{yc} и I_{yc} разной природы, поэтому $R_{\text{опт}}$ не является эквивалентным сопротивлением шумов усилителя, квадрат напряжения которых определяется по формуле Найквиста, как это ошибочно делается в статье [7], где понятие $M_{\text{опт}}$ отсутствует. При значениях же $M \neq M_{\text{опт}}$ (21) точность может быть более, чем на порядок, хуже пороговой.

Следует обратить внимание на разный характер спектра шума, создаваемого эквивалентными источниками шума на входе усилителя. Если тепловой шум U_{yc} ограничен полосой усиления усилителя, то шум, создаваемый током I_{yc} на импедансне $|Z| \approx \text{Re}(Z)$, так же, как и собственный шум ПП, сосредоточен в его полосе пропускания $\Delta f = 0,8\dots 0,9$ МГц. Такой же характер и суммарного спектра при $M > M_{\text{опт}}$, измерявшегося в [14], о чем уже говорилось. В работе [14] авторы на это не обращают внимания, считая, что это и есть спектр акустического шума, интенсивность которого пропорциональна температуре кисти, и допускают в статье [15] ошибку в определении точности измерения температуры.

Большой уровень амплитуды шумового сигнала фокусируемого ПП позволяет входным элементом УВЧ взять полевой транзистор, имеющий меньший, чем биполярный, коэффициент усиления, но только один эквивалентный генератор шума U_{yc} , и исключить влияние усилителя на точность акустотермометра.



Для исключения влияния на точность измерения уходов усиления в работе [7] использовался нулевой модуляционный метод: когда модулятор открыт, на ПП поступает излучение от исследуемого объекта, когда закрыт — идет шумовой акустический сигнал из воды, заполняющей модулятор, имеющей близкую температуру и служащей шумовым эталоном температуры. Поскольку значение суммарного напряжения шума на выходе ПП от положения модулятора почти не зависит, то и точность определения температуры θ в соответствии с соотношением (3) тоже не меняется, но точность определения разности температур объекта и эталона в 2 раза хуже. Появление в этом методе коэффициента 2 в выражении для точности в статье [7] ошибочно объясняется влиянием двух факторов с коэффициентом $\sqrt{2}$ для каждого.

Результаты анализа схемы нулевого модуляционного метода приведены в работе [11]. В ней, помимо согласующей цепи ПП и УВЧ, в качестве элемента схемы, который может значительно ухудшить точность, указан синхронный детектор. Предложена модифицированная схема метода, в которой с помощью инерционного линейного детектора переменная составляющая выделяется и усиливается УНЧ, а затем с помощью синхронного (фазового) детектора и ФНЧ преобразуется в постоянное напряжение.

ВЫВОДЫ

Фокусировка теплового акустического излучения с помощью двояковогнутой эллиптической линзы позволяет:

измерять и сканировать глубинную абсолютную температуру тела одноканальным, одночастотным акустотермометром, в отличие от многоканального радиотермометра и многочастотных или многоканальных акустотермометров, предлагаемых другими авторами;

получить пороговое значение точности измерения, близкое к полученному в радиотермографах;

при точности измерения температуры 0,2 °C уменьшить время измерения до ~ 1 с и аналогично радиотермографу измерять температуру в динамическом режиме;

получить пространственное разрешение ~ 1 мм на глубине до 10 см, что на порядок лучше, а по глубине — на два порядка глубже, чем с радиотермографом с эллиптическим зеркалом;

Нац. технич. ун-т Украины «Киев. политехн. ин-т»

вместе с модифицированной схемой нулевого модуляционного метода, предложенной автором ранее, создать действующий акустотермометр с указанными выше параметрами.

1. Бабий В. И. Перенос акустической энергии в поглощающей и излучающей среде // Морские гидрофиз. исслед. — 1974. — **65**, № 2. — С. 189–192.
2. Bozhen T. Acoustic passive remote temperature sensing // Acoustic imaging, 1982. — Р. 549–561.
3. Godik E. E., Gulyaev Y. V. Functional imaging of the human body // IEEE Engineering in medicine and biology. — 1991. — **10**, № 4. — Р. 21–29.
4. О возможностях акустической термографии биологических объектов / Ю. В. Гуляев, Э. Э. Годик, В. В. Дементиенко и др. // Докл. АН СССР. — 1985. — **183**, № 6. — С. 1495–1499.
5. Зондирование внутренней температуры объектов по их тепловому акустическому излучению / В. И. Миругородский, В. И. Пасечник, С. В. Пешин и др. // Докл. АН СССР. — 1987. — **297**, № 6. — С. 1370–1372.
6. Пасечник В. И. Оценка чувствительности метода акустотермографии // Акуст. журн. — 1990. — **36**, № 4. — С. 718–724.
7. Пасечник В. И. Оценка пороговой чувствительности акустотермометров // Там же. — 1993. — **39**, № 1. — С. 140–143.
8. Пасечник В. И. Исследование теплового акустического излучения в рамках модели гидродинамических флюктуаций // Там же. — 1994. — **40**, № 4. — С. 542–547.
9. Смарышев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. — Л.: Судостроение, 1973. — 280 с.
10. Дидковский В. С., Найды С. А. Расчетные соотношения метода акустотермометрии биологических тканей / НТТУ «Киев. политехн. ин-т». — Киев, 1997. — 11 с. — Деп. в ГНТБ Украины 21.04.97, № 314-Ук97.
11. Дидковский В. С., Найды С. А. Нулевой модуляционный метод измерения теплового акустического излучения биологических объектов // Электроника и связь. — 2000. — **2**, № 8. — С. 253–256.
12. Ezrow D. N. Measurement of the thermal – noise spectrum of water // J. Acoustic Soc. of America. — 1962. — **34**, № 5. — Р. 550–554.
13. Пасечник В. А. Пассивный термоакустический томограф, не использующий априорную информацию о коэффициенте поглощения // Акуст. журн. — 1997. — **43**, № 4. — С. 563–565.
14. Аносов А. А., Бограчев К. М., Пасечник В. И. Измерение теплового акустического излучения из кисти руки человека // Там же. — № 3. — С. 299–306.
15. Аносов А. А., Бограчев К. М., Пасечник В. И. Пассивная термоакустическая томография кисти руки человека // Там же. — № 6. — С. 725–730.
16. Бендет Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 450 с.

Поступила в редакцию
22.05.2002



УДК 539.22:621.317

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Ю. Г. МАКЕЕВ, А. П. МОТОРНЕНКО

Рассмотрена методика неразрушающего локального определения диэлектрических проницаемостей веществ, основанная на резонансных особенностях собственных поляризационно-вырожденных электромагнитных колебаний НЕ-типа в структуре, представляющей ортогональное пересечение запредельных цилиндрического и радиального волноводов. Образец изотропного или анизотропного диэлектрика в виде пластины произвольной формы и размеров помещался в область пересечения волноводов и частично в радиальный волновод. Приведены измеренные данным методом в диапазоне частот 10...70 ГГц значения диэлектрических проницаемостей фторопласта-4, плавленого и монокристаллического кварца.

The paper deals with a procedure of non-destructive local determination of dielectric constants of materials, based on resonance features of the inherent polarization-deteriorated electromagnetic oscillations of HE-type in a structure that is an orthogonal intersection of out-of-limit cylindrical and radial wave guides. A sample of an isotropic and anisotropic dielectric in the form of a plate of an arbitrary shape was placed into an area of wave guides intersection and partially into the radial wave guide. Values of dielectric constants of fluoroplastic-4, fused and single-crystal quartz, measured by this method in the frequency range of 10 to 70 Hz, are given.

Введение. Исследование диэлектрических свойств различных материалов в широком частотном диапазоне имеет большое научное и практическое значение. Это обусловлено тем, что комплексная диэлектрическая проницаемость отражает структурные свойства, а также динамические особенности вещества в разных физических условиях. В последнее время наблюдается повышенный интерес к развитию и использованию радиофизических методов измерения диэлектрических параметров веществ, в частности, в микроволновом диапазоне, что обусловлено по крайней мере тремя обстоятельствами.

Во-первых, появился целый ряд новых диэлектрических и полупроводниковых материалов, в связи с чем возникла необходимость выяснения возможностей их использования при разработке новой элементной базы в микроминиатюрном исполнении для радиоэлектронной и вычислительной техники. Развитие пленочной технологии потребовало изготовления высококачественных диэлектрических подложек с заданными параметрами.

Во-вторых, было обнаружено влияние нетеплового электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на функциональные возможности живых организмов, что вызвало целый поток новых публикаций [1]. Использование диэлектрометрии в миллиметровом диапазоне при изучении биосистем показало уникальную возможность выявления их структурных и функциональных особенностей в связи с заметным различием диэлектрической проницаемости биополимера, связанной и свободной воды [2, 3].

В-третьих, микроволновые методы позволяют изучать не только параметры изотропных диэлектрических материалов, но и характеристики анизотропных монокристаллических образцов, что является инструментом для изучения особенностей кристаллов и расширяет возможности их практического использования. Вместе с тем работ, посвященных микроволновым методам измерения диэлектрических характеристик анизотропных диэлектриков, не так уж и много [4–9].

В настоящей работе представлена методика неразрушающего определения электрических параметров изотропных и анизотропных образцов диэлектриков, являющаяся развитием исследований, изложенных в [4–6]. В отличие от представленной в [4] она обеспечивает проведение

ние неразрушающих измерений и контроль параметров диэлектрических материалов. От описанных в [5, 6] данной методики отличается более высокой точностью за счет использования результатов строгого решения соответствующей электродинамической задачи [10].

Методика исследований. Рассматриваемый метод определения электрических характеристик изотропных и анизотропных диэлектриков в микроволновом диапазоне относится к резонансным методам и основан на использовании собственных поляризационно вырожденных электромагнитных колебаний НЕ₁₁₈-типа в резонаторе. Последний представляет (рис. 1, а) ортогональное пересечение запредельных цилиндрического 1 и радиального 2 волноводов с исследуемым диэлектрическим элементом (ДЭ) 3 в области пересечения волноводов и частично — области радиального волновода. На рис. 1, а ДЭ 3 показан в виде параллелепипеда, однако пластина исследуемого диэлектрика может быть любой плоской конфигурации. После возбуждения в такой резонансной структуре, например, собственного НЕ₁₁₈-колебания происходит снятие вырождения, и в случае однородного изотропного диэлектрического образца резонирующее электромагнитное колебание происходит на одной частоте, зависящей от геометрических размеров резонатора и диэлектрической проницаемости ДЭ. Если диэлектрик не однороден или анизотропен, то возникает два собственных ортогональных колебания НЕ₁₁₈ и НЕ₁₁₈, в плоскостях поляризации которых расположены направления наибольшего и наименьшего значений диэлектрической проницаемости образца.

В работе [4] для измерения параметров анизотропного диэлектрика использовали резонансную структуру на основе волноводно-диэлектрического резонатора (ВДР) с запредельным волноводом. В качестве измерительного ВДР (рис. 1, б) применяли отрезок запредельного цилиндрического волновода 1, частично заполненный ис-

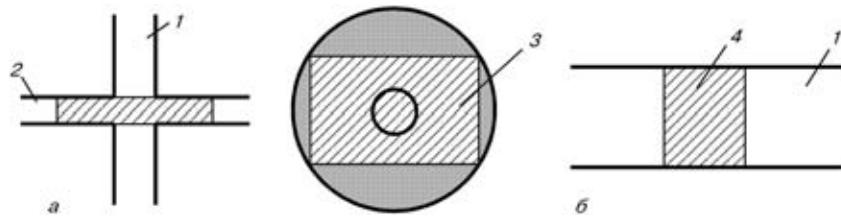


Рис. 1. Схематическое изображение измерительных резонаторов (обозначения см. в тексте)



следуемым ДЭ в виде тонкого диска 4 с диаметром, равным внутреннему диаметру волновода. Возможная эллиптичность диэлектрического диска, а также неизбежный зазор между ДЭ и внутренними стенками волновода вносят дополнительные погрешности в определение электрических параметров образца описанным ранее методом. Предложенный в настоящей работе метод исключает такие погрешности и, кроме того, позволяет проводить дополнительно локальные топографические измерения электрических параметров исследуемого диэлектрика в виде пластины вдоль ее поверхности. Единственным требованием к поперечным размерам диэлектрического образца в этом случае является условие, чтобы диаметр пятна электромагнитного поля, занимающего часть ДЭ, был меньше его минимального поперечного размера. С учетом запредельности волноводов и возможности выбора цилиндрического волновода с малым внутренним диаметром это условие достаточно легко выполнимо на практике даже для сравнительно небольших образцов.

Спектр собственных НЕ-электромагнитных колебаний в резонаторе, изображенном схематически на рис. 1, a, достаточно подробно изучен [10]. В этой работе, в частности, приведено дисперсионное уравнение для низшего НЕ₁₁₈-колебания, на примере использования которого покажем возможности определения параметров диэлектрических образцов в виде пластин произвольной формы. Для этого запишем это уравнение в одноволновом приближении:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{p_{11}^2}{(F_{11}p_{11}^2 + \gamma_{11}^2)\gamma_{11}^2} \frac{p_{21}^2}{\Gamma_{11}^2 + p_{21}^2} - f_{11} \frac{ah}{8} \left(1 - \frac{1}{p_{11}^2 a^2} \right) \right] \times \\ & \times \left[\frac{p_{21}(q_{11}^2 + \xi_{11}^2)(\Gamma_{11}^2 + p_{21}^2)}{\gamma_{11}} F'_{11} + \frac{\epsilon}{f_{11}} \frac{8}{ah} \right] - \\ & - \frac{\Gamma_{11}^2 + p_{21}^2}{a^2 p_{11}^2 \xi_{11}^2 (\Gamma_{11}^2 + p_{21}^2)} (g_{11}^2 + \xi_{11}^2) \left(\Gamma_{11}^2 - \frac{p_{11}^2 p_{21}^2}{\gamma_{11}^2} \right) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где a — внутренний радиус цилиндрического волновода; h — высота радиального волновода, равная толщине диэлектрической пластины;

$$f_{11} = \gamma_a + \Gamma_{11} t h \left(\Gamma_{11} \frac{h}{2} \right); \quad f'_ {11} = \frac{1}{\gamma_a} + \epsilon \frac{1}{\Gamma_{11}} t h \left(\Gamma_{11} \frac{h}{2} \right)$$

$$F_{11} = - \frac{1}{\gamma_{11}^2 a} \frac{1}{I_1(\gamma_{11} a) K_1''(\gamma_{11} a)},$$

$$F'_{11} = - \frac{1}{p_{11} \xi_{11} a I_1(\xi_{11} a) K_1(\xi_{11} a)};$$

$$p_{11} = \frac{1,841}{a}; \quad p_{21} = \frac{2\pi}{h}; \quad \Gamma_{11}' = \left[\left(\frac{3,832}{a} \right)^2 - k^2 \epsilon \right]^{1/2};$$

$$\Gamma_{11} = \left[\left(\frac{1,841}{a} \right)^2 - k^2 \epsilon \right]^{1/2}; \quad \gamma_{11} = (p_{11}^2 - k^2 \epsilon)^{1/2};$$

$$\xi_{11} = (p_{21} - k \epsilon)^{1/2}; \quad \gamma_a = (p_{11} - k)^{1/2};$$

$$\gamma_a' = \left[\left(\frac{3,832}{a} \right)^2 - k^2 \right]^{1/2}.$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по этому уравнению зависимости резонансной длины волны λ , нормированной на критическую длину волны λ_{cr} поля H_{11} пустого волновода, от диэлектрической проницаемости исследуемого диэлектрического образца $\epsilon = 0,5 \dots 4,0$ (рис. 2, a) и $\epsilon = 4,0 \dots 12,0$ (рис. 2, б). Зависимости определены для отношения толщины диэлектрика h к внутреннему радиусу a цилиндрического волновода $h/a = 0,2 \dots 1,6$ (соответственно кривые 1-8).

Порядок определения диэлектрической проницаемости анизотропного диэлектрического образца заключается в следующем. Исследуемый диэлектрик выбирается в виде тонкой пластины произвольных размеров и формы поперечного сечения. По кривым рис. 2 в необходимом частотном диапазоне и предполагаемом значении компонент диэлектрической проницаемости определяют геометрические размеры измерительного резонатора и изготавливают его. В макете измерительного резонатора с исследуемым диэлектрическим образцом возбуждаются собственные колебания НЕ₁₁₈ с помощью микроволнового генератора качающейся частоты (например, панорамного измерителя КСВН). При этом резонатор размещают в волноводный тракт с возможностью его вращения относительно элемента возбуждения колебаний. При произвольном расположении резонатора относительно элемента возбуждения на экране индикаторного устройства должны появиться две резонансные кривые в случае анизотропного диэлектрического образца и одна — в случае

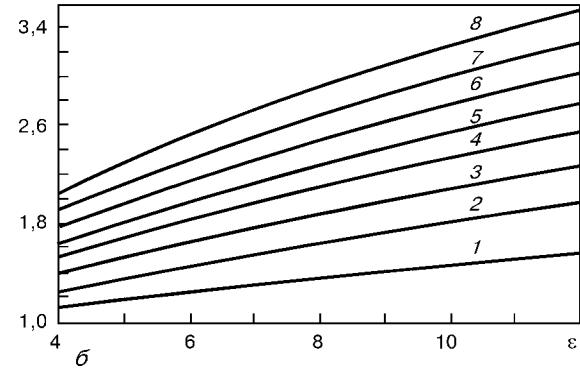
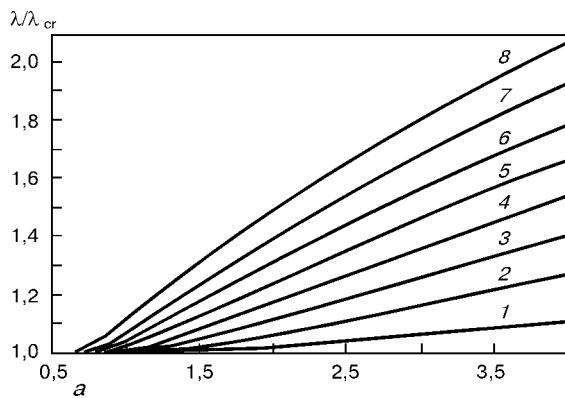


Рис. 2. Расчетные кривые зависимостей нормированной резонансной длины волны λ/λ_{cr} от диэлектрической проницаемости ϵ в диапазоне $\epsilon = 0,5 \dots 4,0$ (a) и $4 \dots 12$ (б) для $h/a = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6$ (соответственно кривые 1-8)



изотропного. Максимальная амплитуда одного из выбранных колебаний при одновременном подавлении другого достигается вращением резонатора относительно элемента возбуждения.

После полного подавления одного из двух колебаний направление одной из кристаллических осей в диэлектрическом образце устанавливают по направлению вектора электрического поля резонирующего колебания НЕ₁₁₈ относительно плоскости образца. В этих условиях измеряют также значение резонансной частоты первого резонансного колебания. Аналогично определяется второе направление кристаллической оси и значение резонансной частоты другого колебания. В случае однородного изотропного образца диэлектрика в измерительном резонаторе возбуждают электромагнитные колебания на одной резонансной частоте, не изменяющейся при вращении резонатора. Далее по измеренным значениям резонансной частоты и известным геометрическим размерам резонатора с помощью дисперсионного соотношения (1) определяют значение одной из компонент диэлектрической проницаемости исследуемого вещества и аналогично — второй. Если не требуется высокая точность, оценить значения диэлектрической проницаемости можно по расчетным кривым (рис. 2) и измеренным значениям λ/λ_{cr} в выбранном измерительном резонаторе.

Результаты экспериментальных исследований. Для иллюстрации возможностей данного метода нами были определены значения диэлектрической проницаемости изотропных материалов: фторопласта-4, плавленого и монокристаллического кварца. Измерения проводили в диапазоне частот 10...70 ГГц, для чего были изготовлены макеты измерительных резонаторов по рис. 1 с внутренними диаметрами цилиндрических отрезков волноводов 2,00...3,50 мм для миллиметрового диапазона и 5,00...15,00 мм — для сантиметрового. Образцы как изотропных, так и анизотропных диэлектриков были изготовлены в форме параллелепипеда, квадрата либо имели форму круга. Толщина диэлектрических образцов варьировалась в пределах 0,04...3,04 мм в зависимости от выбранного диапазона частот. Размеры резонаторов выполняли с точностью не менее 10 мкм, в ряде случаев образцы тщательно шлифовали.

Полученные значения диэлектрической проницаемости ϵ сведены в таблицы. В табл. 1

представлены результаты измерения диэлектрической проницаемости образцов фторопласта-4, а также соответствующих резонансных частот. Значения величины ϵ фторопласта-4 получены для одного образца в виде диска диаметром 20 мм и толщиной $h = 3,04$ мм (№1-4), а также для пленки в виде параллелепипеда толщиной 0,04 мм сечением 6×10 мм² (№5). Здесь же приведены и результаты измерения параметров диэлектрической проницаемости образцов плавленого кварца в виде диска диаметром 23 мм и толщиной 1,56 мм (№ 10-13), а также диаметром 10 мм и толщиной 0,27 мм (№ 14). Результаты измерения компонент диэлектрической проницаемости ϵ_{\perp} и ϵ_{\parallel} образцов монокристаллического кварца (табл. 2) получены для образца в виде пластины размером 20×20×2,52 мм (№ 1) и 20×20×1,51 мм³ (№ 2-5). Для сравнения в таблицах указаны также и литературные

данные. Интересно отметить, что по более старым справочным данным (№ 6 из табл. 2) значения параметров ϵ_{\perp} и ϵ_{\parallel} для образцов монокристаллического кварца заметно отличаются от точнее измеренных из более поздних работ (№ 7-8). Как видно из табл. 2, полученные нами результаты достаточно хорошо совпадают с последними литературными данными.

Для каждого из выбранных нами материалов был выполнен расчет средней квадратической погрешности измерений. При этом погрешности измерений внутреннего диаметра цилиндрической части измерительного резонатора и толщины исследуемого образца были приняты равными $\pm 0,01$ мм, а погрешность измерения частоты во всех рабочих диапазонах — ± 10 МГц. Результаты расчетов показали, что для всех условий экспериментов погрешность измерений диэлектрической проницаемости составила 1...2 %. Следует отметить, что она может быть существенно уменьшена, если повысить точность изготовления образцов и измерения их толщины; то же касается диаметров измерительных резонаторов. Точность измерений можно также повысить при использовании высокостабильного измерительного генератора.

Обсуждение результатов. Как известно, в микроволновом диапазоне наибольшее распространение получили резонансные методы измерения электрических параметров диэлектриков, основанные на обычных цилиндрическом или прямоугольном резонаторах, полностью или частично заполненных образцом диэлектрика. Из резонансных наиболее точным является метод, при котором резонатор полностью заполнен исследуемым диэлектриком. В случае сантиметрового диапазона для этого требуются довольно большие расходы материала диэлектрика, выполняемого в виде параллелепипеда, цилиндра или объема иной формы с высокой точностью. При этом возникает дополнительная проблема ввода в такой резонатор элементов связи. В случае использования в качестве образца диэлектрика малых размеров, частично заполняющего резонатор, необходимо удовлетворить условие малых возмущений, что ограничивает возможности метода.

В рассмотренной нами методике исследуемый образец ДЭ в виде пластины является частью резонатора, а пятно зондирующего поля занимает малую часть диэлектрика в связи с использованием запредельных волноводов. Та-

Таблица 1. Значения диэлектрической проницаемости образцов из различных материалов

| № п/п | Материал | f, ГГц | Диэлектрическая проницаемость ϵ | Толщина образца h , мм | Источник информации |
|-------|-----------------|-----------------------------|--|--------------------------|---------------------|
| 1 | Фторопласт-4 | 10,91 | 2,10 | 3,04 | Наши измерения |
| 2 | | 15,52 | 2,10 | 3,04 | » |
| 3 | | 25,90 | 2,12 | 3,04 | » |
| 4 | | 33,88 | 2,11 | 3,04 | » |
| 5 | | 69,74 | 2,09 | 0,04 | » |
| 6 | | 10^{-3} | 2,00 | — | [11] |
| 7 | | $10^{-7} \dots 3,0$ | 2,10 | — | [12] |
| 8 | | 10,0...25,0 | 2,08 | — | » |
| 9 | | $6 \cdot 10^{-8} \dots 3,0$ | 2,10 | — | [16] |
| 10 | Плавленый кварц | 14,86 | 3,80 | 1,56 | Наши измерения |
| 11 | | 17,76 | 3,79 | 1,56 | » |
| 12 | | 22,00 | 3,83 | 1,56 | » |
| 13 | | 25,20 | 3,79 | 1,56 | » |
| 14 | | 63,00 | 3,82 | 1,56 | » |
| 15 | | — | 3,75 | — | [11] |
| 16 | | 10,00 | 3,80 | — | [16] |
| 17 | | 3,0...25,0 | 3,78 | — | [15] |



Таблица 2. Значения компонент диэлектрической проницаемости образцов монокристаллического кварца

| № п/п | Частота, ГГц | Диэлектрическая проницаемость | | Толщина образца h , мм | Источник информации |
|-------|--------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------|
| | | ϵ_{\perp} | ϵ_{\parallel} | | |
| 1 | 14,75 | 4,46 | — | 2,52 | Наши измерения |
| | 14,53 | — | 4,63 | | |
| 2 | 20,96 | 4,46 | — | 1,51 | » |
| | 20,64 | — | 4,64 | | |
| 3 | 30,95 | 4,40 | — | | » |
| | 30,63 | — | 4,60 | 1,51 | |
| 4 | 53,13 | 4,43 | — | | » |
| | 52,25 | — | 4,64 | 1,51 | |
| 5 | 61,05 | 4,44 | — | | » |
| | 60,48 | — | 4,62 | 1,51 | |
| 6 | — | 4,27 | — | | [13] |
| | — | — | 4,34 | — | |
| 7 | 30,00 | 4,43 | — | | [14] |
| | — | — | 4,633 | — | |
| 8 | — | 4,45 | — | | [18] |
| | — | — | 4,60 | — | |

ким образом, по своим конструктивным особенностям ВДР на ортогональном пересечении волноводов является «полностью заполненным» резонатором с запредельными связями. К тому же такой резонатор достаточно просто включается в измерительный волноводный тракт. В описанных нами экспериментах выходной фланец измерительного резонатора достаточно плотно накладывался на стандартный фланец соответствующего прямоугольного волновода.

Предложенная методика позволяет проводить неразрушающие измерения и контроль параметров диэлектриков в виде тонких плоских пластин произвольных размеров. С помощью данного метода возможны локальные измерения параметров изотропных и анизотропных диэлектриков, а также обнаружение различных дефектов в изотропных диэлектрических образцах. Размер пятна электромагнитного поля, зондирующего диэлектрический образец, зависит от выбранного диапазона частот, геометрии резонансной структуры и значений диэлектрической проницаемости.

Полученные рассмотренным методом значения диэлектрических проницаемостей известных диэлектриков достаточно хорошо согласуются с литературными данными. Следует также заметить, что во всех исследованных нами условиях при вращении измерительного резонатора изменялись лишь значения амплитуды ортогональных колебаний, но не резонансных частот, что свидетельствует о том, что взаимодействие между колебаниями не прошло.

В заключение отметим, что с использованием данной методики нами была обнаружена небольшая анизотропия диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon \leq 0,6$ монокристал-

лических подложек алюмината лантана LaAlO_3 , вырезанных в плоскости (100). Пластины LaAlO_3 перспективны в качестве подложек при эпитаксии высокотемпературных сверхпроводящих пленок с последующим их использованием в микроволновом диапазоне.

1. Девятков Н. Д., Голант М. Б., Бецкий О. В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. — М.: Радио и связь, 1991. — 168 с.
2. Физические свойства системы ДНК – вода / В. Я. Малеев, М. А. Семенов, А. И. Гасан, В. А. Каишур // Биофизика. — 1993. — № 38. — С. 768–790.
3. Щеголева Т. Ю. Исследование диэлектрических характеристик биообъектов в миллиметровом диапазоне радиоволн. — Киев: Наук. думка, 1996. — 187 с.
4. Определение параметров анизотропных диэлектриков на основе волноводно-диэлектрического резонатора / Ю. Г. Макеев, В. А. Коробкин, Н. И. Пятак, Н. М. Пивень // ПТЭ. — 1978. — № 6. — С. 104–107.
5. А. с. 1117538 СССР, МКИ³ G 01 R 27/26 N 22/02. Устройство для неразрушающего контроля диэлектриков и ферритов / В. А. Коробкин, Ю. Г. Макеев. — Опубл. 07.10.84; Biol. № 37.
6. Измерение параметров диэлектрических подложек на СВЧ / Ю. Г. Макеев, А. В. Стрижаченко, В. А. Коробкин, В. Г. Де Мондерик // Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1988. — Вып. 3. — С. 48–51.
7. Измерение анизотропных диэлектрических проницаемостей алюмооксидных материалов / В. А. Новиков, А. М. Морозов, С. И. Павлов, В. А. Березин // Там же. — 1978. — Вып. 5. — С. 39–45.
8. Gilbert M., Manfred N. New method of measurement to anisotropy on microwave frequency // IEEE Trans Instr. Meas. — 1979. — № 28. — Р. 198–204.
9. А. с. 1469398 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для определения ориентации оптической оси в одноосных диэлектрических кристаллах / А. Я. Кирichenко, Т. А. Смирнова, С. Н. Харьковский, Н. Т. Черпак. — Опубл. 30.03.89; Biol. № 12.
10. Макеев Ю. Г., Моторненко А. П. Свободные аксиально-несимметричные колебания в волноводном разветвлении с магнитодиэлектрическим заполнением // ЖТФ. — 1994. — № 64, № 9. — С. 117–126.
11. Таблицы физических величин / Справ. под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.
12. Хиттель А. Р. Диэлектрики и их применение. — М.: Гос. энергиздат, 1959. — 336 с.
13. Физический энциклопедический словарь. — М.: Гос. науч. изд-во «Сов. энцикл.». — 1960. — Т. 1. — 664 с.
14. Afsar M. N. Millimeter-wave dielectric measurement of material // Proc. IEEE. — № 73, № 1. — 1985. — Р. 131–153.
15. Оптические материалы для инфракрасной техники / Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушкин, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. — М.: Наука, 1995. — 336 с.
16. Валитов Р. Я., Сретенский В. Н. Радиоизмерения на сверхвысоких частотах. — М.: Воен. изд-во Мин-ва обороны СССР, 1958. — 412 с.
17. Розбери Ф. Справочник по вакуумной технике и технологии / Под общ. ред. Р. А. Нилендера. — М.: Энергия, 1972. — 455 с.
18. Глюкман Л. И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. — М.: Радио и связь, 1981. — 232 с.

Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ,
Харьков

Поступила в редакцию
06.11.2001



УДК 621.129.12

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ПРЕДПРИЯТИЯ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ОТРАЖАТЕЛЯМИ: ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ВМЕСТО ОБРАЗЦОВ С ЗАРУБКАМИ

В. Н. ГОРБЕНКО, И. Б. КОЛБИН, М. М. ТОПЧИЙ

Установлена экспериментально возможность замены стандартных образцов предприятия с плоскими угловыми отражателями, применяемых для УЗ контроля стальных изделий, образцами с вертикальными цилиндрическими отражателями, указаны их сопоставимые размеры.

The possibility of replacing standard factory samples with plane angular reflectors applied for UT of steel parts is experimentally established by other samples with vertical cylindrical holes is established experimentally and their comparable sizes are indicated.

Одной из наиболее актуальных проблем при проведении УЗ контроля стальных изделий является изготовление рекомендованных в соответствующих документах стандартных образцов предприятия (СОП) с плоскими угловыми отражателями (зарубками). Большинство организаций, выполняющих контроль, не располагает возможностью самостоятельно изготавливать такие образцы, а приобретение необходимого для работы полного их комплекта, как правило, вызывает финансовые затруднения.

Мы поставили перед собой задачу — провести эксперименты и установить возможность применения вместо СОП с зарубками других образцов, в которых используется простой в изготовлении отражатель — вертикальное цилиндрическое отверстие (ВЦО). Для этого было необходимо проверить достоверность рекомендованной в отечественной литературе формулы для пересчета площади зарубки в эквивалентный параметр (диаметр) ВЦО [1, с. 209]. Использовали базовый комплект СОП с зарубками, предназначенный для проведения УЗ контроля энергетического оборудования и трубопроводов. Кроме того, у нас была возможность изготовления практически любых необходимых для исследований образцов (как с ВЦО, так и с зарубками). Параметры преобразователей, примененных в процессе выполнения работы, соответствовали рекомендуемым в табл. 8 из [2].

Выполненные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1. Приведенная в [1] формула: $d_{\text{в.ц.о}} \approx 6,5(S_3 - 1)$, где $d_{\text{в.ц.о}}$ — диаметр вертикального цилиндрического отражателя; S_3 — площадь зарубки, не совпадает с полученными нами экспериментальными данными.

2. При переходе от настройки по зарубкам к настройке по ВЦО наиболее удобно (по технологическим причинам) использовать отверстия с такими размерами, уровень сигнала от которых на

6 дБ меньше, чем уровень сигнала от рекомендованных в технической документации зарубок. Отсюда амплитуда сигнала от отверстия должна соответствовать контролльному уровню чувствительности, который устанавливают при настройке с помощью зарубки:

$$A_{\text{в.ц.о}} = A_3 - 6 \text{ дБ}.$$

Поэтому в случае применения образцов с ВЦО, изготавливаемых в соответствии с установленными нами далее в п. 3 соотношениями, при настройке браковочного уровня чувствительности необходимо вносить поправку $\Delta A = 6 \text{ дБ}$.

3. С учетом поправки, вносимой по рекомендации п. 2, в диапазоне площадей зарубок от 1,6 до 3,0 мм^2 значения диаметров (в мм) ВЦО, сопоставимых с этим зарубками, почти совпадают со значением их площадей. В диапазоне от 5 до 7 мм^2 значения диаметров меньше значений площадей зарубок приблизительно в 2 раза, а в диапазоне от 3,75 до 5,00 мм^2 — на 1,0...1,7 мм. При этом необходимо отметить, что сравнение эквивалентных размеров отражателей в диапазонах 1,6...3,0 и 3,75...5,00 мм^2 проводилось с помощью преобразователей частотой 5 МГц, а в диапазоне 5...7 мм^2 — 2,5 МГц.

Размеры ВЦО, которые можно сопоставить с определенными размерами зарубок, были установлены для каждой из площадей зарубок, рекомендованных в [2] для диапазона толщин образцов от 3,5 до 20,0 мм.

Изложенные выше факты свидетельствуют о возможности замены СОП с зарубками на образцы с ВЦО.

1. *Метод акустического контроля металлов / Н. П. Аleshin и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.*
2. *ОП № 501 ЦД-75. Основные положения по ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений котлоагрегатов и трубопроводов тепловых электростанций. — М.: ЦНИИТМАш, 1977. — 168 с.*

*КП «ХТС», ОАО «Теплоэнергомонтаж»,
Харьков*

*Поступила в редакцию
12.12.2001*

ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ ТА ЇХ ВИРІШЕННЯ В ЗАКОНОДАВЧІЙ СФЕРІ УКРАЇНИ

Ю. К. БОНДАРЕНКО

Показані принципові положення нового пакету законів України, прийнятих у 2001 р. Наведено підходи та методи вирішення проблем забезпечення якості виготовленої продукції та підтвердження її відповідності умовам нормативних документів, що допоможе підвищити конкурентоздатність вітчизняних виробів, технологічних процесів та технічних послуг.

Basic principles of the new package of laws in Ukraine adopted in 2001 are stated. Approaches and methods are described to solve the problems of ensuring the quality of products and verifying their compliance to the standards, this helping to improve the competitiveness of the local products and technologies and technical services.

Ринкові перетворення, які супроводжують процесс становлення України як незалежної держави, виявили значні структурні диспропорції у вітчизняній промисловості. Через це на шляху реалізації державної політики інтеграції до ЄС та вступу до Світової організації торгівлі постало завдання спрямувати промислову політику України на здійснення структурних зрушень у промисловості, зокрема, в її високотехнологічних галузях, досягти світової якості промислової продукції (за умови її низької собівартості) та високого рівня сервісу (технічних послуг).

Недавно ухвалені закони України від 17.05.2001 р. «Про стандартизацію» (№ 2408), «Про підтвердження відповідності» (№ 2406) та «Про акредитацію органів з оцінки відповідності» (№ 2407) трансформували існуючу систему стандартизації та сертифікації. Фахівці навіть заявили про здійснення революції у цій сфері, але підприємці сприйняли ці заяви дещо насторожено. Трудність передусім полягає у тому, що ці закони частково змінили принципи стандартизації й сертифікації.

Найважливіше нововведення — стандарти перестають бути обов'язковими (ст. 12 Закону № 2408), якщо вони не входять до технічних регламентів (це діє тільки після введення технічних регламентів на продукцію). Раніше виробник продукції, що відповідає певним стандартам, повинен був звіряти кожний параметр продукції з параметрами, що передбачені державними стандартами. Тепер дотримання всіляких параметрів і вимог буде добровільною справою. Ось чому ті спеціалісти, які детально ознайомилися з вказаними законами, відзначили, що більш за все вони будуть відповідати вимогам інженерів, конструкторів, технологів, дизайнерів та інших фахівців.

Втім новий принцип — добровільність — застосовується з застереженнями, які передбачені вже згаданою ст. 12 Закону № 2408. Відповідно до них застосування стандартів чи їх окремих положень стає обов'язковим:

для всіх суб'єктів господарювання, якщо це передбачено технічними регламентами чи іншими нормативно-правовими документами;

для учасників угоди (контракту) щодо розроблення, виготовлення чи постачання продукції, якщо в ній є посилання на певні стандарти;

для виробника чи постачальника продукції, якщо він склав декларацію про відповідність продукції певним стандартам чи застосував позначення цих стандартів у її маркуванні;

для виробника чи постачальника, якщо його продукція сертифікована щодо дотримання вимог безпеки.

У цих положеннях з'явилися абсолютно нові поняття, які не відомі вітчизняним підприємцям, але відіграватимуть вирішальну роль у сфері виробництва, експлуатації, стандартизації та сертифікації.

Насамперед звертає на себе увагу термін **технічний регламент**, якому дає визначення Закон № 2408. Мова йде про звичайний нормативно-правовий акт, прийнятий органом державної влади, що встановлює технічні вимоги до продукції, процесів чи послуг безпосередньо або через посилання на стандарти чи відтворюють їх зміст.

Основне призначення технічного регламенту — саме він, а не стандарти, визначатиме обов'язкові вимоги до продукції. Випереджаючи закономірне запитання про відмінність попередніх стандартів та нових технічних регламентів, відразу ж відсилаємо читача до ст. 13 Закону № 2408. У ній визначено, що обов'язкові вимоги, які містяться в технічних регламентах, стосуються тільки безпеки, яка у цьому законі розглянута у більш широкому розумінні — захист людей (їх життя, здоров'я та майна), тварин, рослин тощо. Це означає, що в регламентах не повинно бути інших вимог.

Питання про технічні регламенти висвітлюється і в Законі № 2406. Згідно з його ст. 7 процедура підтвердження відповідності в законодавчо регульованій сфері (раніше — обов'язкова сертифікація) є обов'язковою для виробника та постачальника уповноваженого органу з сертифікації. У законодавчо нерегульованій сфері (раніше — при здійсненні добровільної сертифікації) ця процедура може виконуватися на добровільних засадах. Так от, саме технічними регламентами запроваджується процедура підтвердження відповідності в законодавчо регульованій сфері для окремих видів продукції, яка може становити небезпеку для людей (їх життя та здоров'я), тварин, рослин, а також для майна та довкілля.

Після введення в дію технічних регламентів Держстандарт України повинен офіційно опубліку-

вати перелік національних стандартів, застосування яких може сприйматися як доказ відповідності продукції вимогам технічних регламентів (ст. 9 Закону № 2406). Це можна сказати й інакше: не хочеш мати проблем з доказом безпеки своєї продукції — добровільно дотримуйся відповідних стандартів. В цій же статті зазначається, що виробник чи постачальник також має право підтвердити відповідність продукції вимогам технічних регламентів іншими, ніж відповідність стандартам, шляхами. Йдеться про ще одне нововведення, передбачене Законом № 2406: відповідність продукції вимогам, встановленим законодавством, тепер можна підтвердити не тільки сертифікатом відповідності, як було раніше, а й декларацією про відповідність, чого раніше не було. Ця декларація не зайде, адже за її допомогою виробник під свою повну відповідальність документально засвідчує, що продукція відповідає встановленим законодавством вимогам. Він несе відповідальність за внесення у декларацію недостовірних відомостей. Але виробник може скласти таку декларацію тільки за умови, якщо це передбачено технічним регламентом (ст. 10 Закону № 2406). Якщо до продукції ставляться більш високі вимоги щодо безпеки, то тоді застосовується додаткова сертифікація. Вона проводиться відповідно до вимог технічних регламентів з підтвердженням відповідності.

Всі новації так або інакше описані в європейському аналогі по стандартизації і сертифікації. Вони допоможуть зробити показники якості та безпеки продукції, що виготовляється українськими виробниками, відповідними вимогам європейських і міжнародних стандартів.

Завдяки нововведенням буде більшим вибір схем (модулів) підтвердження відповідності за рахунок введення найбільш поширеного у світі **модульного підтвердження відповідності**. Суть цієї системи у тому, що підприємець самостійно може вибирати схему (модуль) сертифікації. Перелік можливих модулів за принципом пропорційності встановлено в технічних регламентах. Враховуються такі аспекти: тип продукції, характер пов'язаних з нею ризиків; економічна інфраструктура; типи і важливість виробництва для забезпечення високого рівня захисту (тобто декларувати чи сертифікувати).

Принцип пропорційності також вимагає:

1) відсутності у технічних регламентах процедур, непотрібних та обтяжливих для виробників. Вибір процедури підтвердження відповідності доволі зручний, оскільки виробник сам має право вибирати найбільш підходжу для нього процедуру. Всього прийнятих модулів (процедур) вісім, і вони враховують усі особливості виробництва;

2) значно менше втручання державних органів контролю у виробничу діяльність підприємств, бо контроль за якістю продукції переміщується безпосередньо на ринок, тобто у сферу обігу;

3) у підприємства з'явиться економічний стимул працювати за стандартами і сертифікатами. У прикінцевих положеннях Закону № 2406 передбачено зміни в законі «Про оподаткування прибутку підприємств». Так, згідно з ними **суми витрат, пов'язаних з підтвердженням відповідності** про-

дукції, систем якості та управління якістю тощо, **відносяться до складу валових витрат платників податків**.

Як зазначено у прикінцевих положеннях Закону № 2408, державні та інші стандарти є чинними до припинення їх дії або до прийняття відповідних стандартів, які відповідають вимогам цього Закону. Тому **вимоги державних стандартів є обов'язковими до виконання і чинні до прийняття технічних регламентів**.

У технічних регламентах буде визначено перехідний період, після закінчення якого нові вимоги наберуть чинності. Поки що не можна точно визначити, яким він буде. Але відомо, що він буде встановлений тільки після переговорів з виробниками та з урахуванням їхньої думки — це означає, що ще є час для роздумів. Виробники продукції можуть його використати для акумулювання коштів, які знадобляться для вдосконалення технологічних процесів, щоб останні відповідали новим вимогам. Незважаючи на те, що стандарти не будуть обов'язковими, їх застосування працюватиме на авторитет підприємства. Відстрочення торговельним підприємствам буде надано для інвентаризації товару та продукції, виготовлених за старими стандартами, та найшвидшого їх продажу.

Після набрання новими вимогами чинності у підприємця є можливість деякий час продовжувати працювати за попередніми стандартами. Відповідно до ст. 13 Закону № 2408 «у разі виникнення об'ективних перешкод для застосування певних обов'язкових вимог національного стандарту виробник чи постачальник продукції зобов'язаний повідомити про це центральний орган виконавчої влади у сфері стандартизації». Останній вивчає обґрутованість такого звернення, проводить — у разі потреби — експертизу (випробування) і за наявності підстав після узгодження з відповідним центральним органом виконавчої влади, що здійснює контроль за дотриманням відповідних вимог національного стандарту (наприклад, Держкомітетом по будівництву), може дати дозвіл з обмеженим строком дії. Та ця прогресивна норма затирається деякими обставинами. По-перше, дозвіл на продовження праці за старими стандартами, навіть якщо є на те підстави, даватиме Держстандарт України. По-друге, не вказано термін, у межах якого Держстандарт України зобов'язаний прийняти відповідне рішення. Тож питання частково вирішено Постановою Кабміну України № 2 від 3 січня 2002 р. «Про порядок та терміни дії галузевих стандартів і прирівняння до них інших нормативних документів колишнього СРСР».

У з'язку із впровадженням нових законів у сфері стандартизації відкрилися нові можливості й для експортерів. У тій самій ст. 13 Закону № 2408 передбачено: якщо угодою (контрактом) визначено інші вимоги, ніж ті, що встановлені технічними регламентами України, дозволяється застосовувати норми угоди, коли вони не суперечать українському законодавству, яке регламентує процес виготовлення продукції, її зберігання і транспортування.

Як зазначено у перехідних положеннях нових законів, попереднє законодавство про стандарти-

КАЧЕСТВО И БЕЗОПАСНОСТЬ

зацію і сертифікацію діє в частині, що не суперечить цим новим законам. Тому положення про відповіальність, передбачені декретами КМУ «Про стандартизацію і сертифікацію» та «Про державний нагляд за додержанням стандартів, норм і правил та відповіальність за їх порушення» залишаються чинними, оскільки ніякі зміни новими законами не передбачені.

Хочеться відзначити ще й те, що революційні зміни у сфері стандартизації та сертифікації, про які так багато говорять, зовсім не означають відміну обов'язків виробника та постачальників продукції, що підлягає підтвердження на відповідність у законодавчо регульованій сфері. Згідно зі ст. 13 Закону № 2406 виробник повинен, зокрема, наносити на продукцію національний знак відповідності в законодавчо регульованій сфері і компенсувати споживачам продукції завдані збитки в разі виявлення невідповідності продукції вимогам, зазначенним у декларації про відповідність та (або) сертифікаті. Цей порядок затверджено в «Положенні про порядок накладання та стягнення штрафів за порушення законодавства про захист прав споживачів» (Постанова Кабміну України від 17 серпня 2000 р., № 1177). **Постачальник зобов'язаний**

реалізовувати продукцію за умови наявності копії сертифіката відповідності та (або) копії декларації і припинити реалізацію продукції, якщо вона не відповідає вимогам нормативних документів.

Події, що відбуваються останнім часом на нашій планеті, з усією очевидністю демонструють стирання міждержавних кордонів в економічній та інших сферах діяльності. Зважаючи на це, єдність та координація дій країн Європи, до яких по праву належить і наша держава, мають стати основою розвитку та процвітання цього регіону. Реалізація політики інтеграції України до європейської спільноти є, безперечно, вірно обраним шляхом розбудови української економіки.

Останнім часом прийнято ряд постанов Кабміну України (№ 485 від 11.04.02 р. та № 376 від 28.03.02 р.) з метою поширення дії розглянутих вище законів. Перша постанова присвячена впровадженню вартості робіт по підтвердження відповідності виготовленої продукції в законодавчо регульованій області. В другій йде мова про надання органам по сертифікації повноважень на проведення робіт по підтвердження відповідності щодо законодавчо регульованої області.

*Ін-т електrozварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
Київ*

*Надійшла до редакції
22.01.2002*

Научно-производственная фирма Специальные Научные Разработки



Направления деятельности — разработка, изготовление приборов и установок НК механических свойств, структуры, напряженно-деформированного (усталостного) состояния, ресурса металлопродукции и оборудования по магнитным характеристикам металла: коэрцитиметры, аустенометры, многопараметрические анализаторы петли магнитного гистерезиса. Магнитометры универсальные и специализированные (для МПД), включая дефектоскопические. Приборы и установки УЗ-толщинометрии и дефектоскопии, работающие ЭМА-методом бесконтактно, по горячему металлу, без зачистки и без контактной жидкости (через слой защитного покрытия или воздушный зазор).

Методики применения всех этих средств НК.

Область применения — производство прокатной металлопродукции и оборудования машиностроения, текущее состояние оборудования, сосудов давления и др. металлоконструкций в эксплуатации, их диагностика, включая экспертизу технадзора.

Многоканальные системы технологической сигнализации, сбора, обработки и хранения информации для таких объектов, как энергетические котлы, турбины, генераторы, грузоподъемные машины общего и специального назначения.

**г. Харьков, тел./факс (0572) 64-36-13, тел. 64-99-85, 26-32-06
E-mail: bezlyudko@yahoo.com**

В УКРАИНСКОМ ОБЩЕСТВЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

УЧАСТИЕ ДЕЛЕГАЦИИ УО НКТД В 8-Й ЕВРОПЕЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ



**8th ECNDT
Barcelona 2002**

А. Л. Шекеро, ученый секретарь УО НКТД

С 17 по 21 июня 2002 г. в Барселоне (Испания) состоялась **8-я Европейская конференция по неразрушающему контролю**, в которой участвовала делегация Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД).

Предыдущая Европейская конференция по НК проходила в 1998 г. в Копенгагене (Дания) и тогда специалисты Украины впервые приняли участие в мероприятии такого масштаба в составе делегации УО НКТД, численность которой составляла 30 человек. С тех пор участие членов УО НКТД в международных конференциях стало традиционным. Так, в 2000 г. во Всемирной конференции по НК в Риме в составе делегации УО НКТД насчитывалось уже 40 человек. На этот раз УО НКТД организовало поездку и участие в работе конференции 65 специалистов, представляющих предприятия и организации — коллективные члены УО НКТД из разных регионов Украины.

Северный регион:

- Институт электросварки (ИЭС) им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев;
- Институт проблем прочности НАН Украины, Киев;
- Национальный авиационный университет, Киев;
- Институт угольной промышленности «Укргипроект», Киев;
- НПФ «Ультракон», Киев;
- НПФ «Диагностические приборы», Киев;
- Ассоциация «Укрэксперт», Киев.

Западный регион:

- Физико-механический институт (ФМИ) им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов;
- Центр «Леотест-Медиум», Львов;
- Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ИФНТУНГ);
- НПФ «Зонд», Ивано-Франковск;

Центральный регион:

- АО «НИИАчермет», Днепропетровск;
- НПП «Машиностроение», Днепропетровск;
- Приднепровский центр диагностики объектов и сооружений, Днепропетровск;
- ЗАО «Научно-производственный диагностический центр», Кривой Рог.

Восточный регион:

- СКБ «Полисвит» ПО «Коммунар», Харьков;
- НТЦ радиационного приборостроения НТК «Институт монокристаллов», Харьков;
- Восточноукраинский государственный университет, Луганск;
- ООО «Интрон-Сэт», Донецк;

Южный регион:

- Одесский припортовый завод;
- ЧФ «Рембудпроект», Одесса;
- Черноморский ЭТЦ, Одесса.

В работе конференции приняли участие также представители Завода им. В. А. Малышева; АО «Укргазпром», Госнадзорохранруды Украины; Черновицкого ЭТЦ, НПФ «Колоран» и других организаций.

В состав делегации вошли 11 членов Правления УО НКТД: председатель Общества В. А. Троицкий; заместители председателя — О. М. Карпаш и А. В. Мозговой; ученый секретарь — А. Л. Шекеро; члены бюро Правления — Н. Г. Белый, А. Н. Козин, Ю. Н. Посьтайко; члены Правления — И. П. Белокур, И. В. Павлий, В. И. Радько, В. Н. Учанин.

Церемония торжественного открытия конференции состоялась утром 18 июня. Конференцию открыл Президент Испанского общества неразрушающего контроля Эмилио Ромаро. Затем с приветственным словом к делегатам конференции обратились Президент EFNDT Роджер Рош и Президент ICNDT Джузеппе Нардони.

На конференции представлено 416 докладов от 45 стран. Доклады были разделены на секционные



Делегация УО НКТД на 8-й Европейской конференции по НК в Барселоне

и стендовые и распределены по 19 техническим секциям в соответствии с областями практического применения, разработок и исследований. На рис. 1 показано распределение докладов по странам, которые представляют их авторы; на рис. 2 — по методам неразрушающего контроля, физическим принципам и решению проблем; на рис. 3 — по областям практического применения и направлениям исследований.

Как видно из рис. 1, по количеству представленных докладов Украина разделила 6 место с Великобританией, хотя справедливо ради следует отметить, что все наши доклады были стендовыми, что связано с недостаточным владением английским. Из методов контроля, бурно развивающихся в настоящее время, лидером уже традиционно является ультразвуковой. Из поверхностных методов, как следует из рис. 2, первенство принадлежит вихреветковому контролю. Что касается областей технического применения разработок, то здесь все большую роль играет использование результатов НК для прогнозирования остаточного ресурса конструкций.

Перечень и тезисы докладов, а также CD-ROM с полными текстами докладов есть в Секретариате УО НКТД и доступны для ознакомления (тел. (044) 261-51-96).

Украинские специалисты — авторы или соавторы 19 докладов, перечисленных ниже.



Заседание ICNDT открывает его Президент доктор Джузеппе Нардона

1. Неразрушающая диагностика металлических и композитных структур, используя голографию, интерферометрию и ширографию. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Олейник Е. М., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины; Тихий В. Г., КБ «Южное», Днепропетровск.*

2. Контроль дефектов в сварных элементах конструкций, работающих в условиях космоса. *Троицкий В. А., Загребельный В. И., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев.*

3. Влияние технологического непровара на достоверность ультразвукового контроля сварных швов цилиндрических изделий. *Шекеро А. Л., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев.*

4. Контроль герметичности сварных соединений тепловых труб. *Посыпайко Ю. Н., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев.*

5. Трубные образцы для комплексной оценки материала трубчатых теплообменников методами механики разрушений и неразрушающего контроля. *Учинин В. Н., Осташ О. П., ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов.*

6. Исследование вихреветковых преобразователей с высоким разрешением для обнаружения и определения размеров подповерхностных дефектов. *Учинин В. Н., G. Mook, T. Stepinski.*

7. Методы и средства ультразвуковой компьютерной томографии для реконструкции полей тензорных напряжений. *Кошевои В., ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов.*

8. Электромагнитный метод и аппаратура для контроля коррозии подземных трубопроводов. *Джала Р. М., Вербенец Б. Я., ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины; Балашов А. М., «Приднепровские нефтепроводы»; Банахевич Ю. В., Коваль Р. И., Винник О. И., «Львовтрансгаз».*

9. Структурно-логический метод для обработки информации неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из полимерных композитных материалов. *Мозговой А. В., Днепропетровский государственный ун-т.*

10. Стратегия поведения при решении проблем проведения входного и выходного контроля. *Малайчук В. П., Мозговой А. В., Днепропетровский государственный ун-т.*

11. Устройство УАЕКМ-т для акусто-эмиссионного контроля нагруженных стальных конструкций. *Кулиш В. А., Крылов Э. С., Сургай Н. С., Радченко В. В., УкрНИИпроект, Киев.*



Перед началом церемонии торжественного открытия: И. П. Белокур, Президент РОНКТД В. В. Клюев, Президент ICNDT Дж. Нардона, Президент УО НКТД В. А. Троицкий, Президент Чешского общества НК Павел Мазал, В. И. Загребельный, Н. Г. Белый

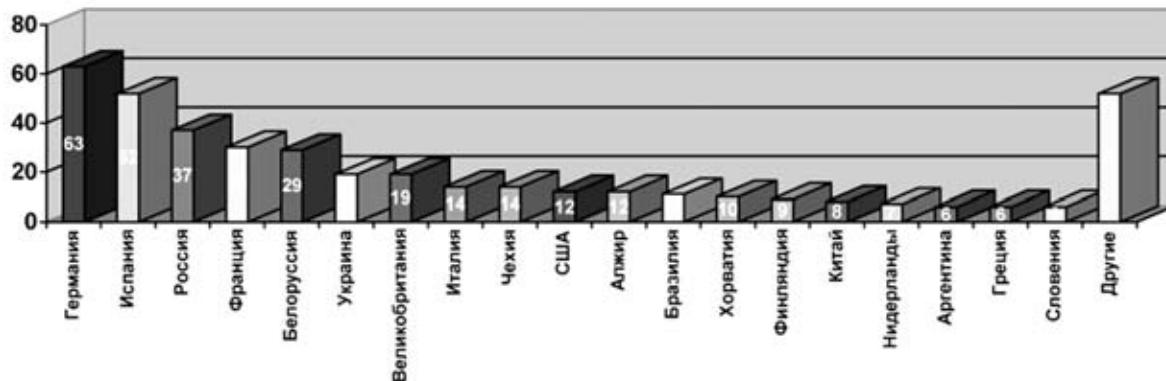


Рис. 1. Распределение количества докладов по странам

12. Моделирование и обработка нестационарного акустического сигнала для выделения усталостных трещин. *Бурау Н. И.*, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.

13. Применение акустической эмиссии для прогнозирования предела прочности в композитных материалах. *Тихий В. Г., Ситало В., Борщевская Д.*, КБ «Южное», Днепропетровск.

14. Разработка математических моделей текучих материалов для градуировки гигрометров. *Невзлин Б., Дьяченко Ю., Сырцов А. И.*, Восточноукраинский национальный ун-т.

15. Акустический контроль качества резьбовых соединений. *Карпаш О. М., Ступура А. И.*, ИФНТУНГ, Ивано-Франковск.

16. Теория ослабления акустического поля и микрокомпьютерный ультразвуковой дефектоскоп. *Давиденко В. Ф., Ткачев В. С.*, НПП «Радиус», Киев.

17. Детекторы для сканирующей интроскопии «сцинтилляторно-фотодиодного» типа. *Рыжиков В. Д., Лисецкая Е. К., Козин Д. Н., Ополонин А. Д., Клиницкая В. З.*, НТЦ радиационного приборостроения НТК «Институт монокристаллов», *Свищ В. М.*, СКБ «Полисвіт», Харьков.

18. Сертификация персонала, выполняющего неразрушающий контроль объектов повышенной опасности в Украине. *Радько В. И.*, Ассоциация «Укрэксперт», Киев.

19. Новые подходы к неразрушающему контролю текущего состояния и остаточного ресурса сосудов давления. *В. Ф. Мужицкий, Б. Е. Попов, Долинский В. М.*, «УкрНИИхиммаш», Харьков; *Без-*

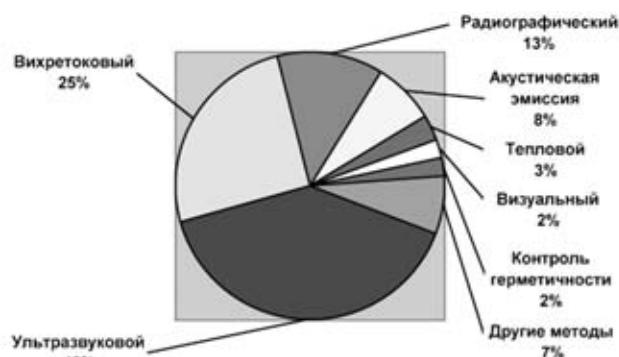


Рис. 2. Распределение количества докладов по методам НК

людько Г. Я., НПФ «Специальные научные разработки», Харьков.

Среди организаций по количеству представленных докладов можно выделить **ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины** и **ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины** — по 4 доклада. Среди членов делегации УО НКТД хотелось бы персонально отметить активное участие во всех мероприятиях конференции **В. Н. Учанина** — представлении двух стендовых докладов, заседаниях технических секций, работу на выставке с потенциальными партнерами по научной работе, заседании ICNDT.

Как всегда, во время конференции работала очень интересная выставка современных средств неразрушающего контроля, где были представлены самые последние новинки: приборы и оборудование для НК. В выставке принимали участие такие известные фирмы, как Agfa, DELTA-Test, ELY Che-

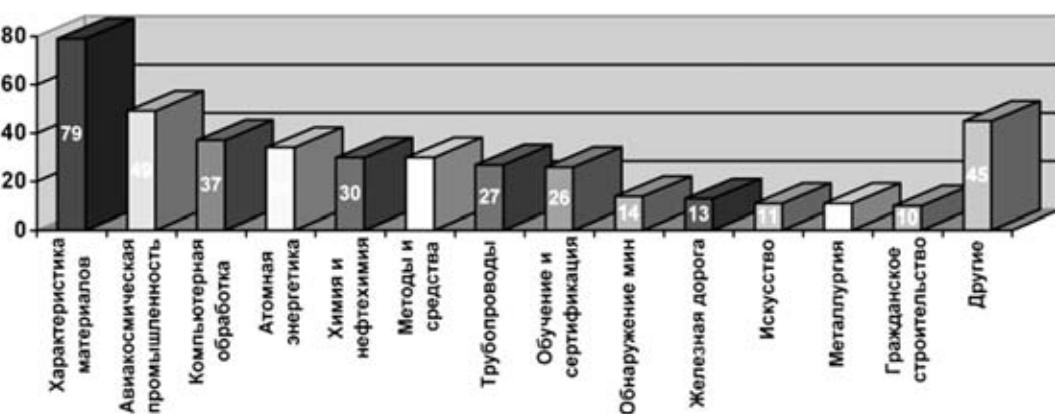


Рис. 3. Распределение количества докладов по областям практического применения



ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

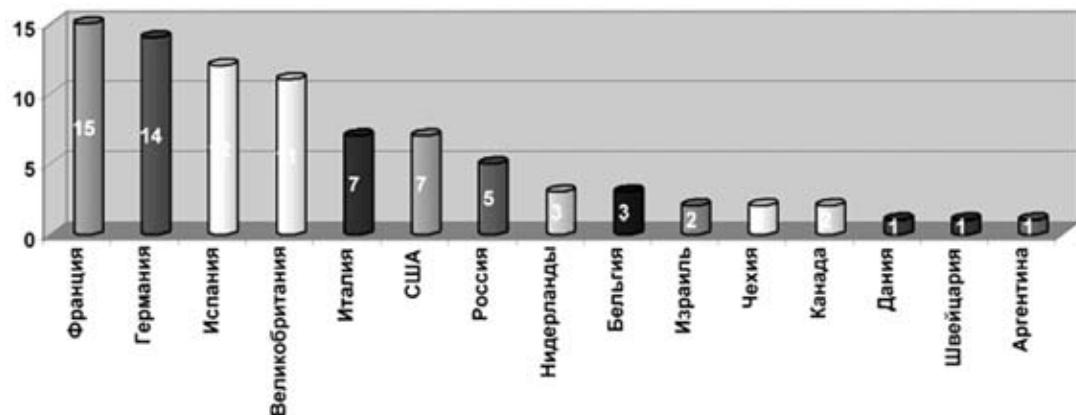


Рис. 4. Количество экспонентов по странам

mical, FORCE Institute, Gilardoni, Helling, Hosking, Imasonic, Institute Dr. Forster, Kodak, Krautkramer, Magnaflux, Olimpus Industrial, Panametrics, Sonatest, Stress Tel, Technatom, Tiede, Zetec и многие другие. Всего в выставке приняли участие 86 фирм из 15 стран мира (рис. 4). Эти фирмы представили оборудование по различным методам методам НК (рис. 5).

Фирмы-производители средств НК постоянно следят за спросом на рынке НК и очень оперативно реагируют на него разработкой нужных потребителю средств контроля. По представленной на рис. 5 диаграмме можно достаточно точно судить о распространенности в Европе определенных методов НК. Как явствует из диаграммы, лидирующие позиции на рынке средств НК продолжают занимать ультразвуковой и радиографический методы. И совсем немного уступает им предложение на приборы для вихревокового контроля.

По договору с Испанским обществом неразрушающего контроля — организатором конференции — и по сложившейся на предыдущих конференциях традиции Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики имело свой стенд на выставке. Вопросы организации такого стендла поднимались на Заседаниях Правления УО НКТД в Ялте (сентябрь 2001 г.) и в Киеве (май 2002 г.). Нужно сказать, что наш стенд выглядел достойно. Специально к Барселонской конференции по решению Правления впервые в истории УО НКТД был разработан и изготовлен флаг Об-

щества, который отныне будет сопровождать все мероприятия, проводящиеся под эгидой УО НКТД. В оформлении стендла приняли участие: Национальный авиационный университет, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Завод им. В. А. Малышева, Институт угольной промышленности «УкрНИИпроект», НПФ «Зонд», за что их представителям: **Белокуру И. П., Майдан З. А., Троицкому В. А., Любченко А. П., Крылову Э. С., Кулишу В. А., Карпашу О. М., Зинчаку Я. М.** Правление и Секретариат УО НКТД выражают благодарность.

В рамках конференции состоялись также заседания Международного комитета по НК (ICNDT). УО НКТД на этих заседаниях представляли В. А. Троицкий, А. Л. Шекеро и В. Н. Учанин.

Решение об участии делегации УО НКТД в 8-й Европейской конференции по НК в Барселоне было принято на заседании Правления общества (Ялта, сентябрь 2001 г.). Учитывая пожелания потенциальных участников поездки, там же было решено организовать два варианта поездки: самолетом и автобусом. Организация поездки самолетом была поручена А. Н. Козину, а ответственным за организацию автобусной поездки стал В. И. Загребельный. Маршрут автобусной поездки включал следующие города: Будапешт, Верону, Милан, Ниццу, Монако, Барселону, Париж, Вену. Максимальное содействие в организации обоих вариантов поездки было оказано со стороны председателя УО НКТД

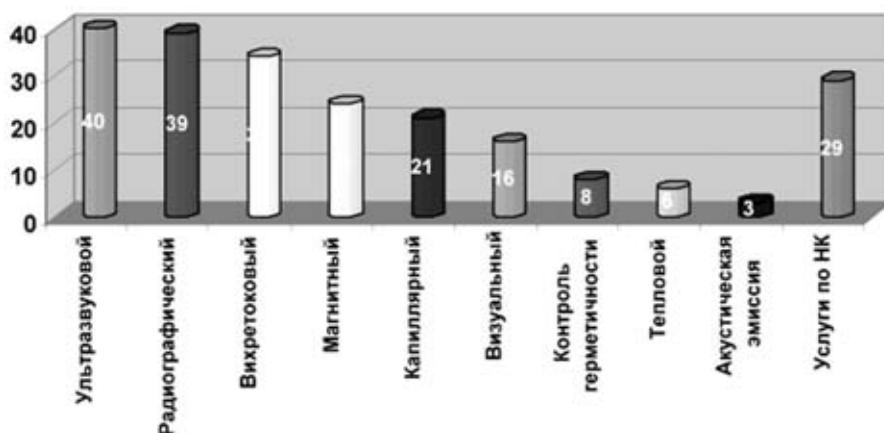


Рис. 5. Количество фирм, представивших оборудование по различным методам НК



В. А. Троицкого и сотрудников Секретариата общества.

Подробные впечатления об автобусной поездке в Барселону будут опубликованы в № 3 «Информационного бюллетеня УО НКТД», а также в разделе «Новости» на сайте УО НКТД:

www.usndt.com.ua.

По общему мнению участников, поездка на 8-ю Европейскую конференцию по неразрушающему контролю по-настоящему удалась, была очень пло-

дотворной и полезной в научном и производственном аспекте, а также очень увлекательной и познавательной с точки зрения знакомства с историей и культурой красивейших европейских городов. Мы расстались с надеждой встретиться вновь, чтобы продолжить освоение Европы. Ведь уже в 2006 г. в Берлине состоится следующая, 9-я Европейская конференция по НК, в которой УО НКТД уже традиционно примет участие и планирует организовать поездку своих специалистов.

УКРАЇНСЬКЕ ТОВАРИСТВО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ



UKRAINIAN SOCIETY for NON-DESTRUCTIVE TESTING and TECHNICAL DIAGNOSTICS

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УНДТ),
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Івано-Франківський
національний технічний університет нафти і газу,
Київський науково-дослідний інститут судових експертіз,
Науково-виробнича фірма «Зонд»,
НВФ «Ультракон-сервіс» та
ЦЕНТР «ЛЕОТЕСТ-МЕДІУМ» (організаційне бюро конференції)
проводять з 17 по 22 лютого 2003 р.

VIII Міжнародну науково-технічну конференцію-виставку ЛЕОТЕСТ - 2003 ФІЗИЧНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ СЕРЕДОВИЩ, МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦІЇ

- теорія і практика фізичних методів контролю середовищ, матеріалів та виробів;
- діагностичні аспекти застосування неруйнівних методів контролю відповідальних конструкцій в експлуатації, питання надійності виробів та конструкцій;
- первинні перетворювачі та методи обробки сигналів, питання метрологічного забезпечення в фізичних методах контролю;
- автоматичні системи та прилади контролю якості виробів;
- фізичні методи контролю в криміналістиці, судовій експертизі та митній справі;
- фізичні методи контролю біологічних об'єктів, екологічний контроль, вимірювання параметрів середовищ, в т. ч. потоків рідини, газу та плазми, плазмових технологічних процесів;
- фізичні методи контролю історичних пам'ятників, археологічних знахідок та творів мистецтва;
- науково-організаційні та економічні проблеми, питання лабораторій, сертифікації продукції, підготовки та атестації персоналу з неруйнівного контролю.

МІСЦЕ ПРОВЕДЕНИЯ

Сел. Славське Львівської області, пансіонат «Бойківщина», вул. І. Франка, 61 А

Сел. Славське — відомий зимовий гірськолижний курорт, розташований в горах Карпати на відстані 130 км від Львова та залізнична станція на трасі Харків – Київ – Львів – Стрий – Славське – Ужгород – Прага (Будапешт, Белград).

ОСНОВНІ ТЕРМІНИ

До 15 січня 2003 р. — направлення заявики на участь і двох примірників статті з актами експертизи за адресою: 79000, м. Львів — поштамп, а/с 6071, Учаніну В. М.

До 20 січня 2003 р. — оплата за участь (до 15 грудня 2002 р. — пільгова оплата за участь).

ЗАЯВКИ УЧАСНИКІВ КОНФЕРЕНЦІЇ

В заявці вказати прізвище, ім'я, по-батькові участника, місце роботи, вчену ступінь та звання, службову, домашню адреси, номер телефона, адресу електронної пошти, номер та дату платіжного доручення на перерахування оргвнеску, номер свідоцтва та індивідуальний податковий номер для платників податку на додану вартість (ПДВ).

ДОВІДКИ

Тел.: (0322) 75-08-69 (Учанін Валентин Миколайович) або 63-32-00 (Кулинич Ярослав Петрович).

Телефон та факс в вихідні дні та вечірній час — (0322) 75-08-69; E-mail: leotest@org.lviv.net або kulynych@ipm.lviv.ua

Оргкомітет ЛЕОТЕСТ-2003 — ЦЕНТР «ЛЕОТЕСТ-МЕДІУМ» (79017 Львів, вул. Ген. Грицая, 11-5).



НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

ВИСИЛОВСКОМУ НИКОЛАЮ ГРИГОРЬЕВИЧУ — 65 лет



1 апреля 2002 г. Висиловскому Николаю Григорьевичу, заведующему лабораторией технической диагностики ООО «Серен» Ассоциации предприятий «ЕВРОМАРКЕТ» исполнилось 65 лет, из которых 35 лет были наполнены практической, научной и преподавательской деятельностью.

Николай Григорьевич закончил Харьковский политехнический институт. В последующей своей практической деятельности на Ждановском заводе тяжелого машиностроения он принимал участие в разработке и изготовлении современных машин для народного хозяйства и создании технологических комплексов для ракетно-космической и оборонной техники. Проведенные им испытания опытных образцов по специальным программам и методикам, а также разработанные предложения по результатам выполненных работ позволили обеспечить требуемую надежность ответственных элементов выпускаемых комплексов и машин.

Результаты указанных работ составили основу его кандидатской диссертации, которую он успешно защитил в 1979 г.

Комплексный подход к решению проблем создания новой техники путем обеспечения обратной связи между проектированием, изготовлением и эксплуатацией явилось характерной особенностью его деятельности. Николаем Григорьевичем разработан метод ускоренных ресурсных испытаний цистерн на автомобильном ходу в сбере. Для этих целей создано устройство, обеспечивающее воспроизведение широкого спектра нагрузок, эквивалентных эксплуатационным. При усталостных испытаниях для регистрации начальной стадии разрушения им предложено устройство, использующее метод акустической эмиссии.

Накопленные знания и опыт Николай Григорьевич успешно применил при техническом диагностировании Царь-колокола в Московском Кремле, проведенного совместно с учеными Москвы и Ростова-на-Дону.

Практическую и научную деятельность на производстве Н. Г. Висиловский совмещает с преподаванием в Ждановском металлургическом институте и Мариупольском филиале Одесской государственной морской академии. Он — автор 25 печатных работ по вопросам АЭконтроля и диагностики, а также надежности металлоконструкций.

Николай Григорьевич — признанный специалист по акустико-эмиссионному контролю. Им выполнены работы по техническому диагностированию с использованием метода акустической эмиссии на объектах повышенной опасности России, Украины, Узбекистана, Казахстана и других регионов СНГ.

Благодаря стараниям и опыту Н. Г. Висиловского на промышленных предприятиях Мариуполя при техническом диагностировании изделий используется метод акустической эмиссии. Он проводит подготовку специалистов по акустико-эмиссионному контролю, подбирает необходимую аппаратуру, которой потом оснащают промышленные предприятия СНГ.

Николай Григорьевич активно работает в составе Технического комитета Госстандарта Украины ТК № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», является председателем его подкомитета по вопросам диагностирования и контроля объектов металлургической промышленности, а также соавтором базовых стандартов по методам и средствам технической диагностики.

Сердечно поздравляем Николая Григорьевича с 65-летием! Желаем здоровья, новых творческих свершений, благополучия и счастья!