

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 2, 2005

Издается с января 1989 г.

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

Издатель: Международная ассоциация «Сварка»

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. Переверзев,
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,
В. Н. Учанин, А. А. Улитко,
А. И. Степаненко,
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,
Т. М. Швец, И. Я. Шевченко

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (044) 261-58-81,
Факс: (044) 268-34-84, 269-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова, И. С. Баташева

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

При перепечатке материалов
ссылка на журнал обязательна

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

- РАБКИНА М. Д.** Оценка коррозионных поражений колонн
ректификации и сероочистки углеводородных газов 3
- НЕДОСЕКА С. А.** К стандартизации применения XML (EXTENSEVE
MARKUP LANGUAGE) в автоматизированных системах АЭ диаг-
ностики 9
- БАБИЧЕВА И. Ф., ШАРКО А. В.** Теоретические разработки по
использованию вейвлет-анализа и нейросетевых технологий в
системе диагностики и прогнозирования остаточного ресурса
промышленного оборудования 17
- МАКОВСКИЙ А. М.** Учет режима работы грузоподъемных кранов
при диагностировании крановых деталей по признаку их цикличес-
кой прочности 22

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

- НЕДОСЕКА А. Я., ОВСИЕНКО М. А., ХАРЧЕНКО Л. Ф., ЯРЕМЕНКО
М. А.** Особенности распространения акустико-эмиссионных волн
на поверхности трубно-оболочечных конструкций 24
- ГОРДЕЛИЙ В. И., ЧАБАНОВ В. Е.** К вопросу оптимизации работы
дефектоскопа 28
- СУЧКОВ Г. М.** Построение приборов для ультразвукового контроля
и измерений с использованием ЭМА способа возбуждения и
приема упругих импульсов 36
- НАЙДА В. Л., МОЗЖУХИН А. А., ПЫШНЫЙ В. М., КОВБАСЕНКО
А. С., ЛОБАНОВ О. Ф., ЧИЖЕНКО В. А.** Некоторые проблемы вихре-
токового контроля состояния металла труб большой длины и спосо-
бы их решения 40
- ЛЕВИЦКИЙ О. Е.** К вопросу получения проекционных данных в ульт-
развуковой реконструктивной томографии: прямоугольная
дискретизация и выбор количества направлений зондирования 43
- ЕРМАК Е. М., ИСМАГИЛОВ А. О.** Измерение упругих деформаций
вертикальных элементов каркасов зданий 50

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- 10-а Міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2005» в
Славську 54
- Итоги проведения выставки AnalyticaExpo-2005 в Москве 56
- Поздравляем юбиляров! 57
- ГОРДЕЛИЙ В. И., ЧАБАНОВ В. Е.** Современные электромагнитно-
акустические преобразователи для неразрушающего контроля 59

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации "Техническая диагностика и неразрушающий контроль" ТКУ-78



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 2, 2005

Founded in January, 1989

Founders: The National Academy of Sciences of Ukraine
The E. O. Paton Electric Welding Institute
International Association «Welding»

Publisher: International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD:

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. Gruz, Yu. B. Drobot,
V. I. Ivanov, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,
G. G. Lutsenko, N. V. Novikov,
E. S. Pereverzev,
P. P. Prokhorenko, 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,
Fax: (38044) 261-34-03, 269-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruz

Electron galley:

I. R. Naumova, L. N. Gerasimenko,
I. S. Batasheva

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001

All rights reserved.
This publication and
each of the articles
contained here in are
protected by copyright.
Permission to reproduce material
contained in this journal
must be obtained
in writing from the Publisher.

CONTENTS

TECHNICAL DIAGNOSTICS

- RABKINA M. D.* Evaluation of corrosion damage of columns for
rectification and desulphurization of hydrocarbon gases 3
NEDOSEKA S. A. On standardization of XML application (EXTENSIVE
MARKUP LANGUAGE) in automated systems of AE diagnostics 9
BABICHEVA E. F., SHARKO A. V. Theoretical developments of the
use of wavelet analysis and neural network technologies in the systems
of AE diagnostics and forecasting the residual life of industrial equipment 17
MAKOVSKY A. M. Allowing for the operating mode of hoisting cranes in diag-
nostics of crane parts by the index of their cyclic strength 22

NONDESTRUCTIVE TESTING

- NEDOSEKA A. Ya., OVSIENKO M. A., KHARCHENKO L. F., YAREMENKO
M. A.* Features of propagation of acoustic-emission waves over the
surface of pipe-shell structures 24
GORDELII V. I., CHABANOV V. E. On optimization of flaw detector
Operation 28
SUCHKOV G. M. Manufacturing instruments for ultrasonic testing
and measurements using EMA process for excitation and reception
of elastic pulses 36
*NAIDA V. L., MOZZHUKHIN A. A., PYSHNY V. M., KOVBASENKO A. S.,
LOBANOV O. F., CHIZHENKO.* Some problems of eddy current control
of the condition of metal of long pipes and methods of solving them 40
LEVITSKY O. E. On generation of projection data in ultrasonic reconstructive
tomography: rectangular discretization and selection of the number of pro-
bing directions 43
ERMAK E. M., ISMAGILOV A. O. Measurement of elastic deformations
of vertical elements of building frames 50

NEWS AND INFORMATION

- 10th International Scientific-Technical Conference «LEOTEST-2005»
in Slavska 54
Results of holding Analytical Expo-2005, Exhibition, Moscow 56
Congratulations to jubilee persons 57
GORDELII V. I., CHABANOV V. E. Modern electromagnetic-acoustic NDT
transducers 59

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board



ОЦЕНКА КОРРОЗИОННЫХ ПОРАЖЕНИЙ КОЛОНН РЕКТИФИКАЦИИ И СЕРООЧИСТКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

М. Д. РАБКИНА

Приведены систематические результаты технического диагностирования колонн ректификации и сероочистки углеводородных газов. Физико-механические исследования металла демонтированных обечаек позволили уточнить наиболее уязвимые места, подверженные коррозионному поражению, и установить вызывающие их причины.

The paper gives systematic results of technical diagnostics of columns for rectification and sulphur-refinement of hydrocarbon gases. Physico-mechanical studies of the metal of dismantled shells enabled more precise determination of the most vulnerable locations, prone to corrosion attack, and establishing their causes.

Состояние вопроса и возникающие проблемы. Для современных нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) независимо от срока эксплуатации и производственной мощности, объема и номенклатуры выпускаемых продуктов, количества и назначения установок с комплексом разнообразных процессов характерны две отличительные особенности:

в целом весь технологический процесс переработки нефти можно представить в виде схемы, показанной на рис. 1;

статистика причин разрушений и эксплуатационных отказов сосудов и аппаратов на этих заводах согласно [1] имеет следующие значения, %: дефекты материалов — 12...15; дефекты изготовления — 20...25; ошибки конструктивные, эксплуатационные — 18...20; эксплуатационный износ — 35...40.

Производство нефтепродуктов в Украине сосредоточено на шести НПЗ общей мощностью более 50 млн т в год [2, 3]. Объемы поставок и соответственно переработки нефти имеют тенденцию к увеличению, что, с одной стороны, способствует развитию национальной экономики, а, с другой, — приводит к естественному эксплуатационному износу нефтеперерабатывающего оборудования, срок действия которого не безграничен. Исходя из этого, возникает необходимость обобщения характерных повреждений оборудования при различных технологических процессах. В данной статье приведены некоторые результаты таких исследований.

Общие сведения. На современных заводах, располагающих комплексом разнообразных процессов (рис. 1), почти все установки первичной и деструктивной переработки нефти производят

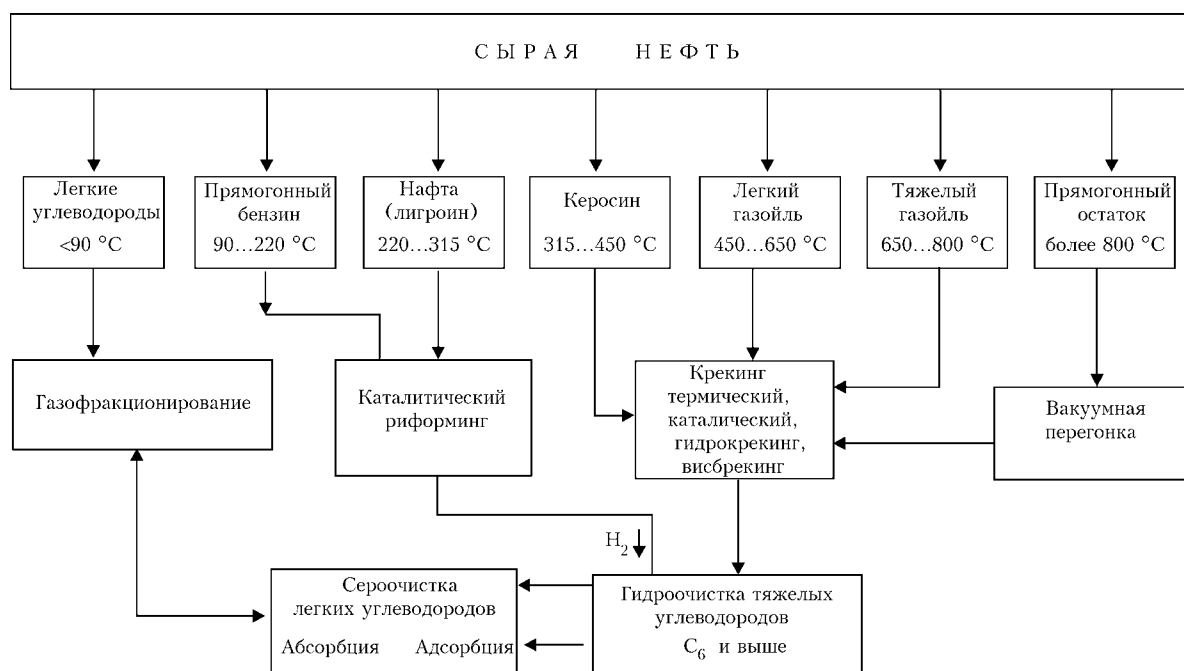


Рис. 1. Принципиальная схема современного технологического процесса переработки нефти



в определенном количестве смеси легких углеводородных газов, которые в дальнейшем поступают на газодифракционирующие установки (ГФУ). При газодифракционировании (ректификации) получают отдельные углеводородные фракции, служащие, в свою очередь, сырьем для нефтехимической и химической промышленности. Процесс ректификации газов состоит из основных стандартных операций: сжатия, разделения фаз, абсорбции, депропанзации (отделения пропана), дебутанизации (отделения бутана) и деизобутанизации (отделения изобутана). Разделение газов на компоненты представляет собой значительно более трудную задачу, чем разделение сырой нефти, поскольку каждый из этих газов является индивидуальным соединением и имеет свою температуру кипения [4]. Например, пропан и бутан легко отделяются от нефти, так как резко отличаются от нее по температурам кипения в широком диапазоне давлений. Поскольку точки кипения *n*-бутана и изобутана очень близки, то для эффективного отделения изобутана требуется большое количество тарелок — деизобутанизатор обычно самая высокая колонна на ГФУ. Независимо от последовательности получения фракций в наибольшей степени коррозионному разрушению подвержены пропановые аппараты из углеродистых и низколегированных сталей [5–7]. Этот вид разрушения обусловлен водородным расслоением и сероводородным растрескиванием стали. Считается, что очистка сырья от сероводорода до концентраций, соответствующих парциальному давлению H_2S в газовой фазе менее 0,001 атм, является эффективным методом защиты от водородного разрушения металла газодифракционирующих установок [8]. Другим методом защиты является изготовление пропановых аппаратов из биметалла углеродистая сталь+сталь 0X13. Однако, сталь 0X13 не подвергается наводороживанию и водородному разрушению металла в сероводородных растворах только при $pH \geq 6$. [9]. Условия эксплуатации остальных (не подверженных водородному разрушению металла) элементов оборудования ГФУ допускают их изготовление из прочных и хладостойких углеродистых или низколегированных сталей.

Непосредственно с процессом газодифракционирования связана очистка и осушка — *сероочистка сухих газов*. Необходимость в глубокой очистке газа от сернистых соединений определяется тем обстоятельством, что в большинстве своем сырые нефти содержат не менее 2,5 мас. % серы, т. е. являются сернистыми. Известны более 30 видов **серы** [10], однако считается, что в нефтях она находится, в основном, в виде сероводорода H_2S и меркаптанов $R-SH$. Кроме того, ряд процессов в заводских технологических схемах сопровождаются выделением газов, содержащих значительные количества сероводорода. Такие газы подвергаются очистке с целью дальнейшего их использования, а также извлечения сероводорода — сырья для получения серы и серной кислоты. Известные методы очистки газов подразделяются на две основные группы: адсорбционную (сухую) и абсорбционную (мокрую). В нефтеперерабатывающей

промышленности нашли применение в основном методы очистки второй группы — растворами этаноламинов.

Этаноламины обладают щелочными свойствами и хорошо поглощают кислые газы. Для извлечения сероводорода из нефтезаводских газов применяют моно- $(C_2H_5ONH_2)$, ди- $(C_2H_5O)_2NH$ и три- $(C_2H_5O)_3N$ этаноламины [5]. Чаще всего используют моноэтаноламин (МЭА), так как он дешевле других, имеет высокую реакционную способность, стабилен, а загрязненные растворы моноэтанолamina легко регенерируются. Концентрация растворов МЭА, используемых для очистки газа, изменяется в широких пределах. Обычно применяются 15...20 % растворы. Моноэтаноламин обладает одним существенным недостатком: он вступает в соединение с сероокисью углерода, часто содержащейся в газе, образуя нерегенерируемые соединения. Поэтому для очистки таких газов используются в качестве поглотителей вторичные и третичные этаноламины.

Принципиальная технологическая схема очистки газа заключается в следующем. Газ на очистку поступает в нижнюю часть абсорбера, в котором он орошается раствором МЭА, свободным от сероводорода. Очищенный газ уходит с верха абсорбера. Поглотитель, насыщенный сероводородом, выходит снизу абсорбера и после предварительного нагрева в теплообменниках поступает на регенерацию в десорбер. В десорбере поглотитель освобождается от сероводорода. Регенерированный раствор МЭА из десорбера через теплообменник и холодильник подается в верхнюю часть абсорбера. Опыт эксплуатации установок очистки углеводородных газов от сероводорода МЭА показывает, что коррозия оборудования, выполненного из углеродистой стали носит более не менее равномерный характер и в значительной степени определяется технологическими факторами, к которым относятся: присутствие продуктов окисления в растворе; степень окисления раствора кислородом; содержание сероводорода в насыщенном растворе; концентрация раствора; температура регенерации раствора.

Результаты технического обследования и их обсуждение. Техническое обследование колонн ГФУ (табл. 1, 2) в течение последних 6...7 лет, основные данные которого приведены в табл. 3, показало, что:

интенсивному коррозионному растрескиванию подвержены, прежде всего, верхние части пропановых аппаратов из двухслойных сталей;

области поражения сосредоточены на внутренней поверхности колонн, преимущественно в районах вводов орошающей жидкости, продуктов и пара из ребойлера. Соответственно, наибольшему коррозионному растрескиванию подвержены в первую очередь район ввода орошения — верхнее днище и верхние обечайки; затем — район ввода пара из ребойлера — две нижние обечайки, граничащие с нижним днищем и, наконец, районы вводов продуктов, отвечающие соответствующим срединным обечайкам;



Таблица 1. Характеристика колонн и параметры процесса газифракционирования углеводородов

Характеристика колонн					Стандартные параметры процесса			
Номер объекта	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Объем, м ³	Марка стали	Вид	Температура, °С		Давление, МПа
						верха	низа	
1	2000	22	86,0	Сталь3 + 0X13	ДП*	35...75	90...140	1,2...1,8
2	1600	18	57,0	Сталь3 + 0X13				
3	1600	18	48,2	Аналог 16ГС				
4	2400	20	157,4	Сталь 20К	ДБ**	45...65	100...150	0,5...0,75
5	2000	14	146,0	ВСтЗ	ДИЗБ***	50...60	65...75	0,75

Примечание. ДП* — депропанизация; ДБ** — дебутанизация; ДИЗБ*** — деизобутанизация.

Таблица 2. Типичный состав рабочей среды в ряде колонн ГФУ

Объект		Соединение			
		Углеводороды	Брутто-формула	Температура кипения*, °С	Плотность**, г/см ³
1	Верх	Пропан	C ₃ H ₈	-42,0	0,50
	Низ	Нижний остаток	—	—	—
2	Верх	Пропан-пропиленовая функция	C ₃ H ₈ C ₃ H ₆	-42,0 -48,0	0,50 0,52
	Низ	Бутан-пропиленовая*** + + пентан амиленовая функции	C ₄ H ₁₀	-0,5	0,58
			C ₄ H ₈	-6,1	0,60
			C ₄ H ₈	+1,1	0,61
			C ₄ H ₈	3,9	0,63
			C ₅ H ₁₂	+9,5 +28,0 +36,2	
3	Верх	Изобутан	C ₄ H ₁₀	-11,7	0,56
	Низ	Нормальный бутан	C ₄ H ₁₀	-0,5	0,58

Примечания. * — при атмосферном давлении; ** — при атмосферном давлении и 15,5°С; *** — три различных н-бутилена имеют одинаковую формулу C₄H₈, но разные структуры и свойства.

коррозионное поражение, в основном, охватывает плакирующий слой в околошовных зонах и сварные соединения.

Анализ технологического процесса и результаты лабораторных исследований на пробах металла из пораженных участков демонтированных объектов [7] позволили заключить следующее. Коррозионное растрескивание и межкристаллит-

ная коррозия двухслойных сталей (табл. 1) связаны прежде всего с эксплуатационным износом плакирующего слоя в сочетании с высоким содержанием сернистых соединений в присутствии водной фазы: от 0,5 % в районе ввода пара из ребойлера до 6 % в районе ввода орошения.

Макро- и микроисследования структуры шлифов сварных соединений показали, что трещины зарождаются и развиваются в узком слое зоны перемешивания аустенитного наплавленного металла с низкоуглеродистой сталью (рис. 2). При этом в районе трещины наблюдаются повышенные (до 40 %) по сравнению с остальным аустенитным слоем, значения твердости.

Таким образом, возникновение локальных участков разнородных

сталей предопределяет в первую очередь пониженную трещиностойкость сварного соединения. Кроме того, отрицательное влияние на трещиностойкость конструкции оказывают также параметры технологического процесса в верхних частях рассматриваемых объектов (табл. 1), поскольку в соответствии с расчетами температура хрупко-вязкого перехода материала после длительного срока эксплуатации не превышает в данном случае 50 °С.

Исходя из изложенного выше, были рекомендованы и своевременно реализованы следующие мероприятия:

демонтирован и полностью заменен объект № 1; заменена ремонтной вставкой с последующей местной термической обработкой поврежденная зона объекта № 2 в районе ввода пара из ребойлера; изменена конструкция ввода пара из ребойлера для снижения интенсивности прямого воздействия струи на стенку корпуса.

*Техническое обследование абсорбера сероочи-
стки сухих газов* (характеристика объекта № 6: внутренний диаметр — 2200 мм; толщина стенки — 12 мм; марка стали 20К; давление — 0,7 МПа; объем — 13,2 м³; температура — +(35...40) °С; термообработка не проводилась; сварка автоматическая и ручная электродуговая — Св-08ГА по ГОСТ 2247-70). Ориентировочный состав рабочей среды, %: H₂S — 5,9; CO₂ — 0,8; CH₄ — 43,6; H₂ — 24,6; C₂ — 25,0,

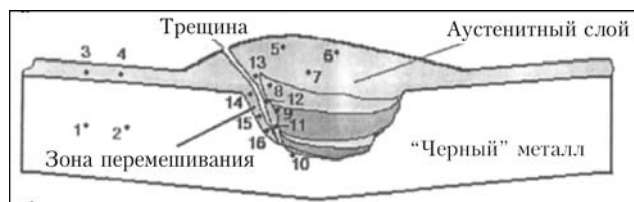


Рис. 2. Схематическое изображение в плакирующем слое сварного соединения пропановой колонны

Значения твердости в соответствующих точках рис. 2

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8
HRA	42,5	44,0	51,5	51,6	53,5	54,4	57,0	68,0
Номер точки	9	10	11	12	13	14	15	16
HRA	65,0	47,5	65,0	66,5	71,5	71,0	70,0	52



Таблица 3. Наиболее опасные дефекты, обнаруженные при обследовании пропановых колонн ГФУ со стороны внутренней поверхности

Срок эксплуатации, лет	Объект	Область коррозионного поражения
Район ввода орошения — верхнее днище с прилегающей обечайкой корпуса		
30	1	Продольные трещины различной длины в диаметральном сварном шве от 50 до 150 мм
		Сетка поперечных трещин в плакирующем слое по всей длине кольцевого сварного шва
		Трещины, выходящие из кольцевого сварного шва, некоторые достигают длины 20 мм
		Отдельно расположенные непровары, шлаковые включения, поры в кольцевом шве
33	2	Питтинговая коррозия на стенке обечайки глубиной до 2... 2,5 мм
		Участки ножевой коррозии по линии сплавления штуцера с днищем
		Продольная трещина в диаметральном сварном шве на пересечении с кольцевым длиной 250 мм и глубиной до 10 мм
		Многочисленные поперечные (длиной до 40 мм) и продольные (длиной до 300 мм) трещины глубиной 2... 4 мм в ОШЗ кольцевого сварного соединения
		Язвенная коррозия в виде «бороздок» глубиной 1... 3 мм по всей длине кольцевого сварного соединения на расстоянии 1... 4 мм от линии сплавления
35	2	Коррозионные повреждения сварного соединения люка-лаза
		Участки с продольными (до 700 мм) и поперечными трещинами в плакирующем слое верхнего днища и ОШЗ кольцевого сварного соединения
Район ввода продуктов нефтепереработки		
30	1	Трещины в продольных сварных швах, длиной от 100 до 300 мм
		Поперечная трещина в валике усиления продольного сварного шва длиной 100 мм
	2	Мелкие поры, выходящие на поверхность
Скопление пор на участке кольцевого сварного шва между продольными сварными соединениями		
33	2	Язвенная коррозия глубиной до 1 мм, протяженностью — 200... 300 мм
		Множественные несплошности суммарной протяженностью — 500 мм; глубиной залегания — 10... 15 мм; размером по высоте — до 5 мм
Район ввода пара из ребойлера — нижние обечайки и нижнее днище		
30	1	Зона поражения округлой формы с толщиной слоя прокорродированного металла до 10 мм напротив ввода пара
		Зона интенсивного коррозионного растрескивания с выходом расслоений в зону сварного соединения рядом с вводом пара
		Дефекты в кольцевом сварном соединении нижнего днища с обечайкой — суммарной протяженностью 2500 мм и глубиной залегания 8... 12 мм
		Трещины длиной от 10 до 60 мм при пересечении продольных и кольцевых сварных швов
		Сетка поперечных трещин с размерами до 25 мм в плакирующем слое нижнего днища по всей длине кольцевого сварного соединения

водный раствор МЭА — 15,0), основные результаты которого приведены в табл. 4, показало, что наибольшее скопление дефектов сосредоточено в районе ввода раствора МЭА в верхних обечайках, подлежащих замене. Согласно рекомендациям (табл. 4), из наиболее поврежденного коррозионным растрескиванием участка демонтированных обечаек были вырезаны темплеты для проведения лабораторных физико-механических исследований.

Прежде всего следует отметить, что температура хрупко-вязкого перехода, полученная на образцах Шарпи «сместилась», по сравнению со стандартными свойствами стали 20К в сторону положительных температур. Это характеризует проявление склонности исследуемого металла к развитию хрупких разрушений уже в диапазоне 0... +20 °С и даже выше. Химический состав основного металла сохраняется на уровне состава стали 20К (ГОСТ 5520–79), хотя в металле шва количество углерода и особенно кремния намного превосходит содержание указанных элементов в проволоке (табл. 5, 6).

Что касается микроструктуры, то по всей толщине стенки абсорбера в основном металле наблюдается ферритно-перлитная смесь с баллом зерна № 8 по ГОСТ 5639–82 (Приложение № 2, шкала № 1), а в сварном шве — ферритно-перлитно-бейнитная смесь. Со стороны обеих поверхностей видимых изменений микроструктуры не обнаружено.

Особое внимание обращает на себя вид неметаллических включений (рис. 3). Кроме традиционных точечных и строчечных, обнаружены крупные вытянутые неоднородные включения длиной от 20 до 250 мкм, шириной от 1 до 15 мкм и твердостью $HV\ 0,01-515$, соответствующей весьма хрупким материалам. Поскольку содержание серы в этих включениях не превышает 0,53 %, их нельзя отнести к сульфидам. Микрорентгеноспектральным анализом показано, что они состоят из ряда оксидов (табл. 7, 8). При этом их вклад в объемную долю всех включений достаточно высок (табл. 9). Следует отметить, что межфазные поверхности полиоксидов представляют собой мик-



Таблица 4. Развитие коррозионных повреждений в корпусе абсорбера сероочистки сухих газов

Срок эксплуатации, лет	Типичные дефекты	Рекомендации
22	Основное скопление несплошностей со стороны внутренней поверхности в верхних обечайках, особенно в районе ввода раствора МЭА; толщина поврежденного слоя ~6 мм	Изменить конструкцию ввода раствора МЭА таким образом, чтобы поступающий продукт равномерно распределялся по сечению объекта
	Коррозионное растрескивание основного металла на ранней стадии развития	
	Дефекты объемной формы с относительно невысокой плотностью распределения, ориентированный под небольшими углами к поверхности	
	Небольшие скопления пор в сварных соединениях люков-лазов и подрезы со следами коррозии	
	Отдельные неглубокие язвы в нижней части сосуда	
24	Появление микротрещин носит обширный характер и наблюдается по всей толщине стенки корпуса, что впоследствии может привести к образованию макроскопических дефектов	Заменить две верхние обечайки, исчерпавшие проектный ресурс, установка рассекателя
	Стадия объединения обособленных несплошностей в слои в верхних обечайках	
	Язвенная коррозия глубиной 1...2 мм по всему корпусу	
	Коррозионные раковины в сварных соединениях люков-лазов с соответствующими обечайками	
26	Язвенная коррозия глубиной до 1...2 мм	—
	Коррозионные раковины в сварных соединениях люков-лазов с соответствующими обечайками	
	В кольцевом сварном соединении нижнего днища с обечайкой:	
	трещиноподобный дефект длиной до 100 мм; глубиной до 4мм,	
	скопления мелких пор, местами подрезы	

Таблица 5. Химический состав основного металла и сварного шва объекта № 6, мас. доля %

Проба	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	Mo	V	Al	Ti	S	P	As
Основной металл	0,182	0,190	0,45	0,05	0,05	0,05	<0,03	<0,02	<0,005	—	0,017	0,022	0,004
Сварной шов	0,144	0,322	0,93	0,46	0,13	0,08	0,16	<0,02	0,0076	0,00	0,016	0,036	0,005

Таблица 6. Массовая доля элементов (%) в проволоке Св-08ГА по ГОСТ 2246-70

C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	S	P
<0,10	<0,03	0,80...1,10	<0,25	<0,10	—	<0,025	<0,30

Таблица 7. Фазовый состав крупных вытянутых включений твердостью HV0,01 – 515

Соединение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	TiO
Содержание, %	46,4...47,6	21,0...22,0	20,5...22,5	8,5...9,0	0,65...0,80

Таблица 8. Металлофизические свойства обнаруженных соединений [11]

Химическая формула и название включения	Кристаллическая система	Вид и форма	Расположение	Пластичность	Твердость HV	Оптические свойства в светлом поле (цвет)
SiO ₂ двуокись кремния (кварц)	α-Гексагональная β-Тригональная	Крупные зерна неправильной формы	Случайное, в виде отдельных скоплений	Не деформируются	Высокая, ~1000	Темно серый до черного
α-Al ₂ O ₃ окись алюминия (корунд)	Гексагональная	Мелкие зерна неправильной формы; крупные правильно образованные кристаллы	Группами, скоплениями; после деформации строчками	Выкрашиваются, оставляя «хвосты»	Очень высокая, >1500	Темно серый, до черного (с фиолетовым оттенком)
MnO закись марганца (мангазит)	Кубическая	Кристаллы неправильной формы, иногда дендритного строения	Группами, после деформации слегка вытягиваются	Слабо деформируются	280	Темно серый; в тонких слоях заметны внутренние отсветы
TiO моноокись титана	Кубическая	Мелкие идиоморфные кристаллики	—	—	Высокая	Темно серый, до черного

ронесплошности, которые в течение длительного периода времени за счет воздействия рабочей среды на внутреннюю поверхность корпуса развиваются в микротрещины.

Относительно содержания водорода в металле и оценки его распределения по толщине стенки абсорбера можно отметить следующее. Значения, полученные методом вакуумного плавления (2,2...3,7 ppm), почти в четыре раза превышают значения, полученные методом лазерного спектрального анализа с чувствительностью по водороду

**Таблица 9. Объемная доля неметаллических включений в различных сечениях толщины стенки корпуса, %**

Сечение	Основной металл	Сварной шов
У внутренней поверхности	0,640	0,403
На середине толщины	0,765	0,447
У наружной поверхности	0,673	0,491

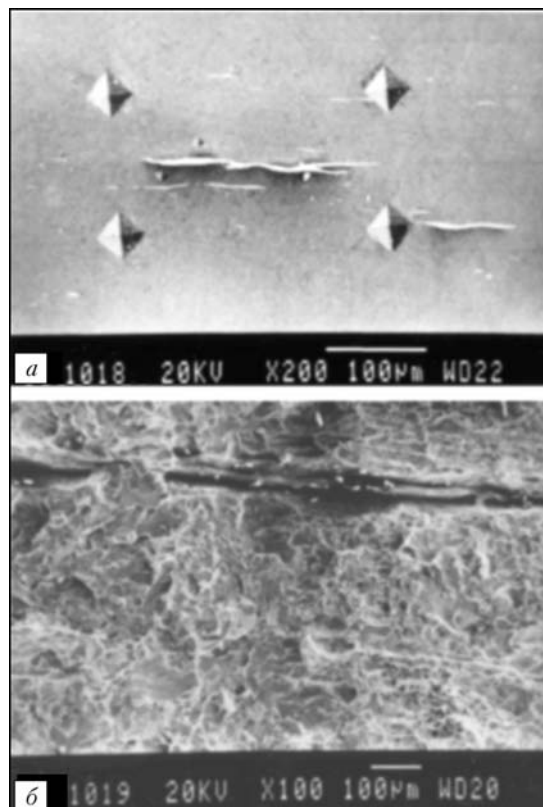
Таблица 10. Распределение водорода в металле по толщине стенки корпуса абсорбера

Расстояние от наружной до внутренней поверхности	Содержание, ppm (1,12·10 ⁻⁴ мас. %)
0,0	0,62
1,5	0,73
3,0	0,73
5,0	0,80
7,0	0,73
9,0	0,83
9,8	0,77

1·10⁻⁷ мас. дол. %. Локальное распределение по толщине стенки практически остается на одном уровне и не превышает 0,83 ppm со стороны внутренней поверхности на расстоянии порядка 2,5 мм от ее края (табл. 10). Это противоречие можно объяснить тем обстоятельством, что основное содержание водорода в данном случае связано с крупными «ловушками».

Таким образом, с течением времени развитие микротрещин в процессе эксплуатации приобрело более обширный характер и охватило всю толщину стенки корпуса, особенно в районе ввода раствора МЭА (табл. 4). Объединение обособленных несплошностей в слои в сочетании с наличием объемных дефектов свидетельствует о том, что существенную роль в коррозионных процессах играет структура металла. Так, в поврежденном металле демонтированных обечаек абсорбера обнаружены крупные вытянутые частицы полиоксидов, обладающие высокой твердостью по сравнению с углеродистой сталью 20К. Межфазная поверхность между такой частицей и матрицей является удобной «ловушкой» для атомов и мелких молекул, которые в процессе эксплуатации скапливаются в крупные молекулы газа, оказывающие давление на стенки полости. Вероятно, что в результате правильно подобранных режимов нагрева и охлаждения могла бы произойти благоприятная структурная перестройка, однако исследуемый объект термообработан не был, хотя в соответствии с рекомендациями [5, табл. 11] аппарат после сварки подлежит термической обработке.

Кроме того, при монтаже объекта в месте ввода раствора МЭА с внутренней стороны колонны не были установлены предусмотренные проектом раскатели, предназначенные для уменьшения воз-

**Рис. 3.** Крупные включения в корпусе абсорбера из стали 20К: а — поверхность шлифа; б — поверхность излома

действия струи продукта на стенки корпуса, что и послужило ускорению процессов накопления внутренних дефектов именно на этом участке.

1. *Фоляниц А. Е.* Применение опыта ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование» по повышению надежности, качества и безопасности оборудования ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование». — Волгоград., www.alf-center.com
2. *Поставки и переработка нефти на НПЗ/ ИАЦ.* — Энергобизнес, 5 августа 2002 г. — www.energobusiness.kiev.ua/news/Postaky_y_pere.html
3. *Поставка и переработка нефти на НПЗ/ ИАЦ.* — Там же, 8 ноября 2003 г. — www.e-b.com.ua/news/04-11-2003-00-00/Postaky_y_pere.html
4. *Перри Дж.* Справочник инженера-химика. Т. 1 / ОНТИ. Главн. ред. хим. литературы. — М.: 1937. — С. 624–630.
5. *Коррозия и защита химической аппаратуры / Справ. руково. Т. 9.* Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность. — Химия. Ленинградское отд., 1974. — С. 211–225.
6. *Леффлер У. Л.* Переработка нефти. — М.: ЗАО «ОЛИМП-БИЗНЕС», 2004. — 223 с.
7. *Некоторые результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности / В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль.* — 1998. — № 3. — С. 17–24.
8. *Шпарбер И. С., Шрейдер А. В.* Защита металлов. — 1969. — 5, № 6. — С. 618.
9. *Шрейдер А. В., Шпарбер И. С.* Борьба с водородным разрушением оборудования нефтезаводов в сероводородных средах // ЦНИИТЭНефтехим. — 1968. — С. 420.
10. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Справ. изд. в 4-х т. Т. 1. Книга 1 // М.: НАУКА, 1978.* — С. 238–278.
11. *Гольдшмидт Х. Дж.* Сплавы внедрения // М.: Мир, 1971. — Вып. 2.



К СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ XML (EXTENSEVE MARKUP LANGUAGE) В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ АЭ ДИАГНОСТИКИ

С. А. НЕДОСЕКА

Рассмотрены возможности и перспективы применения XML — универсального стандарта обмена данными — в области технической диагностики, в первую очередь в автоматизированных многоканальных АЭ системах. Выносятся на обсуждение пользователей и разработчиков систем технической диагностики проект стандарта, описывающего наборы тегов для использования в АЭ диагностике.

The paper considers the possibilities and prospects for application of XML — all-purpose standard of data exchange — in the field of technical diagnostics, primarily in automated multi-channel AE systems. A draft of the standard describing sets of tags for application in AE diagnostics is put up for discussion by users and developers of technical diagnostics systems.

Введение. В последнее время задача непрерывного мониторинга технического состояния опасных производств приобретает все большее значение [1]. Работа автоматизированных систем непрерывного мониторинга базируется, как правило, на применении акустической эмиссии как основного средства диагностики, позволяющего реализовать полный контроль изделий больших размеров и получить информацию из труднодоступных мест. Переход от единичных испытаний к контролю в масштабе цехов и заводов поставил задачи эффективной передачи результатов измерений, обмена данными в реальном времени и взаимодействия разнородных информационных систем.

Имеющийся на сегодня практический опыт применения системы непрерывного мониторинга ЕМА-3 показывает, что для успешного решения этих задач требуются новые подходы.

Система АЭ диагностики ЕМА-3, продукт совместной разработки венгерской компании Видеотон и ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, используется как в составе передвижных лабораторий, так и в качестве стационарного комплекса непрерывного мониторинга промышленных объектов. Система непрерывного АЭ мониторинга на базе оборудования ЕМА-3 рассчитана на автономную работу в течение длительного времени без вмешательства оператора. По заданию эксплуатирующих предприятий требовалось решить вопросы передачи в реальном времени информации по локальной компьютерной сети, а также в аналитический центр в Киеве (посредством Интернет).

Длительная эксплуатация нескольких таких систем в условиях реального производства поставила новые задачи:

вывода на единый экран и обобщенный анализ результатов работы нескольких одинаковых систем мониторинга, контролирующихся разные объекты;

ввода в систему результатов измерений технологических параметров (таких, как нагрузка, тем-

пература, уровень жидкости), полученных другими измерительными системами предприятия.

При решении этих и ряда других задач возникли следующие проблемы: несоответствие используемых форматов данных, необходимость передавать большие объемы данных по компьютерной сети, опасность взлома информации и заражения компьютерными вирусами, необходимость внесения изменений в программное обеспечение для реализации обмена информацией с оборудованием, использующим собственный протокол обмена данными.

Эффективное решение этих задач стало возможным на основе объектного подхода [2] к описанию данных с использованием стандарта XML [3, 4].

Необходимость стандарта обмена данными.

Стандартизация обмена данными является важной задачей для отраслей науки и производства, использующих современные компьютерные технологии. Существующие системы технической диагностики разработаны предприятиями-производителями, как правило, на базе измерительной техники собственной конструкции и специализированного программного обеспечения. Результаты, полученные в процессе измерений, представлены в виде двоичных цифровых данных, формат которых определяет разработчик. Такая методика хорошо работает в изолированной среде, при отсутствии необходимости обмена данными с другими диагностическими системами и измерительным оборудованием.

Однако в последнее время диагностические системы становятся все более сложными (растет, в частности, число измеряемых параметров), и для их работы могут потребоваться сторонние данные, имеющие несовместимый формат. Аналогично, результаты измерений и их анализа, полученные при работе такой системы, могут потребоваться специалистам из других организаций для дополнительной оценки. Нестандартный формат выходных



данных может в этом случае серьезно затруднить дальнейшую работу с ними. В значительной мере это относится и к современным компьютеризированным системам АЭ диагностики. Как правило, для принятия решения о состоянии диагностируемого изделия, помимо собственно результатов измерений АЭ, требуются данные о его напряженно-деформированном состоянии. Для получения таких данных используют тензометрию и другие неразрушающие методы определения напряжений, в частности магнитные. Обычно современное измерительное оборудование сохраняет данные в цифровой форме в собственном формате. Если формат данных неизвестен, организация обмена информацией с таким оборудованием становится проблематичной. Если используемые форматы отличаются, то возникает необходимость взаимной доработки, адаптации разнородных систем. Такая адаптация обычно требует длительной работы, серьезных временных и денежных затрат. Практически неизбежным следствием доработок является внесение ошибок в готовое программное обеспечение. Как правило, поиск и устранение таких ошибок значительно сложнее, чем на стадии первоначального проектирования программ.

Для организации надежного и унифицированного обмена информацией между разнородными диагностическими системами требуются средства стандартизации представления сложных структурированных данных. Наличие такого стандарта позволит без затруднений соединить любое имеющееся измерительное оборудование в единый комплекс, а также представлять результаты работы в единообразном виде.

Следует отметить, что основа для создания такого стандарта существует. Разработанный несколько лет назад в основном для использования в Интернет язык XML (в переводе — расширяемый язык разметки), упрощенная форма общего языка разметки SGML (Standard Generalized Markup Language), сегодня является важным средством унификации обмена данными между неоднородными информационными системами. Основным достоинством технологии XML является возможность описания данных любой сложности и беспрепятственная передача этих данных по компьютерным сетям [3].

Ниже предложена система описания данных с использованием XML, которая может послужить основой для создания такого стандарта в АЭ диагностике (табл. 1–5).

Основы стандарта XML и решаемые с его использованием задачи. Рассмотрим пример описания элементарного блока диагностической информации на языке XML. Представим, что в диагностическую систему требуется вводить результаты измерения рабочего давления (Pressure) и температуры (Temperature) в диагностируемом изделии. Необходимо описать время проведения замеров, значения измеряемых параметров и их размерность (Dimension). Для этого измерительная система, используя синтаксис XML [4], может представить указанные данные в следующем виде:

```
<?xml version = "1.0"?>
```

```
<Doc>
<DateTime>
<Date>06.06.2004</Date>
<Time>16:11:22</Time>
</DateTime>
<Pressure>
<Value>21.27<Value>
<Dimension>MPa</Dimension>
</Pressure>
<Temperature>
<Value>21.27<Value>
<Dimension>C</Dimension>
</Temperature>
</Doc>
```

Приведенное выше представление данных является так называемым документом XML [5]. В рассматриваемом фрагменте можно заметить структурную организацию данных, основой которой является так называемый тег (tag), слово, переводимое с английского как ярлык, метка. Тег определяет начало и завершение блока информации определенного типа. Началу блока информации (называемого «полем тега») соответствует ключевое слово в угловых скобках, например, <Pressure>, а завершению соответственно </Pressure>. Каждый блок информации может содержать произвольное количество вложенных блоков. Таким образом, в языке XML реализована возможность представления данных любой сложности, в том числе с неоднородной структурой. При описании данных на основе XML руководствуются следующими правилами:

наименование тега (закрываемое в угловые скобки) представляет собой слово или понятное сокращение на английском языке;

наименование тега должно однозначно определять характер описываемых в нем данных;

если данные имеют сложную структуру, они должны быть описаны набором тегов, при необходимости организованных иерархически;

информация, содержащаяся внутри поля тега, должна иметь простой и понятный буквенно-цифровой формат.

Однако, наиболее существенным является то, что язык XML позволяет создавать собственные системы представления данных, используя настраиваемые теги. В частности, для описания измеряемых параметров в приведенном примере использованы теги <Pressure>, <Temperature>, <Dimension> и др., но принципиально можно было использовать любые другие наименования, чем и состоит смысл слова «расширяемый» в названии языка. Таким образом, становится возможным создание отраслевых стандартов описания данных на основе XML.

Язык обеспечивает гибкое упорядочение и представление информации, а также новые методы избирательного доступа к данным на основе пользовательских схем [3], также составленных в виде тегов XML. Он позволяет находить и выбирать определенные фрагменты информации из сложных и емких документов.

Еще одним достоинством является динамичность данных. Поскольку данные XML имеют чет-



кую структуру, их обработка может быть проведена различными способами. В отличие от двоичных данных, изменение внешнего представления данных XML не представляет трудностей. Конкретный тег может быть проигнорирован, преобразован в соответствии с некоторым правилом или представлен без изменений [3].

Таким образом, XML — мощная компьютерная технология, позволяющая организовать работу с информацией на современном уровне [4].

Преимущества, получаемые при использовании стандарта XML, восприняты пока не всеми разработчиками сложных интеллектуальных систем. Однако ведущие западные компании в области программного обеспечения, в частности, Microsoft, активно внедряют его в новейших версиях программных продуктов. Согласно имеющимся в Интернет публикациям, результатом внедрения XML является повышение конкурентоспособности технических решений, использующих это средство обмена данными. Ранее, только из-за несовместимости форматов многие существующие информационные системы приходилось со временем заменять более новыми, несмотря на то, что они выполняли возложенные на них задачи. Аналогично, использование программ различных производителей в рамках одной организационной структуры создавало большие трудности и тормозило информационные процессы. Технология XML обеспечивает унификацию форматов данных и обеспечивает интеграцию разнородных информационных систем и программного обеспечения.

Еще одно преимущество XML проявляется при передаче данных по компьютерным сетям (в том числе Интернет). Отрицательным моментом глобализации информационных процессов являются распространение компьютерных вирусов и взлом конфиденциальной информации. Технология XML позволяет упростить защиту информации. Достигается это тем, что данные XML передаются в текстовом формате (не позволяющем распространять вирусы и не блокируемом средствами защиты), а передача потенциально опасных данных двоичного формата может быть эффективно ограничена на уровне локальной компьютерной сети или отдельного компьютера.

Таким образом, использование XML позволяет эффективно решить целый ряд задач, главная из которых — объединение информации из разных источников и эффективное ей управление.

Многие западные предприятия, работающие в близких отраслях, сегодня стандартизируют системы тегов для описания информации, используемой совместно. Это позволяет эффективно вести обмен информацией, поскольку, несмотря на различия структуры данных, используемых внутри организаций, обмен данными между организациями подчиняется единому стандарту.

Естественно, технология XML не лишена недостатков. В частности, для хранения данных требуется значительно больший объем информации в байтах, чем для хранения в двоичном виде. Легкость просмотра и правки файлов XML в программах типа текстовых редакторов может привести

при небрежном отношении или наличии злого умысла к повреждению или искажению информации. Однако, указанные недостатки могут быть преодолены с помощью быстродействующей компьютерной техники с большим объемом оперативной и долговременной памяти (что, по сути, относится к большинству современных компьютеров), а также административными мерами по защите компьютерных сетей.

Применение стандарта XML в системах ЕМА-3. Обмен данными на основе XML был реализован на практике при разработке программного обеспечения к аппаратуре ЕМА-3. В настоящий момент при работе систем непрерывного мониторинга на базе ЕМА-3 генерируется несколько блоков данных, содержащих информацию реального времени о координатах обнаруженных дефектов, работоспособности отдельных элементов системы, настроечных параметрах и т. д.

Система ЕМА-3 генерирует три предупреждения об опасности, которые отображаются на экране управляющего компьютера-сервера. Одновременно создается блок XML данных, который может быть считан любым компьютером, имеющим доступ к управляющему серверу. Таким образом, все заинтересованные в получении данной информации пользователи (руководство цеха и предприятия, сотрудники аналитического центра и т. д.) получают ее оперативно и могут сразу при получении предупреждения предпринять необходимые меры по анализу ситуации и принятию решения о дальнейшем режиме эксплуатации изделия. Конфиденциальность информации обеспечивается средствами администрирования компьютерной сети, а доступ к информации защищен системой паролей. Настраиваемые теги обеспечивают адаптацию системы к структуре данных предприятия. Аналогично организован и ввод в систему данных измерений, выполненных другими устройствами. Результаты измерений эксплуатационных параметров могут быть считаны из общей папки на компьютере в сети предприятия или с Веб-сервера.



Информация, поступающая в формате XML в лабораторию НКТД Одесского припортового завода, преобразуется в графический формат (на экране — развертка объектов контроля с указанием координат сигналов АЭ)



Таблица 1. Универсальные теги

Наименование тега	Тип данных	Описание	Пример
<Value>	Числовой	Универсальный тег. Значение некоторой измеряемой величины	<pre><Pressure> <Value>21.27</Value> ... другие теги </Pressure></pre> Величина измеренного давления 21,27 единиц (например, МПа)
<Count>	Числовой	Универсальный тег для указания числа вложенных тегов одного и того же типа	<pre><Impulses> <Count>1235</Count> ... другие теги </Impulses></pre> Подсчет импульсов АЭ
<Number>	Числовой	Универсальный тег. Показывает порядковый номер	<pre><Impulse> <Number>107</Number> ... другие теги </Impulse></pre> Порядковый номер импульса
<Dimension>	Текстовый	Универсальный тег. Размерность некоторой измеряемой величины	<pre><Temperature> <Dimension>C</Dimension> ... другие теги </Temperature></pre> Размерность температуры — °C
<Enabled>	Булев	Показывает, доступно ли то, что описывается в теге предыдущего уровня	<pre><Channel> <Number>2</Number> <Enabled>True</Enabled> </Channel></pre> Канал № 2 доступен
<Locked>	Булев	Показывает, заблокировано ли то, что описывается в теге предыдущего уровня	<pre><Channel> <Number>4</Number> <Locked>True</Locked> </Channel></pre> Канал № 4 заблокирован

С использованием XML в системах непрерывного АЭ мониторинга на основе оборудования ЕМА-3 решается несколько задач:

доступ к результатам мониторинга сразу из многих мест, что позволяет специалистам разного профиля одновременно работать над анализом данных;

эффективное принятие решения о состоянии конструкции сразу после возникновения опасной ситуации;

программно- и платформонезависимый метод работы с данными;

создание дополнительных обрабатывающих и аналитических программ без изменения основных,

возможность размещения таких программ на любом компьютере в сети предприятия или Интернет;

оперативный просмотр полученных данных в Веб-обозревателе типа Internet Explorer;

защита от компьютерных вирусов и взлома.

Системы ЕМА-3, использующие технологию XML, работают на ряде промышленных предприятий Украины [5, 6]. Особо следует отметить опыт Одесского припортового завода, где более двух лет функционируют системы непрерывного АЭ мониторинга хранилищ аммиака ЕМА-3 (рисунки). Завод имеет современную компьютерную сеть и связь с Интернет. Это дало возможность применить на практике большую часть описанных

Таблица 2. Результаты измерений времени

Наименование тега	Тип данных	Описание	Пример
<Date>	Текстовый	Любой допустимый формат даты	<Date>06.06.2004</Date>
<Time>	Текстовый или числовой	Любой допустимый формат времени	<Time>16:11:22</Time>
<ElapsedTime>	Числовой	Время начала измерения блока АЭ или НЧ информации относительно начального значения	<pre><Impulse> <ElapsedTime>218</ElapsedTime> ... другие теги </Impulse></pre> Время начала АЭ импульса — 218 единиц (например, мкс)



Таблица 3. Результаты акустико-эмиссионных измерений для многоканальных систем

Наименование тега	Тип данных	Описание
<Channel>	Числовой	Номер канала АЭ, для которого содержатся данные тега
<ElapsedTime(+ номер канала АЭ)>	Числовой	Время начала измерения блока АЭ информации для указанного номера канала
<Amplitude(+ номер канала АЭ)>	Числовой	Пиковая амплитуда сигнала АЭ для указанного номера канала АЭ «Energy»
<Energy>	Числовой	Энергия сигнала АЭ
<Energy(+ номер канала АЭ)>	Числовой	Энергия сигнала АЭ для указанного номера канала АЭ
<RiseTime>	Числовой	Время нарастания сигнала АЭ до максимума амплитуды
<RiseTime(+ номер канала АЭ)>	Числовой	Время нарастания сигнала АЭ до максимума амплитуды для указанного номера канала АЭ
<Width>	Числовой	Длительность сигнала АЭ
<Width(+ номер канала АЭ)>	Числовой	Длительность сигнала АЭ для указанного номера канала АЭ
<Counts>	Числовой	Число осцилляций сигнала АЭ
<Counts(+ номер канала АЭ)>	Числовой	Число осцилляций сигнала АЭ для указанного номера канала АЭ
<Noise(+ номер канала АЭ)>	Числовой	Уровень шума, зарегистрированный для канала с указанным номером
<DelayTime(+ номер канала АЭ)>	Числовой	Время задержки, рассчитанное по разности времен прихода сигнала на различные датчики, для указанного номера канала АЭ
<XCoord>	Числовой	Координата X, рассчитанная по разности времен прихода сигнала на различные датчики
<YCoord>	Числовой	Координата Y, рассчитанная по разности времен прихода сигнала на различные датчики
<DateTime>	Вложенные теги типов <Date>, <Time>	Используется для указания начала и завершения временных интервалов
<Impulse> или <Hit>	Вложенные теги типов <Number>, <Channel>, <ElapsedTime>, <Amplitude>, <Energy>, <RiseTime>, <Width>, <Counts>	АЭ информация, полученная в результате срабатывания одного канала АЭ
<Event>	Вложенные теги типа <Number>, <Impulse> или <Hit>, <ElapsedTime>, <Amplitude(+ номер канала АЭ)>, <Energy(+ номер канала АЭ)>, <RiseTime(+ номер канала АЭ)>, <Width(+ номер канала АЭ)>, <Counts(+ номер канала АЭ)>, <DelayTime(+ номер канала АЭ)>	Событие АЭ — информация, полученная в результате обработки совместного срабатывания нескольких датчиков
<Cluster>	Вложенные теги типа <Number>, <Event>, <XCoord>, <YCoord>, <Count>	Содержит события АЭ, сгруппированные по координатному признаку (попадание в заданную область координат с заданной вероятностью)
<Noise>	Вложенные теги типа <Number>, <ElapsedTime>, <Noise(+ номер канала АЭ)>	Содержит описание одного измерения шумов по всем используемым каналам АЭ
<Impulses> или <Hits>	Вложенные теги типов <Impulse> или <Hit>, <Count>	Содержит описание всех зарегистрированных в процессе измерения срабатываний датчиков АЭ
<Events>	Вложенные теги типа <Event>, <Count>	Содержит описание всех зарегистрированных в процессе измерения событий АЭ
<Noises>	Вложенные теги типа <Noise>, <Count>	Содержит описание всех зарегистрированных в процессе измерения шумов
«Clusters»	Вложенные теги типа «Cluster», «Count»	Содержит описание всех зарегистрированных в процессе измерения кластеров



Таблица 4. Результаты измерений дополнительных параметров

Наименование тега	Тип данных	Описание
<Pressure>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Давление
<Temperature>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Температура
<Stress>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Напряжение механическое
<Deformation>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Деформация
<Strain>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Усилие
<Shift>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Смещение
<Level>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Уровень
<Height>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Высота
<Length>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Протяженность
<Radius>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Радиус
<Angle>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Угол
<Square>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Площадь
<Volume>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Объем
<Depth>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Глубина
<Voltage>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Напряжение электрическое
<Resistance>	Вложенные теги типа <Value>, <Dimension>	Сопротивление электрическое
<ElapsedTime>	Числовой	Время начала измерения блока НЧ информации для указанного номера канала
<LFP>	Вложенные теги типов <ElapsedTime>, <LFP(+ номер канала НЧ)> или <Pressure>, ..., <Resistance>	Тег для хранения всей НЧ информации, полученной при измерении в одной временной точке
<LFP(+ номер канала НЧ)>	Числовой	Измеренная НЧ величина для указанного номера канала НЧ

возможностей XML, в частности, ввод технологической информации в управляющий сервер, размещение и систематическое обновление результатов мониторинга на специализированном Веб-сервере.

Аналитический центр в Киеве отслеживает информацию по текущему состоянию объектов мониторинга в реальном времени. Передача данных на основе XML позволяет безопасным способом управлять процессом мониторинга. В настоящее время с участием автора статьи ведутся работы по объединению на основе XML мониторинговых систем завода в единый информационно-аналитический комплекс.

Стандартизация применения XML в АЭ диагностике. Весьма перспективным представляется начать диалог разработчиков систем АЭ диагностики в направлении внедрения стандарта XML и создания общей системы тегов. Это может обеспечить развитие АЭ диагностики в следующих направлениях: взаимной проверки средств диагностики, унификация различных систем, обмена опытом и кооперация.

Назовем актуальные области применения технологий XML в системах АЭ диагностики:

создание единого механизма сертификации АЭ систем различных производителей;

обмен результатами проведенных измерений между системами разных типов;

обработка и анализ данных, полученных системой одного типа, с применением системы другого типа;

дистанционное управление диагностическими процессами;

создание многоуровневых систем с полностью независимыми компонентами;

создание систем, отдельные части которых размещены на значительном удалении одна от другой, интеграция данных в масштабах крупных организаций и отраслей.

Для применения технологии XML в сфере АЭ диагностики предлагается разработать стандарт, описывающий требования к структуре XML документов и набору тегов для описания определенных типов данных. Естественно, успешное применение стандарта XML в АЭ диагностике будет зависеть от усилий разработчиков диагностических систем и пользователей по его внедрению, поэтому обсуждение проекта стандарта представляется весьма полезным.

Предлагаемые для использования в АЭ диагностике наименования тегов и их структурная взаимосвязь представлены в виде табл. 1–5, с описанием типов передаваемых в них данных:

унифицированное описание физических величин произвольного типа и подсчет числа однотипных блоков информации;

результаты измерений времени;

результаты акустико-эмиссионных измерений для многоканальных систем. Состоят из вложенных и повторяющихся тегов, описывающих информацию, полученную в различные моменты времени каждым каналом АЭ. Объединяют ее в так называемые события АЭ и группируют события в кластеры по координатному признаку;

результаты измерений дополнительных параметров, не относящихся к акустической эмиссии.



Таблица 5. Настроечные параметры АЭ системы

Наименование тега	Тип данных	Описание
<XCoord>	Числовой	Координата X размещения датчика АЭ
<YCoord>	Числовой	Координата Y размещения датчика АЭ
<Gain>	Числовой	Коэффициент усиления АЭ или НЧ канала
<Threshold>	Числовой	Величина порога ограничения минимальной амплитуды сигналов АЭ
<ThresholdFix>	Булев	Тип порога — постоянный или плавающий
<Sensor>	Вложенные теги типов <XCoord>, <YCoord>, <Gain>, <Threshold>, <ThresholdFix>, <Locked>	Содержит настроечную информацию для одного АЭ канала, соответствующего размещенному на объекте контроля датчику
<Sensors>	Вложенные теги типов <Sensor>, <Count>	Содержит датчики, объединенные в одну логическую группу
<BaseX>	Числовой	Расстояние по оси X между датчиками АЭ в случае их равномерного расположения
<BaseY>	Числовой	Расстояние по оси Y между датчиками АЭ в случае их равномерного расположения
<FilterMin>	Числовой	Минимальное значение частоты для фильтруемой полосы пропускания канала АЭ
<FilterMax>	Числовой	Максимальное значение частоты для фильтруемой полосы пропускания канала АЭ
<DeadTime>	Числовой	Время, на которое блокируется прием информации каналом АЭ после завершения текущего срабатывания датчика
<Strobe>	Числовой	Максимальное время, на которое канал АЭ открыт для выполнения единичного измерения
<ClusterSize>	Числовой	Характеристический размер области координат, в которой полученные сигналы АЭ логически объединяются в общий кластер
<SoundVelocity>	Числовой	Скорость звука в обследуемом материале

Это, как правило, низкочастотные параметры (Low Frequency Parameters), измеряемые с заданной периодичностью. Для таких параметров, помимо их фактических значений, указывают тип тарировки и тарировочные коэффициенты;

настроечные параметры АЭ системы: установка коэффициентов усиления, порогов, временных ограничений и т. д.

Представленная выше система тегов может при необходимости быть дополнена тегами для описания других видов данных, используемых в диагностическом контроле. Автор будет признателен за замечания, предложения и дополнения к предлагаемой системе тегов.

Весьма полезной представляется разработка в перспективе Государственного Стандарта Украины по использованию XML в АЭ диагностике. При наличии поддержки основных разработчиков диагностических систем и организаций, использующих эти системы, такой стандарт может быть предложен для использования в рамках международного сотрудничества. Учитывая универсальность проекта, а также то, что стандарт XML требует составления тегов на английском языке, имеются хорошие перспективы для его международного использования.

Выводы

Использование XML в информационных системах имеет ряд важных достоинств, таких как упрощение процедуры и повышение безопасности обмена данными, аппаратная и платформенная независимость, снижение затрат на интеграцию разнородных систем.

Технология XML позволяет вырабатывать внутриотраслевые стандарты обмена данными на основе соглашения об использовании тегов, что дает возможность организовать эффективное взаимодействие между разнородными системами АЭ диагностики, а также с дополнительным цифровым оборудованием.

Технология описания данных на основе XML может быть применена в технической диагностике, имеется опыт применения XML в автоматизированных системах АЭ мониторинга.

Стандартизация описания данных на основе XML в АЭ диагностике позволит создать единую методику сертификации АЭ систем различных типов.

Учитывая тенденцию к внутригосударственной и международной интеграции работ в области диагностики, необходима координация усилий разработчиков и пользователей АЭ систем Украины и зарубежья в разработке и применении стандартов описания данных на основе XML.



1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Инд-пром, 2001. — 815 с.
2. Недосека С. А. Объектный подход к решению задач механики несплошной среды и прогнозированию состояния материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 1. — С. 13–21.
3. Холзнер С. XML. Энциклопедия, 2-е изд. ISBN: 0619101873. — 2004. — 1104 с.
4. Carey P. New Perspectives on XML- Introductory. ISBN: 5-94723-651-6. — 2004. — 1216 p.
5. О непрерывном мониторинге резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / А. Я. Недосека, А. А. Грузд, М. А. Яременко, С. А. Недосека // Матер. науч.-техн. семинара «Прогрессивные технологии сварки в промышленности». — 20–22 мая 2003 г., Киев; УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ». — С. 85.
6. Недосека С. А. Контроль линии синтеза аммиака системой АЭ диагностики ЕМА-3У // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 24–28.

МГП «ИНДПРОМ»,
Киев

Поступила в редакцию
20.01.2005

НОВАЯ КНИГА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

В. А. Маслова, В. А. Стороженко. Термография в технической диагностике и неразрушающем контроле. Мягкая цветная обл., рус. яз., 160 с., цена с НДС 20 грн.

Монография посвящена одному из современных и активно развивающихся методов неразрушающего контроля качества материалов и изделий, основанному на регистрации температурного поля на поверхности контролируемого объекта. В основу монографии положены результаты многолетних исследований в области термографии, проводившихся в Украине коллективом НТЦ «Термоконтроль» Харьковского национального университета радиоэлектроники. Кроме того, обобщен мировой опыт применения термографии в различных отраслях промышленности: электроэнергетике, металлургии, машиностроении, строительстве и т. д. Показана эффективность применения термографии не только для контроля теплового режима объекта (обнаружению мест перегрева различного происхождения), но и для выявления дефектов его внутренней структуры: трещин, расслоений, непроваров и т. п.

Приведены физические основы термографии и рассмотрены особенности ее применения в различных аспектах: в диагностике (пассивный метод контроля), в дефектоскопии (активный метод контроля), а также в дефектометрии и в томографии.

Наряду с практическими приложениями термографии рассмотрены вопросы теории тепловой дефектоскопии и дефектометрии, а также методы расшифровки результатов термографии.

Дан обширный иллюстративный материал в виде тепловых карт (термограмм) различных объектов, а также графиков и схем, поясняющих закономерности теплового контроля и методику его проведения.

В Приложении приведены справочные таблицы для оценки применимости метода к различным объектам.

Монография предназначена для широкого круга специалистов по неразрушающему контролю, работающих в различных отраслях промышленности, а также может быть полезна для студентов специальности 7.09.09.03 — «Приборы и методы неразрушающего контроля» и слушателей центров подготовки и аттестации персонала по неразрушающему контролю системы EN 473:2000.

По вопросам приобретения обращаться
в «Издательство СМИТ» 61166, Харьков, пр. Ленина, 14
Тел. (057) 702-04-72 (доб. 229)
Факс (057) 702-13-07
E-mail: mn@smit.kharkov.ua



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И. Ф. БАБИЧЕВА, А. В. ШАРКО

Разработана математическая модель прогнозирования изменения механических характеристик промышленного оборудования в процессе эксплуатации. Для обработки эмпирических данных предложено использовать вейвлет-анализ и нейросетевые технологии, что способствует автоматизации процесса диагностических исследований и выявлению отклонений механических характеристик изделия от допустимых на более ранней стадии.

The paper describes a mathematical model developed for forecasting the change in mechanical characteristics of industrial equipment in operation. For empirical data processing it is proposed to use wavelet-analysis and neural network technologies, thus promoting automation of the process of diagnostic studies and revealing deviations in mechanical characteristics of the product from those admissible at an earlier stage.

Актуальность проблемы. В настоящее время при разработке автоматизированных систем диагностики и прогнозирования остаточного ресурса промышленных объектов все большую актуальность приобретает анализ сигналов с целью выделения информативных параметров, на основании которых создается база знаний для настройки системы. Реальные сигналы в большинстве случаев являются квазидетерминированными, т. е. они являются функциями ряда случайных и неслучайных параметров на некотором интервале времени. В связи с этим актуальной является задача фильтрации сигналов с целью повышения их информативности. Кроме того, точность прогноза повышается с увеличением количества входных параметров системы, что в свою очередь достигается комплексным использованием методов контроля. Однако применение большого количества методов резко усложняет настройку системы при практически неизменной точности прогноза, поэтому разработка новых технологий обработки информации с целью выделения совокупности характеристик, несущих информацию об исследуемом объекте, с использованием современных математических моделей способствует повышению эффективности работы автоматизированной системы технической диагностики. Решение этой проблемы соответствует государственным научно-техническим программам, которые сформулированы в законах Украины «О научной и научно-технической деятельности» и «О национальной программе информатизации».

Анализ публикаций. На современном этапе существуют системы НК, основанные на использовании различных методов [1–5]. Принцип действия каждого из них основан на измерении той или иной физической величины и установлении эмпирической корреляционной зависимости с физи-

ко-механическими характеристиками исследуемого металла. В зависимости от измеряемой структурно-чувствительной характеристики материала методы НК прочностных свойств можно разбить на три группы: механические, акустические и электромагнитные.

Наиболее полная классификация определения прочностных свойств металлов безобразцовыми механическими методами дана в работах [6, 7]. Показано, что при определении предела прочности по измерениям твердости коэффициент пропорциональности зависит от степени равномерной деформации, т. е. от упрочнения материала. Следует отметить, что хотя для определения прочностных свойств металла этими методами не нужно изготавливать специальные образцы, как это делается при испытаниях на разрывной машине, они могут быть лишь условно причислены к неразрушающим, так как на поверхности изделий после испытаний остаются отпечатки от индентора. Они являются своеобразными концентраторами напряжений и в отдельных случаях могут привести к разрушению деталей в процессе эксплуатации. Кроме того, для измерения твердости требуется тщательная подготовка поверхности изделий, что увеличивает трудоемкость контрольных операций.

Магнитные и вихревые методы контроля основаны на наличии корреляционных связей механических и физико-химических свойств изделий и их электрических и магнитных характеристик. В качестве таких информативных основных характеристик, используемых для контроля температурных режимов закалки и отпуска, определения твердости, содержания ферритной фазы, остаточного аустенита и других параметров, определяющих качество термообработки изделий из ферромагнитных сплавов магнитными методами, при-



меняются коэрцитивная сила, остаточная индукция, магнитная проницаемость и эффект Баркгаузена [8]. Основными недостатками магнитных и вихретоковых методов являются следующие факторы: при испытании этими методами на результаты измерений существенное влияние оказывают даже небольшие колебания химического состава сплава в пределах допуска на марку материала. Кроме того, в ряде случаев имеет место неоднозначная зависимость механических и физико-химических свойств изделий от их магнитных характеристик и электропроводности.

Акустические методы позволяют исследовать состояние материалов по скорости и времени распространения продольных, поперечных и поверхностных волн, по измеренным значениям частот собственных колебаний изделий, проводить структурные исследования по данным измерений коэффициента затухания, с использованием методов акустической спектроскопии, оценивать механические свойства по результатам изучения акустических процессов в инденторе, прогнозировать изменение напряженного состояния методами акустической эмиссии. Общим недостатком акустических методов является необходимость обеспечения надежного акустического контакта и хорошая подготовка поверхности контролируемого изделия. Кроме того, в мегагерцовом диапазоне большая часть энергии рассеивается на отдельных кристаллах, что снижает точность определения физико-механических характеристик.

Проанализировав сказанное выше, можно сделать вывод, что применение отдельных методов в системе контроля и прогнозирования не позволяет получить требуемую точность измерений. Актуальность поставленной проблемы определяется состоянием используемого оборудования на современном этапе, когда появилась острая необходимость продления срока службы промышленных объектов. Одним из выходов из сложившейся ситуации является создание системы диагностики и прогнозирования остаточного ресурса, основанной на комплексном использовании методов НК.

Целью статьи является разработка математической модели автоматизированной системы технической диагностики и прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования, основанной на комплексном использовании методов НК, для обработки данных, в которой используется вейвлет анализ и нейросетевые технологии.

Пусть вектор $\bar{\xi}$ представляет совокупность измеряемых параметров, анализ которых позволяет предсказать будущее техническое состояние $\bar{e}$ контролируемого объекта. На техническое состояние объекта влияют факторы, определяющие необра-

тимые процессы деградации физико-механических свойств объекта (вектор $\bar{X}$, а также случайные внешние и внутренние помехи (вектор $\bar{Y}$). При измерении параметров возможны погрешности измерений (вектор $\bar{Z}$), вследствие чего вместо истинного вектора $\bar{\xi}$ получается новый зашумленный вектор $\bar{\xi}_1$. Кроме того, на результаты прогнозирования влияют погрешности прогнозирования (вектор $\bar{W}$). Таким образом, будущее техническое состояние $\bar{e}$ объекта зависит от ряда случайных векторных аргументов:

$$\bar{e} = f(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{W}). \quad (1)$$

Математическая модель процесса прогнозирования представлена на рис. 1.

Вероятностный характер модели прогнозирования (1) определяется тем, что аргументы $\bar{X}$, $\bar{Y}$, $\bar{Z}$ и $\bar{W}$ являются случайными функциями. Получить зависимость (1) в аналитической форме для сложных объектов практически невозможно. Одним из вариантов решения поставленной задачи является метод расчленения общей задачи прогнозирования на две самостоятельные — задачу измерения прогнозирующих параметров, когда ра-

ботают с моделью вида $\bar{\xi}_1 = \varphi(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$. При этом на стадии, предшествующей измерению, проводится анализ всех влияющих факторов с целью уменьшения их количества, и задачу получения результата прогнозирования по модели вида $\bar{e} = \psi(\bar{\xi}_1, \bar{W})$. Однако эффективность подобной системы незначительна из-за большой трудоемкости обработки эмпирических данных и низкой точности прогноза. Основной проблемой является обработка многомерных зашумленных эмпирических данных, т. е. нахождение корреляционной зависимости между измеряемыми физическими и физико-механическими характеристиками контролируемого металла. Поставленная задача является задачей аппроксимации, решение которой с требуемой точностью можно получить при помощи нейронных сетей [9, 10]. Авторами статьи предлагается модель технической диагностики и прогнозирования, структурная схема которой показана на рис. 2.

Целью вейвлет-анализа сигнала $\bar{\xi}_1$ является очистка его от шума, т. е. выделение составляющей сигнала, несущей основную информацию об исследуемом объекте. В итоге получаем явную ана-

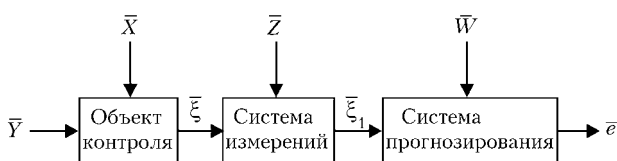


Рис. 1. Структурная схема системы прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования

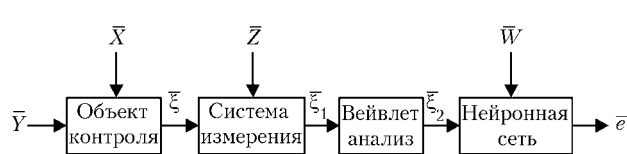


Рис. 2. Модернизированная схема технической диагностики и прогнозирования остаточного ресурса



литическую модель вида $\bar{e} = f(\bar{\xi}, \bar{W})$, в которой зависимость будущего технического состояния от случайных помех и погрешностей сведена к минимуму.

При использовании вейвлет-анализа предусматривается выполнение следующих этапов.

Вейвлет-преобразование сигнала. Предположим, что вектор $\bar{\xi}_1$ имеет последовательность, состоящую из 2^n точек $\{x_1, x_2, \dots, x_{2^n}\}$ для некоторого целого $n > 0$. Эту последовательность можно отождествить со следующей функцией из пространства V^n кусочно-постоянных функций на равноотстоящих интервалах длины $1/2^n$:

$$f(t) = x_1 \Phi_{n,0}(t) + \dots + x_{2^n} \Phi_{n,2^n-1}(t), \quad (2)$$

где $\Phi(t)$ — масштабирующие функции из пространства V^n .

Первым шагом вычисления вейвлет-преобразования последовательности $\{x_1, x_2, \dots, x_{2^n}\}$ является разложение $f(t)$ по альтернативному базису пространства V^n , половину которого составляют вейвлеты $\psi(t)$:

$$\begin{aligned} f(t) = & a_{n-1,0} \Phi_{n-1,0}(t) + \dots + \\ & + a_{n-1,2^{n-1}-1} \Phi_{n-1,2^{n-1}-1}(t) + \\ & + d_{n-1,0} \Psi_{n-1,0}(t) + \dots + d_{n-1,2^{n-1}-1} \Psi_{n-1,2^{n-1}-1}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где a — аппроксимирующие коэффициенты, определяющие грубую низкочастотную составляющую исходного сигнала; d — детализирующие коэффициенты, определяющие высокочастотную составляющую исходного сигнала.

Следующим шагом процесса преобразования является применение такого же базисного преобразования к членам равенства (3), содержащим аппроксимирующие коэффициенты. Детализирующие коэффициенты при этом остаются без изменения. Структурная схема вейвлет-преобразования представлена на рис. 3. Для получения аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов используем свойства ортогональности и нормированности. В базисе функций V^n все масштабирующие функции $\Phi(t)$, также как и вейвлет-функции $\psi(t)$ ортогональны. Кроме того, каждая $\Phi(t)$ и каждый $\psi(t)$ являются нормированными. Умно-

жим обе части выражения (3) на $\Phi_{n-1,j}(t)$ и проинтегрируем по t от 0 до 1. В результате получим

$$\int_0^1 f(t) \Phi_{n-1,j}(t) dt = a_{n-1,j}. \quad (4)$$

В силу ортогональности в правой части (4) остается только один член, а нормирование приводит к отсутствию коэффициента при $a_{n-1,j}(t)$. Теперь подставим правую часть равенства (2) вместо $f(t)$ в (4). При $j = 0$ левая часть равенства (4) будет:

$$\begin{aligned} \int_0^{1/2^n} x_1 \sqrt{2^n} \sqrt{2^{n-1}} dt + \int_{1/2^n}^{2/2^n} x_2 \sqrt{2^n} \sqrt{2^{n-1}} dt = \\ = (x_1 + x_2) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) 2^2 \left(\frac{1}{2^n} \right) = \frac{x_1 + x_2}{\sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Комбинируя (4) и (5), при $j = 0$ получаем

$$a_{n-1,0} = \frac{x_1 + x_2}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

Остальные коэффициенты $a_{n-1,j}$, $j = 0, \dots, 2^{n-1} - 1$ вычисляются аналогично:

$$a_{n-1,j} = \frac{x_{2j+1} + x_{2j+2}}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Аналогично, используя свойства ортогональности и нормированности функций $\Psi_{n-1,j}$, можно вычислить коэффициенты $d_{n-1,j}$ по следующей формуле:

$$d_{n-1,j} = \frac{x_{2j+1} - x_{2j+2}}{\sqrt{2}}. \quad (8)$$

В итоге получаем матрицу аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов на k -м уровне разложения.

Выделение и удаление шумовой составляющей исходного сигнала $\bar{\xi}_1$. Шумовые составляющие сигнала создают детализирующие коэффициенты с высоким содержанием шумовых компонент, имеющих большие случайные выбросы значений сигнала. Задав некоторый порог для их уровня и срезав по уровню детализирующие коэффициенты, можно уменьшить уровень шумов. При этом уровень ограничения можно устанавливать для каждого коэффициента отдельно, что позволяет строить адаптивные к изменениям сигнала системы очистки сигнала от шума на основе вейвлетов.

Обратное вейвлет-преобразование. Получим сигнал $\bar{\xi}_2$ из аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, содержание шумовой составляющей в котором сведено к минимуму. Для получения зависимости между параметрами, позволяющими определить будущее техническое состояние контролируемого объекта $\bar{e}$ и вектором из-

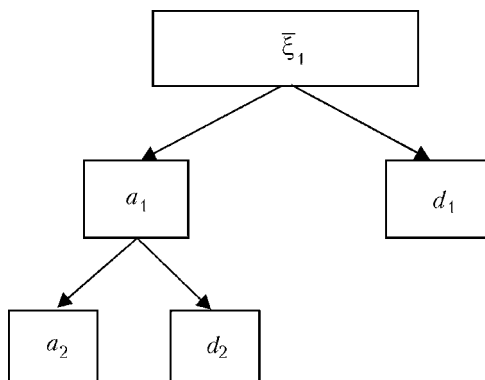


Рис. 3. Структурная схема быстрого вейвлет-преобразования сигнала

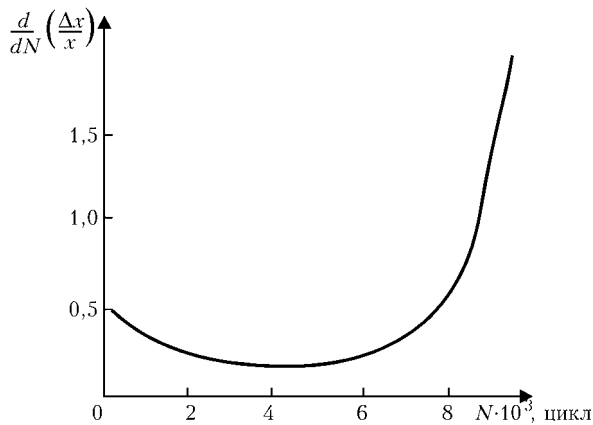


Рис. 4. Производная изменения скорости измеряемой величины по количеству циклов

меряемых характеристик $\bar{\xi}_2$, использовались нейросетевые технологии.

Использование нейронных сетей предусматривает выполнение следующих этапов:

определить входной вектор нейронной сети (входным вектором является набор эмпирических данных, полученных в процессе НК выбранными методами; размерность вектора определяется количеством измеряемых параметров);

определить выходной вектор сети, в качестве которых используются требуемые механические характеристики исследуемого металла;

определить тип и структуру сети: число слоев, связи между слоями; объекты, являющиеся весовыми коэффициентами, определить функцию ошибки системы и т. д.;

определить критерий качества и функционал ее оптимизации, зависящий от ошибки;

обучить сеть, в процессе чего определяются смещения и весовые коэффициенты до получения требуемой точности прогноза.

В результате обучения нейронная сеть становится способной в момент времени t вычислять упрежденные значения функции на временном интервале $[t + 1, t + \alpha]$ при подаче на ее вход значений функции F из интервала $[t - T + 1, t]$, где α — длина интервала упреждения; T — длина интервала наблюдения. Входной сигнал нейронной сети — это вектор значений функции F на интервале $[t - T + 1, t]$:

$$\bar{\xi}_2 = [F(t - T + 1), F(t - T + 2), \dots, F(t - 1), F(t)]. \quad (9)$$

Выходной сигнал нейронной сети в момент времени t — это вектор аппроксимированных нейронной сетью упрежденных на интервале $[t + 1, t + \alpha]$ значений функции F :

$$\bar{e}(t) = [\bar{e}_1(t), \bar{e}_2(t), \bar{e}_n(t)]. \quad (10)$$

Желаемый выходной сигнал нейронной сети в момент времени t — это вектор значений функции F на интервале $[t + 1, t + \alpha]$. Ошибка решения определяется как разность между желаемым и действительным выходными сигналами в дискретный момент времени t , т. е. ошибка решения показывает

расстояние до правильного значения. При настройке весов целью является минимизация значений вектора ошибки на каждом n -м примере.

Для прогнозирования и оценки остаточного ресурса исследуемого оборудования необходимо определить зависимость измеряемых параметров от накопления дефектности. Эта зависимость может быть определена известной U -образной кривой интенсивности отказов, показанной на рис. 4.

Из рисунка следует, что первоначальный спад скорости изменения измеряемой величины отвечает области приработочных отказов, а конец этапа сигнализирует о переходе к стадии нормальной эксплуатации. Дальнейшее резкое увеличение скорости изменения измеряемой характеристики указывает на переход в область износовых отказов и предупреждает об опасности дальнейшей эксплуатации детали или конструкции.

Решение задачи оценки остаточного ресурса акустическим методом контроля, основанном на изменении скорости ультразвука в металле в зависимости от структуры и накопления микродефектов при эксплуатации под воздействием циклически меняющихся нагрузок и температуры проводились на плоских образцах из стали 45, изготовленных с корсетным вырезом в средней части. Корсетный тип образца необходим для концентрации накоплений усталостных повреждений. Предварительная термическая обработка заключалась в нагреве при 870°C в течение 0,5 ч и охлаждении на воздухе. Рабочую поверхность образцов шлифовали до $R_z = 3,2$ мкм. Образцы циклически нагружали в отнулевом цикле напряжений при двух температурах: 20 и 200°C с частотой цикла 5 Гц и уровнями максимальных напряжений цикла 320, 400 и 550 МПа. Число циклов доводили до 10^5 . Скорость звука измеряли до и после приложения нагрузок. Часть образцов испытывали до разрушения методом малоциклового усталости. Скорость поверхностных волн измеряли периодически, по мере возрастания количества наработанных циклов N . Согласно полученным данным, с ростом числа циклов, уровня циклических напряжений и температуры испытаний скорость волн в образце уменьшается.

Изменение скорости поверхностных волн с наработкой при отнулевом цикле напряжений представлено на рис. 5, а. На рис. 5, б представлен вейвлет-сигнал, обработанный и очищенный от шумовой составляющей. Скорость звука измеряли относительно исходного (до циклических испытаний) состояния по мере нарастания числа циклов в процессе испытаний. Зависимость $v(N)$ состоит из трех этапов. На первом, продолжительностью около 10^3 циклов нагружения, происходит сравнительно быстрое, но замедляющееся к концу уменьшение скорости УЗ импульса. На втором, наиболее длительном, скорость распространения УЗ импульса линейно убывает с ростом числа циклов, причем наклон зависимости $\Delta v/v$ практически одинаков для всех образцов и не зависит от продолжительности второй стадии. При наступлении заключительного этапа скорость УЗ резко падает, а значение $\Delta v/v$ резко возрастает и продолжает уве-

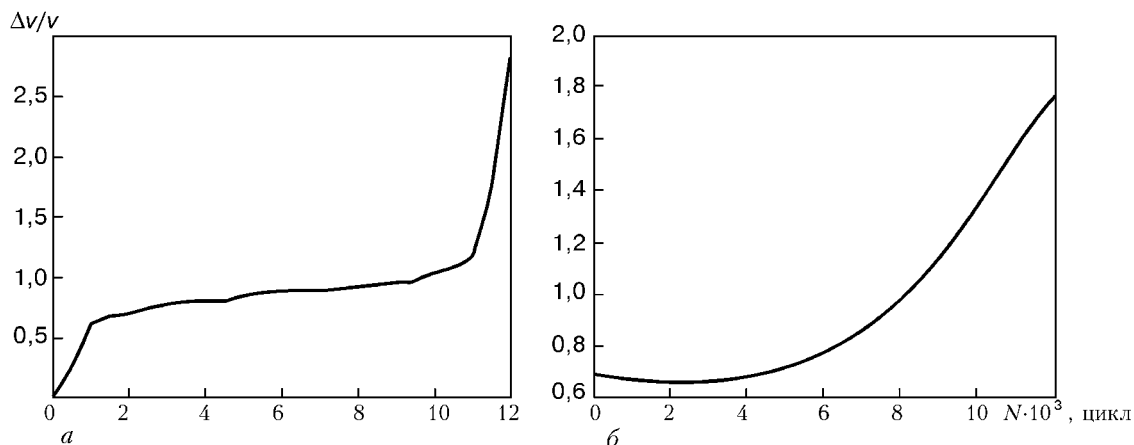


Рис. 5. Изменение скорости поверхностной волны на разных стадиях с увеличением количества циклов нагружений: а — исходный сигнал; б — вейвлет обработанный сигнал

личиваться вплоть до момента усталостного разрушения.

Первоначальный спад скорости УЗ импульса отвечает области приработочных отказов, а конец этапа сигнализирует о переходе к стадии нормальной эксплуатации. Дальнейшее резкое увеличение темпа спада скорости распространения УЗ импульса указывает на переход в область износных отказов и предупреждает об опасности дальнейшей эксплуатации детали или конструкции. Следует отметить, что наличие стадий у зависимостей физико-механических свойств от числа циклов нагружения носит универсальный характер, т. е. данное свойство наблюдается для большинства измеряемых физических характеристик. Из графиков также следует, что вейвлет предобработанный сигнал позволяет предсказать понижение прочностных характеристик конструкции на более ранней стадии, что позволяет своевременно принять меры по предупреждению аварийной ситуации на исследуемом объекте. Кроме того, точность прогноза будет существенно выше при использовании нескольких методов НК, так как это позволит увеличить количество информативных характеристик, подаваемых на вход нейронной сети, что способствует уменьшению ошибки при принятии экспертом решения о дальнейшей эксплуатации промышленного объекта.

Вывод

В результате выполненного теоретического исследования разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать изменение механических характеристик металлов в процессе эксплуатации объекта. Использование вейвлет-анализа в процес-

се предобработки сигнала позволяет выделить шумовую составляющую, возникающую вследствие влияния различных факторов на точность прогноза, что способствует выявлению отклонений механических характеристик изделия от допустимых на более ранней стадии. Применение нейронных сетей для определения прочностных характеристик металлов позволяет автоматизировать процесс контроля, что существенно снижает трудоемкость диагностических исследований.

1. Ботаки А. А., Ульянов В. А., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1983. — 179 с.
2. Рубин А. Л., Шарко А. В. Комплексный неразрушающий контроль качества термообработки деталей и заготовок. — М., 1990. — С. 21–28.
3. Шарко А. В., Бабичев С. А. Вычислительный информационный комплекс акустического контроля механических свойств твердых тел. — Херсон, Вестник ХГТУ. — 2000. — № 7. — С. 297–306.
4. Бабичев С. А., Шарко А. В. Сравнительная характеристика методов обработки многомерных данных на примере акустического контроля прочностных свойств металлов // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. — 2001. — № 2. — С. 43–52.
5. Шарко А. В., Бабичев С. А. К вопросу о возможности построения комплексных акустических систем технической диагностики металлопродукции // Там же. — 1997. — № 1. — С. 184–190.
6. Киселев Ю. А. Зависимость между твердостью по Виккерсу и пределом прочности при разрыве // Завод. лаб. — 1968. — № 5. — С. 596–597.
7. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. — М.: Металлургия, 1965. — 170 с.
8. Мельгуи М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей. — Минск: Наука и техника, 1980. — 184 с.
9. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. — М.: Горячая линия. — Телеком, 2001.
10. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети. — Matlab 6. М.: Диалог МИФИ, 2002. — 489 с.

Херсон. гос. техн. ун-т

Поступила в редакцию
08.11.2004



УЧЕТ РЕЖИМА РАБОТЫ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ КРАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО ПРИЗНАКУ ИХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

А. М. МАКОВСКИЙ

Рассматривается способ объединения математических моделей циклической прочности крановых деталей и классификации грузоподъемных кранов по режимам работы. В результате представляется возможным контролировать в процессе диагностирования кранов использование его режимного ресурса и накопления усталостных повреждений в деталях во взаимосвязи.

A method is considered for joining the mathematical models of cyclic strength of crane parts and classification of climbing cranes by operating modes. As a result it appears to be promising to monitor the consumption of crane operating life and accumulation of fatigue damage in the parts in interrelation during the crane diagnostics.

Техническая диагностика грузоподъемных кранов делится на общепараметрическую и детальную. В первом случае, кроме внешних параметров, определяют наработку крана и сравнивают ее с заданной при проектировании, во втором — определяют фактическое физическое состояние деталей конструкции. В работе [1] нами было показано, как можно определять остаточный режимный ресурс крана на основании стандарта ISO4301 и ГОСТ 25546–82. Здесь приводятся основные аналитические зависимости, позволяющие связать наработку крана, определяемую его режимной группой, с диагностическим признаком циклической прочности деталей крана, участвующих в подъеме груза. В первую очередь сюда относятся элементы металлической конструкции, а также несущие детали механизма подъема, испытывающие число циклов нагружения в полном соответствии с числом подъемов груза.

Согласно стандартам ISO 4301 и ГОСТ 25546–82 по режиму работы грузоподъемные краны делятся на восемь групп. Каждая группа может быть описана следующим аналитическим выражением [1]:

$$K = \frac{\lg \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right)^m \frac{C_i}{\alpha \beta}}{\lg 2} - 2, \quad (1)$$

где Q_i — массы грузов, поднимаемых краном за отмеченный отрезок времени; $Q_{\max}$ — номинальная грузоподъемность крана; C_i — число подъемов грузов каждой массы; n — число выделенных грузов массы Q_i ; α , β — коэффициенты пропорциональности.

Введем обозначение для подлогарифмического выражения в числителе формулы (1) и назовем это выражение наработкой крана S :

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right)^m \frac{C_i}{\alpha \beta}. \quad (2)$$

Если принять $K = K_0$, где K_0 — паспортная (расчетная) режимная группа крана, то наработка за срок службы крана L_0 будет $S = S_0$.

Если годовая наработка крана за весь срок службы постоянна, то

$$S_0 = L_0 W_1, \quad (3)$$

где W_1 — годовая наработка крана,

$$W_1 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right)^m \frac{C_i}{\alpha \beta}.$$

Формулу (1) для полного срока службы крана можно представить так:

$$K_0 = \frac{\lg L_0 W_1}{\lg 2} - 2. \quad (4)$$

Отсюда выражение для L_0 получим в виде:

$$L_0 = \frac{10^{K_0 \lg 2 + 2 \lg 2}}{W_1}. \quad (5)$$

При расчете крановых деталей на циклическую прочность используют эквивалентные напряжения в расчетном сечении

$$\sigma_{\text{э}} = \sigma_{\max} \sqrt[m]{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \right)^m \frac{N_i}{N_{\text{э}}}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\max}$ — наибольшие напряжения; σ_i , N_i — соответственно действующие напряжения и число их циклов; $N_{\text{э}}$ — число циклов эквивалентных напряжений, $N_{\text{э}} = \sum_{i=1}^n N_i$.

В выражении (6) введем обозначение:

$$s = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \right)^m N_i \quad (7)$$

и условно назовем его наработкой детали.



Для σ_a и N_a , которые приводят деталь к разрушению в расчетном сечении, существует зависимость:

$$\sigma_a = \sigma_{rk} \sqrt[m]{(N_0/N_a)}, \quad (8)$$

где σ_{rk} — неограниченный предел выносливости материала; N_0 — базовое число циклов.

Тогда

$$\sigma_{\max} \sqrt[m]{S/(N_a)} = \sigma_{rk} \sqrt[m]{(N_0/N_a)}.$$

Из этого соотношения следует, что условием разрушения детали является выполнение условия:

$$s = N_0 (\sigma_{rk}/\sigma_{\max})$$

Из выражения (8)

$$N_a = N_0 (\sigma_{rk}/\sigma_a)^m.$$

С учетом (5) и (6) имеем

$$N_a = (\sigma_{rk}/\sigma_{\max})^m \frac{N_0}{S}. \quad (9)$$

Если принять $S = l_0 s_1$, где s_1 — годовая наработка детали; l_0 — срок службы детали до разрушения в расчетном сечении, то

$$N_a = \left(\frac{\sigma_{rk}}{\sigma_{\max}} \right)^m \frac{N_0}{l_0 s_1}. \quad (10)$$

Обозначим

$$(\sigma_{rk}/\sigma_{\max})^m = \varepsilon. \quad (11)$$

Тогда срок службы детали

$$l_0 = \frac{\varepsilon}{s_1} \frac{N_0}{N_a}.$$

Обозначим

$$N_a/N_0 = v. \quad (12)$$

Тогда

$$l_0 = \varepsilon v / s_1. \quad (13)$$

Сопоставим годовую наработку крана, определенную по формуле (3), с годовой наработкой детали, определенной по формуле (7). Введем коэффициент пропорциональности между S_1 и W_1 в предположении, что Q_i и σ_i , а также что C_i и N_i связаны линейно,

$$\xi = W_1/s_1. \quad (14)$$

Примем условие, что срок службы детали l_0 равен сроку службы крана L_0 , т. е.

$$l_0 = L_0.$$

Тогда с учетом (4) и (13) можно получить:

$$\frac{10^{K_0 \lg 2 + 2 \lg 2}}{W_1} = \frac{\varepsilon v}{s_1}.$$

Дальнейшие преобразования и подстановка данных стандарта ISO 4301 приводят к такой зависимости:

$$K_0 = \frac{\lg \varepsilon v}{0,3} + 8. \quad (15)$$

Пусть $\sigma_{\max} = \sigma_{rk}$; $N_a = N_0$. Тогда $\varepsilon v = 1$, $\lg \varepsilon v = \lg 1 = 0$, $K_0 = 8$.

Пусть $K_0 = 1$. Тогда $\lg \varepsilon v = -2,1$,

$$\varepsilon v = 10^{-2,1} = \frac{1}{10^{2,1}} \approx 0,01.$$

Из этого следует, что для $L \leq K_0 \leq 8$ значение εv изменяется в пределах $0,01 \leq \varepsilon v \leq 1$.

Из формулы (15) получим табличные значения режимной группы для разных значений εv (таблица).

Табличные значения режимной группы K_0

εv	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,250	0,5	1
K_0	1	2	3	4	5	6	7	8

Выводы

При диагностировании кранов определяют их режим работы, т. е. режимную группу по стандартам ISO 4301 и ГОСТ 25546-82. При этом расчетным параметром является наработка крана.

При диагностировании кранов по признаку поврежденности конструкции в результате утраты циклической прочности деталей определяют эквивалентные напряжения и число их циклов. Их сочетание можно назвать наработкой расчетного сечения детали на его циклическую прочность.

Приравнивая срок службы крана, определяемого его паспортной режимной группой, т. е. запроектированной наработкой, к сроку службы детали, определяемому действующими напряжениями и числом их циклов, можно получить аналитическую связь между наработкой краном режимной группой и ресурсом деталей конструкции по признаку их циклической прочности.

Полученные зависимости позволяют при диагностировании кранов косвенным путем определять остаточный ресурс работы элементов конструкций, определяя остаточный режимный ресурс крана по стандартам ISO 4301 и ГОСТ 25546-82.

1. ИСО 4301/1. Краны и подъемные устройства. Классификация. Общие положения.
2. ГОСТ 25546-82. Краны грузоподъемные. Режимы работы.
3. Маковский А. М. Диагностирование кранов по остаточному режимному ресурсу на основе классификации стандарта // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1991. — № 1. — С. 29-32.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБНО-ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. Я. НЕДОСЕКА, М. А. ОВСИЕНКО, Л. Ф. ХАРЧЕНКО, М. А. ЯРЕМЕНКО

Представлены результаты исследования влияния особенностей распространения сигналов акустической эмиссии в различных типах изделий, что может быть учтено при проведении акустико-эмиссионного (АЭ) контроля трубо-оболочечных конструкций в условиях производства для определения необходимого количества и мест установки акустических преобразователей.

The paper gives the results of studying the influence of the features AE signal propagation in different types of products, which may be taken into account during AE testing of pipe-shell structures under the production conditions to determine the required number and position of mounting the acoustic transducers.

Для успешного решения задач, связанных с повышением надежности работы различных видов изделий, необходимо разрабатывать и внедрять в практику новые методы технической диагностики и контроля, совершенствовать уже используемые. Одним из таких методов является АЭ метод контроля. Следует отметить, что внедрение этого метода в практику контроля требует учета целого ряда особенностей контролируемых конструкций, влияния этих особенностей на изменение параметров распространяющейся волны. Рассмотрим эти вопросы более подробно.

Для изучения особенностей распространения АЭ волн были проведены обследования отдельных участков трубопроводов, сосудов и резервуаров технологического назначения на различных предприятиях химической, нефтехимической и газовой отраслей промышленности. При проведении АЭ контроля в условиях производства необходимо учитывать следующие особенности: высокий уровень производственных шумов, что затрудняет локацию АЭ сигналов; наличие изоляции, приводящее к дополнительному поглощению энергии волны; наличие переходов труб (обечаек) разного диаметра; наличие отводных трубопроводов; наличие клапанов, кранов и фланцевых соединений, что приводит к увеличению степени затухания сигнала (поглощение, рассеивание) в 5...10 раз по сравнению с участками с постоянной толщиной; влияния повышенных температур на изменение характеристик сигнала.

При изучении особенностей характеристик распространения волн для определения возможного расстояния между датчиками необходимо выде-

лить и зарегистрировать в условиях помех моду сигнала с максимальным значением амплитуды, определить коэффициент затухания сигнала в материале. Экспериментальные данные показывают, что для стальных труб затухание УЗ волн составляет как в случае пустой трубы, так и заполненной, величину порядка 0,2 дБ/м. Это позволяет разносить датчики АЭ на расстояние более 100 м. Измерение скоростей распространения сигнала при работе на газопроводах показало, что локацию следует проводить для моды, распространяющейся со скоростью 3,5 мм/мкс, а при работе на нефтепроводах — 1,5 мм/мкс. Скорость изменяется в зависимости от материала трубы, температуры и других характеристик. В случае подкладной прокладки трубопровода следует учитывать глубину залегания трубы и характеристики почвы.

Ослабление амплитуды УЗ волн, распространяющихся в среде, определяется затуханием и описывается следующим выражением:

$$A = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

где α — коэффициент затухания (Нп/м).

Коэффициент затухания УЗ колебаний определяется расстоянием (длиной пути) в метрах, на котором амплитуда плоской волны уменьшается в $e = 2,718$ раз.

Для определения коэффициента затухания применялись (рис. 1): генератор импульсов Г5-54; излучатель УЗ колебаний, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ (ИЭС); приемник УЗ колебаний (ИЭС); объект контроля; осциллограф

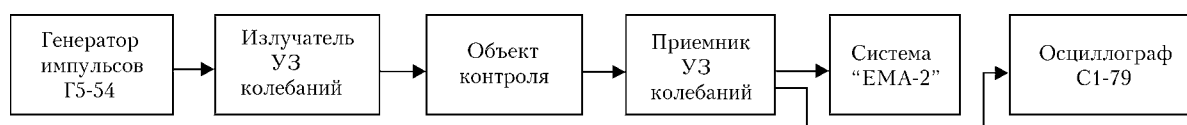


Рис. 1. Структурная схема измерения коэффициента затухания УЗ волн



Рис. 2. Участок трубопровода с установленными датчиками для определения коэффициента затухания УЗ колебаний



Рис. 4. Участок объекта контроля, подготовленный для определения коэффициента затухания УЗ колебаний

С1-79; система технической диагностики «ЕМА-2»; соединительные элементы.

На излучатель УЗ колебаний подавали сигнал с выхода генератора импульсов Г5-54. Параметры сигнала: длительность — 2 мкс; амплитуда — 10 В; частота повторения — 10 Гц.

Излучатель УЗ колебаний в процессе исследований перемещали относительно приемника. Измерения проводили через фиксированное расстояние (1... 10 м) по горизонтальному (вертикальному) сечению контролируемого объекта. На экране осциллографа наблюдали за формой сигнала и проводили измерение значений амплитуды. Излучатель УЗ колебаний устанавливали в одну точку пять раз. Данные по пяти измерениям усредняли.

Для определения коэффициента затухания УЗ колебаний на участках аммиакопровода приемник и излучатель устанавливали на верхней образующей трубы. На рис. 2 показан подготовленный участок с установленными датчиками трубопровода для определения коэффициента затухания на объекте контроля. Излучатель УЗ колебаний в процессе исследований перемещали относительно приемника по верхней образующей трубы на участках без защитного кожуха (в колодцах компенсаторов). Измерения проводили через 10 м. Полученные данные представлены на рис. 3.

Согласно формуле (1):

$$\alpha = 1,0986/40 = 0,0275 \text{ Нп/м}$$

и затухание сигнала будет

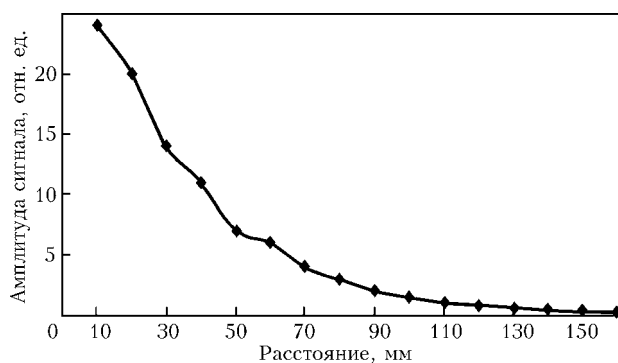


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала АЭ от расстояния между приемником и излучателем УЗ сигнала

$$N_{\alpha} = 0,235 \text{ дБ/м.}$$

Аналогичные исследования проведены на трех аммиакохранилищах, представляющих собой вертикальные цилиндрические сосуды с крышкой высотой 21 м, диаметром основания 50 м.

Аммиакохранилища в момент проведения АЭ прозвучивания находились без рабочего продукта, изоляционное покрытие было снято. На рис. 4 показан участок объекта контроля, на котором проведено определение коэффициента затухания УЗ колебаний.

Данные измерений представлены в виде графических зависимостей на рис. 5.

Анализируя зависимости амплитуд сигнала АЭ от расстояния между приемником и излучателем УЗ сигнала, можно отметить, что наблюдается неравномерность распределения звуковой волны в зависимости от соотношения между фазами волн, складывающихся в той или иной точке.

Геометрическая сумма векторов прямой и обратной волны определяет амплитуду суммарной волны:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi},$$

где A — амплитуда суммарного колебания; A_1 — амплитуда прямой волны; A_2 — амплитуда обратной волны; φ — разность фаз между исходными волнами в данной точке.

Наблюдается нарушение энергетического сложения волн, т. е. результирующая амплитуда может быть как больше, так и меньше суммы амплитуд каждой из составляющих волн.

Ослабление амплитуды УЗ волны происходит по экспоненциальному выражению (1).

На эту экспоненту накладывается девиация суммарной амплитуды, поэтому необходимо выделение самой экспоненты. Она проходит через ординату 7 м. Таким образом, коэффициент затухания УЗ колебаний для аммиакохранилищ:

$$\text{№ 1: } \alpha = 0,615/7 = 0,088 \text{ Нп/м } (N_{\alpha} = 0,763 \text{ дБ/м});$$

$$\text{№ 2: } \alpha = 0,693/7 = 0,099 \text{ Нп/м } (N_{\alpha} = 0,86 \text{ дБ/м});$$

$$\text{№ 3: } \alpha = 0,536/7 = 0,076 \text{ Нп/м } (N_{\alpha} = 0,665 \text{ дБ/м}).$$

При определении коэффициента затухания АЭ сигнала на поверхности сферических объектов контроля (например, шарового газгольдера, име-

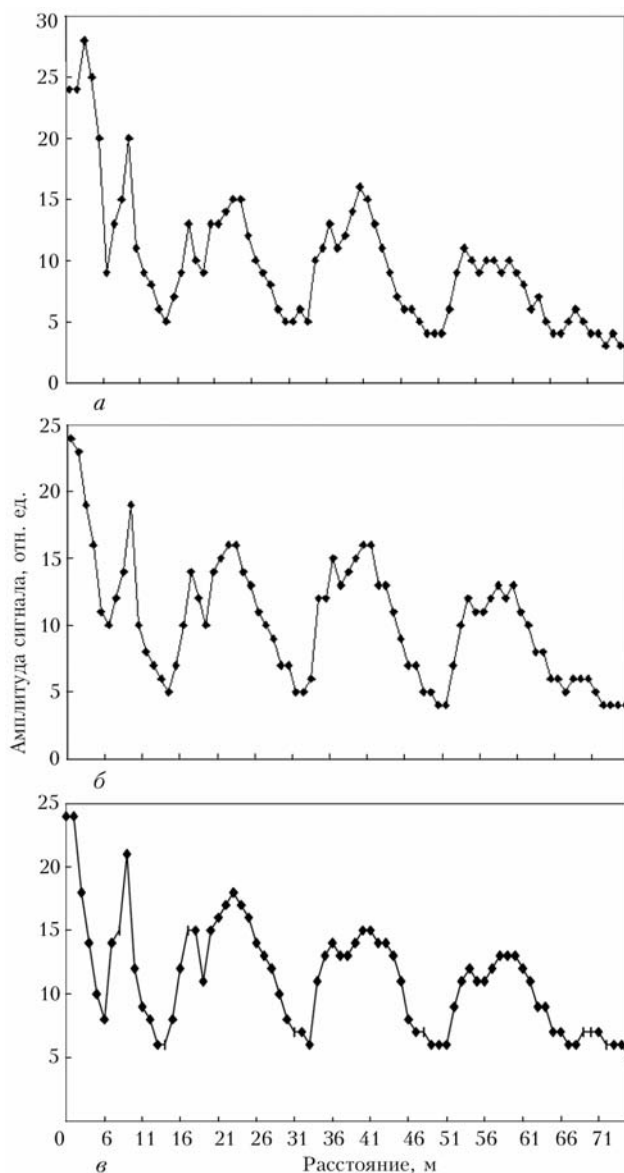


Рис. 5. Зависимости амплитуд сигнала АЭ от расстояний между приемником и излучателем УЗ сигнала на аммиакохранилищах № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в)

ющего диаметр 10,5 м) излучатель УЗ колебаний перемещали через 1 м по геодезической линии (большому кругу) в направлении от вершины к нижней точке сферы. Внешний вид объекта контроля представлен на рис. 6.

Представим полученные данные в графическом виде (рис. 7).

Амплитуда УЗ волны в данном случае определяется согласно выражению:

$$A = A_0 e^{-\alpha x(1 + k \sin^2(x/R))},$$

где x — расстояние по геодезической линии от источника УЗ колебаний до приемника; k — коэффициент формы изделия; R — радиус сферы.

Коэффициент затухания УЗ колебаний для шарового газгольдера:

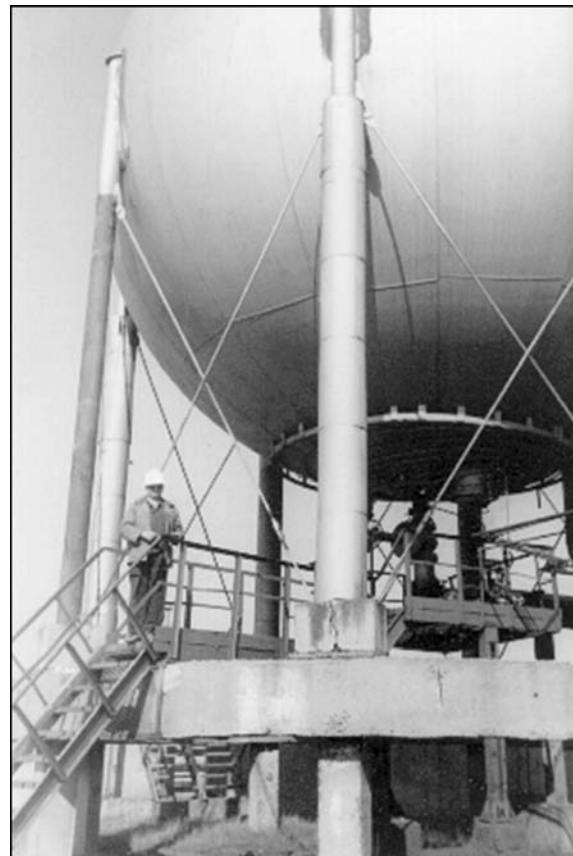


Рис. 6. Сферический объект контроля, на котором было проведено определение коэффициента затухания УЗ колебаний

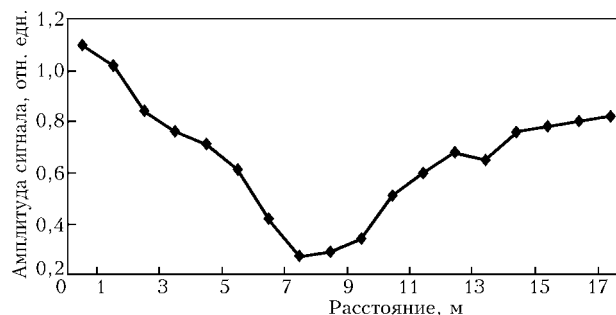


Рис. 7. Зависимость амплитуды сигнала АЭ от расстояния между приемником и излучателем УЗ сигнала (шаровой газгольдер; между 8 и 9-м измерением проходит горизонтальное сечение сферы)

$$\alpha = \frac{1,3}{10} = 0,13 \text{ Нп/м } (N_\alpha = 1,13 \text{ дБ/м}).$$

Анализируя зависимости амплитуд сигнала АЭ от расстояния между приемником и излучателем УЗ сигнала, можно отметить, что наблюдается неравномерность распределения звуковой волны в зависимости от соотношения между фазами волн, в результате которой амплитуда суммарной волны уменьшается к полюсу, находящемуся на четверти расстояния геодезической линии от источника УЗ колебаний (минимум), и увеличивается к другому полюсу, находящемуся на половине длины геодезической линии.

Выводы

Коэффициент затухания УЗ колебаний на участках аммакопровода составляет 0,0275 Нп/м, что позволяет разносить приемные преобразователи АЭ для проведения контроля на расстояния до 100 м.

Коэффициент затухания УЗ колебаний на аммакохранилищах — 0,076... 0,099 Нп/м. Это позволило определить оптимальное расстояние между приемными преобразователями АЭ — 15 м и схему их размещения на объекте.

Коэффициент затухания УЗ колебаний на шваром газгольдере составляет 0,13 Нп/м. Исходя из этого оптимальное расстояние между акустическими преобразователями — до 10 м по геодезической линии.

При проведении АЭ контроля трубно-оболочечных конструкций больших размеров необходимо

учитывать особенности распространения АЭ волн в таких конструкциях, что позволит повысить достоверность получаемой АЭ информации, точность определения координат мест повышенной АЭ активности, обоснованно установить оптимальное количество приемных преобразователей.

1. ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. — Київ, Держ. комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2003. — 47 с.
2. О применении метода акустической эмиссии для контроля промышленных конструкций / А. Я. Недосека, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко, М. А. Яременко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 3. — С. 3-6.
3. Рекомендации по применению акустико-эмиссионной диагностики технологического оборудования и трубопроводов газохимических комплексов. — М.: ИРЦ «Газпром», 1997. — 154 с.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справ. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1976. — 326 с.

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

Поступила в редакцию
24.02.2005



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ "ПРОИЗВОДСТВО И ЗАЩИТА — 2005" 29 НОЯБРЯ — 2 ДЕКАБРЯ 2005 г.

Украина, Киев, Международный выставочный центр, Броварской пр-т, 15

Организаторы:

Министерство промышленной политики Украины
Украинская Национальная Компания
«Укрстанкоинструмент»
ЗАО «Международный выставочный центр»

При поддержке:

Министерства обороны Украины
Министерства топлива и энергетики Украины
Государственного комитета Украины по вопросам
технического регулирования и потребительской
политики
Государственного комитета Украины по надзору за
охраной труда

В рамках форума пройдут следующие международные специализированные выставки:



**МЕТАЛЛО-
ОБРАБОТКА**

(металлообрабатывающие технологии,
оборудование)



**УКРИНТЕР
ТЕХ**

(промышленные технологии, оборудование)



**ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ,
ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ**

(контрольно-измерительные приборы,
лабораторное и испытательное
оборудование, метрология, сертификация)



**БЕЗОПАСНОСТЬ
ПРОИЗВОДСТВА**

(средства защиты, безопасность рабочей зоны)



СУБКОНТРАКТЫ

(размещение заказов по кооперации)



**УКРВТОР
ТЕХ**

(комиссионная техника, оборудование)

Во время форума состоится ряд конференций и научно-технических семинаров, посвященных вопросам развития научно-производственного потенциала машиностроительной отрасли, высокоэффективного маркетинга и менеджмента на промышленных предприятиях и др. Предприятия и организации смогут продемонстрировать весь спектр выпускаемой продукции по различным направлениям деятельности в рамках соответствующих тематических разделов, а посетители — получить необходимую информацию и ознакомиться с основными и сопутствующими технологиями.

Подробную информацию о Международном выставочном центре и мероприятиях, проводимых на его территории, Вы можете найти на наших сайтах: <http://www.tech-expo.com.ua>, <http://www.iec-expo.com.ua>.

Контактный тел.: (044) 201 1161
e-mail: reklama@iec-expo.com.ua

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ДЕФЕКТОСКОПА

В. И. ГОРДЕЛИЙ, В. Е. ЧАБАНОВ

Приведено математическое моделирование генераторов, применяемых в дефектоскопах, и анализируются их сравнительные качества. Показан характер воздействия электроакустического тракта и пьезопреобразователей на временные и спектральные характеристики излучаемых акустических сигналов.

Mathematical simulation of generators, used in flaw detection, is given, and their comparative qualities are analyzed. Shown is the nature of the impact of electroacoustic circuit and piezotransducers on the time and spectral characteristics of the emitted acoustic signals.

При анализе работы ультразвуковых (УЗ) дефектоскопов основное внимание уделяется трем его узлам, а именно: электрическому тракту возбуждения пьезопреобразователя, самому пьезопреобразователю, а также тракту усиления и обработки информации. Причем, центральным и наиболее ответственным узлом по праву считается пьезопреобразователь, а все другие узлы в конечном итоге являются вспомогательными и служат для его возбуждения и приема, анализа получаемой с его помощью информации. Вместе с тем результат работы дефектоскопа, т. е. его чувствительность, разрешающая способность, объекты контроля и получаемая информация формируется всеми тремя указанными узлами. В настоящей работе рассмотрим первые из этих факторов.

Исследование тракта возбуждения дефектоскопа. Генераторы электрических импульсных сигналов, применяемых в УЗ дефектоскопах, бывают самых различных видов. Рассмотрим их сравнительные достоинства, недостатки, и на этом фоне оценим качества рассматриваемых приборов.

Одним из наиболее распространенных источников электрических сигналов дефектоскопов является генератор ударного возбуждения. Им формируется резко меняющаяся амплитуда напряжения, а все частотные свойства акустического сигнала устанавливаются параметрами самих преобразователей. Характеристики таких сигналов можно описать функцией:

$$F_1(\tau) = 1 - (1 - e^{-\eta(\tau - \tau_0)})U(\tau - \tau_0), \quad (1)$$

где τ_0 — момент срыва электрического сигнала; η — показатель его ослабления; $U(\tau - \tau_0)$ — единичная ступенчатая функция Хевисайда.

Причем, регулированием показателя добиваются увеличения спектральной плотности указанного импульса. Временные и спектральные характеристики таких сигналов показаны на рис. 1.

Несомненным достоинством таких генераторов являлась их простота. Но повышенная зависимость от электроакустического тракта делает такие дефектоскопы неустойчивыми к параметрам применяемых УЗ преобразователей и объектов контроля. К тому же их КПД в связи с высокой интенсивностью неиспользуемых низкочастотных сигналов оказывается чрезвычайно низким.

В других типах генераторов формируются обычные монохроматические сигналы, амплитуды которых модулируются по различным законам. В частности, один из таких типовых импульсов можно описать следующей функцией:

$$F(t) = \left[\Phi(\tau_0 - t) \frac{(1 - e^{-\eta_1 t})}{(1 - e^{-\eta_1 \tau_0})} + (1 - \Phi(\tau_0 - t)) e^{-\eta(t - \tau_0)} \right] \times \cos(\omega_0 t), \quad (2)$$

в которой параметр η_1 определяет длительность возрастающей части импульсного сигнала; η — убывающей; τ_0 — его временную ширину; ω_0 — круговую рабочую частоту. Типовые характеристики таких сигналов представлены на рис. 2.

Может применяться также и иная форма огибающих импульсов. Вместе с тем преимуществом таких генераторов является сравнительно простой способ управления рабочей частотой и спектральной шириной излучаемых сигналов, отсутствие в них низкочастотной составляющей. Однако большая длительность таких импульсов существенно понижает разрешающую способность контроля.

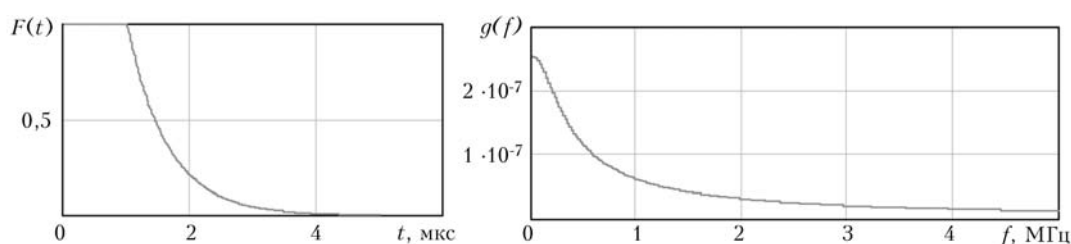


Рис. 1. Временные $F(t)$ и спектральные $g(f)$ характеристики типовых сигналов генератора ударного возбуждения преобразователей

© В. Е. Чабанов, В. И. Горделий, 2005

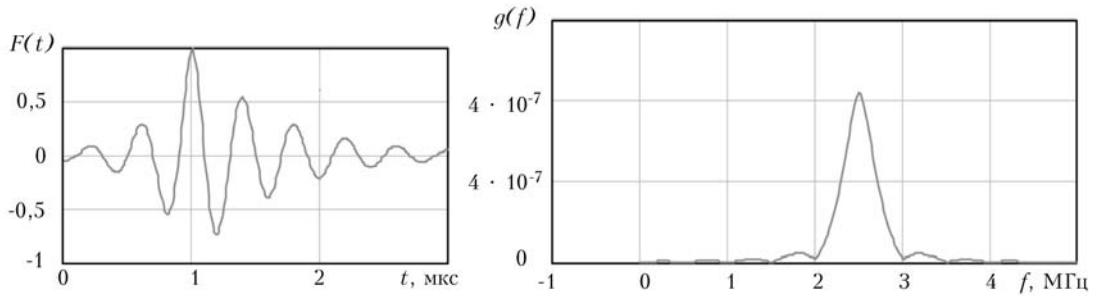


Рис. 2. Типовая временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики сигналов, описанных выражением (2)

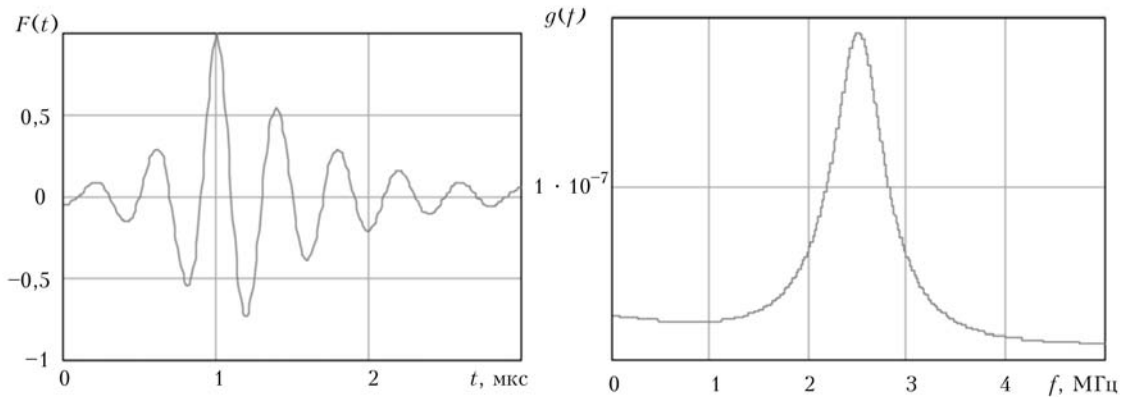


Рис. 3. Временные $F(t)$ и спектральные $g(f)$ характеристики типовых сигналов, часто применяемых в дефектоскопах

Другая модификация указанных импульсных сигналов может быть описана формулой

$$f(t) = \cos(\omega_0 t) [\exp(\eta_1 t)U(-t) + \exp(-\eta_2 t)U(t)]. \quad (3)$$

Их временная и спектральная формы показана на рис. 3.

У таких генераторов достигается малая длительность импульсного сигнала и сравнительно широкая спектральная ширина, но они оказываются зависящими как от генератора, так и от преобразователя и всего электроакустического тракта.

В электрическом тракте возбуждения дефектоскопа может быть также предусмотрено периодическое воздействие электрического генератора, излучающего набор прямоугольных импульсных сигналов, амплитуды которых изменяются по определенному закону, а длительности и скважность устанавливаются рабочей частотой преобразователя. Таковым, в частности, является дефектоскоп DIO-562.

Импульсные сигналы указанного генератора можно описать следующей функцией:

$$F(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} E(n)f_n(\tau). \quad (4)$$

$$\text{Здесь } f_n(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{при } 2n\tau_0 < \tau < 2n\tau_0 + \tau_0, \\ 0 & \text{в других случаях;} \end{cases}$$

$E(n)$ — функция, описывающая закон изменения амплитуды возбуждающего преобразователь электрического сигнала; τ_0 — длительность каждого прямоугольного импульса или их скважности.

В частности, в исследуемом дефектоскопе функция $E(n)$ представляет собой вероятностную функцию Гаусса. Она может быть описана выражением

$$E(n) = \exp \left\{ -\frac{[-n + (N + 1)/2]^2}{B^2} \right\},$$

в котором параметр B^2 — дисперсия; N — число прямоугольных импульсов в сигнале (рис. 4).

Как и раньше, временные функции здесь нормированы, время отсчитывается в секундах. Спектральные характеристики указанных функций описываются выражением и приведены на рис. 5:

$$f_1(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{n=0}^{N-1} E(n) e^{i\omega(2n+1/2)\tau_0} \frac{\sin(\omega\tau_0/2)}{\omega}. \quad (5)$$

Здесь частота измеряется в мегагерцах. Из анализа полученных характеристик видно, что чем больше импульсов в сигнале, т. е. чем он длиннее, тем меньшим оказывается спектральный фон в неработающей части частот, более добротной является его спектральная характеристика. Преимуществом таких генераторов является стабильность излучаемых им сигналов, слабая зависимость формируемых с его помощью акустических импульсов от частотных параметров преобразователей. Недостатком таких сигналов служит их большая длительность и наличие мощных низкочастотных сигналов, которые, если их не подавить соответствующими фильтрами, могут создавать помехи при неразрушающем контроле.

Ниже представлены характеристики при использовании другого, асимметричного закона на-

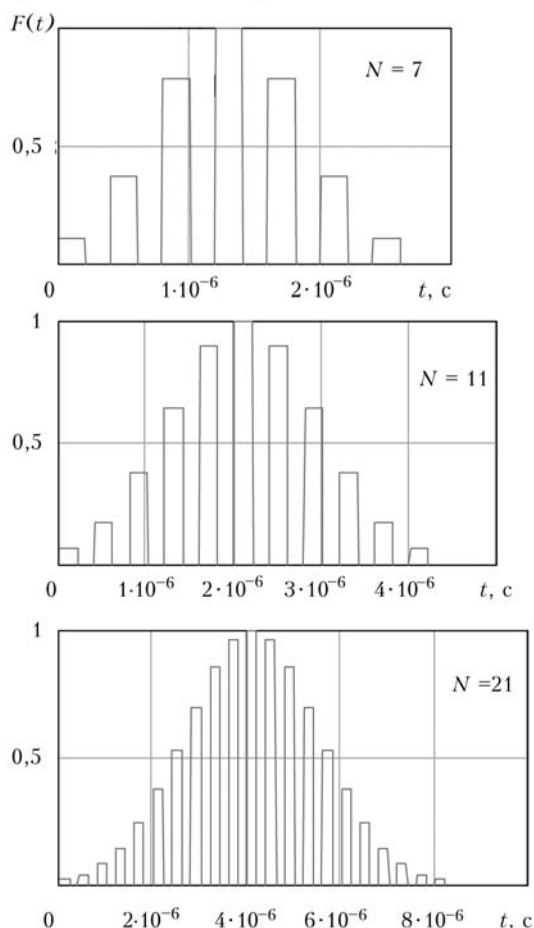


Рис. 4. Временные формы электрического импульсного сигнала, применяемого в дефектоскопе ДТО-562 для возбуждения пьезопреобразователей при различном числе импульсов N

растания и убывания амплитуд прямоугольных сигналов в импульсе, описываемого функцией:

$$E(n) = \left\{ \frac{e^{\eta_1 n}}{e^{\eta_1 (\lceil N/3 \rceil - n)}} U(\lceil N/3 \rceil - n) + \frac{e^{-\eta n}}{e^{-\eta (\lceil N/3 \rceil - n)}} U(n - \lceil N/3 \rceil) \right\}. \quad (6)$$

Здесь функция $\lceil Z \rceil$ обозначает целую часть числа Z , меньшую ее величины; $U(Z)$ — единичная ступенчатая функция Хевисайда; η_1 и μ — экспоненциальные множители, характеризующие нарастающую и убывающую части импульсного сигнала (рис. 6).

Из результата следует, что внесение асимметрии не оказывает существенного влияния на характеристики используемых для возбуждения преобразователей импульсных сигналов, но делает их менее длительными.

В случае, если низкочастотная составляющая импульсных сигналов отсекается соответствующими высокочастотными фильтрами, то временные и спектральные их характеристики имеют вид, представленный на рис. 7, 8.

Из сравнения приведенных рисунков видно, что для сигнала симметричного вида (рис. 4) применение высокочастотных фильтров существенно

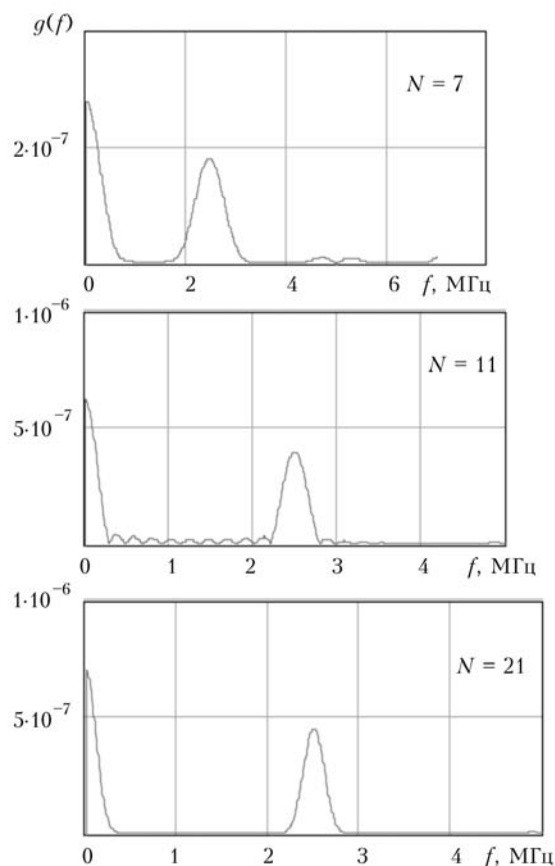


Рис. 5. Спектральные характеристики сигналов, представленных на рис. 4

приближает форму импульсного сигнала к модулированной синусоиде уже начиная с граничной частоты, равной $0,25\omega_0$ и не влияет на нее практически до резонансной частоты. Для асимметричного сигнала этого не происходит даже при частоте среза фильтра, равной $0,1\omega_0$. Однако такой вывод в полной мере справедлив только для идеального фильтра, который сам по себе обладает частотным спектром. Именно он и искажает форму импульсов на рис. 8. Вместе с тем у реальных фильтров этот эффект окажется в существенной мере сглаженным. И, тем не менее, данное обстоятельство позволяет утверждать, что применение сигналов, показанных на рис. 4, с ограничивающими частоту фильтрами весьма перспективно.

Влияние электроакустического тракта дефектоскопа на характеристики сигналов, излучаемых пьезопреобразователями. Как известно, работа пьезопластины преобразователя определяется не только особенностями генератора, свойствами соединения и системы электрического согласования их между собой, но и параметрами самой пластины, демпфера, протектора, импедансом контролируемого изделия. Детальный анализ воздействия всех этих факторов на зависимость между электрическими сигналами генератора и акустическими импульсами является достаточно сложной задачей. Однако для получения основных закономерностей здесь можно применять приближенные формулы. В частности, таковыми могут быть выражения, приведенные в работе [1]. Согласно

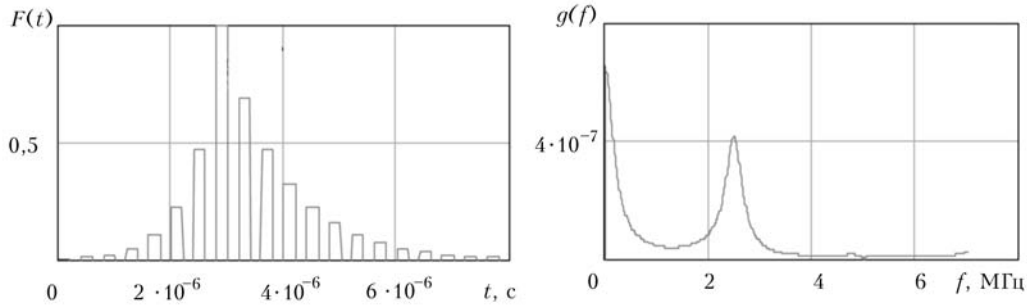


Рис. 6. Временная форма $F(t)$ и спектральная характеристика $g(f)$ асимметричного импульсного сигнала

данной монографии, комплексное сопротивление пьезопреобразователя может быть описано выражением:

$$Z_n = Z_c + Z_p = -\frac{1}{i\omega C} \left[1 - \frac{\beta^2 \operatorname{tg}(\pi\omega/2\omega_0)}{\pi\omega/2\omega_0} \right]. \quad (7)$$

Здесь $C = \epsilon_0 \epsilon S / h$, где $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ — диэлектрическая постоянная пьезопластины площадью S и толщиной h ; $\omega_0 = 2\pi c / h$, c — скорость звука; параметр $\beta = \sqrt{e^2 / (\rho c^2 \epsilon \epsilon_0)}$ — коэффициент электромеханической связи; e — пьезоконстанта. В частности, для пьезокерамики ПКР-7М соответствующие величины равны $\beta \approx 0,49$; $\epsilon \approx 5000$; для ЦТС-19 соответственно 0,4 и 1725 ± 325 , для кварца Х-среза — 0,095 и 4,5.

Акустическая нагрузка пьезопластины зависит от параметров демпфера и протектора с изделием. Вблизи рабочей частоты можно полагать, что их совместный обратный комплексный импеданс равен $1/Z_p = 1/R_p + (-iX_p)^{-1}$, в котором

$$R_p = \frac{\beta^2}{\omega C k h} \frac{4z_1}{z_0 + z_1};$$

$$X_p = 4 \frac{\beta^2}{\omega C} \frac{\operatorname{tg}(\pi\omega/2\omega_0)}{\pi\omega/2\omega_0} \left[\left(\frac{z - z_0}{z_1} \right)^2 - 4 \right]^{-1};$$

z , z_0 и z_1 — соответственно волновые сопротивления контролируемой среды, демпфера и пьезопластины.

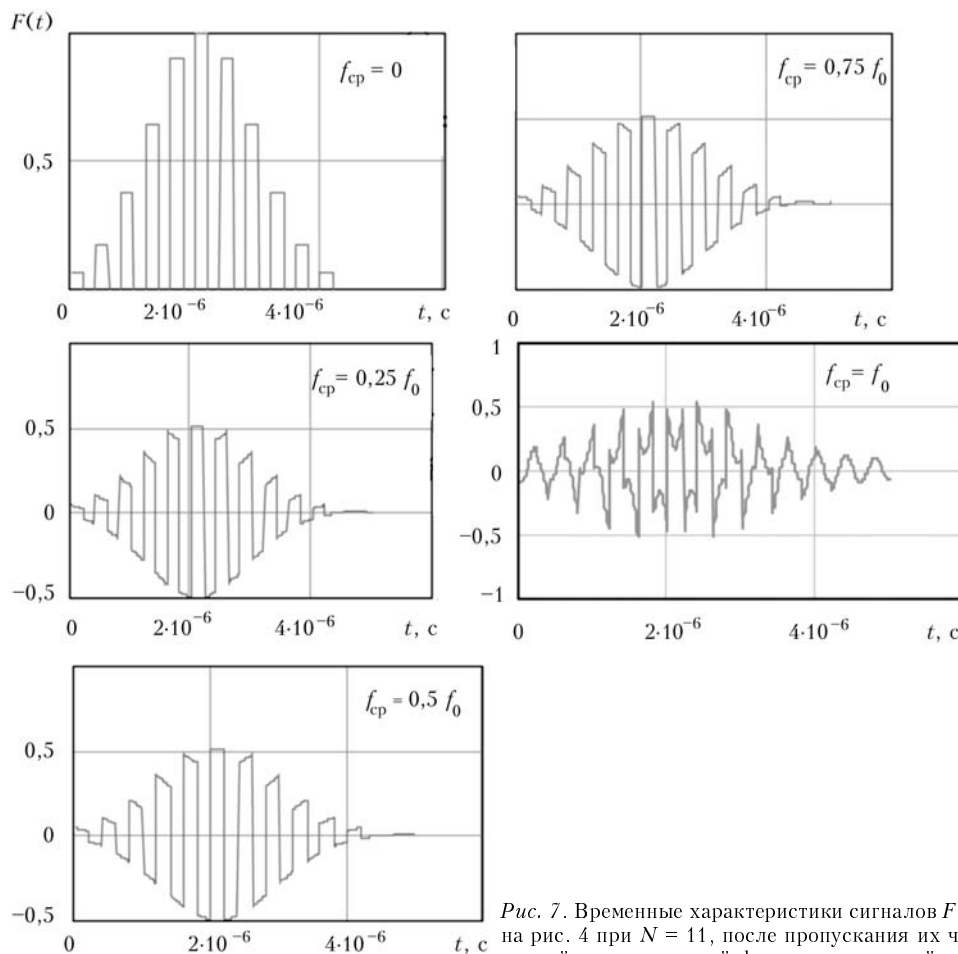


Рис. 7. Временные характеристики сигналов $F(t)$, показанных на рис. 4 при $N = 11$, после пропускания их через высокочастотный прямоугольный фильтр с указанной частотой среза f_{cp}

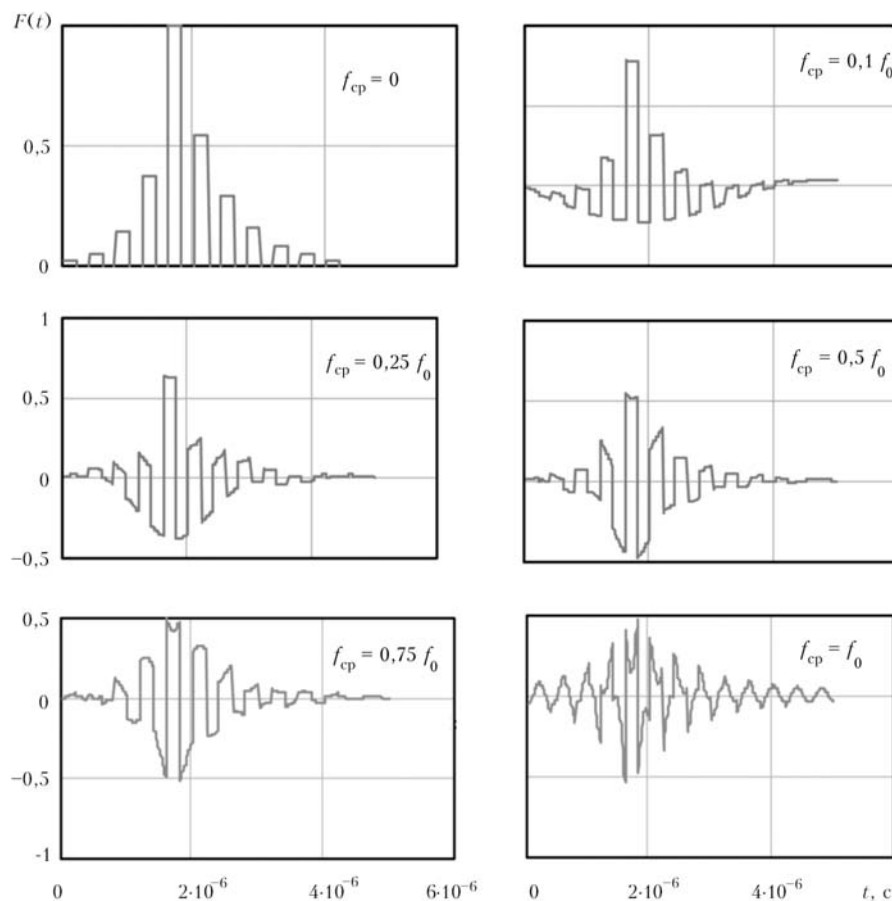


Рис. 8. То же для асимметричного сигнала, показанного на рис. 6

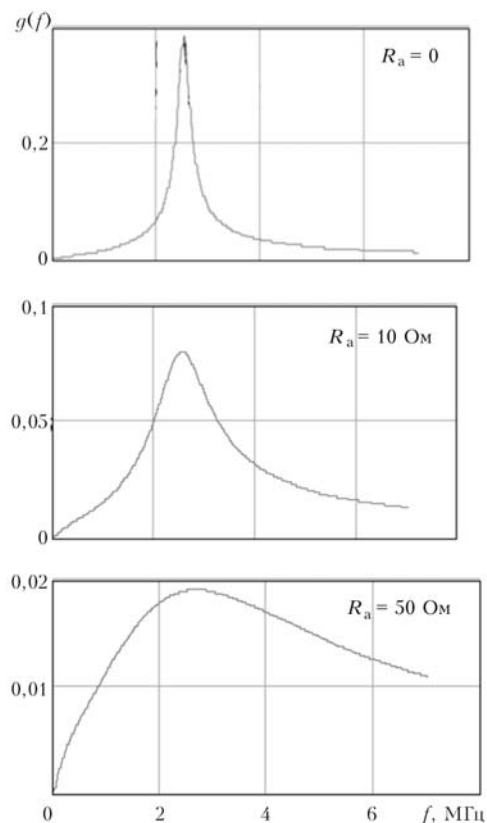


Рис. 9. Изменение импеданса электроакустического тракта пьезопреобразователя при различных сопротивлениях активной нагрузки R_a

Приведенные решения позволяют рассмотреть вопрос о достижении оптимальных условий согласования пьезопластины с генератором. При этом для компенсации реактивной составляющей емкостной нагрузки преобразователя последовательно с ним нередко подключают комплексное сопротивление, состоящее из индуктивности L_a и активного сопротивления R_a . Причем, индуктивность выбирают равной $L_a = 1/(\omega_0^2 C)$, а сопротивлением R_a добиваются расширения частотной характеристики электроакустического тракта до требуемой величины. Тогда суммарная электрическая нагрузка генератора будет

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma} &= Z_p + R_a + (-i\omega C)^{-1} - i\omega L_a = \\ &= Z_p + R_a + \frac{i}{C} \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega\omega_0^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Разумеется, приведенное решение является приближенным и не учитывает все особенности пьезопреобразователей. И, тем не менее, им можно пользоваться для выполнения качественных расчетов. Поэтому его и положим в основу выполняемого анализа.

На следующих ниже рисунках приведены расчеты соответствующих импедансов. При этом всюду применялись следующие данные: рабочая частота — 2,5 МГц, пьезопластина — ЦТС-19, скорость звука в ней принималась равной 3,3 км/с,

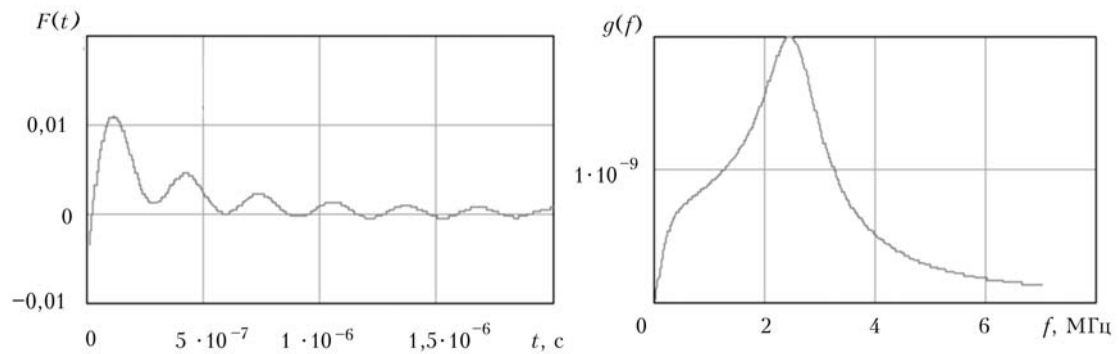


Рис. 10. Временные $F(t)$ и спектральные $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых пьезопреобразователями при использовании генератора ударного возбуждения и отсутствии фильтров

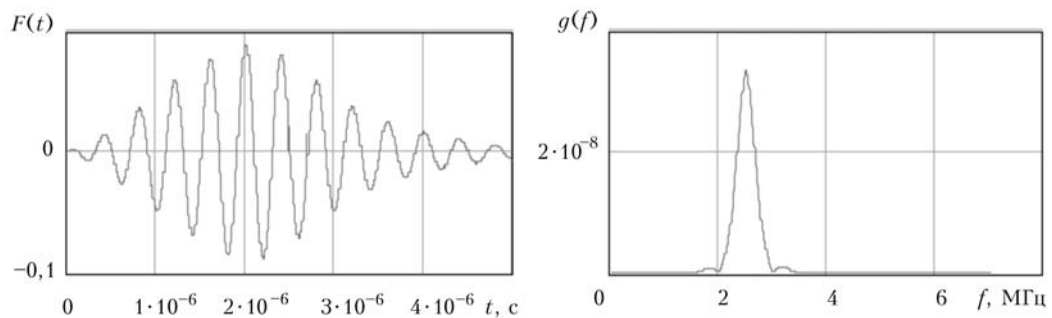


Рис. 11. Временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых пьезопреобразователями при возбуждении их импульсами модулированного гармонического сигнала, описываемого выражением (2)

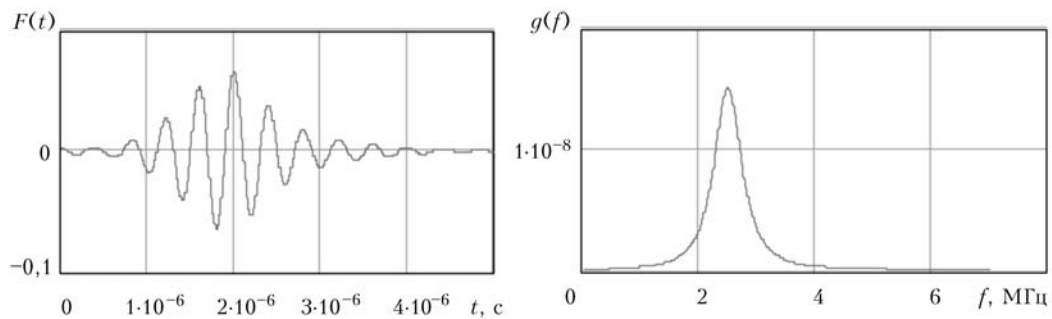


Рис. 12. Временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых пьезопреобразователями при возбуждении их сигналами, описываемыми выражением (3)

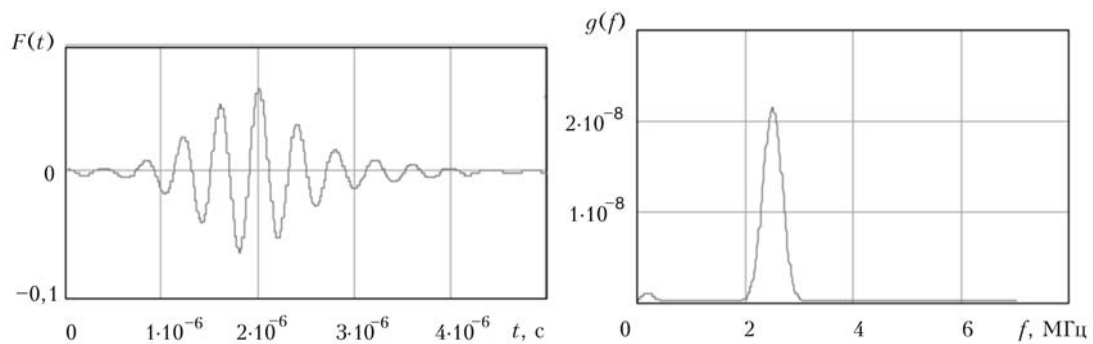


Рис. 13. Временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых дефектоскопами типа DIO-562 при возбуждении их сигналами, описываемыми выражением (4)

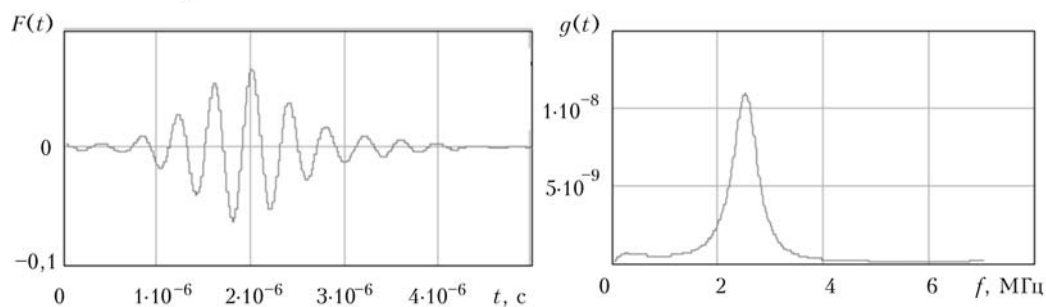


Рис. 14. Временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых дефектоскопами при возбуждении их асимметричными сигналами, описываемыми выражением (6)

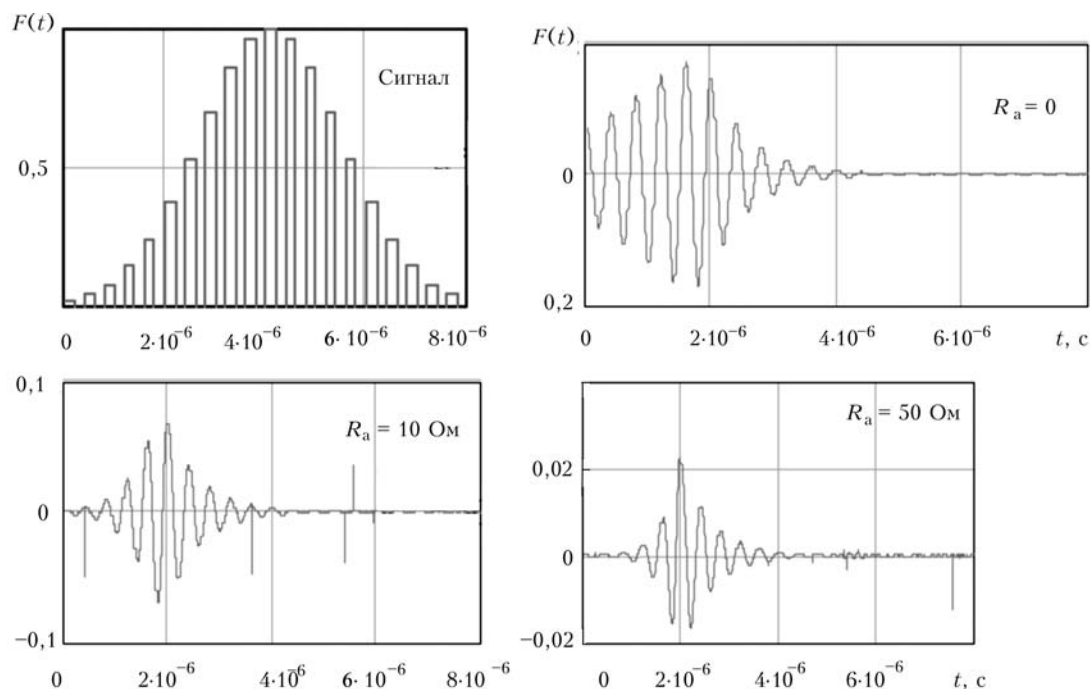


Рис. 15. Временные $F(t)$ характеристики акустических импульсов, излучаемых генераторами соответствующих сигналов при использовании различных активных сопротивлений нагрузки R_a

$\epsilon = 1525$, коэффициент электромеханической связи — $0,4$, импеданс — $23 \cdot 10^6$ Па с/м, импедансы демпфера — 10^7 Па с/м и среды (углеродистой стали) — $46,1 \cdot 10^6$ Па с/м. Площадь пьезопластины принимали равной 10^{-4} м². Результаты выполненных расчетов приведены на рис. 9.

Из результатов следует, что применение дополнительных сопротивлений действительно способствует расширению частотного диапазона тракта пьезопреобразователей, но при этом существенно увеличивает саму величину импеданса. В дальнейших расчетах будем использовать его величину, равную 10 Ом.

Оценим изменение спектральной и временной характеристик сигналов различных генераторов после прохождения ими электроакустического тракта, т. е. соответствующие параметры возбуждаемых ими акустических импульсов (рис. 10–12).

Здесь величина η принималась равной $0,2\omega_0$. Таким образом, в данном случае действительно формируется импульсный сигнал, временные параметры которого устанавливаются только свой-

ствами электроакустического тракта преобразователя.

Из сравнения полученных временных сигналов с первоначальными, показанными на рис. 2, можно сделать вывод, что акустический сигнал оказался более симметричным.

Здесь также наблюдается увеличение симметрии сигналов после прохождения ими электроакустического тракта дефектоскопа (рис. 13, 14).

Из сравнения временных форм сигналов, представленных на рис. 13 и 14, следует, что несмотря на различие сигналов генератора, излучаемые акустические сигналы оказываются в целом идентичными. Чтобы данное утверждение сделать еще более наглядным, увеличим количество импульсов в них. Такие расчеты показаны на рис. 15, 16. На рис. 15 показаны импульсные сигналы генераторов.

Из сравнения полученных импульсов следует, что характеристики акустических сигналов, излучаемых преобразователями, в целом определяются спектральными характеристиками сигналов используемого генератора. А поскольку временная

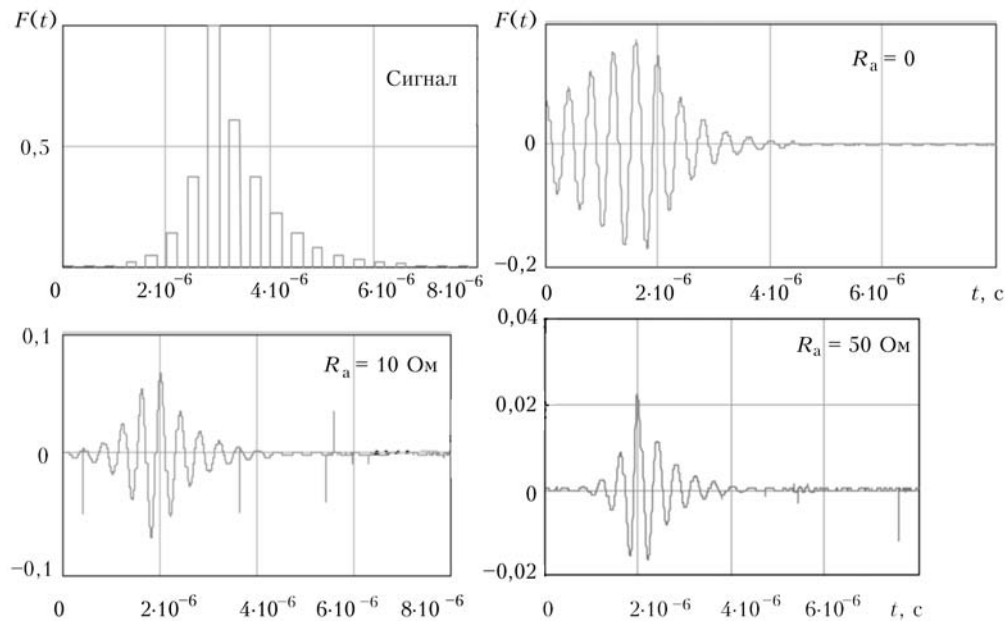


Рис. 16. Временные $F(t)$ характеристики акустических импульсов, излучаемых асимметричными генераторами соответствующих сигналов при различных активных сопротивлениях нагрузки

симметрия рассматриваемых сигналов не оказывает большого влияния на их спектр, временные характеристики рассматриваемых импульсов также различаются мало. И еще, чем шире оказывается спектральная характеристика электроакустического сигнала дефектоскопа, тем более коротким является излучаемый им импульсный сигнал. И это влияние при используемом генераторе дефектоскопа типа ДЮ-562 оказывается существенно более весомым, чем форма и длительность сигнала самого генератора.

Вывод

Применение генератора сигналов с указанной амплитудной модуляцией не приводит к существенно улучшению временных и спектральных характеристик дефектоскопов, но способствует стабилизации его рабочей частоты и меньшей зависимости сигналов от параметров преобразователей. Кроме того, специальные фильтры, формирующие спектральные характеристики сигналов, при использовании пьезопреобразователей не требуются.

1. Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. — Т.1. Методы и приборы УЗ исследований. — Ч.А. — Мир, 1966. — 592 с.

НПП «ВИГОР», Москва, РФ

Поступила в редакцию
27.03.2005

Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее: Сборник докладов VIII Украинской научно-технической конференции. — Часть 2. — Киев: Сталь, 2004. — 440 с.

С 18 по 22 октября 2004 г. в Киеве состоялась VIII Украинская научно-техническая конференция «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее», посвященная 60-летию образования ОАО «Украинский научно-исследовательский и проектный институт стальных конструкций имени В. Н. Шимановского» (тел.: (044) 543-93-87). Проведение конференции поддержано Госстроем Украины, Национальной академией наук Украины, Киевской городской госадминистрацией, Академией строительства Украины и другими государственными и общественными организациями.

На конференции представлено 172 доклада, подготовленных 290 учеными и специалистами из 10 стран. Тематика докладов охватывает вопросы расчета, проектирования, изготовления, монтажа, технической эксплуатации и ремонта зданий и сооружений, выполненных в металлических конструкциях.

Во вторую часть сборника включены доклады, посвященные вопросам совершенствования материалов, конструкций, технологий изготовления и монтажа (секция 3), оценке надежности, долговечности и остаточного ресурса металлоконструкций (секция 4), технической эксплуатации, усилению и реконструкции зданий и сооружений (секция 5), а также вопросам развития и совершенствования нормативной базы в области металлостроительства (секция 6).



ПОСТРОЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМА СПОСОБА ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРИЕМА УПРУГИХ ИМПУЛЬСОВ

Г. М. СУЧКОВ

Приведены итоговые результаты работ по построению приборов для неразрушающего контроля и измерений, а также блок-схемы устройств, позволяющих реализовать ЭМА способ при различных технических, технологических и экономических требованиях.

The paper gives the final results of the work on construction of instruments for non-destructive testing and measurements. Block-diagrams of devices are given, which allow implementing various technical, technological and economic requirements.

Значительными преимуществами перед «мокрыми» методами ультразвукового контроля (УЗ) в сложных условиях эксплуатации — при скоростной дефектоскопии и толщинометрии, контроле загрязненных и горячих металлов, изделий с неэлектропроводными покрытиями и др. обладает ЭМА способ [1–11]. Однако реализовать эти преимущества не позволяет низкая чувствительность и существенная зависимость результатов контроля от расстояния между ЭМА преобразователем и поверхностью изделия. По моему мнению, главным препятствием при практической реализации ЭМА способа является традиционный подход к созданию средств неразрушающего контроля (НК) с применением ЭМА способа. Имеет место проблема, решение которой позволит создать новый класс приборов, дополняющих существующие контактные средства УЗ НК. На основании анализа результатов многолетних исследований [1–19] и практического применения ЭМА способа в промышленности поставленная проблема решена для контроля качества и измерений характеристик изделий. Сформированы основные принципы построения ЭМА дефектоскопов и толщиномеров различного назначения.

При УЗ контроле изделий из материала с высоким коэффициентом ЭМА преобразования (алюминий и его сплавы, мелкозернистая высококачественная ферромагнитная сталь и т. д.), или изделий из материалов с низким ослаблением УЗ колебаний, или при реализации технологии контроля, не требующей высокой производительности (ручной контроль), возможно применение схемы построения дефектоскопа или толщиномера (рис. 1) с применением ударного возбуждения. Однако, как следует из работы [1], характеристики полезных сигналов определяются характеристиками исходного зондирующего сигнала. Поэтому при реализации этой схемы необходимо сформировать исходный возбуждающий импульс. Это можно осуществить двумя путями — регулировкой длительности и амплитуды импульса то-

ка, возбуждающего ЭМА преобразователь. Тогда по мере уменьшения глубины контролируемого объема изделия следует уменьшать длительность зондирующих импульсов. При этом увеличивается часть энергии импульса в высокочастотной области спектра сигнала. Следовательно, увеличивается разрешающая способность дефектоскопа или толщиномера. Дополнительной регулировкой амплитуды импульса тока, возбуждающего ЭМАП, можно оптимально формировать участок частотного спектра с максимальным распределением энергии в диапазоне, в котором осуществляется прием отраженных УЗ импульсов. Кроме того, по мере уменьшения толщины изделия необходимо увеличивать и частоту следования зондирующих импульсов. Такое требование обусловлено дополнительными потерями энергии УЗ импульсов при многократных отражениях на границах контролируемого не толстого изделия.

Прибор НК, выполненный по предложенной схеме (см. рис. 1), работает следующим образом. Синхронизатор 1 вырабатывает импульсы, согласующие работу всех блоков и узлов прибора. Под воздействием синхроимпульса генератор 2 ударного возбуждения формирует импульс напряжения, прикладываемый к входным цепям ЭМАП 3. Длительность импульса тока в ЭМАП 3 фор-

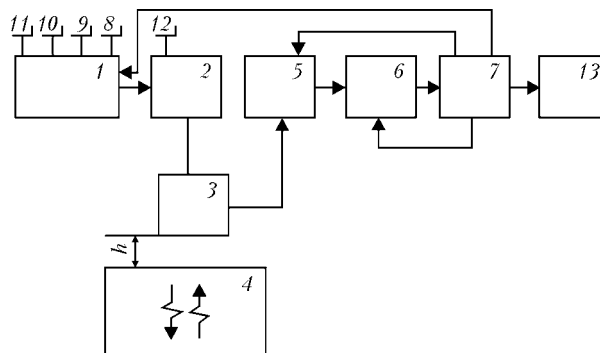


Рис. 1. Упрощенная блок-схема УЗ прибора для контроля ЭМА способом с использованием ударного возбуждения преобразователя (h — зазор между ЭМАП и изделием)

мируется регулятором 8, его амплитуда — регулятором 9, а частота следования регулятором 10 синхронизатора 1. Регуляторы 8 и 9 должны иметь участки плавного перехода, так как с их помощью можно осуществлять тонкое согласование выходных цепей генератора 2 с входными цепями ЭМАП 3. Таким путем достигается дополнительное уменьшение «мертвой» зоны, а также улучшается форма зондирующего УЗ импульса и за счет этого решающая способность. Регулятор 10 может быть дискретным.

При поступлении импульса тока ЭМА преобразователь 3 возбуждает в контролируемом изделии 4 УЗ импульсы, имеющие параметры, идентичные параметрам возбуждающего импульса тока. Обязательным условием идентичности характеристик импульса тока и УЗ импульса является широкополосность ЭМАП 3. В противном случае возбуждаемый УЗ импульс будет искажен. Измеренные характеристики изделия 4 не будут в полной мере соответствовать действительным. Кроме того, снизится коэффициент преобразования электромагнитной энергии в акустическую. Будет принята только часть излученной энергии. Это приведет к снижению амплитуды сигнала и, соответственно, к понижению чувствительности и точности контроля. Помехозащищенность контроля также будет недостаточной.

Принятые ЭМАП 3 от изделия 4 отраженные импульсы усиливаются широкополосным усилителем 5. Широкополосность усилителя 5 необходима для приема основной части энергии из всего излученного и затем принятого спектра. В то же время, широкополосный усилитель будет принимать помехи во всей рабочей полосе частот, т. е. помехозащищенность может быть недостаточной. Усиленные сигналы поступают в блок 6 обработки информации, а затем в устройство 7 отображения информации и сигнализации. В блоках 6 и 7 может быть применена традиционная технология работы с информационными сигналами.

Толстые изделия, изделия с существенным коэффициентом ослабления упругих импульсов и т. п. контролировать приборами, использующие ударное возбуждение, нецелесообразно.

Как показано в работах [1, 2, 5, 9, 16, 19], повысить эффективность прибора НК позволяет применение возбуждения ЭМАП пакетными импульсами тока. Блок-схема такого прибора для неразрушающего бесконтактного контроля показана на рис. 2. Он особенно эффективен при дефектоскопии теньвым и зеркально-теньвым методами, дефектоскопии эхо-методом объемных изделий с достаточно высоким затуханием, дефектоскопии эхо-методом горячих изделий, дефектоскопии литых материалов, толщинометрии. Он существенно отличается от предыдущего прибора (см. рис. 1). Роль синхронизатора возлагается на блок 6 обработки информации и управления. Добавлен формирователь 1 с регулятором 8 частоты f_0 заполнения пакетного импульса, регулятором 9 длительности τ_n пакетного импульса и регулятором 10 частоты $f_{сл}$ следования пакетных импульсов. Сформированный пакетный импульс уси-

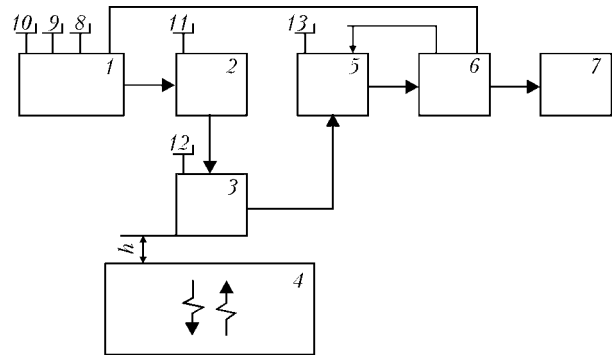


Рис. 2. Упрощенная блок-схема прибора для УЗ контроля ЭМА способом с использованием пакетного возбуждения ультразвуковых колебаний и резонансной фильтрации

ливается генератором 2 зондирующих импульсов до заданной амплитуды, определяемой регулятором 11. Генератор 2 возбуждает в ЭМАП 3 пакетные импульсы тока с заданными частотой заполнения, длительностью, амплитудой и частотой следования зондирующих импульсов. В этом случае ЭМАП 3 должен иметь узкую частотную полосу, или быть резонансным. ЭМАП 3 снабжается регулятором 12 центральной рабочей частоты, соответствующей частоте УЗ колебаний, установленной нормативно-технической документацией (НТД) на контроль. Обычно ее значения устанавливаются дискретно. Для тонкой настройки и согласования выходных характеристик генератора 2 и входных характеристик ЭМАП 3 используют регуляторы 8 и 9.

В изделии 4 возбуждаются УЗ импульсы с параметрами, соответствующими параметрам тока, питающего преобразователь 3. Принятые от изделия 4 УЗ импульсы усиливаются узкополосным или резонансным усилителем 5. В результате узкополосные ЭМАП 2 и усилитель 5 существенно ограничивают прохождение помех и шумов на блок 6 обработки информации и управления. Соотношение сигнал/шум по сравнению с предыдущим вариантом (см. рис. 1) повышается. Для согласования параметров усилителя 5 и характеристик принятого пакетного импульса усилитель также должен быть снабжен регулятором 13 резонансной частоты (центральной частоты принимаемой полосы) сигнала. После усиления принятый сигнал поступает в блок 6 обработки информации и управления и затем в устройство 7 отображения информации и сигнализации.

Узкополосное возбуждение и прием УЗ импульсов описанным прибором УЗ бесконтактного контроля приводит к исключению из спектра высокочастотных компонент спектра. Принятый сигнал искажается. Результаты измерений могут иметь погрешность выше необходимой. Не всегда может быть получено достаточное превышение полезного сигнала над шумом.

Устранить недостатки описанных выше приборов НК (см. рис. 1 и 2) можно за счет построения широкополосных устройств, не искажающих информационный сигнал (рис. 3). Так же, как и в предыдущем случае, дефектоскоп или тол-

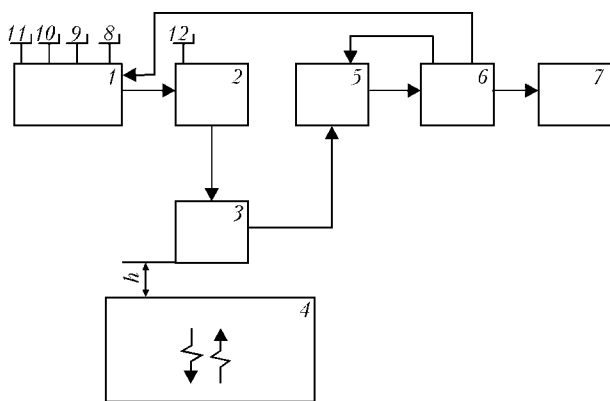


Рис. 3. Упрощенная блок-схема прибора для УЗ контроля ЭМА способом с использованием пакетного возбуждения УЗ колебаний и линейно-частотной фильтрации

щиномер снабжен формирователем 1 с регулятором 8 частоты f_0 заполнения пакетного импульса, регулятором 9 длительности τ_n пакетного импульса и регулятором 10 частоты f_{cl} следования пакетных импульсов. Дополнительно формирователь 1 снабжен плавным регулятором 11 длительности последнего в пакете импульса заполнения. С его помощью заметно уменьшается величина «мертвой» зоны. Сформированный пакетный импульс усиливается генератором 2 зондирующих импульсов до заданной амплитуды, определяемой регулятором 12. Генератор 2 возбуждает в ЭМАП 3 пакетные импульсы тока с частотой, соответствующей частоте УЗ колебаний, установленной НТД на контроль, заданными длительностью, амплитудой и частотой следования зондирующих импульсов. Пакетный импульс имеет огибающую, близкую к прямоугольной. В этом случае ЭМАП 3 должен иметь частотную полосу, соответствующую частотной полосе возбуждаемого импульса тока. Для тонкой настройки и согласования выходных характеристик генератора 2 и входных характеристик ЭМАП 3 используют регуляторы 8, 9 и 11.

В изделии 4 возбуждаются УЗ импульсы с параметрами, соответствующими параметрам тока, питающего ЭМАП 3. Принятые от изделия 4 УЗ импульсы усиливаются линейно-частотным усилителем 5, имеющим частотную полосу не на много

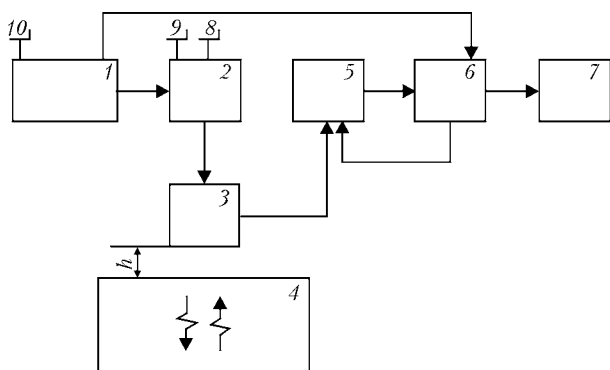


Рис. 4. Упрощенная блок-схема прибора для УЗ контроля ЭМА способом с оптимальной фильтрацией



Рис. 5. Двухпроцессорный ЭМА толщиномер для измерений по «черновой» поверхности или по лакокрасочному покрытию толщиной до 3 мм, в котором реализованы линейно-частотная и оптимальная фильтрации

(приблизительно на 10...20 %) превышающую полосу возбуждаемого импульса. Это необходимо, так как в процессе распространения и отражений в изделии УЗ импульс обретает более широкую частотную полосу. В результате принимается практически вся энергия информационного сигнала и существенно ограничивается прием помех и шумов. Сохранение формы информационного сигнала в сравнении с предыдущим вариантом (см. рис. 2) позволяет повысить разрешающую способность и точность измерений. После усиления принятый сигнал поступает в блок 6 обработки информации и управления и затем в устройство 7 отображения информации и сигнализации.

Во всех описанных выше случаях построения приборов УЗ бесконтактного контроля используются сигналы с произведением его полосы частот на длительность, примерно равным единице. Как показано в работе [19], для существенного увеличения сигнал/шум необходимо выбирать исходный вид информационного сигнала с произведением его полосы частот на длительность, много большим единице, т. е. формировать оптимальный сигнал. Блок-схема, реализующая оптимальное возбуждение и прием УЗ импульсов, показана на рис. 4.

В приборе формирователь 1 содержит регулятор 8 частоты заполнения пакета, регулятор 9 длительности пакета, регулятор 10 частоты следования зондирующих импульсов и переключатель 11 кода (вида) исходного информационного сигнала. Выберем, например, фазокодированный вид оптимального сигнала — тринадцатипозиционный код Баркера. Сформированный оптимальный сигнал усиливается широкополосным генератором 2 зондирующих импульсов до величины, определяемой регулятором 12. Генератор зондирующих импульсов 2 возбуждает в широкополосном ЭМАП 3 импульсы тока. Ширина частотной полосы ЭМАП 3 в режиме возбуждения и приема УЗ импульсов должна быть немногим больше полосы сформированного оптимального сигнала. Принятые из ЭМАП 3 информационные импульсы усиливаются полосовым усилителем 5 также с полосой пропускания, немногим большей ширины по-



лосы оптимального сигнала. Далее оптимальный фильтр 6, настроенный на сформированный сигнал, сжимает информационный импульс. Для выбранного кода Баркера, полученная в результате корреляционная функция будет иметь максимум, в 13 раз превышающий амплитуды принятого ЭМАП сигнала. При этом корреляционный пик будет сдвинут на время задержки оптимального фильтра, который является известной постоянной величиной. Уровень шума после оптимальной фильтрации также уменьшается. Затем полученный сигнал обрабатывается в блоке 7 обработки информации и управления и поступает на устройство 13 отображения информации и сигнализации. Полученный в результате информационный сигнал существенно превосходит по своим характеристикам сигналы, полученные с помощью приборов НК, выполненными согласно блок-схемам, показанным на рис. 1–3.

Описанные блок-схемы имеют функциональное назначение и могут быть реализованы в цифровом виде [18]. Их аналоговая реализация оптимальна при высокой производительности контроля и скоростной обработке информации [17]. Цифровая обработка предпочтительнее в ручных дефектоскопах, структуроскопах и толщиномерах (рис. 5). Возможно также создание устройств на комбинированных принципах. Окончательное решение о структуре прибора неразрушающего ЭМА контроля необходимо принимать с учетом технических и экономических условий, а также в соответствии с существующими на предприятиях-изготовителях технологиями производства изделий.

1. Себко В. П., Сучков Г. М., Алексеев Е. А. Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий // Дефектоскопия. — 2002. — № 12. — С. 21–28.
2. Экспериментальное исследование чувствительности ЭМА преобразователей при дефектоскопии эхо методом объемными сдвиговыми волнами / Г. М. Сучков и др. // Там же. — 2000. — № 2. — С. 12–16.
3. Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА способа // Там же. — 2000. — № 10. — С. 67–70.
4. Сучков Г. М. Определение сечения рассеяния сдвиговых линейно поляризованных ультразвуковых колебаний с произвольной ориентацией вектора поляризации на длинном круговом цилиндрическом дефекте // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 2. — С. 3–9.

5. Исследование несплошностей в листах / Г. М. Сучков, И. В. Михайлова, А. И. Савон и др. // Дефектоскопия. — 2001. — № 3. — С. 83–87.
6. Сучков Г. М. Исследование особенностей распространения поверхностных волн при контроле ЭМА способом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 3. — С. 33–35.
7. Экспериментальные исследования нового способа бесконтактной ультразвуковой дефектоскопии труб эхометодом / Г. М. Сучков и др. // Дефектоскопия. — 1999. — № 11. — С. 77–80.
8. Сучков Г. М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом // Контроль. Диагностика. — 2001. — № 12. — С. 36–39.
9. Сучков Г. М. Исследование ЭМА способом выявляемости плоскодонных отражателей в образцах из различных материалов // Там же. — 2002. — № 5. — С. 50–51.
10. Себко В. П., Сучков Г. М., Горкунов Б. М. Новый способ обнаружения дефектов металлов с помощью электромагнитно-акустических преобразователей // Вест. Нац. техн. ун-та «ХПИ» // Сб. научн. тр. «Электроэнергетика и преобразовательная техника». — 2003. — Т. 1. — С. 54–58.
11. Сучков Г. М. О практической применимости ЭМА преобразователей для дефектоскопии поверхности изделий сложной формы эхометодом // Дефектоскопия. — 1999. — № 10. — С. 15–19.
12. Себко В. П., Сучков Г. М. Электромагнитно-акустический способ неразрушающего контроля. Часть 1. Эффект ЭМА преобразования // Укр. метролог. журн. — 2003. — № 1. — С. 35–38.
13. Сучков Г. М. Высокочувствительный электромагнитно-акустический преобразователь // Контроль. Диагностика. — 2001. — № 10. — С. 30–32.
14. Сучков Г. М. Разработка и внедрение технологии сплошного автоматического обнаружения дефектов макроструктуры объемно-закаленных рельсов бесконтактным ультразвуковым методом. — Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. — Харьков: ХАДИ, 1988. — 22 с.
15. Сучков Г. М. Разработка технологии и аппаратуры для ЭМА толщиномеров // Контроль. Диагностика. — 2001. — № 11. — С. 38–39.
16. Себко В. П., Сучков Г. М., Горкунов Б. М. Электромагнитно-акустический способ неразрушающего контроля. Часть 2. Электромагнитно-акустические преобразователи // Укр. метролог. журн. — 2003. — № 2. — С. 35–38.
17. Ваврив Д. М., Сучков Г. М. Способ обработки информации при скоростном неразрушающем контроле // Дефектоскопия. — 2001. — № 8. — С. 50–52.
18. Создание электромагнитно-акустического толщиномеров для контроля тонкостенных труб / Д. М. Ваврив, Г. М. Сучков, В. В. Виноградов и др. // Там же. — 2002. — № 10. — С. 7–13.
19. Сучков Г. М. Обработка информации. Возможности корреляционного анализа при толщинометрии ЭМА способом // Контроль. Диагностика. — 2002. — № 8. — С. 37–40.

Нац. техн. ун-т Украины «ХПИ»,
Харьков

Поступила в редакцию
15.04.2004

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ

В. Л. НАЙДА, А. А. МОЗЖУХИН, В. М. ПЫШНЫЙ, А. С. КОВБАСЕНКО, О. Ф. ЛОБАНОВ, В. А. ЧИЖЕНКО

Рассмотрены проблемы, сопровождающие вихрековый контроль (ВТК) теплообменных труб (ТОТ) парогенераторов (ПГ) атомных электростанций (АЭС) и предложены некоторые технические способы решения с помощью совершенствования конструкций зондов для ВТК.

The problems encountered in eddy current control of heat exchanger tubes of vapor generators in nuclear power plants are considered, and some technical methods are proposed for solving them through improvement of the design of eddy current probes.

Контроль ТОТ ПГ, как известно, выполняется на АЭС с помощью зондов (преобразователей) ВТК, которые имеют контролирующую головку, гибкий удлинитель и электрический соединитель. Удлинитель преимущественно выполняется в виде трубчатой оболочки или цилиндрической спирали, внутри которой размещены электрические кабели связи головки с электрическим соединителем для подключения к контролируемому прибору (рис. 1, а).

Для предотвращения наведения электрических полей, которые отрицательно влияют на качество сигнала, связь головки с электрическим соединителем выполняется коаксиальными кабелями по всей длине удлинителя, кроме места соединения с головкой, где это невозможно, так как катушки головки имеют простые тонкие изолированные провода. При этом провода головки присоединяются к коаксиальным кабелям, которые внутри оболочки имеют прямолинейную по сути или слегка волнистую форму.

Учитывая, что при наматывании удлинителя на барабан прямые кабели рвутся за счет того, что длина их должна быть больше длины оболочки на разность диаметров наматывания, умноженную на число π , их делают волнистыми для запаса длины кабелей. Но это дает кратковременный эффект, поэтому ресурс работы таких зондов невелик.

Технология использования зонда предусматривает многоразовое наматывание удлинителя на барабан и сматывание для перехода на контроль очередной трубки, которых на объекте контроля тысячи. И всякий раз при наматывании на барабан предварительно прямолинейно развернутого зонда, в котором длина кабелей близка к длине оболочки, кабели перемещаются относительно оболочки в сторону направления намотки. Это происходит за счет того, что они наматываются по диаметру, размер которого равен диаметру барабана плюс, как минимум, толщина оболочки. Внутренние витки оболочки укладываются на барабан вплотную, а внешние расходятся радиально относительно центра барабана, благодаря чему сред-

няя длина вдоль центральной оси спирали увеличивается. Таким образом, кабели затягиваются вглубь удлиненной оболочки и потому при производстве их закладывают большей длины, чем спираль оболочки. При разматывании имеет место обратный процесс: спираль за счет упругости складывает внешние (относительно оси барабана) витки и возвращает свою первичную длину, которая теперь меньше длины кабелей. Кабели, более длинные, чем оболочка, не могут возвратиться полностью в первичное положение, так как они уже закреплены с обоих концов. В процессе разматывания кабели стараются разместиться в сокращенной оболочке и выгибаются в пределах внутреннего пространства спирали, становясь волнистыми. Так как кабели за счет сопротивления от трения не могут возвратиться полностью в первичное положение, их волнистость увеличивается в направлении к барабану. При последующих наматываниях на барабан с первыми витками кабели наматываются в волнистом состоянии, а не в прямолинейном, как при первом наматывании при их монтаже, при этом уже после второго оборота они не имеют возможности двигаться в направлении головки и остаются в таком состоянии. Таким образом, на следующие обороты снова не хватает длины кабелей и имеет место передвижение их в направлении от головки к барабану. Повторные разматывания и наматывания приводят к тому, что кабели еще более мнутся и сдвигаются в направлении от головки. Резерва длины проводов не хватает и они разрываются, что выводит зонд из строя.

Предотвратить это можно несколькими способами, которые были испытаны на моделях зондов (преобразователей) НК325 типа ВТЗ-10,8-18, разработанных в ОКТБ Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ. На рис. 1, а–г приведены примеры конструкции зонда с накопителем кабелей в виде кабельных спиралей.

На рис. 1, б кабели выполнены в виде пары прямолинейных по сути участков, которые чередуются с участками, где оба кабеля совместно сви-

ты в спираль по форме цилиндрической пружины растяжения по сути с примыканием витков в первичном состоянии. При этом оба кабеля 6 и 7, как показано на рисунке, свиты параллельно впритык вокруг общей оси, образуя общую спираль 8 одного диаметра. На рис. 1, в спиральные участки каждого кабеля автономны. Они выполнены как отдельные спирали 9 и 10, навитые вокруг параллельных осей 11 и 12 и смещены по длине до размещения в зоне прямолинейных участков другого кабеля. На рис. 1, г прямолинейный участок каждого кабеля размещен в середине цилиндрического пространства спиралевидного участка другого кабеля по сути вдоль оси спирали другого кабеля. Между пружинными участками сделан отступ 13 для перемещения при растяжении спиралей.

Такая конструкция характеризуется тем, что в начальном состоянии, когда зонд находится в прямолинейном положении, кабельные спирали 8, 9 и 10 сжаты по сути до примыкания витков. При наматывании удлинителя на барабан в пределах каждого оборота барабана кабели компенсируют недостаток длины за счет растягивания спиралевидных участков. При разматывании зонда с барабана спирали кабелей сжимаются в пределах упругости и уменьшают свою длину вместе со спиралью оболочки. При повторных наматываниях-разматываниях за счет спиралевидных участков предотвращается смещение кабелей в одну сторону до их разрыва, благодаря чему ресурс работы зонда значительно увеличивается.

Для выполнения кабельных спиралей наиболее компактной формы, показанной на рис. 1, г, предложен способ, проиллюстрированный на рис. 1, д.

Наматывание одного кабеля в спираль вокруг прямолинейного участка второго кабеля проводят

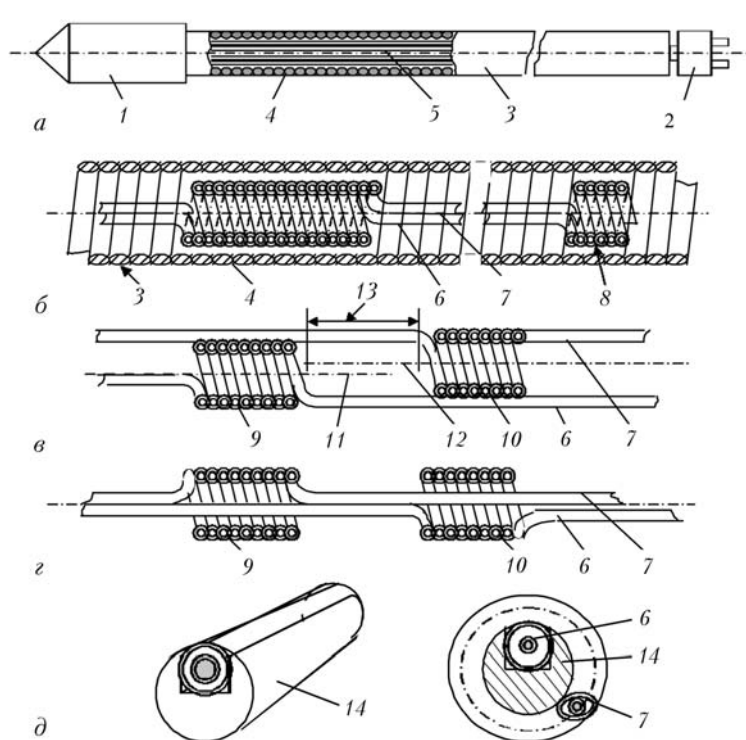


Рис. 1. Схемы конструкции зонда (а), изготовления накопителя (б-г) и выполнения кабельных спиралей (д): 1 — контролирующая головка; 2 — электрический соединитель; 3 — удлинитель; 4 — спираль; 5 — электрические кабели; 6 — накопитель с совместными 2-х кабельными спиралями; в — автономные кабельные спирали; г — кабельные спирали, охватывающие смежные кабели; 3 — оболочка; 4 — металлическая спираль; 6, 7 — кабели; 8 — совместная спираль из двух кабелей; 9, 10 — автономные кабельные спирали; 11, 12 — оси спиралей; 13 — отступ для перемещения при растяжении спиралей; 14 — дополнительная цилиндрическая деталь

совместно с дополнительной цилиндрической деталью 14. Она имеет паз, в который закладывают кабель 6, предназначенный для прохода внутри спирали, а потом на эту деталь вместе с кабелем в пазу наматывают второй кабель 7. После наматывания деталь 14 сдвигают вдоль ее оси и закладывают в паз другой кабель, повторяя операцию наматывания с кабелем, который был предварительно вынут из паза. При проведении ВТК в усложненных условиях, например, на ПГ с на-

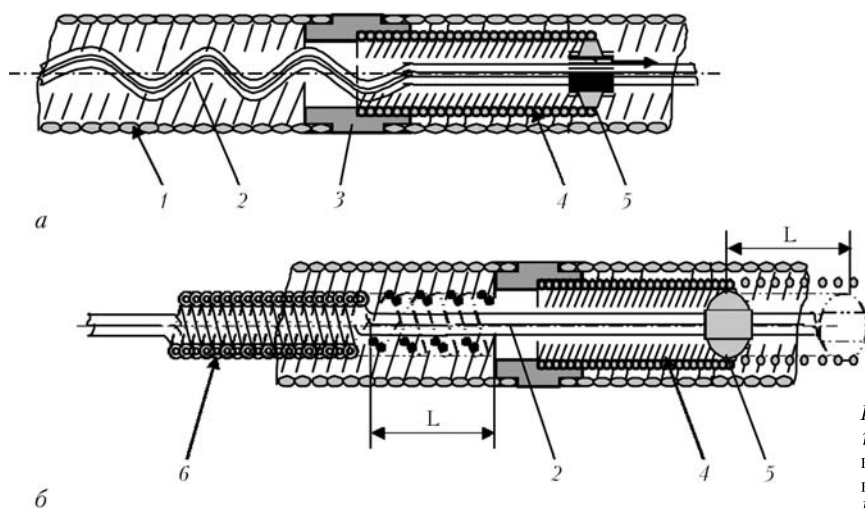


Рис. 2. Схема усилителя натяжения кабелей: 1 — оболочка удлинителя; 2 — коаксиальные кабели; 3 — муфта; 4 — пружина; 5 — крепление кабеля; 6 — кабельная спираль; L — отступ

личием значительных отложений на внутренних поверхностях стенок ТОТ, когда усилия при вытягивании зонда вызывают растяжение спирали оболочки, упругости кабельных спиралей может быть недостаточно. Для таких условий разработана конструкция усилителя натяжения кабелей зонда, которая приведена на рис. 4. Она предусматривает повышение усилия удержания кабелей от подвижки в сторону намоточного барабана и возвращение их в первичное положение.

Для этого в середине оболочки 1 коаксиально ей дополнительно размещена металлическая пружина 4 растяжения, которая одним концом закреплена на оболочке 1 с помощью муфты 3, а к другому концу 5 прикреплены кабели.

На рис. 2 показано что кабели 2 пропущены в середине пружины 4. Это сделано таким образом, что с одного конца пружины они размещены прямолинейно или с натяжением под действием пружины, а по другую имеют излишек длины относительно оболочки. Излишек может быть образован за счет волнистости кабелей 2 со стороны головки относительно пружины 4, как показано на рис. 2, а, или в виде накопителя в форме кабельной спирали 6 (рис. 2, б). Благодаря этому в прямолинейном состоянии зонда пружина сжата

почти до соприкосновения витков, а кабели на прямолинейном участке распрямлены. В остальной части оболочки со стороны головки кабеля образуют запас, который компенсирует утяжку кабелей одновременно с растягиванием пружины при наматывании удлинителя на барабан. При разматывании зонда с барабана пружина сжимается и подтягивает за собой излишек кабеля на прежнее место. Излишек кабелей целесообразно выполнять в форме спирали соленоида с прямым отрезком перед пружинной длиной L , равным длине растяжения пружины 4. Оболочка может быть разделена на две или больше секций, соединенных муфтой 3, по разные стороны которой расположены пружина с распрямленными кабелями и запас излишка кабелей.

Приведенные технические решения запатентованы.

1. Пат. 50072А Україна МПК 7G01N27/90. Зонд для контролю металевих труб / О. Ф. Лобанов, В. Л. Найда, А. О. Мозжухін та ін. — Надрук. 15.10.2002, Бюл. № 10.
2. Пат. 50073А Україна МПК 7G01N27/90. Зонд для неруйнівного контролю стану металу труб та спосіб його виконання / В. Л. Найда, В. М. Піншій, А. О. Мозжухін та ін. — Надрук. 15.10.2002, Бюл. № 10.

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

Поступила в редакцию
25.03.2005

4-а Науково-технічна конференція «СУЧАСНІ ПРИЛАДИ, МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ»

З 06 по 09 грудня 2005 р. в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу відбудеться 4-а Міжнародна науково-технічна конференція і виставка «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання».

Конференція буде проводитися за такими напрямками:

1. Методи і технічні засоби проведення неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання.
2. Особливості проведення неруйнівного контролю і технічної діагностики нафтогазового обладнання.
3. Підготовка, атестація і сертифікація спеціалістів в галузі неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання.
4. Підготовка фахівців за спеціальністю «Прилади та системи неруйнівного контролю» у вищих навчальних закладах України.

По матеріалах конференції передбачається видання матеріалів доповідей, які будуть визнані ВАК України як фахове видання.

В роботі виставки будуть приймати участь відомі фірми і організації-виробники технічних засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики України і зарубіжжя.

Адреса оргкомітету по проведенню конференції:

кафедра «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції»
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.

Тел. (8-03422) 4-60-77, 4-24-3; E-mail: mdqc@ifdtung.if.ua

К ВОПРОСУ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОЕКЦИОННЫХ ДАННЫХ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕКОНСТРУКТИВНОЙ ТОМОГРАФИИ: ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ДИСКРЕТИЗАЦИЯ И ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА НАПРАВЛЕНИЙ ЗОНДИРОВАНИЯ

О. Е. ЛЕВИЦКИЙ

Сформулированы условия корректного выбора линейного шага дискретизации и числа направлений зондирования в азимутальной плоскости объекта при получении проекционных данных в ультразвуковой трансмиссионной реконструктивной томографии.

The main requirements for UT patterns for tomographic investigation of the structure of the material are defined, and a practical pattern of tomographic scanning is considered for sheet materials, using the shadow method of sounding and its features with one-sided access to one of the surfaces.

Введение. Главная задача реконструктивной вычислительной томографии состоит в восстановлении пространственной функции по конечному числу ее линейных интегралов (проекций), причем процедура восстановления должна соответствовать схеме сканирования. Следует отметить, что дискретный характер сбора проекционных данных в томографии носит принципиальный характер. При реализации произвольной практической схемы сканирования исследуемой области или участка всегда возникает дискретизация либо по линейному перемещению, либо по углу поворота, или по первому и второму. Поэтому влияние конечности выборки и схемы сканирования (схемы получения проекционных данных) на точность и разрешающую способность восстановления — один из важнейших вопросов реконструктивной томографии.

В этой работе сформулированы условия корректности дискретизации: выбор линейного шага перемещения сканирующего устройства и количество направлений зондирования в азимутальной плоскости.

Двумерная функция $f(x, y)$ с областью определения D , что описывает объект зондирования по исследуемой характеристике или параметру, однозначно определяется функцией Радона $\tilde{f}(p, \varphi)$ [1–3]:

$$\tilde{f}(p, \varphi) = \iint_{\infty} f(x, y) \delta[p - (x \cos \varphi + y \sin \varphi)] dx dy, \quad (1)$$

где согласно рис. 1: p — расстояние от начала координат до прямой L , по которой проводится интегрирование (определяет положение лучевой проекции); φ — угол между прямой p и координатной осью x ; $\delta(\bullet)$ — дельта-функция.

Согласно (1) преобразование Радона определяется как интегрирование функции f вдоль всех возможных прямых L , которые пересекают область определения D .

Выражение (1) можно представить в другой форме, если воспользоваться векторной записью уравнения прямой на плоскости [4]:

$$\tilde{f}(p, \bar{\tau}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\bar{x}) \delta[p - (\bar{x}, \bar{\tau})] d\bar{x}, \quad (2)$$

где $p = (\bar{x}, \bar{\tau})$ — уравнение прямой на плоскости в векторной форме; $(\bar{x}, \bar{\tau}) = x \cos \varphi + y \sin \varphi$ — скалярное произведение векторов $\bar{x}$ и $\bar{\tau}$; $\bar{\tau}$ — единичный вектор вдоль прямой p с координатами соответственно $(\cos \varphi, \sin \varphi)$.

В случае функции трех переменных $f(x, y, z)$, используя векторную запись $\bar{\tau} = (x, y, z)$ и единичный вектор $\bar{\tau}$, преобразование Радона записывается аналогично (2):

$$\tilde{f}(p, \bar{\tau}) = \iiint_{\infty} f(\bar{x}) \delta[p - (\bar{x}, \bar{\tau})] d\bar{x}, \quad (3)$$

где $(\bar{x}, \bar{\tau}) = \tau_1 x + \tau_2 y + \tau_3 z = p$ — уравнение плоскости интегрирования; p — расстояние до плоскости интегрирования; $\bar{\tau}$ — единичный вектор вдоль прямой p , определяющий ориентацию плоскости.

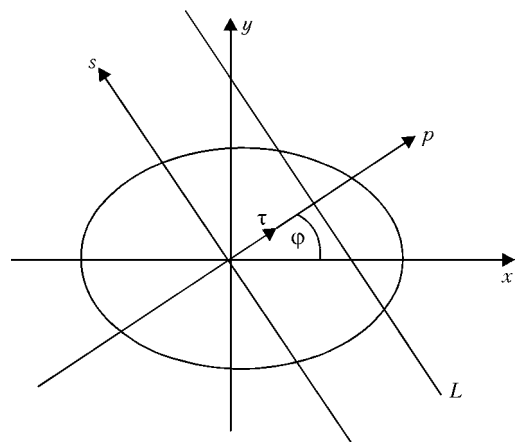


Рис. 1. К определению лучевой проекции

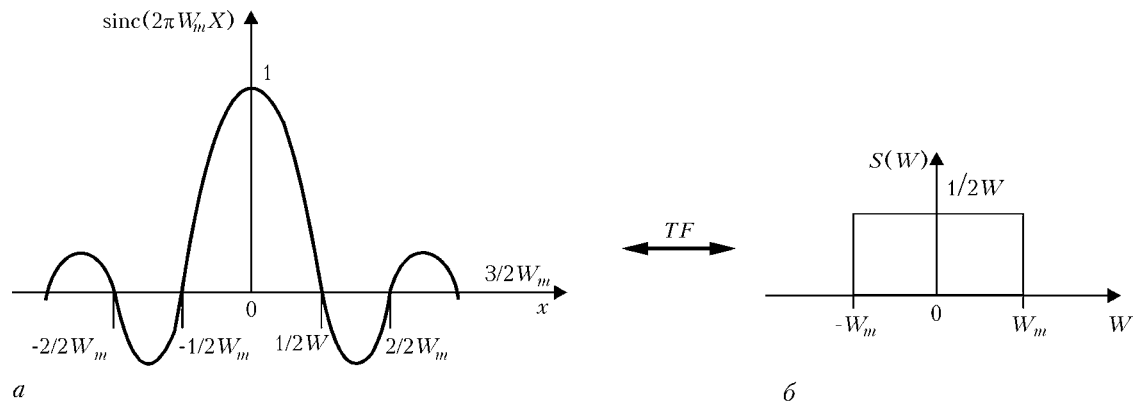


Рис. 2. Функция $\text{sinc}(2\pi W_m x)$ и ее фурье-спектр

Следует отметить, что согласно (3) *интегрирование выполняется по плоскостям*, а не по прямым согласно (2).

Однако, как было отмечено выше, эта функция известна для конечного множества точек области его определения (p, φ) . Возникают очевидный вопрос: возможно ли однозначно восстановить распределение f , имея ограниченную информацию об объекте, или иначе — возможно ли точно восстановить сечение объекта по конечному числу дискретных проекций? Эта задача имеет утвердительный ответ для определенного класса объектов [2]. Так, для осесимметричного распределения исследуемой характеристики объекта, когда функция Радона переходит в уравнение Абеля, достаточно одной проекции. Для объектов, сечения которых можно представить через произведение двух функций с разделенными переменными, — достаточно иметь две проекции.

В общем случае, данная проблема с математической точки зрения исследовалась Ф. Наттерером (детальнее см. [2], розд. II.3). Согласно Ф. Наттереру (выводы к теореме II.3.7) значения лучевых интегралов $\tilde{f}(p, \varphi)$ (луч-проекций) для конечного числа направлений φ_i не определяют однозначно функцию f из класса C_0^∞ , если даже p пробегает все значения из интервала определения. Как отмечает автор, для получения положительного результата на функцию f необходимо наложить определенные ограничения. Наилучшие результаты получаются для функций с ограниченной шириной спектра.

В данной работе мы будем рассматривать именно такие функции и получим для них корректные условия дискретизации, а также получим оценку разрешающей способности для случая, когда наборы проекций определяются для конечного числа азимутальных направлений.

Теорема отсчетов. Поскольку произвольное изображение (двумерное или трехмерное) можно описать с помощью некоторой функции $s(\vec{x})$, математическая задача состоит в дискретизации функции $s(\vec{x})$ и ее восстановлении по дискретному множеству значений отсчетов. Здесь $\vec{x}$ — вектор координат: $\vec{x} = (x_1, x_2)$ и $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$ соответственно в 2- и 3-мерном случаях. Фундаментальным результатом в этой области является те-

орема отсчетов или теорема Шеннона. Эта теорема собственно формулируется для функций (сигналов) с ограниченной полосой спектра [5–7]. Прежде чем перейти к содержанию теоремы Шеннона сделаем несколько предварительных замечаний.

Будем говорить, что определенная в n -мерном действительном пространстве R^n функция имеет ширину спектра $B = W_m$, если фурье-спектр этой функции локально интегрирован и равен нулю вне границ сферы радиусом W_m . Наглядным примером функции с ограниченным спектром в одномерном случае является sinc -функция

$$\text{sinc}(2\pi W_m x) = \begin{cases} \frac{\sin 2W_m x}{2\pi W_m x}, & x \neq 0; \\ 1, & x = 0. \end{cases}$$

Ширина спектра функции $\text{sinc}(2\pi W_m x)$ равна $B = 2W_m$, поскольку она представляет собой обратное преобразование Фурье «прямоугольной функции» $S(f)$ (рис. 2), которая тождественно равна нулю за пределами отрезка $[-W_m, +W_m]$:

$$S(f) = F[\text{sinc}(2\pi W_m x)] = \begin{cases} \frac{1}{2W_m}, & -W_m < f < +W_m; \\ 0 & \text{при } f \leq -W_m \text{ и } f \geq +W_m. \end{cases}$$

Заметим, что для непрерывного действительного сигнала $s(x)$ с ограниченным спектром, верхняя частота которого равна W_m , его фурье-спектр всегда симметричная функция с полной шириной спектра, равной $2W_m$ (см. рис. 2, б)

В двумерном $[\vec{x} = (x_1, x_2)]$ и трехмерном $\vec{x} = [(x_1, x_2, x_3)]$ случаях функция sinc задается формулами соответственно

$$\begin{aligned} \text{sinc}(\vec{x}) &= \text{sinc}(x_1) \text{sinc}(x_2), \\ \text{sinc}(\vec{x}) &= \text{sinc}(x_1) \text{sinc}(x_2) \text{sinc}(x_3). \end{aligned}$$

Как видно из графика функции $\text{sinc}(2\pi W_m x)$ (рис. 2, а), она положительна при $|x| < 1/2W_m$, а за пределами этого интервала описывает затухающие колебания.

Рассмотрим двумерный случай. В терминах цифровой обработки изображений функция $\text{sinc}(2\pi W_m x)$ описывает «элемент изображения» размером $1/2W_{mx} \times 1/2W_{my}$. Следовательно, функция $s(x, y)$ с шириной спектра $B_x = W_{mx}$ и $B_y = W_{my}$ (рис. 3) не содержит деталей размером

меньше $1/2W_{mx} \times 1/2W_{my}$ и, следовательно, для описания деталей такого размера необходимо выбирать функцию с радиусом полосы Фурье-спектра в частотной области не менее $\max(W_{mx}, W_{my})$.

Таким образом, можно принять, что детали изображения, описываемого некоторой функцией $s(x, y)$, с линейными размерами, меньшими $1/2W_m$, в спектральной (частотной) области описываются значениями спектральной функции $S(\omega)$ при $|\omega| > W_m$, и наоборот — значение $S(\omega)$ при $|\omega| < W_m$ характеризуют более крупные детали. В теории цифровой обработки изображений (двумерный случай) переменная ω определяет *пространственную частоту*.

Следует отметить, что поскольку реальные сигналы, как правило, имеют конечную длительность, они описываются функциями на ограниченном интервале. Фурье-спектр $S(\omega)$ такой функции, строго говоря, неограниченный. Однако, если значения компонент пространственного спектра при $|\omega| > W_m$ ничтожно малы (т. е. вся информация о пространственно-частотной структуре изображения сосредоточена в круге (или шаре) радиусом $B = W_m$, то говорят, что функция $s(x, y)$ имеет эффективную ширину спектра $B_e = W_m$. Функции с эффективной шириной спектра допускают такую же интерпретацию, как и функции со строго ограниченным спектром.

Сформулируем теорему отсчетов в случае дискретизации изображения двумерного распределения.

Пусть функция (сигнал) $s(x, y)$ — функция (сигнал) с шириной спектра $B = W_m$, и для шага дискретизации справедливо условие $X_0 \leq 1/2W_m$, $Y_0 \leq 1/2W_m$. Кроме того, функция (сигнал) ограничена по величине при $-\infty < x, y < \infty$, а ее спектр не имеет особенностей при $|\omega| = W_m$. Тогда функция (сигнал) $s(x, y)$ однозначно определяется по дискретным отсчетам $s(k/2W_m)$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) и может быть представлена в виде ряда

$$s(x, y) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{k}{2W_{mx}}\right) \frac{\sin 2\pi W_{mx}(x - \frac{k}{2W_{mx}})}{2\pi W_{mx}(x - \frac{k}{2W_{mx}})} \times \\ \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} s\left(\frac{k}{2W_{my}}\right) \frac{\sin 2\pi W_{my}(y - \frac{k}{2W_{my}})}{2\pi W_{my}(y - \frac{k}{2W_{my}})}, \quad (4)$$

где W_{mx}, W_{my} — граничные значения частоты спектра функции $s(x, y)$ в прямоугольной сетке частот соответственно по осям w_x и w_y (рис. 3).

Иначе говоря, отсчеты функции $s(x, y)$ в точках, которые расположены равномерно в прямоугольной сетке с шагом $X_0 = k/2W_{mx}$ и $Y_0 \leq 1/2W_m$, полностью определяют $s(x, y)$ во всех других точках.

Условия $X_0 = k/2W_{mx}$, $Y_0 \leq 1/2W_{my}$ называются условиями Найквиста. Если принять во внимание, что Фурье-спектр дискретизированной

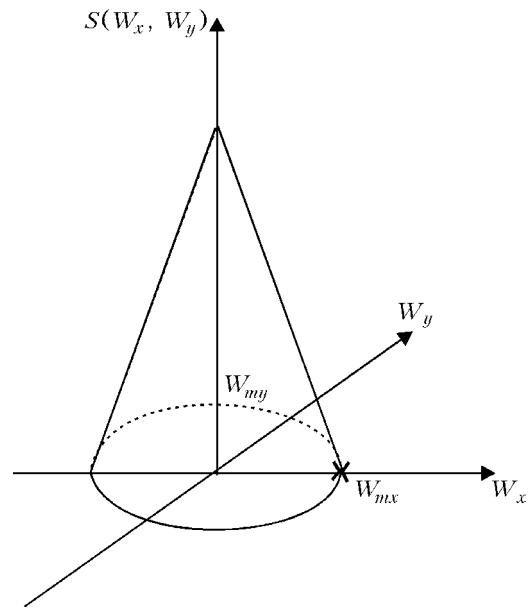


Рис. 3. Спектр исходной функции $s(x, y)$ в прямоугольной сетке координат

функции $S_s(\omega)$ представляет собою периодическое продолжение спектра исходной функции (сигнала) $S(\omega)$ с периодами соответственно $2W_{mx}$ и $2W_{my}$, то условие Найквиста обеспечивает отсутствие эффекта наложения частот, который при восстановлении согласно (4) приводит к заметной разности между восстановленным сигналом после дискретизации и исходным, что подлежал дискретизации [5, 6].

Теорема Шеннона нашла широкое применение в теории и практике обработки сигналов (одномерный вариант теоремы), цифровой обработки изображений (двумерный вариант теоремы) и цифрового спектрального анализа (одно- и двумерные варианты теоремы).

В отечественной и технической литературе советских времен указанную теорему связывают с именем В. А. Котельникова, в иностранной (в основном американской и английской) подобную теорему называют теоремой Шеннона или теоремой отсчетов.

Соотношение продолжительность — полоса и разрешающая способность по частоте. Функции, которые используются в теории сигналов (одномерные функции или временные функции-сигналы) или в теории обработки изображений (двумерные функции или пространственные функции-сигналы), известны лишь на ограниченном интервале — временном или пространственном. Согласно теореме отсчетов для точного восстановления функции с ограниченным спектром необходимо проводить дискретизацию по неограниченной области определения носителя функции (во временных или пространственных координатах). Однако, функция или сигнал не могут быть одновременно ограничены по продолжительности и полосе спектра [5, 8, 9]. И хотя любая функция-сигнал не может быть строго ограниченной по продолжительности или полосе, ее все-таки можно охарактеризовать в некоторой конечной простран-

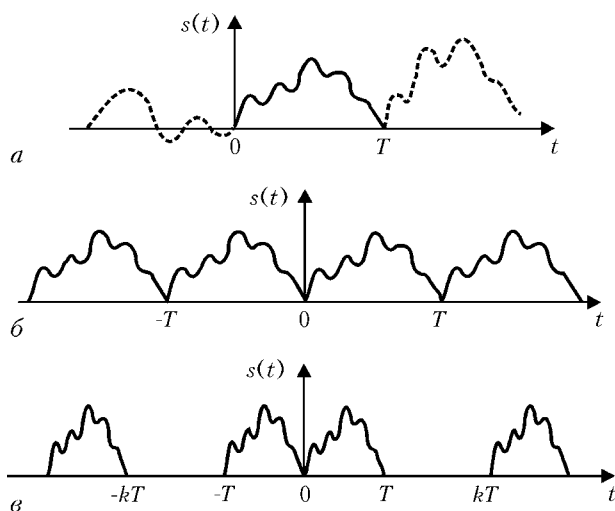


Рис. 4. Сигнал $s(t)$ с ограниченным временным интервалом задания $(0, T)$

ственной области диаметром L_e или в конечном временном интервале T_e , в которых сосредоточена доминирующая часть ее энергии при представлении соответственно в пространственных или временных координатах, и некоторой областью диаметром (интервалом) W_e , в которой сосредоточена доминирующая часть ее энергии при представлении ее в частотной области. В этом случае говорят об эффективной продолжительности функции-сигнала $L_e(T_e)$ и эффективной ширине частотной полосы W_e .

Можно показать, что при задании непрерывной функции-сигнала $s(\bar{x})$ (с ограниченным спектром) на конечном интервале нельзя получить больше, чем определенное количество точек спектра, причем оно определяется продолжительностью функции в области ее задания. Для наглядности и удобства осмысления математических выкладок рассмотрим одномерный случай во временной области.

Пусть сигнал $s(t)$ с ограниченным спектром на уровне F_m известен нам на ограниченном временном интервале $(0, T)$ (рис. 4, а). Пройгнорируем поведение сигнала за пределами интервала $(0, T)$. Так как функция задана на конечном интервале, то согласно дуальной теореме отсчетов для частотной области (теорема Шеннона справедлива для функций безотносительно к природе ее носителя), ее фурье-спектр определен только

для дискретных значений частот, разделенных промежутками $1/T$ (аналогичная картина имеет место, если сигнал во временной области *периодический*). В то же время, частотный спектр начального сигнала $s(t)$ ограничен на уровне F_m . Это равноценно заданию сигнала на интервале $(0, T)$ лишь N отсчетами через периодические промежутки времени продолжительностью $T_s = 1/2F_m$ (прямая теорема Шеннона). Покажем, что при таком задании сигнала во временной области согласно теореме отсчетов невозможно получить больше, чем $N/2$ отсчетов спектра.

В самом деле, длина интервала определения сигнала составляет $T = NT_s$. Поэтому величина разрешающей способности по частоте равна $\Delta f = 1/T = 1/NT_s$. Если максимальная частота спектр составляет F_m , то согласно прямой теореме отсчетов период корректной дискретизации должен удовлетворять условию

$$T_s \leq 1/2F_m = 1/2\gamma F_m, \gamma \geq 1.$$

Отсюда

$$\Delta f = 1/NT_s = 2\gamma F_m/N. \quad (5)$$

Максимальное значение числа отсчетов спектра достигается при $\gamma = 1$:

$$N_F = \frac{F_m}{\Delta f} = \frac{N}{2}. \quad (6)$$

Таким образом, вся информация о сигнале на временном интервале $(0, T)$ помещается в $N/2$ точках исходного спектра сигнала, причем, совокупность этих спектральных точек адекватна фурье-спектру периодической функции с периодом T , полученной путем периодического продолжения сегмента сигнала продолжительностью T (рис. 4, б) за границы интервала $(0, T)$.

Из соотношения (5), видно, что чем больший интервал $T = NT_s$ наблюдаемого сигнала мы фиксируем, тем большую разрешающую способность по частоте мы можем получить. В предельном случае, если сигнал неограниченный во времени, то можно получить оценку спектра с любой заданной точностью.

Сделаем одно важное замечание. Если разделить $kN/2$ точек спектра (k — натуральное число), то, очевидно, расстояние между соседними частотными отсчетами становится в k раз меньшим, что соответствует увеличению периода продолжения исходного сигнала в k раз. Это равноценно тому, что новый периодический сигнал теперь должен совпадать с нашим сигналом только на интервале $(0, T)$ и быть равным нулю между точками T и kT (рис. 4, в).

Аналогичный результат можно получить для двумерного случая. Пусть изображение $s(x, y)$ определено в прямоугольной области (L_x, L_y) (рис. 5, а). Пол-

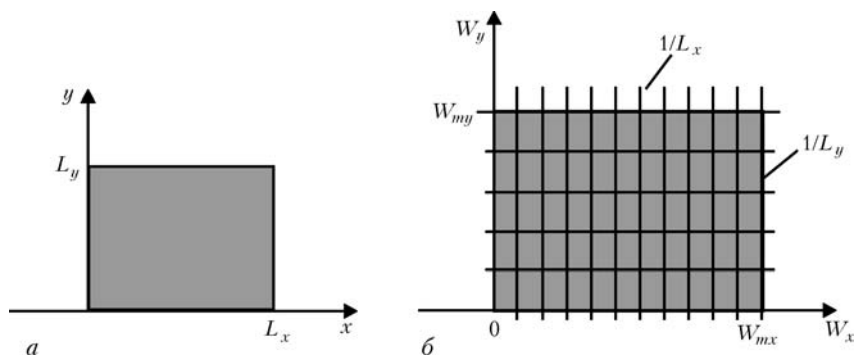


Рис. 5. Области определения изображения в прямоугольной сетке пространственных (а) и частотных (б) координат

ному изображению отвечает спектр с прямоугольной областью определения с предельными частотами соответственно W_{mx} и W_{my} (рис. 5, б). Аналогично одномерному случаю получаем:

разрешающая способность по частотной оси w_x :

$$\Delta w_x = \frac{1}{L_x} = \frac{1}{N_x L_{sx}};$$

разрешающая способность по частотной оси w_y

$$\Delta w_y = \frac{1}{L_y} = \frac{1}{N_y L_{sy}},$$

где L_{sx} и L_{sy} — пространственные интервалы дискретизации по соответствующим пространственным осям.

Если выбрать период корректной дискретизации по пространственным координатам согласно условию

$$L_{sx} \leq 1/2W_{mx} = 1/2\gamma W_{mx}, \quad L_{sy} \leq 1/2W_{my} = 1/2\gamma W_{my}, \quad \gamma \geq 1,$$

то аналогично предыдущему случаю получаем

$$\Delta w_x = 2\gamma W_{mx}/N_x, \quad \Delta w_y = 2\gamma W_{my}/N_y. \quad (7)$$

Отсюда максимальное число частотных уровней отсчета ($\gamma = 1$) по оси w_x составляет

$$\frac{W_{mx}}{\Delta w_x} = \frac{N_x}{2},$$

а по оси w_y

$$\frac{W_{my}}{\Delta w_y} = \frac{N_y}{2}.$$

Таким образом, максимальное значение числа отсчетов спектра равняется $N_x N_y / 4$. В случае равенства предельных частот спектра ($N_x = N_y = N$) число возможных отсчетов составляет $N^2 / 4$.

Разрешающая способность по азимутальному углу зондирования. Как уже отмечалось выше, для точного восстановления внутренней структуры двумерного или трехмерного объекта по его линейным проекциям необходимо иметь неограниченное количество по разному ориентированных таких проекций, т. е. угловой параметр сканирования ϕ пробегает все значения из области определения $(0, 180^\circ)$. Однако на практике значения

линейных проекций (набор линейных интегралов по прямым L в направления ϕ) можно определить только для конечного числа направлений, т. е. восстановление проводится по некоторому конечному угловому набору проекций, полученных для дискретных значений азимутального угла облучения с некоторым шагом $\Delta\phi$. Поэтому при решении задачи дискретизации по азимутальному углу зондирования возникает ряд практических вопросов:

1. Как выбрать оптимальный интервал дискретизации $\Delta\phi$ и какими соображениями при этом руководствоваться?

2. Какая максимально допустимая величина интервала дискретизации $\max\Delta\phi$, при котором еще принципиально возможно корректное восстановление исходного распределения по его угловым проекциям?

Получить ответы на поставленные вопросы можно лишь в случае, если задачу дискретизации рассматривать вместе с обратной задачей — восстановление исходного распределения по его дискретным проекциям. Суть задачи заключается в том, что согласно теореме о центральном сечении [1–3] необходимо восстановить утраченные в процессе дискретизации участки непрерывного спектра распределения, которые лежат в угловых промежутках между отсчетами (вернее — восстановить поведение спектра в этих промежутках).

Рассмотрим теорему о центральном сечении (двумерный случай).

Пусть функция $f(x, y)$ абсолютно интегрируема в области определения $\Delta(x, y)$, а ее фурье-спектр ограничен некоторой областью $W(u, v)$. Тогда одномерное фурье-преобразование проекции $\tilde{f}(p)|_{\phi=\phi_i}$ двумерной функции $f(x, y)$, полученной под углом $\phi = \phi_i$ в пространстве сигналов (рис. 6, а), представляет собой центральное сечение под тем же углом $\phi = \phi_i$ в пространстве спектров преобразования Фурье исходной функции (рис. 6, б).

Другими словами, фурье-образ проекции $\tilde{f}(p)|_{\phi=\phi_i}$ для угла ϕ_i (рис. 6, а) представляет собой спектр функции $f(x, y)$ вдоль прямой, которая проходит через начало координат в частотной плоскости $W(u, v)$ под тем же углом ϕ_i (рис. 6, б) и фактически является центральным сечением

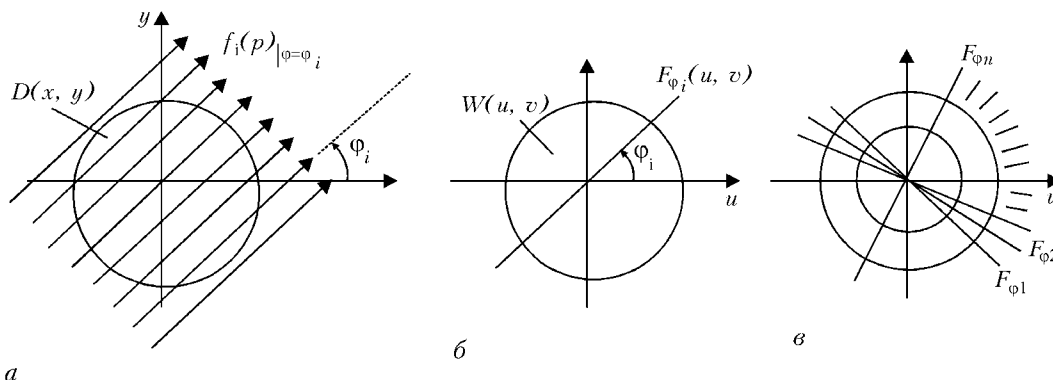


Рис. 6. К теореме о центральном сечении

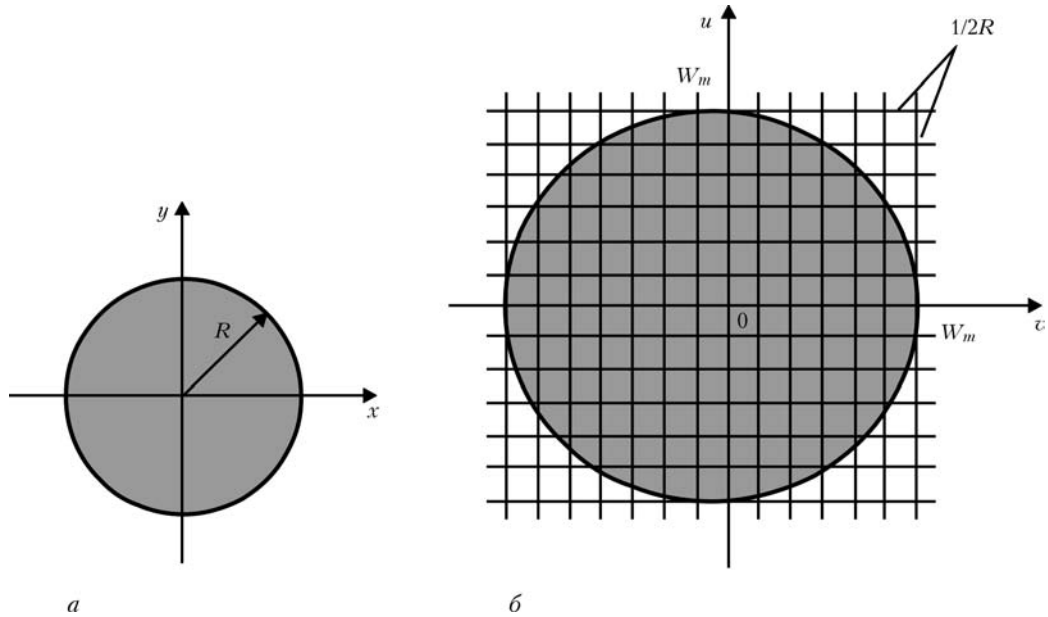


Рис. 7. Области определения двумерного изображения: а — в пространственной области (x, y) ; б — в спектральной области (u, v)

двумерного фурье-преобразования исходной функции $F\phi_i(u, v) = F(u\cos\phi_i + v\sin\phi_i)$.

С одной стороны, теорема о центральном сечении позволяет получить преобразование Фурье исходного распределения $f(x, y)$, если известны его проекции, а следовательно, и само распределение, используя для этого известное соотношение для обратного преобразования Фурье. С другой стороны, как следует из приведенной теоремы, для точного восстановления исходного распределения необходимо иметь неограниченное количество проекций под разными углами.

Реально на практике мы обычно имеем дело с конечным числом проекций. Совершенно понятно, что чем меньшее количество отсчетов мы берем на угловом интервале $(0, 180^\circ)$, тем длиннее интервал дискретизации $\Delta\phi = \phi_s$ и более сложно выполнить процедуру точного восстановления исходного распределения $f(x, y)$. И наоборот, чем больше угловых отсчетов, тем короче интервал дискретизации и точнее процедура восстановления (рис. 6, в).

Найдем оценку разрешающей способности по углу для случая *стандартной параллельной схемы сканирования*, когда проекции (преобразование Радона) определяются для конечного числа направлений из простых эвристических соображений. Поскольку условия дискретизации по углу в трехмерном случае можно получить из условий дискретизации на плоскости, ограничимся рассмотрением двумерного случая. Теоретическое обоснование процесса дискретизации по углу содержит теорема о центральном сечении и теорема дискретизации Шеннона.

Пусть двумерное сечение в прямоугольной системе координат (x, y) исследуемого объекта описывается функцией распределения $s(x, y)$ (в УЗ томографии это может быть распределение скорости распространения УЗ колебаний или линейный коэффициент поглощения в рентгеновской томографии). Для определенности область задания

функции распределения примем в виде круга радиусом R (рис. 7, а). Соответственно пусть эффективная ширина пространственного спектра $F(u, v)$ этого сечения в прямоугольной системе координат (u, v) ограничена радиусом W_m (рис. 7, б). Так как область определения «изображения распределения» в пространственных координатах ограничена поперечником длиной $2R$, то согласно обратной теореме Шеннона его спектр определен только для дискретной прямоугольной сетки частот (рис. 6, б), разделенных промежутками $1/2R = 1/NR_s$, где R_s — шаг дискретизации изображения в пространственной области; N — число отсчетов изображения по поперечнику. Согласно теореме дискретизации функций с ограниченным спектром шаг дискретизации выбирается из условия $R_s \leq 1/2W_m$. Отсюда шаг частотной сетки

$$\Delta u = \Delta v = \Delta f = \frac{2W_m}{N}. \quad (9)$$

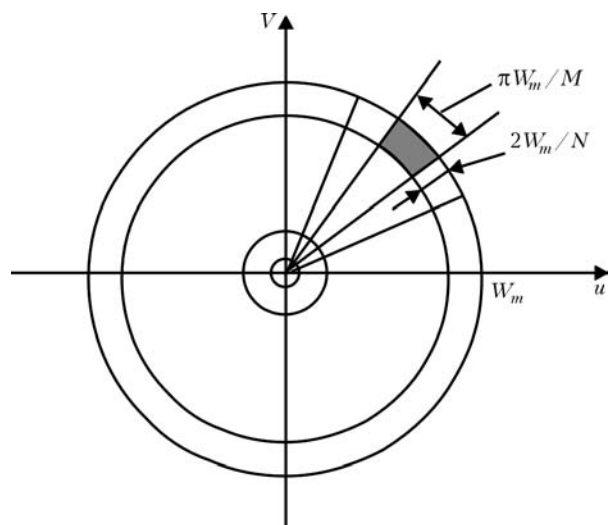


Рис. 8. Полярная дискретизационная сетка взятия отсчетов в спектральной области

Мы хотим найти такое дискретное множество M направлений, которое бы обеспечивало корректное восстановление изображения $s(x, y)$, т. е. — для разделения деталей размером $1/2W_m$, достаточно знать проекции на этом множестве. Представим область определения спектра изображения в полярной сетке, как показано на рис. 8.

Шаг сетки в радиальном направлении составляет $2W_m/N$, а по углу — $\Delta\varphi = 180^\circ/M$. Самые крупные ячейки полученной сетки, которые еще принадлежат области определения спектра, лежат в кольце с верхним радиусом W_m . Каждая такая ячейка при $M, N \gg 1$ представляет собой приближенно прямоугольник со сторонами соответственно $2W_m/N$ и $\pi W_m/M$. Очевидно, что для корректной дискретизации по углу необходимо, чтобы выделенные ячейки имели форму квадратов со стороной $2W_m/N$, т. е. должно выполняться условие:

$$\frac{2W_m}{N} = \frac{\pi W_m}{M}. \quad (10)$$

Отсюда получаем:

$$M = \frac{\pi N}{2}. \quad (11)$$

При дискретизации двумерного сигнала (изображения) $s(x, y)$ с ограниченным пространственным спектром в параллельных направлениях с пространственным шагом согласно теореме Шеннона $R_s = 1/2W_m$ число азимутальных направлений зондирования должно удовлетворять условию $M \geq \pi N/2$.

Можно показать, что соотношение (11) справедливо для областей определения изображения и

спектра произвольной конфигурации с той лишь разницей, что для расчета в качестве значений R и W_m , берутся соответственно величины $\max(R_{mx}, R_{my})$ и $\max(W_{mx}, W_{my})$.

Выводы

В большинстве практических случаев можно проводить дискретизацию в ограниченном поле размером $L_m \times L_m$, предполагая, что ее спектральный носитель сосредоточен в частотном интервале радиусом W_m и что значение $L_m W_m \geq N/2$ велико. Тем не менее, необходимо проявлять осторожность при интерпретации полученных данных реконструкции, так как мы априори изъеали из рассмотрения мелкие детали оригинала исследуемого распределения.

1. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии. — М.: Мир, 1983. — 352 с.
2. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. — М.: Мир, 1990. — 280 с.
3. Введение в современную томографию / Под ред. К. С. Тернового, М. В. Синькова. — Киев: Наук. думка, 1983. — 232 с.
4. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Аналитическая геометрия. — М.: Наука, 1988. — 244 с.
5. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. — Т. 1: Основные принципы и классические методы. — М.: Мир, 1983. — 312 с.
6. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. — М.: Мир, 1971. — 496 с.
7. Маркюс Ж. Дискретизация и квантование. — М.: Энергия, 1973. — 272 с.
8. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Фinitные функции в физике и технике. — М.: Наука, 1971. — 324 с.
9. Марпл С. Л.-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. под ред. И. С. Рыжака. — М.: Мир, 1990. — 584 с.

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины,
Львов

Поступила в редакцию
20.02.2004

УКРАИНСКОЕ ОБЩЕСТВО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

с 18 по 25 ноября 2005 г. в г. Афины, Греция

проводит 5-ю Национальную конференцию и выставку
по неразрушающему контролю и диагностике

УО НКДД планирует организовать поездку украинских специалистов для участия в этой конференции. Желающие принять участие должны до 1 мая 2005 г. направить в Секретариат УО НКДД заявку, подписанную руководителем организации (указать Ф.И.О., место работы, должность, телефон, факс, E-mail, почтовый адрес, номер загранпаспорта, наличие доклада) по адресу:

03680, г. Киев-150 ГСП, ул. Боженко, 11 тел: 261-08-78 (Загребельный В. И.)
Факс: (044) 220-94-82, e-mail: usndtAukr.net или zagrebelnyy@ukr.net

Conference Secretary
Eleftheria Prassianaki

MSc of Management-Louis Pasteur graduate, Strasbourg, FR
Address: HSNT, PO Box: 64066, Zografou, 157 10, Athens-Gree.
Tel.: +30210-7723759, e-mail: hsnt@hsnt.gr. Web Site: www.hsnt.gr

ИЗМЕРЕНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ

Е. М. ЕРМАК, А. О. ИСМАГИЛОВ

Рассмотрены вопросы экспериментального определения упругих перемещений точек колонн промышленных зданий для уточнения расчетного моделирования опорных связей каркаса.

The paper deals with the issues of experimental determination of elastic displacements of points of industrial building columns for a more precise simulation by calculation of support ties of the frame.

Важным этапом работ по оценке технического состояния конструкций зданий в условиях эксплуатации являются проверочные расчеты на максимально уточненных расчетных схемах.

Известно [1, 2], что представление узловых и опорных связей каркасов на расчетных схемах предельными характеристиками жесткости (идеальные шарниры или жесткие заделки) часто не отвечает их фактической, упругоподатливой работе под нагрузкой, поэтому в общем случае узлы сопряжения и опирания элементов каркаса должны моделироваться упругими связями [4].

В данной работе показана возможность такого моделирования для узлов опирания колонн каркаса существующих одноэтажных промышленных зданий на фундаменты.

Допускается, что остаточные деформации грунтов основания под подошвой фундамента при временных воздействиях являются пренебрежимо малыми или стабилизировались и при повторных нагрузках не накапливаются. Тогда указанное уточнение расчетных схем может быть реализовано, если установить характеристики опорных связей, учитывающие возможность упругих линейных и угловых перемещений, т. е. упругие осадки и повороты опорных сечений колонн каркаса.

Принимаем в качестве таких характеристик: коэффициент жесткости основания K_i (отношение величины давления на колонну к соответствующей величине осадки);

коэффициент пропорциональности u_i , связывающий величину изгибающего момента, воспринимаемого опорным сечением колонны, и теоретический угол поворота этого сечения (допускаем, что поворот фундамента и базы колонны является совместным).

Исходим также из того, что характеристики K_i и u_i — случайно изменчивые величины, так как находятся в зависимости от ряда факторов, которые трудно оценивать теоретически с необходимой точностью (свойство и состояние грунтов основания, работа элементов базы колонны, жесткость соединения ее с фундаментом и др.). Поэтому достаточно достоверные значения этих характеристик можно установить только по результатам натурных экспериментов.

Далее изложены особенности методики испытаний, которая основана на допущениях: упругая податливость опорных связей колонн каркаса оценивается по величине упругих перемещений при действии испытательной нагрузки; испытательной нагрузкой является вертикальное давление, оказываемое на колонну мостовыми кранами.

Таким образом, для экспериментального определения линейной и угловой упругости опорных связей нужно измерить вертикальные и горизонтальные перемещения точек колонн, по величинам которых можно судить как о работе конструкции, так и о работе грунтов основания.

Трудность измерений состоит в том, что любая точка нагруженной и деформируемой конструкции совершает сложное перемещение в пространстве.

Могут быть предложены два варианта реализации методики таких испытаний.

Вариант 1. Определение перемещений точек колонн каркаса с помощью прогибомеров по дистанционной схеме [3], т. е. измерение указанных перемещений относительно условно неподвижных (опорных) точек.

Допустим, что нужно определить перемещение выбранной точки колонны в плоскости поперечной рамы каркаса (плоскости наиболее интенсивной работы конструкции при загрузке), и что это перемещение однозначно определяется двумя составляющими по заданным направлениям — вертикальному и горизонтальному.

Вертикальная составляющая перемещения может быть определена прогибомером, если проводочная связь между точкой колонны и прибором будет расположена вертикально. В этом случае горизонтальная составляющая практически не влияет на показания прогибомера. Однако при таком расположении прибора и связи измерения величины перемещений будут неточные, так как опорная точка, находясь у основания колонны, может перемещаться при действии нагрузки вместе с полом и грунтом. Поэтому прогибомеры необходимо размещать на некотором расстоянии от базы колонны и проводочные связи, следовательно, будут натянуты под углом к горизонту. При такой установке прибора его показания будут уже зависеть от двух составляющих. Следовательно, измеряя перемещения какой-либо точки колонны в плоскости рамы, нужно устанавливать на эту точку

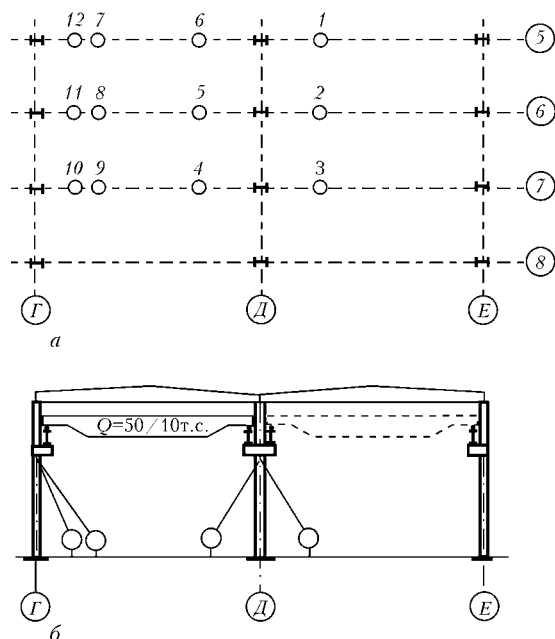


Рис. 1. Схема установки прогибомеров на объекте испытаний: а — план; б — разрез

два прибора (рис. 1) и тогда направления проволочных связей определяют направления составляющих перемещений, которые измеряются. Эти два направления должны быть обязательно различными.

Горизонтальные и вертикальные составляющие перемещений точек колонны определяются путем пересчетов, если известны геометрические характеристики положения проволочных связей относительно колонны. Выведем соответствующие зависимости.

Вертикальная составляющая осадки состоит из перемещения, вызванного упругой податливостью опоры, и перемещения вследствие поворота стойки как жесткого целого. Ввиду малости угла этого поворота (до 1°) влиянием последнего пренебрегаем.

Пользуясь обозначениями размеров на рис. 2, получаем:

$$(h - \Delta l_{11})^2 + (a + \Delta l_2)^2 = c^2, \quad (1)$$

$$(h - \Delta l_{12})^2 + (b - \Delta l_2)^2 = d^2, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta l_{12} - \Delta l_{11}}{2} = \frac{\Delta l_2}{h}, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta l_{12} + \Delta l_{11}}{2} = \Delta l_1. \quad (4)$$

Для определения составляющих перемещений точек колонны Δl_1 и Δl_2 по приведенным формулам необходимо, кроме показаний прогибомеров, иметь данные о длинах проволочных связей и размерах катетов образованных треугольников (размеры a , b , h на рис. 2).

Полученные таким образом значения перемещений и известные величины силовых воздействий, им соответствующие, дают возможность определить коэффициенты податливости основания

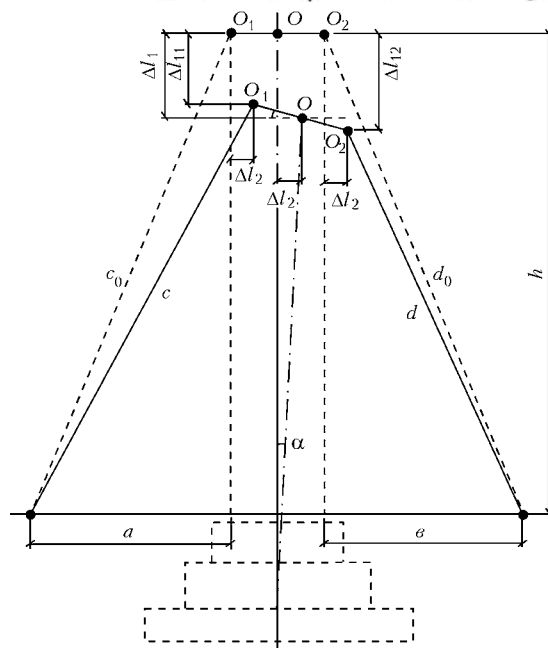


Рис. 2. Схема перемещений точек O_1 и O_2 при упругих деформациях колонны от испытательной нагрузки (вариант 1)

и составить модель упругоподатливых опор для уточнения расчетной модели.

Для уточнения пространственных расчетных моделей используется та же методика, но на каждую точку нужно ставить три прогибомера с разными направлениями проволочных связей.

Вариант 2. Для измерения перемещений точек колонн используется высокоточный нивелир, а также нивелирные рейки и специальные измерительные площадки, которые крепятся неподвижно в нижней части колонн.

До загрузки колонны испытательной нагрузкой (положение площадки на рис. 3 показано штриховой линией) и в нагружаемом состоянии (одно из возможных положений площадки показано сплошной линией) берутся отсчеты по рейкам, установленным в точках O_1 и O_2 .

Вертикальные перемещения этих точек

$$\Delta l_{11} = h'_{O_1} - h_{O_1}, \quad \Delta l_{12} = h'_{O_2} - h_{O_2}, \quad (5)$$

где h_{O_1} , h_{O_2} — «нулевые» отсчеты; h'_{O_1} , h'_{O_2} — отсчеты, указывающие на положение точек под нагрузкой.

Из (5) следует, что перемещения точек площадки вверх имеет знак «+», а перемещения вниз — знак «-».

Ясно, что расстояние между точками O_1 и O_2 , т. е. размеры измерительной площадки в плане могут влиять на точность измерений.

Вертикальное перемещение точки O колонны:

$$\Delta l_1 = \frac{\Delta l_{12} + \Delta l_{11}}{2}. \quad (6)$$

Угловые перемещения колонны в данном сечении (рис. 3):

при $\Delta l_{11} \leq 0$ и $\Delta l_{12} \leq 0$:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\Delta l_{12} - \Delta l_{11}|}{2a + h_k}, \quad (7a)$$

при $\Delta l_{11} > 0$ и $\Delta l_{12} > 0$ или наоборот:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\Delta l_{12}| + |\Delta l_{11}|}{2a + h_k}. \quad (76)$$

Выбор способа измерения перемещений точек колонны из представленных выше вариантов зависит от наличия или отсутствия тех или иных измерительных приборов и приспособлений для их установки, а также от условий проведения испытаний: расположения оборудования в цехе, возможности установки приборов и удобство работы с ними и др.

Приведем пример реализации методики измерений по варианту 1 и уточнения расчетной схемы для двухпролетной поперечной рамы каркаса машинного зала на ПО «Запорожтрансформатор».

Порядок проведения испытаний. В связи с некоторой неопределенностью работы опорных связей колонн каркаса и неизученным поведением под нагрузкой грунтов основания испытания проводились в два этапа.

На первом этапе — предварительных испытаниях — кроме основной задачи, решались вспомогательные: отработка методики эксперимента; проверка работы приборов; уточнение правильности намеченного пути исследования.

Второй этап испытаний проводили как определяющий, для корректировки методики и уточнения результатов с наиболее возможной достоверностью. Для измерений перемещений использовались прогибомеры ПМ-3 системы Максимова. Точность измерений 0,01 мм.

Схема расстановки приборов (на втором этапе испытаний) приведена на рис. 1.

Испытательная нагрузка. Для создания испытательных нагрузок на колонны каркаса использовались мостовые краны грузоподъемностью $Q = 20$ тс с грузом 12,5 тс (на этапе предварительных испытаний) и $Q = 50/10$ тс с грузом 35,0 тс (на этапе основных испытаний).

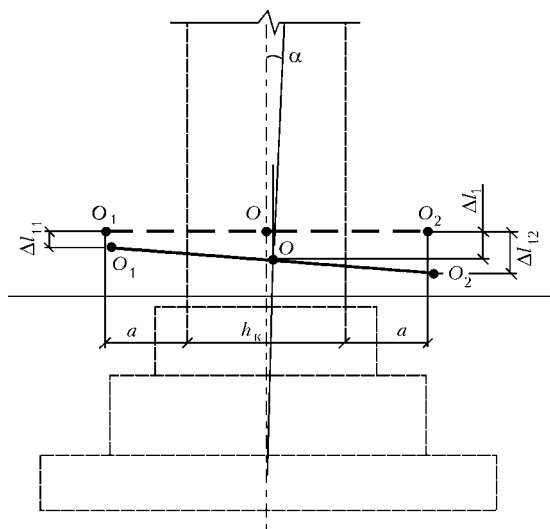


Рис. 3. Схема перемещений точек O_1 и O_2 при упругих деформациях колонны от испытательной нагрузки (вариант 2)

Для получения необходимой выборки статистических данных измерения проводились при различных установках испытательной нагрузки (двенадцать установок крана в пролете «Г-Д» — по четыре установки для последовательного нагружения колонн по осям «5», «6» и «7»). Схема передвижения и установок крана при проведении основных испытаний приведена на рис. 4.

Результаты испытаний. Для колонн среднего ряда «Д» при давлении от мостового крана $P_d = 290$ кН (кран грузоподъемностью $Q = 50/10$ тс с грузом) получено математическое ожидание величины осадки фундамента и соответствующая величина коэффициента жесткости основания:

$$Y_d = 0,031 \text{ см}, K_d = 9355 \text{ кН/см}.$$

Для определения теоретического значения u_i нужно знать величину коэффициента постели основания под фундаментом C_0 , который может быть определен из условия равновесия фундамента как штампа на сплошном упругом основании при его вертикальной осадке (рис. 5):

$$N - C_0 y_{ab} = 0,$$

откуда

$$C_0 = N / y_{ab}, \quad (8)$$

где N — нагрузка, вызывающая осадку « y » фундамента; a и b — размеры подошвы фундамента вдоль «цифровой» и «буквенной» осей соответственно.

Используя условие равновесия фундамента, нагруженного изгибающим моментом M_i (рис. 5, б), получаем:

$$M - 2 \frac{a\phi}{4} C_0 \frac{ab}{2} \frac{2}{3} \frac{a}{2} = 0,$$

откуда

$$M = \frac{C_0 b a^3}{12} \phi. \quad (9)$$

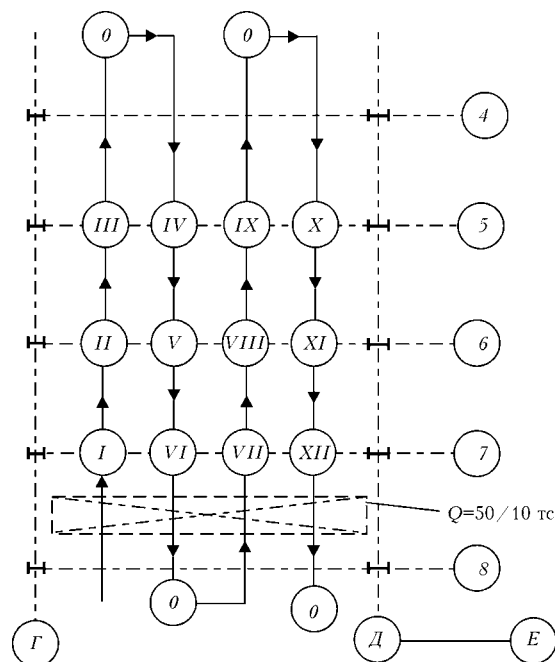


Рис. 4. Схема установок испытательной нагрузки на объекте испытаний

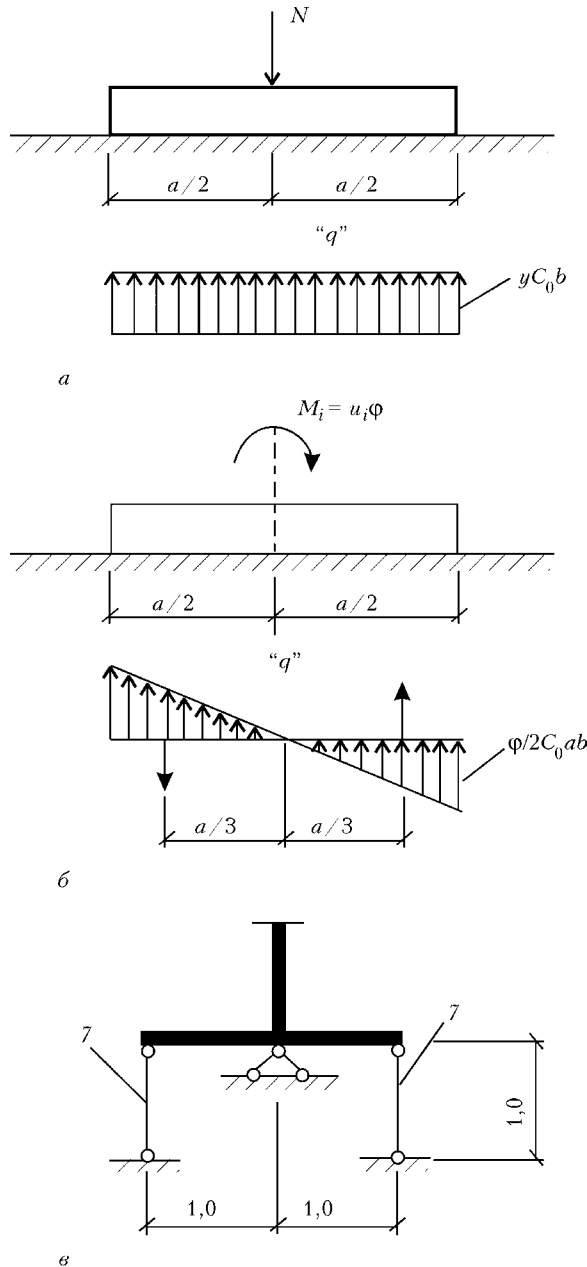


Рис. 5. Схемы усилий при осадке фундамента (а) и при повороте фундамента (б), схематизация опорных связей на расчетной модели (в)

По определению

$$M = u_i \phi. \quad (10)$$

Поэтому из (9) и (10) следует

$$u_i = C_0 (b a^3 / 12),$$

или, учитывая (8)

$$u_i = \frac{N}{y} \frac{a^2}{12}. \quad (11)$$

Для колонны среднего ряда «Д-6»:

$$N_d = 290 \text{ кН}, y = 0,031 \text{ см}, a_d = 6,0 \text{ м}.$$

По формуле (11):

$$u_d = \frac{290,0}{0,031} \frac{6,0^2}{12} 10^{-2} = 2,90 \cdot 10^6 \text{ кН·м}.$$

Для представления на расчетной модели «внутренних» [4] упругих связей опорных узлов используем стержневую схематизацию (рис. 5, в) и определим характеристики таких связей при следующих допущениях: упругие осадки опор каркаса малы (в данном случае их величины — меньше 1 мм) и поэтому их влиянием на распределение изгибающих моментов в элементах поперечных рам очевидно можно пренебречь; степень упругого защемления колонны в опорном узле зависит от податливости опорных связей при повороте; ввиду малости угла поворота опорного сечения колонны считаем, что $\text{tg} \phi = \phi$; стержни «7» на модели опорных узлов поперечных рам принимаются идеально упругими, устойчивость их при сжатии считается обеспеченной, а осевая жесткость определяется величиной коэффициента u_i , остальные стержневые элементы этой модели принимаются абсолютно жесткими (рис. 5, в).

Определим жесткость упругих стержней «7».

Если к опорному сечению приложено усилие в виде единичного момента $M = 1 \text{ кН·м}$ и упругие стержни «7» имеют единичную длину (1,0 м), а расстояние между ними и осью стержня колонны также равно 1,0 м (рис. 5, в), то исходя из выражения (10) и учитывая, что

$$\phi = y_7 / 1,0, \text{ где } y_7 = \frac{M \cdot 1,0}{2EA_7},$$

получаем

$$EA_7 = \frac{u_i}{2}. \quad (12)$$

В данном конкретном случае для опоры средней колонны $EA_7 = 1,45 \cdot 10^6 \text{ кН}$.

Рассмотренная методика экспериментального определения параметров упругого защемления опорных узлов каркаса и соответствующего уточнения расчетных моделей пока реально применима для решения задачи оценки и обеспечения надежности конструкций в условиях эксплуатации. Но с накоплением данных для различных конструктивных решений, размеров, условий нагружения и др., а также данных статистических исследований эти параметры могут быть нормированы и использованы при проектировании.

1. Исследование действительной работы стальных конструкций промышленных зданий // Сб. трудов под ред. С. А. Бернштейна. — 1938. — 196 с.
2. Шатило Г. А. Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов. — М.-Л.: 1952. — 287 с.
3. Безухов Н. И. Испытания строительных конструкций и сооружений. — М.: Госстройиздат, 1954. — 452 с.
4. Ермак Е. М. Действительная работа и расчетные модели стальных каркасов промышленных зданий. — Магсква: ДонГАСА, 2002. — 189 с.



10-а МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЛЕОТЕСТ-2005» В СЛАВСЬКУ

З 14 по 19 лютого 2005 року в Карпатах в Славську Львівської області вдесьте зібрались спеціалісти з неруйнівного контролю на свою Ювілейну міжнародну науково-технічну конференцію «ЛЕОТЕСТ-2005. Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів». Цього разу конференція була присвячена питанням електромагнітного та акустичного контролю.

Організатором цієї щорічної конференції виступили Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів), Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Науково-виробнича фірма «Зонд» (м. Івано-Франківськ) та Науково-виробнича фірма «Ультраконт-Сервіс» (м. Київ). **Організаційне бюро конференції — Центр «Леотест-Медіум».**

В конференції взяли участь більше як 60 спеціалістів з України, Росії, Білорусі, Молдови, Польщі та Німеччини.

Відкрили конференцію заступник директора ФМІ ім. Г. В. Карпенка, член-кореспондент НАНУ *З. Т. Назарчук* та голова оргкомітету конференції, голова Західного відділення УТ НКТД, директор Центру «Леотест-Медіум» канд. техн. наук *В. М. Учанін*. Від імені організаторів конференції вони побажали плідної праці її учасникам та нагородили грамотами тих, хто найбільш активно на протязі 10 років сприяв її становленню. Серед відзначених грамотами *Троїцький В. О., Карпаш О. М., Луценко Г. Г., Безлюдько Г. Я., Рибачук В. Г., Шекеро А. Л., Посипайко Ю. М., Єгоров М. М.* (Санкт-Петербург), *Москвяк Є. В., Духовський О. Ю., Любченко А. П., Тихий В. Г., Снарський А. В., Прохоренко П. П.* (Мінськ), *Зубіташвілі А. В.* (директор пансіонату «Бойківщина»), *Кісіль І. С., Дереча В. Я., Прохоренко В. Я., Серебренников С. В., Телітко Л. П.* Присутні також прослухали вітальне звернення, надіслане головою УТ НКТД проф. *В. О. Троїцьким*.

Дослідження проблем неруйнівного контролю якості матеріалів затверджені серед пріоритетних наукових напрямків ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ. В першій доповіді *З. Т. Назарчука, В. М. Учаніна, В. Г. Рибачука* «Розвиток досліджень з неруйнівного контролю та технічної діагностики у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАНУ» представлено досягнення науковців інституту в таких напрямках НК:

вихрострумова дефектоскопія, структуроскопія, товщинометрія та коерцитиметрія;

поширення акустичних та електромагнітних полів в неоднорідних середовищах;

розв'язання обернених задач теорії розсіювання з метою визначення розміру неоднорідностей;

візуалізація акустичних зображень;

вивчення кореляційних залежностей фізико-механічних характеристик матеріалу та його акустичних параметрів;

вивчення фізики деформаційних процесів та деградації матеріалів, зокрема методом вимірювання локальної термо-ЕРС;

розробка УЗ обчислювального томографа для оцінки властивостей матеріалів;

визначення параметрів дефектів матеріалів методом вихрострумової дефектометрії;

дослідження методів візуалізації неоднорідностей при вихрострумовому контролі та цифрова обробка зображень на основі теорії контрастності;

розробка автоматизованих систем вихрострумового контролю та спеціальних перетворювачів;

магнітна коерцитиметрія виробів із спечених твердих сплавів;

вивчення акустичної емісії при розвитку тріщин в зоні пластичних деформацій.

Фахівці з ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ винесли на суд колег ще кілька досить цікавих доповідей:

• *Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, С. Ф. Савула, О. Й. Винник, Р. Т. Бабуняк, В. Р. Джала, Р. М. Кузик, П. М. Хлипняч.* Контроль протикорозійного захисту підземних трубопроводів за безконтактними вимірами струму.

• *О. Р. Берегуляк, Р. А. Воробель, І. М. Журавель, І. Б. Івасенко, Н. В. Отир, К. В. Суцук.* Комп'ютеризована система «Образ-Д1» для аналізу рентгенографічних знімків.

• *В. Г. Рибачук, В. М. Учанін.* Спосіб вихрострумового контролю немагнітних матеріалів з врахуванням температурного впливу.

• *В. В. Кошовий, Є. В. Кривін, А. М. Муравйов, І. М. Романишин.* Розробка методів ультразвукової томографії на розсіяному сигналі для оцінки деградації конструкційних матеріалів.

• *О. Є. Левицький.* Одержання проекційних даних в ультразвуковій реконструктивній томографії.

• *Г. Є. Михайловський, В. В. Панов, В. Д. Погребенник.* Можливості акустичних методів контролю у виробництві композиційних деревинних матеріалів.

• *В. Д. Погребенник.* Метрологічне забезпечення акустичних інформаційно-вимірювальних систем.

• *В. М. Учанін, В. В. Черленевський, К. А. Іващенко, І. І. Кириченко, В. Г. Тихий, М. В. Хомченко.* Розробка вихрострумового дефектоскопа для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів в зварних швах.

• *Р. А. Воробель, І. М. Журавель.* Модифікація методу статичної сегментації.

Ще з трьома доповідями виступили вчені інших інститутів НАН України:

• *В. В. Некрасов, Б. В. Гриньов, В. В. Білогуб, Ю. А. Борошенко, Є. М. Селегеев* (Інститут монокристалів, м. Харків). Приймально-детектуючий тракт рентгенівського інтроскопа для НКТД.

• *В. М. Деркач, Р. В. Головащенко, Є. В. Горошко, В. Г. Корж, С. В. Недух, А. С. Плевако, С. І. Тарапов* (Інститут радіофізики та електроніки, м. Харків). Вимірювання діелектричних параметрів матеріалів при низьких температурах в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Як завжди, великий інтерес та плідну дискусію викликали доповіді постійних учасників конференції із Санкт-Петербурга:



• *М. М. Єгоров, М. А. Мурашко* (ЛЕТІ, Асоціація «ТЕСТРОН»). Застосування п'єзоелектричних перетворювачів зі змінним кутом вводу пучка.

• *К. Є. Абакумов, Р. Г. Львов, О. В. Теплякова* (ЛЕТІ). Дифракція пружних хвиль на компактній неоднорідності з несиметричною будовою.

• *К. Є. Абакумов, Р. Г. Львов, О. В. Теплякова* (ЛЕТІ). Дифракція на циліндричному включенні в пружному середовищі.

Цікаві доповіді вперше в Україні представили закордонні гості:

• *Д. П. Безпалько, Е. Ліпські* (Люблінський технічний університет, Польща). Застосування дискретних вейвлет-перетворень для контролю зношення ріжучого інструменту.

• *Олаф Хессе, С. Панкрат'єв* (Institut für Maschinen, Antriebe und elektronische Geratetechnik gGmbH, Nordhausen, Germany). Застосування GMR сенсорів для задач вихрострумової дефектоскопії.

• *М. Стахурські* (Інститут зварювання, Глівіце, Польща). Certification of non-destructive testing personnel in Great Britain.

Про свої досягнення в розробці дефектоскопів розповіли представники ряду підприємств, що давно пропонують свою продукцію на ринку України:

• *Г. Г. Луценко, В. М. Учанін, В. М. Гоголя* (НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ). Автоматизована багатоканальна вихрострумова система для виявлення та ідентифікації глибоко розташованих та поверхневих дефектів труб з неферомагнітних сталей.

• *Д. В. Галаненко, В. Б. Галаненко, Г. Г. Луценко* (НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ). Нова методика УЗК внутрішніх кілець підшипників буксових вузлів колісних пар вагонів.

• *В. В. Карась* (НВФ «Ультракон», м. Київ). Сучасні розробки НВФ «Ультракон».

• *А. А. Покладов* (АТ «Votum», м. Кишинів). УД4-Т — новий підхід до вирішення традиційних задач.

• *А. В. Сидоров, Л. М. Серебров, О. О. Духовський* (НВФ «Інтрон-СЕТ», м. Донецьк). Послідовність оцінки технічного стану механічного обладнання при використанні спектрального аналізу вібрації.

Білья десяти доповідей представили співробітники різних університетів України, що, безумовно, свідчить про розвиток наукових досліджень також і в навчальних закладах. Відзначимо кращі з них:

• *А. М. Овсянкін, В. Г. Демидко* (НАУ, м. Київ). Моніторинг засобів дефектоскопії конструкцій з композиційних матеріалів.

• *С. В. Серебреніков, Д. В. Трушаков* (КНТУ, м. Кіровоград). Дослідження вихрострумових перетворювачів з П-образним та стержневим осердям.

• *Л. П. Теліпко, В. М. Манько, А. А. Ващенко* (ДДТУ, м. Дніпродзержинськ). До питання діагностування технічного стану будинків та споруд, розташованих на просідаючих ґрунтах.

Проф. *А. Снарський* прочитав дві доповіді, підготовлені чотирма авторами з різних наукових установ:

А. Снарський, С. Лук'янець, М. Женіровський, О. Бакаєв (НТУУ «КПІ», ІФ НАНУ, ІТФ НАНУ, H.ROSEN Engineering).

Магнітне поле двовірного дефекту в зразку обмеженої товщини.

Розрахунок розсіяного магнітного поля для тривимірного дефекту в товстому зразку

Слід також відзначити доповіді фахівців НВО «Зонд» з Івано-Франківська та НВЦ «Віатех» з Києва:

• *П. М. Райтер, П. Я. Криничний* (НВФ «Зонд»). Контроль поверхневих втрат металу феромагнітних об'єктів модифікованим індукційним здавачем.

• *П. Я. Криничний, П. М. Райтер, А. Б. Гриців, О. В. Вісков* (НВФ «Зонд»). Контроль геометричних параметрів пластмасових труб у процесі їх виготовлення.

• *А. С. Москаленко* (НВЦ «Віатех»). Нові технології контролю параметрів рідин в закритих резервуарах з використанням ультразвукових перетворювачів із зовнішньої фіксацією.

Найкращі доповіді конференції видано окремою збіркою.

В холі конференц-залу проходила виставка засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики. В ній брали участь:

- НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ;
- НВФ «Промприлад», м. Київ;
- НВП «Інтрон-СЕТ», м. Донецьк;
- НВФ «Ультракон», м. Київ;
- АТ «Votum», м. Кишинів;
- Фірма «Шерл», м. Київ;
- Центр «Леотест-Медіум», м. Львів.

В цілому, конференція пройшла в діловій, привітній та доброзичливій атмосфері, чому сприяло в значній мірі і місце її проведення — пансіонат «Бойківщина», що розташований на околиці Славська в оточенні багаторічних сосен, ялин та смерек, поблизу гірськолижних трас. Незважаючи на напружену наукову програму, учасники конференції мали можливість деякий час присвятити відпочинку на гірських лижах. До того ж, треба відзначити як цікавий феномен той факт, що наукові дискусії під час цього відпочинку не припинялися.

Організатори конференції чекають Вас і в наступному році, в середині лютого.

Адреса Оргкомітету: 79017, м. Львів-17, вул. Генерала Грицяя, 11/5, тел./ф (0322) 75-08-69.

E-mail: leotest@org.lviv.net.

Інформаційне повідомлення підготували
*В. М. Учанін (ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ),
Ю. М. Поспайко
(ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ)*



ИТОГИ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫСТАВКИ AnalyticaExpo-2005

19–22 апреля 2005, КВЦ «Сокольники», Москва

Ассоциация разработчиков, производителей и поставщиков химической продукции и лабораторного оборудования «Росхимреактив», Ассоциация Аналитических центров «Аналитика»,
Научный совет Российской академии наук по аналитической химии,
Российский Союз химиков, Международная выставочная компания
при поддержке
Министерства промышленности и энергетики РФ, Госстандарта России, Министерства природных ресурсов, Госстроя РФ, Культурно-выставочного центра «Сокольники»
провели

Международную специализированную выставку аналитического и лабораторного оборудования, технологий и материалов для анализа, контроля, исследований во всех отраслях промышленности «AnalyticaExpo-2005»

Сегодня это крупнейшая и самая востребованная выставка рынка аналитического и лабораторного оборудования. По мнению участников **AnalyticaExpo** является единственным выставочным проектом, который успешно решает поставленные перед ним задачи, создав единое аппаратно-методическое поле, объединяющее науку, производителей и переработчиков сырья, а также потребителей конечной продукции, экологические, санитарно-гигиенические и иные контролирующие государственные и общественные органы. Более того, выставка **AnalyticaExpo** способствует внедрению комплексных систем управления качеством и координации деятельности разнородных организаций и предприятий, занимающихся оснащением лабораторий. Но главное — участники выставки получают возможность оценить ситуацию на рынке и выработать общую позицию по проблемам отрасли. Ведь тематика выставки отражает практически все стороны и этапы создания лабораторий — от проектирования и строительства лабораторных помещений, подбора конструкционных материалов и покрытий, формирования климата, подготовки газов, воды, воздуха, выбора оборудования, приборов, систем отображения и обработки информации, обеспечения текущей деятельности реактивами, стандартными образцами, материалами, запасными частями до поставки специальной одежды и средств защиты, методического и информационного сопровождения аналитического исследования. Значительное внимание на выставке было уделено проблемам стандартизации и унификации методов исследований применяемого оборудования и приборов, приведению их в соответствие с международными стандартами.

Премьера выставки **AnalyticaExpo** состоялась в 2003 г. и была отмечена огромным успехом: в 2003 г. количество участников составило 117 компаний, в 2004 г. — 179, в 2005 г. — это уже более 310 российских и зарубежных фирм, обеспечивающих функционирование лабораторий — научно-исследовательских, контрольно-испытательных, санитарных, экологических, агрохимических, учебных, арбитражных, заводских и многих других. В их числе такие фирмы, как **Analytik Jena, BRUKER, Donau Lab Moscow, Ebro Electronic GmbH, Intertech Corporation**, являющаяся генеральным спонсором выставки, **Kruss Optronic GmbH, Merck, NETZSCH Geratetechnik, PerkinElmer, Petrotech, Shimadzu, SPECTARIS e.V., Stanford Equipment, Thermo Electron Austria, Waters,**

«Аналитические Экс-Рей Системы», ВИМС, ГНУ НИИ высоких напряжений при ТПУ, НПО «Измерительная техника», «Крисмас плюс», «Лабораторное оборудование и приборы», «Лига», «Люмэкс», «МеталлДизайн», «Порса», «Практик-НЦ», Carl Zeiss, «Сартогосм», «СиСиЭс Сервис», «Солар ТИИ», «Экоинструмент», «Экос-1», «Экрес» и многие другие. Таким образом, ежегодно количество участников выставки увеличивается почти в 1,5 раза. Высокая активность участников показывает, насколько актуально выбрана тематика выставочного проекта. А в состав оргкомитета выставки входят представители отраслевых министерств, известные ученые, руководители отраслевых организаций.

Выставка является ведущим мероприятием и представляет широкую научную программу. Во время работы выставки ассоциация «Росхимреактив» провела несколько семинаров: *«Аналитические и контрольно-измерительные приборы», «Химические реактивы и особо чистые химические вещества», «Лабораторная мебель»* — и конференцию *«Экспресс-методы химического анализа: достоинства и недостатки, области применения»*, посвященную аналитическому контролю качества воды в различных сферах водопользования. В первый день работы выставки НСАХ РАН провел конференцию *«Химический анализ»*, на следующий день конференция прошла с секцией *«Анализ металлов и сплавов»*, а 21 апреля — с секцией *«Химические сенсоры. Аналитические приборы»*. Российское Хемометрическое общество организовало секцию по хемометрике. 20 апреля Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии провело свой семинар, а ассоциация аналитических центров «Аналитика» — секцию *«Обеспечение качества результатов аналитических работ»*. Также была программа презентации российских и зарубежных компаний, которые представили свои новые разработки как в области оборудования, так и в области методического обеспечения.

Все эти и другие мероприятия были интересны химикам, технологам, специалистам по контролю качества продукции, снабженцам и маркетологам. Для всех участников и гостей **AnalyticaExpo** стала отличной площадкой для установления и дальнейшего развития деловых контактов и обмена научно-техническими идеями.

Информационное сообщение подготовлено организаторами конференции



ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРОВ!

АНАТОЛИЮ КОНСТАНТИНОВИЧУ ГУРВИЧУ — 80



Дорогой Анатолий Константинович!

Ученые Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и я лично горячо и сердечно поздравляем Вас, члена-корреспондента Академии транспорта России, лауреата Премии Совета Министров СССР, Премии Правительства России, Международной премии «Рентген-Соколов», Заслуженного работника транспорта РФ, Почетного железнодорожника, вице-президента РОНКТД, Главного редактора журнального обозрения «В мире неразрушающего контроля» со знаменательным юбилеем — 80-летием со дня рождения.

Вы широко известны как выдающийся ученый в области неразрушающего контроля качества сварных соединений конструкций.

Большое уважение вызывает Ваша активная научная и общественная деятельность, а также самоотверженная работа по подготовке кадров.

Нам приятно отметить, что подготовленная вами совместно с профессором И. Н. Ермоловым книга «Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов» впервые была издана в г. Киеве в издательстве «Техника» еще в 1972 г. и до сих пор является настольной книгой специалистов-сварщиков в странах СНГ.

Огромный интерес для специалистов представляет редактируемый Вами журнал «В мире неразрушающего контроля», который освещает самые современные аспекты этого важного направления науки и техники.

Вы внесли огромный вклад в дело обеспечения надежности, долговечности и безопасности железнодорожного транспорта.

Особенно приятно отметить Ваше многолетнее сотрудничество с Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

От всей души желаем Вам, дорогой Анатолий Константинович, крепкого здоровья, счастья в личной жизни и долгих лет творческой педагогической и научной деятельности!

*С уважением,
академик Б. Е. Патон*



Доктору технических наук, профессору, члену Национального аттестационного комитета Украины по НК, основателю научной школы информационно-измерительных технологий неразрушающего контроля **Валентину Павловичу Малайчуку** исполнилось 80 лет.

Валентин Павлович родился 2 апреля 1925 г. в г. Днепропетровске. После окончания Рязанского артиллерийского училища в 1945 г., служил в войсках 39-й армии Дальневосточного военного округа. В 1955 г. закончил Харьковскую артиллерийскую радиотехническую академию им. Л. А. Говорова.

В 1961 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 1963 г. — на научной работе в Воронежском военном научно-исследовательском институте. Научные интересы: теория и практика радиоразведки и радиоэлектронной борьбы при решении задач преодоления противовоздушной и противоракетной обороны самолетами и головными частями баллистических ракет. В 1970 г. защитил докторскую диссертацию, в 1972 г. ему присвоено звание профессора.

С 1976 г. Валентин Павлович работает в Днепропетровском национальном университете заведующим кафедры радиоэлектронной автоматики, а с 1996 г. — профессором этой же кафедры. Организовал в университете подготовку инженеров

по новой специальности: «Приборы и системы неразрушающего контроля», создал научную школу «Информационно-измерительные технологии неразрушающего контроля, технической и медицинской диагностики». За годы работы в университете подготовил и издал 18 учебных пособий. Подготовил 20 кандидатов и 5 докторов наук. Автор более чем 100 научных статей, изобретений, монографий, учебников.

Вызывает искреннее уважение способность Валентина Павловича найти научную новизну в самых разнообразных и далеких одна от другой областях знаний: радиоэлектронной разведке, радиолокации, мониторинге энергетических систем, психометрии и, наконец, неразрушающем контроле. Человек широкой души, у которого хватает жизненных сил и энергии на поддержку товарищей, коллег и многочисленных учеников, одновременно он надежная опора для семьи.

Дорогой Валентин Павлович! Вы встретили свой юбилей полным жизненных сил, энергии и творческих планов, сохранили юношескую любознательность. Желаем Вам долгих лет жизни, крепкого здоровья, творческих успехов в Вашей сложной и ответственной работе, а также продолжения Вашей благородной деятельности по воспитанию молодых инженеров и ученых!

*Кафедра радиоэлектронной автоматики ФТИ ДНУ
Украинское общество НК и ТД*



Министерство
образования и науки Украины
СУМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Министерство
промышленной политики Украины
ОАО «ВНИИАЭН»

ГЕРВИКОН HERVICON • 2005

6 – 9 сентября 2005 г. в г. Сумы (Украина)
состоится очередная XI Международная научно-техническая конференция
**«Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность
насосного и компрессорного оборудования» — ГЕРВИКОН-2005.**

Тематика Конференции

- современные технологии в исследованиях, разработке, проектировании и производстве насосного и компрессорного оборудования;
- вопросы динамики системы «ротор-опоры-уплотнения» центробежных машин;
- снижение шума и вибрации насосов и компрессоров, вибродиагностика и прогнозирование остаточного ресурса;
- повышение надежности и эффективности уплотнительных устройств насосов и компрессоров;
- экологически безопасная эксплуатация насосного и компрессорного оборудования, проблемы энерго- и ресурсосбережения.

В рамках Конференции пройдут специализированные семинары:

- по инициативе и при поддержке Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института атомного и энергетического насосостроения «ВНИИАЭН» (г. Сумы) — «Насосы для топливно-энергетического комплекса и нефтедобывающей промышленности: проектирование, изготовление и эксплуатация» — «НАСОСЫ-2005».
- по инициативе ряда ведущих предприятий химической промышленности и фирмы «ТРИЗ» (г. Сумы) — «Проблемы безопасной эксплуатации компрессорного и насосного оборудования в химической промышленности» — «ЭКОН-05».

Основные сроки

31.03.2005 — последний срок подачи заявок на участие в Конференции с докладом;

31.05.2005 — последний срок подачи полного текста доклада и перечисления оргвзноса;

31.08.2005 — последний срок подачи заявок на участие в Конференции без доклада.

Соучредители и спонсоры Конференции

ОАО «СМНПО им. М.В.Фрунзе»	(Сумы)	ООО «ТРИЗ»	(Сумы)
НПВП «Феррогидродинамика»	(Николаев)	ЗАО «НПО «Гидромаш»»	(Москва)
ООО «Изогерм»	(Москва)	ОАО «НПО «Энергомаш»»	(Химки)
ДП «Турбонасос» КБХА		(Воронеж)	

Организационный комитет Конференции ГЕРВИКОН•2005

Сумский государственный университет

ул. Римского-Корсакова, 2

г. Сумы, 40007, УКРАИНА

Тел./факс: (0542) 33-35-94

E-mail: marts@omdm.sumdu.edu.ua

Website: www.hervicon.sumy.ua



СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В. И. ГОРДЕЛИЙ, В. Е. ЧАБАНОВ

Приведен краткий обзор современных электромагнитно-акустических преобразователей, применяемых для неразрушающего контроля рельсов. Они могут также широко использоваться для УЗК и других объектов.

В настоящее время электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП) уже прошли стадию научно-исследовательской проработки и становятся полноправными средствами, применяемыми для неразрушающего контроля (НК) самых разнообразных объектов контроля.

Их преимущества по сравнению с пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП):

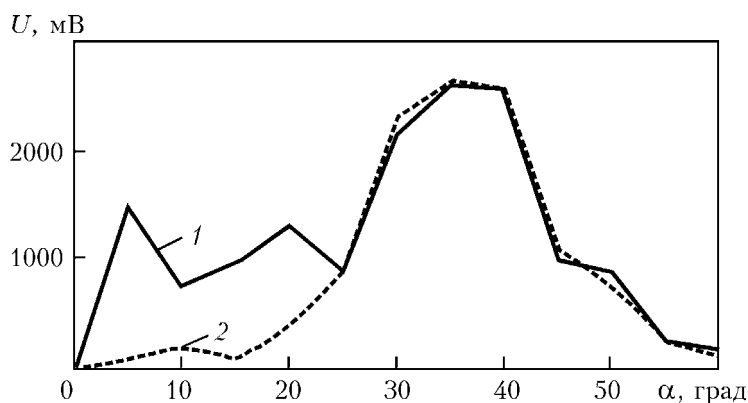
- ❖ способность излучать и принимать УЗ импульсные сигналы бесконтактно, без использования промежуточных контактирующих сред;
- ❖ существенно меньшая зависимость дефектоскопии от шероховатости поверхности, от скорости контроля, от температуры и наличия всевозможных нетокопроводящих загрязнений: масла, краски, ржавчины и проч.;
- ❖ возможность излучать и принимать сигналы в широком диапазоне частот, углов излучения, характера волн и типов их поляризации.

При этом массогабаритные характеристики ЭМАП соизмеримы с таковыми типовых ПЭП, что обеспечивает удобство их эксплуатации. Соотношение сигнал—помеха акустических сигналов при излучении и приеме сравнимо с получаемой при использовании ПЭП, в результате чего чувствительность контроля с применением ЭМАП не уступает таковой при использовании типовых дефектоскопов, базирующихся на применении пьезопреобразователей. При использовании ЭМАП выполняется теорема взаимности, а поэтому они одинаково надежно работают как в режиме излучения, так и в режиме приема. Достаточно надежный физико-математический аппарат, разработанный авторами, позволяет уверенно осуществлять проектирование ЭМАП с заданными характеристиками. По мере развития стоимость и эксплуатационные качества аппаратуры с применением ЭМАП приближаются к аналогичной аппаратуре, применяющей ПЭП.

В основу излучения ультразвука с помощью ЭМАП положен принцип наведения токов Фуко в электропроводных материалах, когда вблизи них располагаются электропроводы, по которым протекают импульсные токи. Вступая во взаимодействие со специально создаваемым постоянным магнитным полем, указанные токи пробуждают силы Ампера, которые и являются источником приповерхностных механических напряжений, возбуждающих УЗ поля. Обратный эффект проявляется при колебании электронов металлов под действием падающего ультразвука в магнитном поле, что приводит к генерированию токов в расположенных вблизи токопроводах. Причем, временные характеристики этих токов аналогичны УЗ импульсным сигналам, попадающим на поверхность контролируемых изделий, а чувствительность и пространственное распределение полей, излучаемых преобразователями, в полном соответствии с принципом взаимности оказываются точно такими же, когда они принимают УЗ сигналы.

Кроме вихретокового механизма излучения—приема на работу ЭМАП с ферромагнетиками может также влиять магнитострикционный механизм. Однако в конструкциях ЭМАП, обычно применяемых в настоящее время, этот механизм проявляется слабо, а поэтому во внимание не принимается.

Особенности работы ЭМАП определяются конструкцией применяемых постоянных магнитов и используемых катушек. При этом при разработке магнитов реализуется требование минимизации их массогабаритных характеристик при получении максимально большой индукции магнитного поля при одновременном понижении зависимости его величины от зазора между преобразователем и поверхностью контроля. Кроме того, на пространственные характеристики генерируемого звука существенно влияет материал магнитопровода или располагаемого за ним специального экрана. При неудачном их подборе возникает реверберация, увеличивающая мертвую зону преоб-



Направленности излучения типового (1) и сконструированного авторами ЭМАП (2) (в милливольтках) при работе под углом 35°

разователя, а также возникают паразитные сигналы на нерабочих углах (рисунки). И это в значительной мере ухудшает соотношение сигнал-помеха акустической природы.

Однако наиболее сложным элементом, в наибольшей мере влияющим на работу ЭМАП, является катушка, по которой проходит импульсный ток при работе ЭМАП в режиме возбуждения и с которой снимаются сигналы при их работе в режиме приема.

Когда ставится задача сконструировать ЭМАП, работающий по нормали к поверхности контроля, в настоящее время применяют круговые катушки. В

случае проектирования ЭМАП, работающих как под нормальным, так и под наклонными углами, применяются катушки с прямыми параллельными токопроводами, проходящими под магнитопроводами. Причем, в первом случае токи в различных токопроводах синфазные, а в других случаях токи в соседних токопроводах противофазны. Однако и в том, и в другом случае акустические сигналы, излучаемые и принимаемые такими преобразователями, обладают поперечной SV-поляризацией. Аналогична конструкция катушек ЭМАП рэлеевских волн, но здесь кроме прямых токопроводов иногда применяют сфокусированные. При этом управление углом наклона лучей и типом волн осуществляется вариацией рабочих частот.

Выполненными научно-экспериментальными исследованиями установлено, что наиболее простыми и надежными в работе являются прямые ЭМАП, а также ЭМАП рэлеевских волн. Более сложные в эксплуатации преобразователи, работающие под наклонными углами. Из них наиболее устойчивы ЭМАП, работающие под углами $\pm 35^\circ$ и $+60^\circ$, а на других углах они работают нестабильно.

С помощью ЭМАП можно также генерировать и продольные акустические волны, когда катушка располагается между полюсами постоянного магнита. Вместе с тем общепринято, что продольные волны излучаются и принимаются такими преобразователями значительно хуже, чем сдвиговые.

В последнее время возрастает интерес к преобразователям SH-поляризованных волн. Они генерируются либо набором чередующихся магнитов, под которыми проходят прямые токопроводы, либо системой переплетающихся токопроводов, располагаемых под полюсом постоянного магнита. Однако ни теории работы таких преобразователей, ни достаточно систематизированных исследований их до настоящего времени нет. Работами, выполненными авторами, установлено, что SH-поляризованные волны, т. е. такие, вектор смещения частиц среды в которых параллелен поверхности, являются поверхностными волнами типа Рэлея. Указанные преобразователи из условий их конструкции являются низкочастотными. Сейчас авторами создается теория SH-поляризованных ЭМАП, проводятся необходимые испытания.

НПП «ВИГОР» сконструирован класс ЭМАП, которые применяются для широкого класса измерений состояния материалов. В частности, в установке УД-ЭМА-РСП-01, предназначенной для НК старогодных рельсов на рельсосварочных предприятиях, применяются прямые преобразователи (угол излучения 0° , рабочая частота — 2 МГц), наклонные (угол излучения 40° , рабочая частота — 1 МГц) и рэлеевские (рабочая частота 0,25 и 0,5 МГц). Их приемно-излучающие катушки и магнитные системы могут быть как совмещенными, так и раздельными. Кроме того, возможны комбинированные ЭМАП: в одном корпусе располагается несколько преобразователей, работающих в различных режимах.

Сейчас уже изготовлены и на железных дорогах страны эксплуатируются 19 установок УД-ЭМА-РСП-01. Ими обнаруживается немало дефектов в рельсах, не фиксируемых другими современными средствами дефектоскопии, использующими ПЭП.

**За более подробной информацией просим обращаться по адресу:
107174, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 2; а/я 25, НПП «ВИГОР».
Тел./факс: (095) 262-85-35; e-mail: cevig@rambler.ru**