

# ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А.Я. Недосека<sup>1</sup>, С.А. Недосека<sup>1</sup>, М.А. Яременко<sup>1</sup>, Я. Гереб<sup>2</sup>, М.А. Овсиенко<sup>1</sup>,  
С.А. Кушниренко<sup>3</sup>, А.П. Иващенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Sensophone. 1029 Hungary, Budapest, Honfoglalás u. 28

<sup>3</sup>Одесский припортовый завод. 65001, г. Одесса, Главпочтамт а/я № 304

<sup>4</sup>ГП «Укрметртестстандарт». 03143, г. Киев, ул. Метрологическая, 4

Рассмотрены нормативные документы по проверке оборудования для проведения акустико-эмиссионного контроля и мониторинга промышленных объектов. Разработаны схемы и проект методики проверки параметров оборудования. Приведены результаты работ с обновленным оборудованием. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 9.

*Ключевые слова:* метрология, единство измерений, проверка приборов, системы акустико-эмиссионного контроля и мониторинга, схемы измерения параметров систем

В связи с развитием науки, техники, разработкой и широким внедрением новых технологий акустико-эмиссионного (АЭ) диагностирования объектов растут требования к методикам и средствам проведения измерений различных физических величин и достоверности получаемой с их помощью информации.

Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в законных единицах измерений, а характеристики погрешностей или неопределенности измерений известны с определенной вероятностью и не выходят за установленные границы [1]. Для обеспечения единства измерений специалистами на различных объектах и в разные периоды требуется разработка единой научной базы, способной обеспечивать высокое качество измерений в практической повседневной работе, а также при проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ. Измерительные системы (средства) АЭ контроля и диагностирования занимают особое место среди основных видов неразрушающего контроля основного металла конструкций и сварных соединений.

Метод АЭ на сегодня является одним из наиболее информативных благодаря измерению большого количества параметров сигналов АЭ, поступающих с объекта диагностирования. В частности: интенсивность, амплитуда сигнала, длительность, крутизна фронта, измерение разности времен прихода (РВП) сигнала на установленные на объекте датчики АЭ, частотный спектр и др.

Для обеспечения единства измерений и ответственности результатов специалистами ИЭС им. Е.О. Патона и Центра стандартизации и ме-

трологии в рамках работы Технического комитета стандартизации Украины «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (ТК 78) разработан ряд нормативных документов, которые частично удовлетворяют вышеперечисленным требованиям [2–4]. В частности, разработана методика периодической проверки электронной части АЭ диагностического комплекса ЕМА (далее – системы ЕМА) [5], установлен межповторный интервал – не более 12 месяцев. Порядок проведения проверки систем ЕМА должен включать следующие пункты: проверка комплектности, маркировки и внешнего вида; контроль работоспособности; проверка коэффициента усиления и уровня собственных шумов; контроль диапазона измерений и погрешности при измерении эффективных значений амплитуды непрерывной АЭ и амплитуды дискретных импульсов АЭ; определение неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) АЭ каналов; контроль погрешности при измерении длительности импульсов АЭ; контроль погрешности при измерении РВП сигналов АЭ; контроль погрешности при измерении амплитуды низкочастотных (НЧ) сигналов. Эти операции проводятся для каждого канала АЭ. При проведении проверки необходимо использовать рабочие эталоны и средства измерительной техники (СИТ), указанные в методике, или другие рабочие эталоны с техническими характеристиками не хуже, чем у рекомендованных. СИТ, которые используются при традиционной схеме проверки (таблица), должны быть поверены в установленном порядке.

Фото стенда для определения АЧХ преобразователей (датчиков) АЭ приведено на рис. 1.

Средства для поверки (традиционные)

Наименование рабочих эталонов	Основные метрологические характеристики	Тип
Осциллограф двухлучевой	Диапазон частот – от 10 до 10 МГц	С1-85
Генератор импульсов специальной формы – 2 (радиоимпульсов)	Диапазон частот – от 1 до 1 МГц; диапазон амплитуд – от $5 \cdot 10^{-3}$ до 5 В	Г6-28
Генератор импульсов двухканальный	Диапазон длительности импульсов – от 1 мкс до 6,5 мс; диапазон задержки между импульсами разных каналов – от 1 мкс до 65 мс	Г5-56
Генератор синусоидальных сигналов	Диапазон частот – от 10 Гц до 1 МГц; синус, прямоугольник, $U_{\text{вых}} - 5 \text{ В}$	Г3-112
Вольтметр эффективных значений	Диапазон частот – от 2 кГц до 1 МГц; диапазон амплитуд – от 1 мВ до 5 В	В3-38
Частотомер	Диапазон частот – от 10 Гц до 1 МГц. Измеряет частоту в непрерывном режиме, длительность радиоимпульса, время задержки между импульсами	Ч3-33
Источник питания постоянного тока	Установка постоянного напряжения в пределах от 0,1 до 5 В	Б5-43
Измеритель напряжений постоянного тока	Диапазон от 0,1 до 5 В	Щ 4300
Преобразователь-формирователь акустического поля (ПФАП)	$f_n = 0,1 \text{ МГц}$ ; $f_v = 2 \text{ МГц}$ ; $k_{\text{передачи}} = 10^{-10} \text{ м/В}$	–



Рис. 1. Стенд для проведения поверки датчиков АЭ систем ЕМА-3

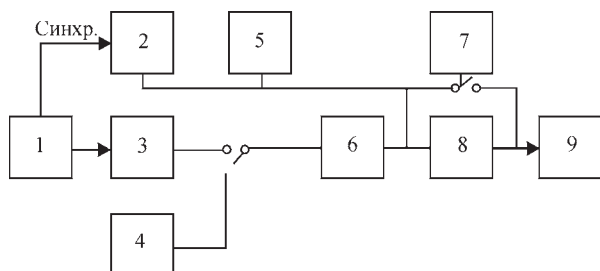


Рис. 2. Общая схема для контроля параметров АЭ каналов: 1 – генератор импульсов двухканальный Г5-56; 2 – осциллограф двухлучевой С1-85; 3 – генератор сигналов специальной формы Г6-28; 4 – нагруженный резистор сопротивлением 50 Ом; 5 – частотомер Ч3-33; 6 – переходной конденсатор емкостью 5 мкФ; 7 – вольтметр эффективных значений В3-38; 8 – промежуточный усилитель; 9 – система ЕМА

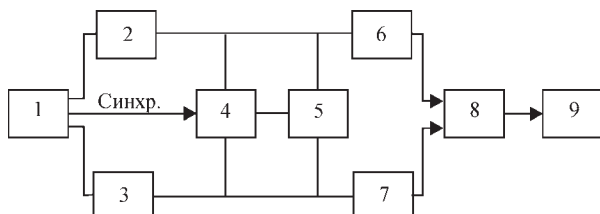


Рис. 3. Схема для контроля погрешности при измерении РВИ: 1 – генератор импульсов двухканальный Г5-56; 2, 3 – генератор сигналов специальной формы Г6-28; 4 – осциллограф двухканальный С1-85; 5 – частотомер Ч3-33; 6, 7 – переходный конденсатор емкостью 5 мкФ; 8 – промежуточный усилитель; 9 – система ЕМА

Для проведения поверки были разработаны различные схемы измерений требуемых характеристик (рис. 2–5).

При этом многие указанные приборы уже устарели и имеют более современные аналоги. Кроме того, усовершенствована аппаратура систем ЕМА с учетом современных возможностей электронной базы и компьютерной техники. Расширение сферы использования приборов на базе метода АЭ для диагностирования технического состояния промышленных объектов и увеличение количества каналов АЭ в приборах требуют усовершенствования оборудования и автоматизации проведения поверки измерительной техники.

Начиная с 2017 г. в рамках темы «Разработка и исследование технологии акустико-эмиссионной диагностики и оборудования нового поколения для оценки технического состояния конструкций в промышленных условиях» целевой научной программы ОФТПМ НАН Украины «Перспективные конструкционные и функциональные материалы с длительным сроком эксплуатации, фундаментальные основы их получения, соединения и обработки», а также целевой комплексной программы научных исследований НАН Украины «Надежность и долговечность материалов, конструкций, оборудования и сооружений» (Ресурс-2) с привлечением к работам специалистов, участвующих в производстве систем АЭ диагностирования, усовершен-

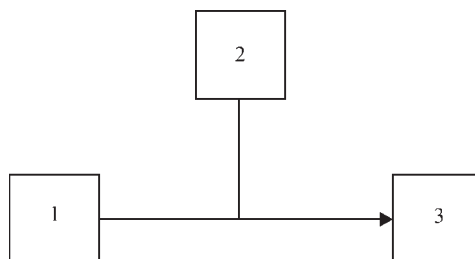


Рис. 4. Схема для контроля параметров НЧ каналов: 1 – источник постоянного тока Б5-43; 2 – измеритель напряжения Щ 4300; 3 – система ЕМА

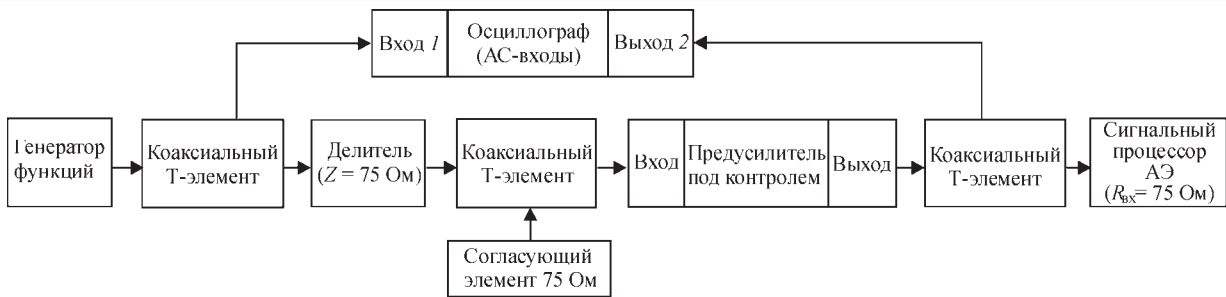


Рис. 5. Схема измерения коэффициента усиления и АЧХ



Рис. 6. Приборы для проведения поверки АЭ оборудовано методикой определения фактических характеристик отдельных блоков и узлов, входящих в системы АЭ контроля и диагностики. Современные системы контроля должны обеспечивать измерение, цифровую обработку и сохранение всех стандартных параметров сигналов АЭ (пиковая амплитуда сигнала, время прихода сигнала, длительность импульса, время нарастания импульса до пикового значения, счет (количество пересечений порогового уровня), средний уровень сигнала); определение координат источников сигналов АЭ; частотный анализ импульсов АЭ; корреляция между сигналами АЭ; интерфейс с управляющим компьютером и тестовые режимы каналов АЭ.

Разработаны, с учетом требований нормативных документов Украины и отдельных европейских стандартов в этой сфере [6, 7], а также изложенного выше, структурные схемы проведения измерений, прибор-мультиплексор, проект методики определения характеристик, программное обеспечение (ПО), которое объединяет работу генератора сигналов, мультиплексора, осциллографа, управляющего компьютера, а также проводит тест прибора.

К управляющему компьютеру посредством USB интерфейса подключаются цифровой генератор, осциллограф и мультиплексор каналов АЭ. Тестируемый АЭ прибор объединяется с компьютером посредством Ethernet подключения. Тестовое ПО на управляющем компьютере задает параметры генерируемых сигналов и получает действующие значения от цифрового осциллографа-генератора. Параллельно происходит считывание измеряемых АЭ характеристик тестируемым прибором. Процесс тестирования многоканальных АЭ систем с помощью программно-управляемого мультиплексора может проис-

ходить как параллельно по всем каналам АЭ, так и последовательно (максимальное количество одновременно подключаемых каналов – 16).

Во время выполнения тестирования прибора АЭ, ПО для тестирования передает в цифровой осциллограф-генератор заранее подготовленную программу изменения выходного сигнала генератора в зависимости от тестируемого прибора и предварительных усилителей. После запуска начала тестирования в зависимости от принятого порядка сканирования акустических каналов включается последовательный или параллельный режим мультиплексора. Программное обеспечение на управляющем компьютере начинает получать значения амплитуды и частоты с цифрового осциллографа-генератора и тестируемого прибора. На основании сохраненных массивов информации строятся все необходимые графические зависимости и формируются таблицы данных и автоматический отчет в MS Word.

Методика предполагает определение реальных характеристик тестируемых многоканальных систем по различным программам с выдачей результатов измерений в электронной и печатной формах.

Ниже на рисунках приведены вид мультиплексора, измерительного прибора ЕМА-4 и вид экрана на монитора с результатами измерений (рис. 6), а также структурная схема для проведения поверки оборудования (рис. 7).

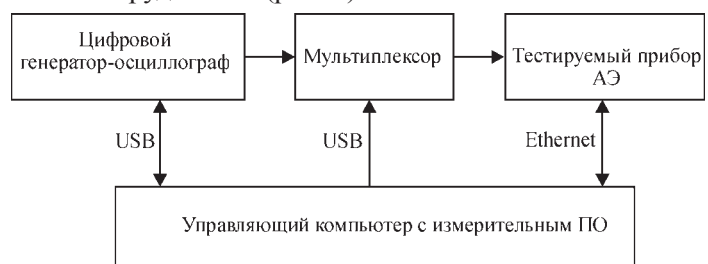


Рис. 7. Общая схема для проведения поверки

Предполагается в дальнейшем полный переход на новые методики и средства измерений.

Современные средства измерения и ПО позволяют уменьшить время проведения проверок приборов АЭ контроля, в частности, типа ЕМА, расширить перечень измеряемых величин.

Результаты проведения настройки оборудования ЕМА-4 (данные проверки АЧХ АЭ каналов системы) с использованием новых приборов и разработанной методики выборочно приведены на рис. 8.

Для проверки использовали линейный (коэффициент усиления – 40 дБ) и логарифмический режимы усиления (Gain Mode); программным путем выбирали одну из четырех полос пропускания (Filter Mode): LC 30...100; 100...300; 300...1000; 30...1000 кГц.

В таблицах на рис. 8 показаны нижняя и верхняя частота сигнала (Lower – Higher Freq., кГц), а также на графиках показан уровень сигнала на выходе (Output Level, дБ).

Для определения погрешности полученных координат источников АЭ использовали специальные образцы: полоса для линейной локации (1500 мм×50 мм×5 мм) и лист для плоскостной локации (1000 мм×1000 мм×4 мм), размеченный на квадраты 100 мм×100 мм.

На основании проведенных измерений согласована с ГП «Укрметртестстандарт» форма протокола проверки работоспособности электронной части АЭ систем ЕМА-3, 4 для дальнейшей проверки оборудования.

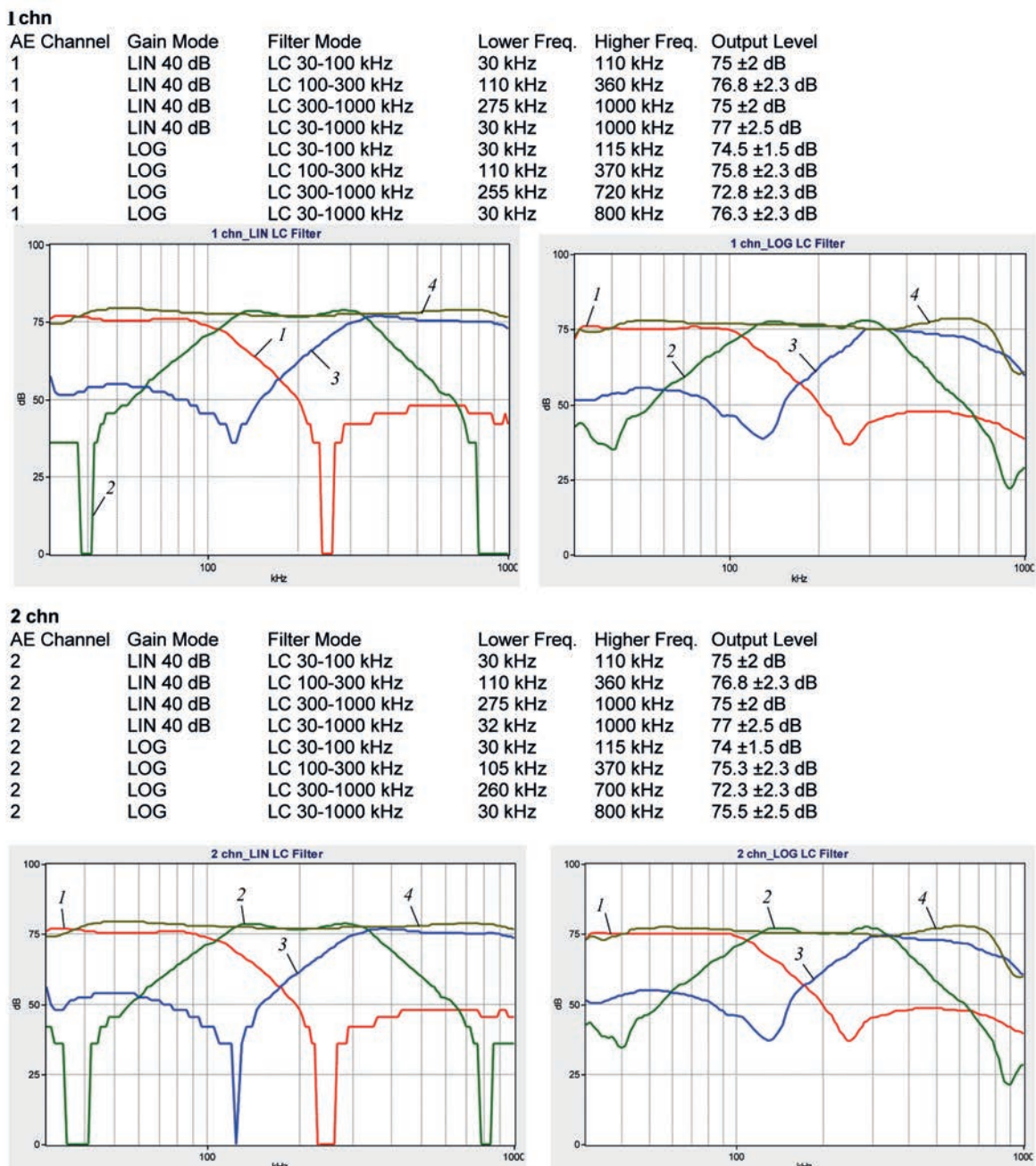


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика АЭ каналов системы ЕМА-4 для полос пропускания: 1 – 30...100 кГц; 2 – 100...300; 3 – 300...1000; 4 – 30...1000

**2. Результаты исследований**

2.1. Определение относительной погрешности при измерении эффективных значений амплитуды непрерывной акустической эмиссии

Номер канала	Нормированное значение амплитуды, мВ	Измеренное значение амплитуды, мВ	Пределы допустимой относительной погрешности, %	Полученное значение погрешности, %
1	450	448,9	±3,0	0,24
	200	195,5		2,25
	100	99,6		0,40
	50	48,6		2,80
	0,5	0,502		-0,40
2	450	445,2	±3,0	1,07
	200	196		2,00
	100	100,5		-0,50
	50	50,2		-0,40
	0,5	0,498		0,40
3	450	445,7	±3,0	0,96
	200	195,7		2,15
	100	99,6		0,40
	50	49,8		0,40
	0,5	0,502		-0,40

2.2. Определение относительной погрешности при измерении эффективных значений амплитуды импульсов акустической эмиссии

Номер канала	Нормированное значение амплитуды, мВ	Измеренное значение амплитуды, мВ	Пределы допустимой относительной погрешности, %	Полученное значение погрешности, %
1	450	451,8	±3,0	-0,40
	200	200		0,00
	100	98,2		1,80
	50	49,3		1,40
	0,5	0,49		2,00
2	450	450,1	±3,0	-0,02
	200	197,6		1,20
	100	99,1		0,90
	50	50,1		-0,20
	0,5	0,492		1,60
3	450	449,2	±3,0	0,18
	200	199		0,50
	100	98		2,00
	50	49,3		1,40

2.3. Определение абсолютной погрешности при измерении координат дефектов

Номера каналов	Истинное значение расстояния, м	Измеренное значение расстояния, м	Пределы допустимой относительной погрешности, м	Полученное значение погрешности, м
1, 2	0,5	0,493	±0,025	0,007
	1,0	1,01	±0,05	-0,01
	3,0	3,09	±0,15	-0,09
	5,0	4,78	±0,25	0,22
	10,0	9,79	±0,6	0,21
3,4	0,5	0,487	±0,025	0,013
	1,0	0,96	±0,05	0,04
	3,0	3,04	±0,15	-0,04
	5,0	4,89	±0,25	0,11
	10,0	9,95	±0,6	0,05
5, 6	0,5	0,51	±0,025	-0,01
	1,0	1,02	±0,05	-0,02
	3,0	2,94	±0,15	0,06
	5,0	5,15	±0,25	-0,15
	10,0	10,22	±0,6	-0,22

Рис. 9. Протокол (фрагмент) проверки работоспособности электронной части АЭ системы ЕМА

Рекомендуемый вариант протокола (фрагмент) проверки работоспособности электронной части АЭ системы ЕМА представлен на рис. 9.

### Выводы

В связи с совершенствованием оборудования для проведения АЭ контроля и мониторинга объектов промышленности, увеличением количества каналов АЭ в приборах, а также необходимости обновления существующих методик поверки систем разработано соответствующее оборудование (в частности, для поверки систем ЕМА-3, 4), разработаны схемы для проведения проверки оборудования и создана предварительная методика выполнения операций поверки, что позволит автоматизировать процесс проведения поверки систем АЭ контроля и мониторинга и сократит время проведения поверки.

### Список литературы

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/shon/1314-18>.
2. (2002) МДУ 016/10-2002 Багатоканальні акустико-емісійні діагностичні комплекси. Методика державної метрологічної атестації.
3. (2002) МДУ 017/10-2002 Багатоканальні акустико-емісійні діагностичні комплекси.

4. (2004) МПУ 002/10-22-2004 Метрологія. АЕ діагностичний комплекс ЕМА (електронна частина). Методика повірки.
5. (2006) Методика перевірки працездатності електронної частини акустико-емісійного комплексу ЕМА.
6. ДСТУ EN 13477-1:2016 (EN 13477-1:2001, IDT) Неруйнівний контроль. Акустична емісія. 7. Характеристика устаткування. Частина 1. Технічні характеристики устаткування.
7. ДСТУ EN 13477-2:2016 Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Характеристика устаткування. Частина 2. Експлуатаційні показники (EN 13477-2:2010, IDT)

### References

1. Law of Ukraine «On metrology and metrological activity». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/shon/1314-18> [in Ukrainian].
2. (2002) MDU 016/10-2002: Multichannel acoustic emission diagnostic complexes. Procedure of state metrological certification [in Ukrainian].
3. (2002) MDU 017/10-2002: Multichannel acoustic emission diagnostic complexes [in Ukrainian].
4. (2004) MPU 002/10-22-2004: Metrology. AE diagnostic complex EMA (electronic components). Checking procedure [in Ukrainian].
5. (2006) Procedure for checking the serviceability of electronic components of acoustic emission complex EMA [in Ukrainian].
6. DSTU EN 13477-1:2016 (EN 13477-1:2001, IDT): Nondestructive testing. Acoustic emission. Description of equipment. Pt 1: Equipment characterization [in Ukrainian].
7. DSTU EN 13477-2:2016: Nondestructive testing. Acoustic emission. Description of equipment. Pt 2: Verification of equipment characteristics (EN 13477-2:2010, IDT) [in Ukrainian].

## ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЄСТРАЦІЇ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД

А.Я. Недосєка<sup>1</sup>, С.А. Недосєка<sup>1</sup>, М.А. Яременко<sup>1</sup>, Я. Гереб<sup>2</sup>, М.А. Овсієнко<sup>1</sup>, С.О. Кушніренко<sup>3</sup>, А.П. Іващенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150. м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Sensophone. 1029 Hungary, Budapest, Honfoglalas u. 28

<sup>3</sup>Одеський припортовий завод. 65001, м. Одеса, Головопштамт а/с № 304

<sup>4</sup>ДП «Укрметртестстандарт». 03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 4

Розглянуто нормативні документи по перевірці обладнання для проведення акустико-емісійного контролю та моніторингу промислових об'єктів. Розроблено схеми та проект методики перевірки параметрів обладнання. Наведено результати робіт з оновленим устаткуванням. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 9.

*Ключові слова:* метрологія, єдність вимірювань, повірка приладів, системи акустико-емісійного контролю та моніторингу, схеми вимірювання параметрів систем

## TECHNOLOGY OF EVALUATION OF THE VALIDITY OF RECORDING ACOUSTIC EMISSION INFORMATION IN DIAGNOSTICS OF STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

A.Ya. Nedoseka<sup>1</sup>, S.A. Nedoseka<sup>1</sup>, M.A. Yaremenko<sup>1</sup>, J. Gereb<sup>2</sup>, M.A. Ovsienko<sup>1</sup>, S.A. Kushnirenko<sup>3</sup>, A.P. Ivashchenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Sensophone. 1029 Hungary, Budapest, Honfoglalas u. 28

<sup>3</sup>Odessa Port Plant. General Post Office PO Box No.304, 65001, Odessa, Ukraine.

<sup>4</sup>SC «Ukrmetrteststandart». 4 Metrologicheskaya Str., 03143, Kyiv, Ukraine

Normative documents on calibration of equipment for acoustic emission control and monitoring of industrial facilities are considered. Schemes and a draft of the procedure for checking the equipment parameters have been developed. The paper gives the results of work performance with upgraded equipment. 7 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

*Keywords:* metrology, unity of measurements, instrument calibration, systems of acoustic emission control and monitoring, schemes of measurement of system parameters

Поступила в редакцію

28.05.2019