

УДК 006

<sup>1</sup>В.П. Квасников, д.т.н.  
<sup>2</sup>С.А. Сапрыкин, к.т.н.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПЕРЕНОСНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВИБРОКОНТРОЛЯ И ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

<sup>1</sup>Национальный Авиационный Университет

<sup>2</sup>Украинский научно-исследовательский институт природных газов (УкрНИИГаз)

*В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований для нефтегазовой промышленности Украины решена важная научно-прикладная проблема создания и внедрения отечественных стационарных и переносных систем, аппаратных и программных средств, технологий и методик, нормативных актов по виброконтролю и вибродиагностированию основных узлов разнотипного газоперекачивающего оборудования КС и АГНКС, которые позволили с высокой точностью и надежностью без остановки и разборки оценивать техническое состояние основных узлов агрегатов.*

**Ключевые слова:** стационарные и переносные устройства, виброконтроль и вибродиагностика, газоперекачивающие агрегаты.

### Введение

Впервые разработаны отечественные аппаратные средства: стационарные системы виброконтроля и вибродиагностирования основных узлов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) типа ГТН-25 (СПВК-14), ГПА-16 с двигателем ДЖ-59 и ГТ-750-6 (СПВК-8), КУ АГНКС (СПВК-3); переносные системы вибродиагностирования основных узлов электроприводных ГПА типа СТД-4000 (АВ-ЭГПА), для вибродиагностирования шатунных подшипников (ШП), цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и турбокомпрессора (ТК), газомоторного компрессора (ГМК) типа 10 ГКН (СВиК-ГМК), для подшипниковых узлов ГМК МК8, ДР12, Z330 приборы на базе СВиК-ГМК, автоматизированная система сбора и обработки данных вибродиагностирования основных узлов пяти типов компрессорных установок (КУ), автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС). Усовершенствованы приборы СВиК-60, СВиК-10 для ГПА типа ГТ-750-6 и ГТК-10 [1,2].

### Цель и постановка задачи

Целью работы является разработка программ и методик для проведения метрологической аттестации переносных и стационарных устройств виброконтроля и вибродиагностирования разнотипного газоперекачивающего оборудования. Необходимым условием для решения поставленной задачи является подбор стандартных средств измерения, разработка схем определения частотных диапазонов и уровней вибрации устройств, обработка результатов. Определение метрологических характеристик.

### Программы, методики и результаты метрологической аттестации

Метрологическая аттестация приборов СВиК-60, СВиК-100, анализатора вибрации АВ-ЭГПА выполнялась базовой организацией метрологической службы Мингазпрома ВНПО «Союзгазавтоматика» НИПИАСУтрансгаз согласно договоров с УкрНИИГазом.

Приборы СВиК-ГМК, АСОК (АГНКС) стационарные устройства СПВК-14, СПВК-8, СПВК-3 проходили метрологическую аттестацию на базе метрологической службы Института проблем машиностроения АН Украины.

Неотъемлемым этапом при разработке средств измерений является оценка их погрешности (точности). В общем случае оценки погрешностей этих средств получают тремя методами: по расчетам  $\Delta_r$ , нормативным документом  $\Delta_n$  или экспериментальным путем  $\Delta_\varepsilon$ . Если первые два метода оценок обычно применяют на стадии проектирования измерительных систем, так называемым анализом с целью сведения к минимуму этой погрешности или обеспечения требуемой точности то третий метод является заключительным в процессе разработки измерительных средств. Т.е. первые два метода является предварительными, а третий – окончательным. В последнем случае естественно встает вопрос о сведении к минимуму опытных исследований, при которых осуществляется доводка средств измерений и оценка их

погрешности.

Процедура построения моделей погрешностей средств измерений практически не отличается от таковых при получении моделей любых исследуемых объектов, для которых эффективно применение теории планирования эксперимента (ПТЭ) [3].

Программа и методика аттестации разрабатывались на основе ДСТУ 3215-95, ГОСТ 8.009-84, ГОСТ 8.207-76, ГОСТ 23222-88, МИ 1873-88, СТП-52.1-08-060-82 и других нормативных документов (НД) и литературных источников [3-6].

При проведении метрологической аттестации выполнялись операции внешнего осмотра, опробование, определение метрологических характеристик и применялись стандартные средства измерительной техники с вибростендом ВЭДС-10А. На рис.1 представлены схемы определения частотных диапазонов измерения вибрации, уровней контролируемой вибрации для прибора СВиК-ГМК.

### Определение погрешностей измерения при метрологической аттестации переносного прибора СВиК-ГМК

Определение погрешностей измерений частотных диапазонов СВиК-ГМК.

Определение погрешности установки частоты.

Частота входного сигнала задается генератором ГЗ-34 и контролируется частотомером ЧЗ-35А. Погрешность измерения частоты частотомером ЧЗ-35А  $\pm 1$  ед.сч. Напряжение входного сигнала измеряется милливольтметром типа ВЗ-38 на пределе 3мВ, погрешность измерений на этом пределе  $\pm 2,5\%$ . Следовательно, погрешность измерения входного сигнала 1,5 мВ составляет:

$$\Delta = \frac{2.5 \cdot 3}{100} = 0.075, \quad \delta = \frac{0.075}{1.5} \cdot 100; \quad \delta = 5\%$$

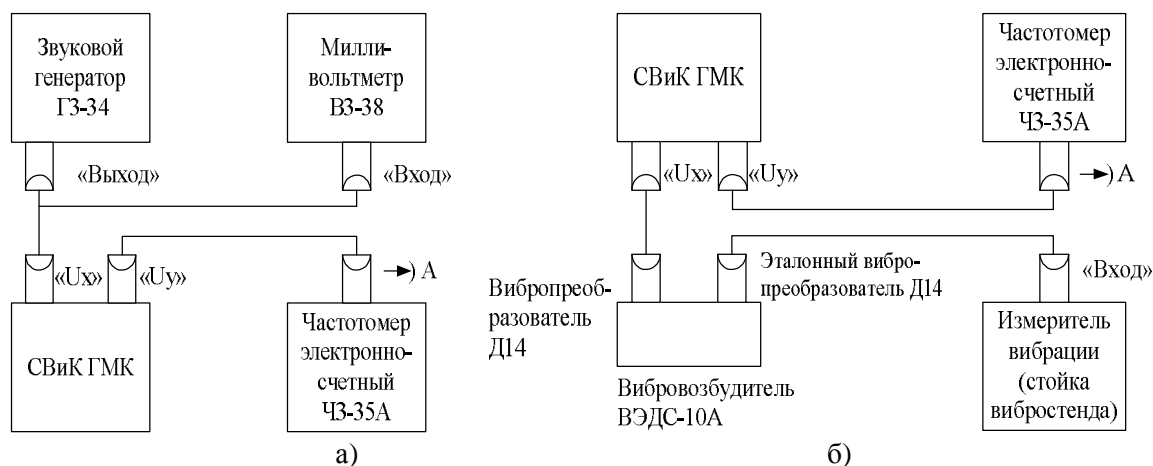


Рис. 1. Схемы определения метрологических характеристик прибора СВиК-ГМК: а) схема определения частотных диапазонов; б) схема определения контролируемой вибрации

Погрешность определения уровней контролируемой вибрации.

Уровни контролируемой вибрации задаются вибростендом ВЭДС-10А (рис.2)

Погрешность задания определяется погрешностью вибропреобразователя Д14 и погрешностью измерителя вибрации. Погрешность вибропреобразователя складывается из погрешности градуировки и нелинейности амплитудной характеристики. Воспользовавшись паспортными данными, получим:

$$\delta_e = \sqrt{\delta_{gp}^2 + \delta_n^2}; \quad (1)$$

$$\delta_e = \sqrt{5^2 + 4^2} = 6,4,$$

где  $\delta_{gp}$  - относительная погрешность градуировки, %;  $\delta_n$  - нелинейность амплитудной характеристики, %;  $\delta_e$  - относительная погрешность вибропреобразователя, %.

Относительная погрешность измерителя вибрации определялась согласно п.9.3.7 паспорта

ВЭДС-10А и составила  $\delta_n = 0,05\%$ .

Относительная погрешность задания уровней вибрации равна

$$\delta_3 = \sqrt{\delta_a^2 + \delta_n^2}, \quad (2)$$

$$\delta_3 = \sqrt{6,4^2 + 0,05^2} \approx 6,4.$$

Погрешность измерения длительности импульсов фазовой селекции.

Погрешность измерения длительности импульсов фазовой селекции определяется погрешностью частотомера ЧЗ-35А и составляет  $\pm 1$  ед.сч

При определении метрологических характеристик стационарных устройств СПВК-14, СПВК-8, СПВК-3 определялись погрешности: измерения виброскорости в рабочем диапазоне амплитуд виброскорости в рабочем диапазоне частот определялась неравномерность АЧХ приборов, определялась погрешность включения сигнализации.

Погрешность измерения виброскорости в рабочем диапазоне амплитуд определяют на фиксированной частоте  $f_0$  при различных значениях амплитуд, равномерно распределенных по амплитудному диапазону, одно из которых должно быть минимальным другое – максимально допустимым. С этой целью необходимо установить частоту колебаний стола вибровозбудителя образцовой виброустановки (далее в тексте – вибростенд)  $f_0$  и поддерживать ее неизменной. Учитывая действительный коэффициент преобразования виброизмерительного преобразователя вибростенда, задают амплитуду колебаний вибростенда в соответствии с таблицей №1 протокола испытаний СПВК-8 (рис. 2), СПВК-3 (рис. 3). Снять показания прибора и результаты занести в таблицу 1 протокола.

Погрешность измерения виброскорости в рабочем диапазоне частот и неравномерности АЧХ прибора определяют при близких к постоянным значениям виброскорости при различных значениях частоты, находящихся в пределах рабочего диапазона частот прибора.

При этом два значения частоты должны быть в начале диапазона, два – в конце диапазона (обязательно наличие нижней и верхней граничной частоты).

С этой целью следует задать частоту вибрации  $f_0$ . Установить значение виброскорости, указанное в таблице 2 протокола испытаний (рис. 2, 3) для  $f_0$  и поддерживать его неизменным. Далее необходимо задавать частоту колебаний вибростенда в соответствии с таблицей 2 протокола испытаний (рис.2, 3), затем снять показания прибора и занести результаты в таблицу 2 протокола испытаний (рис.2, 3).

Протокол от \_\_\_\_\_ Датчики X \_\_\_\_\_ Y \_\_\_\_\_

Таблица 1				Таблица 2			
Установл.		Измерен. Vп, мм/с		Установл.		Измерен. Vп, мм/с	
U, мВ	Ug, мм/с	X	Y	f, Гц	K <sub>f</sub>	X	Y
15	2,12			20	0,08		
50	7,08			25	0,1		
100	14,16			31	0,124		
200	28,32			40	0,16		
300	42,48			50	0,2		
400	56,64			63	0,252		
420	59,47			80	0,32		
				100	0,4		
				125	0,5		
				160	0,64		
				200	0,8		
				250		20/6	20/6
				315	1,26		
				400	1,6		
				500	2,0		
				630	2,52		
				800	3,2		
				1000	4,0		

Таблица 3

Предупредит. сигнализация		Аварийная сигнализация	
X	Y	x <sup>н*</sup> y	x <sup>н*</sup> y

Рис.2. Протокол испытаний прибора ГПА ГТ-750-6

Протокол от \_\_\_\_\_ Датчики X \_\_\_\_\_ Y \_\_\_\_\_

Таблица 1				Таблица 2			
Установл.		Измерен. Vп, мм/с		Установл.		Измерен. Vп, мм/с	
U, мВ	Ug, мм/с	X	Y	f, Гц	K <sub>f</sub>	X	Y
1	0,88			5,0	0,125		
10	8,85			6,3	0,158		
25	22,12			8,0	0,2		
35	30,96			10,0	0,25		
45	39,81			12,5	0,31		
55	48,66			16	0,4		
70	61,92			20	0,5		
80	70,77			25	0,625		
				31	0,78		
				40		7,3	7,3
				63	1,575		
				80	2,0		
				100	2,5		
				125	3,125		
				160	4,0		
				250		16,0	16,0
				315	1,26		
				400	1,6		
				630	2,52		
				800	3,2		
				1000	4,0		

Таблица 3

Предупредит. сигнализация		Аварийная сигнализация	
X	Y	x <sup>н*</sup> y	x <sup>н*</sup> y

Рис.3. Протокол испытаний прибора АГНКС

### Определение погрешности включения сигнализации

Задать вибростендом частоту вибрации  $f_0$ . Медленно увеличивать значение виброскорости.

В момент спрацьовування сигналізації зафіксувати значення віброскоростей, при яких вимкнулась сигналізація. Данні занести в таблицю 3 протокола.

Медленно уменьшать значения виброскорости до вимкнення захисних сигналів. Значення віброскоростей, при яких вимкнулась сигналізація, занести в таблицю 3 протокола испытаний (рис.2, 3).

Эти операции повторить не менее трех раз.

#### Оформление результатов аттестации

Определение погрешности измерения виброскорости. По результатам каждого измерения (таблицы 1 и 2 протокола) определяют погрешность по формулам

$$\delta_a = \frac{V_n - V_q}{V_q} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $V_q$  - значение виброскорости, воспроизводимое вибростендом;  $V_n$  - показание прибора.

$$\delta_f = \frac{k_f \cdot V_n - V_\delta}{V_\delta} \cdot 100, \quad (4)$$

где  $k_f = \frac{f_n}{f_\delta}$ ;  $V_\delta, V_n$  - показания прибора на базовой частоте и частоте измерения.

Погрешность измерения виброскорости в рабочих диапазонах амплитуд и частот при доверительной вероятности 0,95 определяют по формуле:

$$\delta_n = 1.1 \sqrt{\delta_o^2 + \delta^2 + v^2}, \quad (5)$$

где  $\delta_o$  - погрешность воспроизведения вибрации по данным последней поверки;  $v$  - нестабильность прибора за время работы  $v = 0.5\delta$ ,

$$\delta = \sqrt{\delta_a^2 + \delta_{f \max}^2} \quad (6)$$

Абсолютное значение погрешности измерения виброскорости определяется по формуле

$$\Delta_n = \frac{V \cdot \delta_n}{100}, \quad (7)$$

где  $V$  - значение виброскорости, при которой определялась погрешность измерения виброскорости в рабочем диапазоне амплитуд, мм/с;  $\delta_n$  - погрешность измерения виброскорости при  $V$ , %.

Приведенную погрешность измерения виброскорости определяют по формуле

$$\gamma_n = \frac{\Delta_{n \max}}{V_{\max}} \cdot 100, \quad (8)$$

где  $V_{\max}$  - максимальное значение измеряемой виброскорости.

Определение неравномерности АЧХ прибора. Неравномерность АЧХ прибора определяется по результатам экспериментальных исследований, указанным в таблице 2 протокола, по формуле

$$x = 20 \lg \frac{V_n}{V_\delta} \quad (9)$$

где  $x$  - неравномерность АЧХ, дБ;  $V_n, V_\delta$  - значения виброскорости на измеренной и базовой частотах, мм/с.

За неравномерность АЧХ прибора принимается максимальное значение  $X$

Определение погрешности включения сигнализации. Расчет погрешности включения сигнализации производится по данным, указанным в таблице 3 протокола, по формуле

$$\delta_k = \frac{\Delta}{V_k} \cdot 100, \quad (10)$$

где  $\delta_k$  - погрешность включения сигнализации, %;  $\Delta$  - максимальное отклонение от заданной точки коммутации аварийной сигнализации, мм/с;  $V_k$  - заданная точка коммутации аварийной

сигналізації, мм/с

Пример: Определение погрешности измерения виброскорости устройства виброконтроля ГПА ГТ-750-6.

За независимые (входные) параметры принимаются:

$x_1^i$  - абсолютная погрешность прибора в рабочем диапазоне амплитуд колебаний (виброскорости) при фиксированной частоте вибровозбудителя (частоте вибрации);

$x_2^i$  - абсолютная погрешность прибора в рабочем диапазоне частот при постоянном значении амплитуды колебаний (виброскорости);

$i$  - порядковый номер точки измерения вибрации.

В качестве зависимого (выходного) параметра принимается  $y^i = f(x_1^i, x_2^i)$  - результирующая абсолютная погрешность прибора в рабочем диапазоне амплитуд и частот.

Исходные данные по результатам измерений сведены в таблицу 1

Таблица 1  
Результаты измерения

№	$x_1$	$x_2$	$y$
1	0,1	0,4	5,72
2	0,2	0,35	5,52
3	0,22	0,42	5,93
4	0,1	0,3	4,99
5	0,12	0,38	5,64
6	0,13	0,35	5,39
7	0,1	0,4	5,97
8	0,08	0,42	5,99

Представив регрессионную функциональную зависимость между выходными параметрами в виде

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + a_4 \cdot x_1^2 + a_5 \cdot x_2^2 \quad (11)$$

неизвестные коэффициенты -  $a_i$  находим с помощью метода наименьших квадратов.

Окончательно уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 19.618 - 98.036x_1 + 174.094x_2 + 67/25x_1x_2 + 231.217x_1^2 - 246.08x_2^2 \quad (12)$$

Акт, протокол, свидетельства о метрологической аттестации передавались в комплексе с технической документацией и комплектующими эксплуатационному персоналу компрессорных станций (рис. 4-6)

По результатам метрологической аттестации разработанные приборы допускались к применению в качестве рабочего средства измерений, а стационарные устройства включались в автоматическую систему защиты и управления агрегатов.

Підстава: ДСТУ 3215-95

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
МАШИНОБУДУВАННЯ

СВІДОЦТВО № 180 від 04.11.1997 р.

про метрологічну атестацію

Назва Пристрій віброконтролю КЗ АГНКС  
з датчиками каналів №169 та №168

Позначення СПВКЗ АГНКС №

Дата виготовлення жовтень 1996 р.

Виробник ПМаш НАН України

Належить УкрНДІГаз

Призначення безперервний контроль вібростану та захист компресорного обладнання

Результата метрологічних досліджень		
Назва метрологічної характеристики	Одержане значення метрологічної характеристики	Тип (клас, розряд) зразкових засобів, застосованих під час атестації
	Канал №1	Канал №2
1. Похибка вимірювання віброшвидкості, %	8,4	8,4
2. Похибка спрацювання аварійної сигналізації, %	1,8	1,8
3. Нерівномірність АЧХ віброметра, дБ	0,44	0,44

З результатами метрологічної атестації (протокол № 180 від 03.11.1997 р.)

викорано робочим засобом вимірювальної техніки

Перевірку проводити відповідно до МІ 1873 88

Підпис: М. М. Мацюк (Д. М. Мацюк) грудень 1998 р.

Рис. 4. Свидетельство о метрологической аттестации СПВКЗ АГНКС

Підстава: ДСТУ 3215-95

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
МАШИНОБУДУВАННЯ

СВІДОЦТВО № 182 від 02.12.97 г.

про метрологічну атестацію

Назва Стационарный прибор вибрационного контроля

Позначення СПВК-8 № 4

Дата виготовлення апрель 1997 г.

Виробник

Належить

Призначення неперервний контроль вібростану та захист компресорного обладнання

Назва метрологічної характеристики	Результата метрологічних досліджень			
	Одержане значення метрологічної характеристики		Тип (клас, розряд) зразкових засобів, застосованих під час атестації	
	1	2	3	4
Номер каналу	4	5	12	6
Номер датчика	250 253	256 258	275 282	259 261
1. Погрешность измерения виброскорости, %	6,2 5,7	7,3 6,0	6,0 7,3	6,2 6,2
2. Погрешность срабатывания аварийной сигнализации, %	0,6 0,6	0,6 1,0	0,9 0,9	0,6 0,6
3. Нерівномірність АЧХ, %	2,4 1,3	4,0 2,1	2,0 4,0	2,4 2,4

З результатами метрологічної атестації (протокол № 182 від 02.12.97 г.) Стационарный прибор вибрационного контроля СПВК-8

визнано допускається к применению в качестве рабочего средства измерений

Перевірку проводити відповідно до Программы и методики метрологической аттестации СПВК-8

Підпис: М. М. Мацюк (Д. М. Мацюк) январь 1999 г.

Рис. 5. Свидетельство о метрологической аттестации СПВК8 ГТ-750-6

Основа: ГОСТ 8.326-8 Форма 115

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО № 114**  
о метрологической аттестации средства измерений

Наименование Устройство аварийной Защиты  
ГТН-25

Тип № 42.157.00.00.00

Дата выпуска декабрь 1993 года

Назначение выдача сигнала предварительной и  
аварий-  
ной сигнализации по вибрационному состоянию  
газоперекачивающего агрегата ГТН-25

Основные метрологические характеристики:

Пределы измерений виброскорость, мм/с 2...60

Допускаемые погрешности относительная погрешность, % ±15

Условия эксплуатации температура, °С 20±5  
относительная влажность, % 65±15  
атмосферное давление, кПа 100±4

## Результаты аттестации

№ п-п	Наименование метрологических характеристик	Полученные значения метр. характеристик	Оценка точности (погрешности) метр. х-к
1.	Диапазон измерений виброскорости, мм/с	2...60	
2.	Относительная погрешность измерений, %	±15	
3.	Частотный диапазон вибрации, Гц	40 ...1000	

По результатам метрологической аттестации (протокол № 114 от 3.01 1994 года) средство измерений допускается к применению в качестве рабочего средства измерений

Очередная поверка действительна до 01. 1995.

И. П. Ман АН УССР  
А. Н. ПОДГОРНЫЙ  
19 г.

В. Бурлук тнв. К. зак. № 5068-1000

Рис. 6. Свидетельство о метрологической аттестации СПВК14 ГТН-25.

**Выводы**

Стационарные и переносные средства прошли метрологическую аттестацию. Стационарные системы включены в автоматические системы управления агрегатов. Системы имеют широкие функциональные возможности для включения их в состав различных методик вибродиагностирования на базе корреляционного, спектрального, фазового анализа вибросигналов и других методов.

**Список литературных источников**

- 1 Сапрыкин С.А. Методы и технические средства вибрационной диагностики газоперекачивающего оборудования. – Х, Рада, 2009.-368 с.
- 2 Саприкин С.О. Прилади та методи віброконтролю і вібродіагностування газоперекачувальних агрегатів та компресорних установок газотранспортної системи України// Техническая диагностика и неразрушающий контроль.-2006.-№2.-с.33-38
- 3 Земельман М.А., Кузнецов В.П., Солопченко Г.Н. Нормирование и определение метрологических характеристик средств измерений.-М.: Машиностроение, 1986. -48с.
- 4 Вайсбанд М.Д., Пропенко В.Н. Техника выполнения метрологических работ.-К.: Техника, 1986.-168с.
- 5 Планирование и организация измерительного эксперимента/Е.Т.Володарский, Б.Н. Маменовский, Ю.М. Туз.- Киев.: Вища шк. Главное изд-во, 1987.- 280с
- 6 Курзенков Г.Д. Основы метрологии в авиаприборостроении: Учебное пособие.-М.: Изд-во МАИ, 1990.-312с.
- 7 Шенк Х. Теория эксперимента.- М.: Мир.-1972.-381с.
- 8 Анализ и обработка записей колебаний. Р.Менли. Перевод с английского М.: Машиностроение, 1972.-368с.
- 9 Саприкин С.А. Математическое моделирование при создании средств вибродиагностирования ГПА// Проблеми нафтової промисловості: Зб. наук. праць. Вип.6 – Київ, 2008.-С.213-218.