



УДК 531.768:006.91

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРАМИ НА ОСНОВЕ MEMS-ТЕХНОЛОГИИ

**Р.С. Проскурня,** младший научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

**В.В. Скляр,** кандидат технических наук, ученый секретарь ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

**Ю.Н. Сквородкина,** инженер ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



Р.С. Проскурня



В.В. Скляр



Ю.Н. Сквородкина

*Представлено практическое применение акселерометров при бездемонтажном исследовании оборудования. Описаны перспективы их применения и исследования.*

*It is presented practical application of accelerometers when desoldering examination of equipment is not performed. It is described perspectives of their application and examination.*

### Введение

Среди существующих методов неразрушающего контроля (магнитного, теплового, вихретокового, ультразвукового, радиационного, визуального, оптического, контроля с использованием акустической эмиссии) вибродиагностика является взаимодополняющим методом для оценки функционирования механических систем.

Определение и контроль вибрационных характеристик оборудования по месту эксплуатации являются необходимыми для обеспечения безопасной работы сложных инженерных конструкций и объектов. При применении метода вибродиагностики на частотах от 1 до 30 Гц используются методы свободных и вынужденных колебаний. Методом свободных колебаний определяются собственные резонансные частоты исследуемого оборудования и его декременты затухания на резонансных частотах. Известно, что частота описанных сейсмических событий от 3 до 12 баллов по шкале Медведева-Шпонхойера-Карника (MSK 64) находится в диапазоне от 1 до 30 Гц. Данный метод успешно зарекомендовал себя при диагностике оборудования

с весом до 100 кг. Съём и обработка сигналов с исследуемого оборудования осуществляются при помощи акселерометров.

### Выбор экспериментального метода

Важными вибрационными характеристиками сложных инженерных объектов и конструкций являются их собственные частоты и декремент затухания. Собственные частоты и декремент затухания оборудования можно определить методом свободных колебаний [1–3].

Метод свободных колебаний (МСК) заключается в анализе затухающих акустических колебаний, возбуждаемых в исследуемом оборудовании. Метод успешно зарекомендовал себя при исследовании оборудования, не имеющего жесткого крепления к строительной конструкции (полу, стене, потолку), не требует расходных материалов подготовки поверхности [4]. Длительное время МСК использовался в основном в анализаторах дефектов слоистых сред. До недавнего времени существовавшие преобразователи акустического сигнала в электрический, аналоговые спектральные анализаторы, индикаторы результатов измерений не обеспечивали требуемой достоверности измерений и не позволяли выделять устойчивую информативную составляющую в сложном сигнале, полученном при преобразовании затухающей волны. Развитие современных технологий вибродатчиков, в частности, на основе микроэлектромеханических систем (MEMS – *Micro-Electro Mechanical Systems*), позволило использовать МСК с большей эффективностью.

Технология MEMS от компании "Analog Devices" (США) представляет собой разновидность технологий MEMS, позволяющих совмещать на одном кристалле микроэлектромеханическое устройство с традиционными электронными элементами интегральных схем.

На специальные участки кристалла наносится диоксид кремния, проводится литография, вскрываются окна для подсоединения микромеханического сенсора к электрической схеме и одновременного



Рис. 1. Корзина с грузами и динамометр для создания свободных колебаний

получения “якорей”, удерживающих конструкцию сенсорной части датчика на кремниевой подложке. Далее сверху наращивается слой поликристаллического кремния, затем посредством литографии и травления поликремния создается сенсорная структура. Наконец, травится “жертвенный” слой, и механическая часть датчика готова.

В результате механическая часть датчика включает поликремниевую пластинку, механически соединенную с подложкой при помощи упругих элементов подвеса, удерживаемых “якорями”, способную перемещаться в направлении одной степени свободы под действием ускорения. По краям пластины вытравлены балки, закрепленные на подложке и образующие дифференциальную систему большого числа ячеек парных емкостей.

Перемещение подвижной пластины относительно этих неподвижных блоков позволяет регистрировать ускорение. В отсутствие ускорения емкости в ячейке почти одинаковы, если же ускорение отличается от нуля, пластинка смещается, и баланс емкостей нарушается.

При выполнении работ по оценке оборудования при воздействии сейсмических колебаний использовались акселерометры на основе MEMS-технологии.

### Проведение эксперимента

Свободные колебания создавались при помощи корзины с грузами или при помощи натяжения через систему стальных тросов к динамометру (рис. 1). Синусоидальные механические колебания создавались переносным генератором VM-100, возбуждающим синусоидальные механические колебания в заданных координатных областях оборудования (рис. 2). Переносной вибростенд состоит из блока управления, перестраиваемого по частоте в диапазоне от 0,1 до 100 Гц, генератора тока и электромагнитного генератора виброколебаний. Пределы допускаемых погрешностей частоты генератора  $\pm 1\%$  при  $P=0,95$ , компонент ускорений  $a_x, a_y, a_z \pm 3\%$  при  $P=0,95$ .

Измерение ускорений заданных координатных областей оборудования с массой до 200 кг выполнялось программно-техническим комплексом (ПТК) с акселерометрами (рис. 3, 4), разработанными в ННЦ “Институт метрологии”.

Акселерометры подключаются к персональному компьютеру через интерфейс RS-485, что позволяет отнести измерительную часть на несколько десятков метров от компьютера.

В комплект акселерометра с интерфейсом RS-485 входят:



Рис. 2. Генератор механических колебаний VM-100



Рис. 3. ПТК с акселерометрами

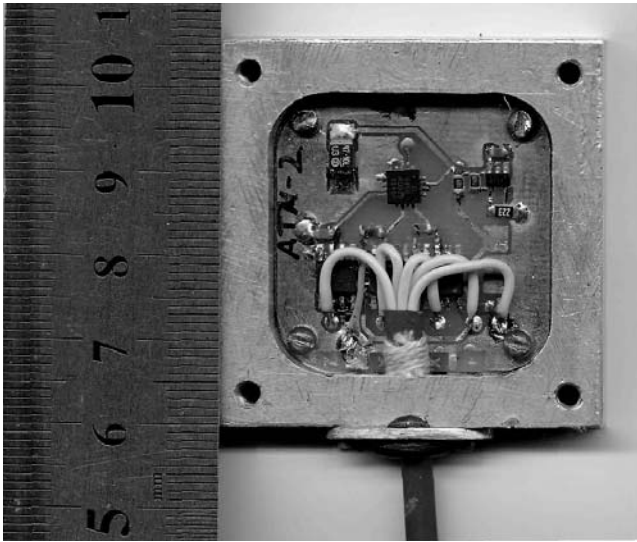


Рис. 4. Акселерометр в корпусе

- плата акселерометра в корпусе с разъемом (рис. 4);
- адаптер RS-485 – USB, подключаемый к компьютеру;
- соединительный кабель.

Акселерометры жестко крепятся к корпусу исследуемого оборудования по взаимоперпендикулярным плоскостям. Крепление акселерометров по месту установки оборудования представлено на рис. 5а, б, в. На рис. 5б изображено крепление магнита, при отключении которого создавалось воздействие для свободных колебаний. Сигналы с акселерометров обрабатывались по программе.

Программное обеспечение акселерометров позволяет:

- отображать акселерограммы сигналов (рис. 6);
- компенсировать начальный уровень сигнала (например, ускорение свободного падения  $9,8 \text{ м/с}^2$  для оси Z);

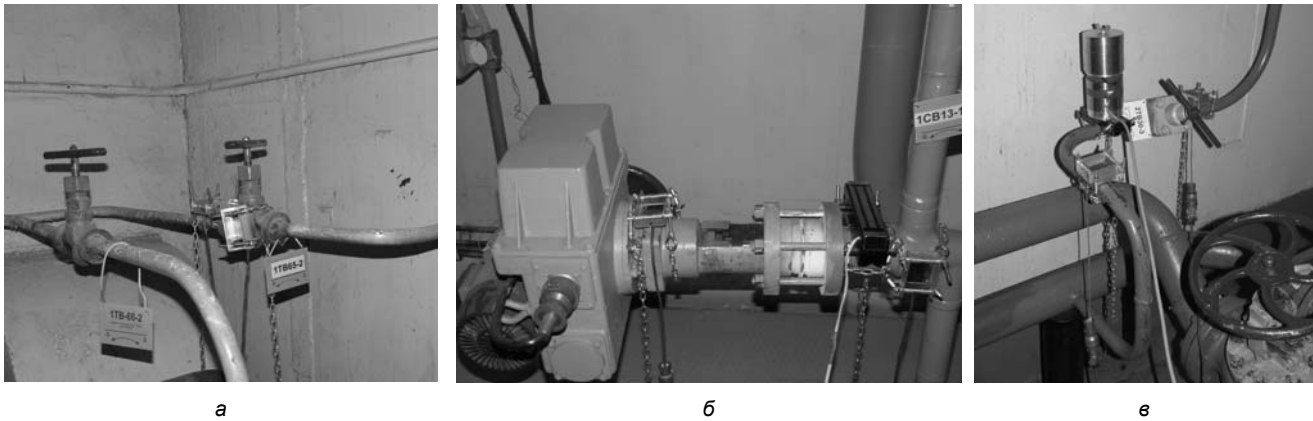


Рис. 5. Крепление акселерометров

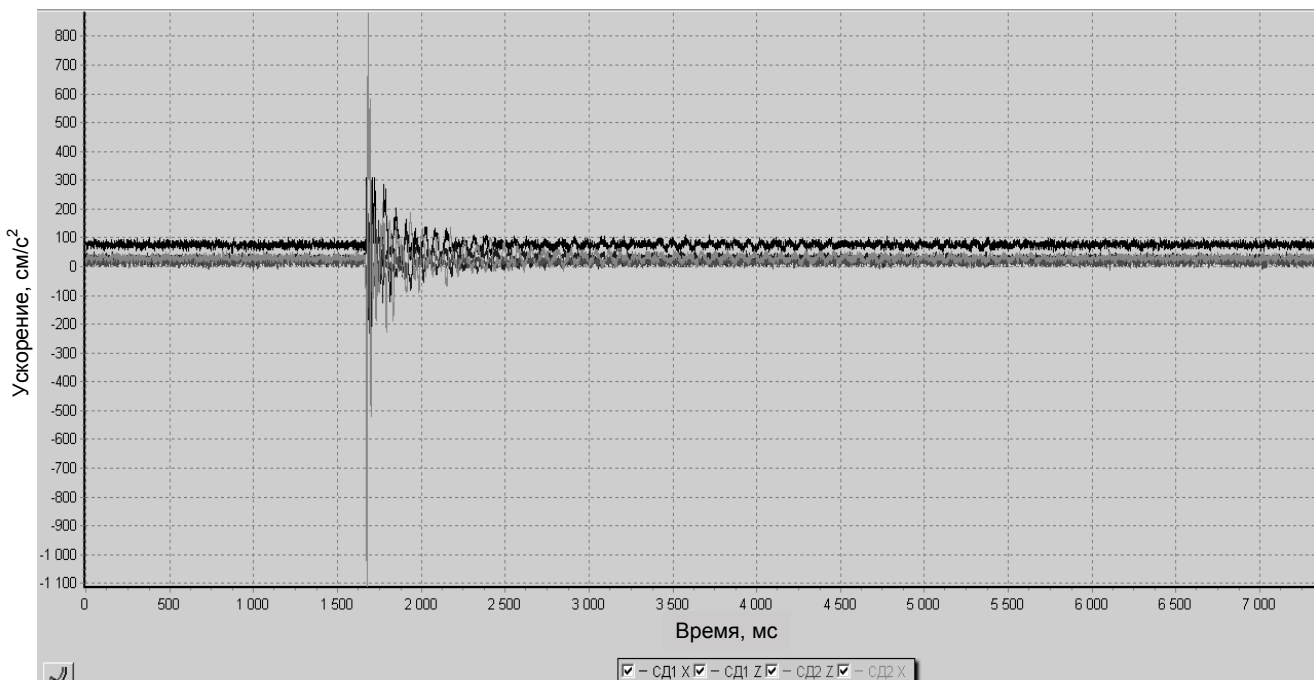


Рис. 6. Акселерограмма сигналов

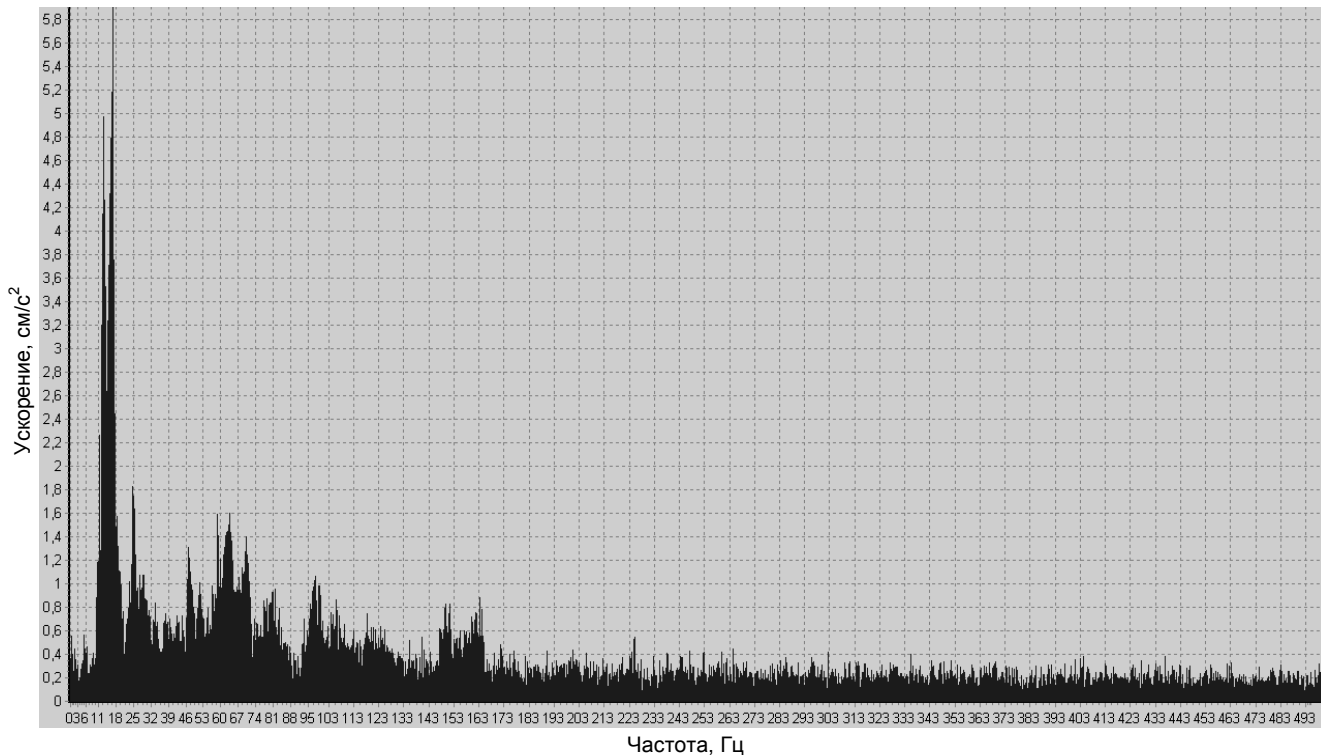


Рис. 7. График спектра для выделенного фрагмента

- выделять на графиках интересные фрагменты сигнала;
- сохранять выделенный фрагмент в виде txt-или csv-файла (файл csv открывается в MS-Excel);
- получать график спектра для выделенного фрагмента (рис. 7).

Для вычисления спектра используется быстрое преобразование Фурье (БПФ), которое на сегодняшний день, без сомнения, – самый распространенный инструмент анализа, который применяется во всех отраслях науки и техники. БПФ стало основным инструментом спектрального анализа сигналов. БПФ – это алгоритм вычисления за количество действий, меньшее, чем  $O(N^2)$ , требуемых для прямого вычисления дискретного преобразования Фурье.

Дискретное преобразование Фурье трансформирует последовательность комплексных (либо вещественных) чисел  $x_n$  в последовательность комплексных чисел  $X_k$ . Прямое и обратное преобразования Фурье определяются как

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n w_N^{kn}, \quad w_N = e^{\frac{2\pi i}{N}}, \quad k = 0, \dots, N-1;$$

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n w_N^{-kn}.$$

Приведенные выше формулы имеют сложность  $O(N^2)$ , однако широко известен способ снизить сложность дискретного преобразования Фурье до  $O(N \cdot \log(N))$ . Это действие и есть быстрое преобразование Фурье.

Алгоритм быстрого преобразования Фурье применим к любым коммутативным ассоциативным

кольцам с единицей. Чаще всего этот алгоритм применяют к полю комплексных чисел (с  $\varepsilon = e^{2\pi i/n}$ ) и к кольцам вычетов.

Основной шаг алгоритма состоит в сведении задачи для  $N$  чисел к задаче для  $p = N/q$  чисел, где  $q$  – делитель  $N$ .

Большинство алгоритмов БПФ разработаны для комплексных последовательностей, так как комплексный случай поддается более легкому анализу, чем вещественный. Однако на практике очень часто приходится работать с вещественными числами, и отдельным вопросом является быстрое действие БПФ вещественных последовательностей. Для четного  $N$  существует формула, позволяющая свести вещественное БПФ к комплексному БПФ в два раза меньшей длины и тем самым примерно в два раза повысить быстродействие в сравнении с использованием комплексного БПФ той же длины.

Таким образом, если длина преобразования – четное число, то вещественное преобразование будет примерно в два раза быстрее комплексного. Если же длина преобразования – нечетное число, то скорость вещественного преобразования не будет отличаться от скорости комплексного преобразования той же длины.

Однако, делая вывод по исследованию измерительного сигнала с помощью спектрального анализа, можем сказать, что короткая запись данных приводит к недостаточно точным результатам применения Фурье-анализа, так как разрешающая способность зависит от длительности выборки. Также проявляется неявная весовая обработка данных при вычислении БПФ. Взвешивание проявляется в

виде “утечки” в частотной области, то есть энергия главного лепестка спектральной линии “утекает” в боковые лепестки, что приводит к наложению и искажению спектральных линий других присутствующих сигналов.

При этом спектральные линии слабых сигналов могут маскироваться лепестками спектральных линий более сильных сигналов. Правильный выбор функции окна, значения которой спадают на краях, позволяет ослабить утечку в боковые лепестки, однако лишь за счет снижения разрешающей способности.

Для преодоления указанных недостатков было принято решение в дальнейшем при измерении и исследовании использовать параметрические методы, позволяющие выбрать функцию, аппроксимирующую реальный набор данных. Применение параметрических методов предполагает знание априорной информации, достаточной для построения параметрической модели исследуемого процесса. Дальнейшее рассмотрение модели авторегрессионного спектрального анализа подробно приведено в статье [4].

В результате испытаний регистрировались акселерограммы собственных затухающих колебаний объекта испытаний, возникающих после резкого снятия приложенного к объекту усилия (рис. 8).

Вычисление тренда позволит оценить затухание свободных колебаний конструкции (или ее добротность – параметр, обратный затуханию). Тренд вычисляется методом наименьших квадратов.

### Анализ полученных результатов

Обработка полученной информации заключалась в определении резонансных частот, относительных уровней мощности колебаний оборудования и соответствующих им декрементов затухания [5]. В качестве примера приведем результаты вычисления резонансных частот и декрементов затухания собственных колебаний максимального уровня мощности для клапана с управляющим пневмоприводом (см. таблицу).

Из таблицы видно, что резонансные частоты в диапазоне от 1 до 30 Гц (согласно заключительному отчету об оценке сейсмостойкости оборудования энергоблока № 1, 2; 191-20-О-КО-11 и методике 191-16-М-10) для двух рядом закрепленных акселерометров АТМ-1 и АТМ-2 составляют 16,75 и 22,15 Гц при максимальных относительных уровнях мощности соответственно. Декременты затухания  $\delta \geq 32,8\%$  и  $\delta \geq 11,0\%$  соответственно. Определение декрементов затухания необходимо для принятия решения о необходимости проведения антисейсмических мероприятий. Размещение декрементов затухания в диапазоне от 5 до 99 % не требует проведения антисейсмических мероприятий, то есть оборудование не требует дополнительного закрепления по месту эксплуатации [6–8].

### Заключение

Применение акселерометров позволяет производить измерение и расчет свободных и вынужденных колебаний оборудования без демонтажа с его рабочего места, а также делать экспертное за-

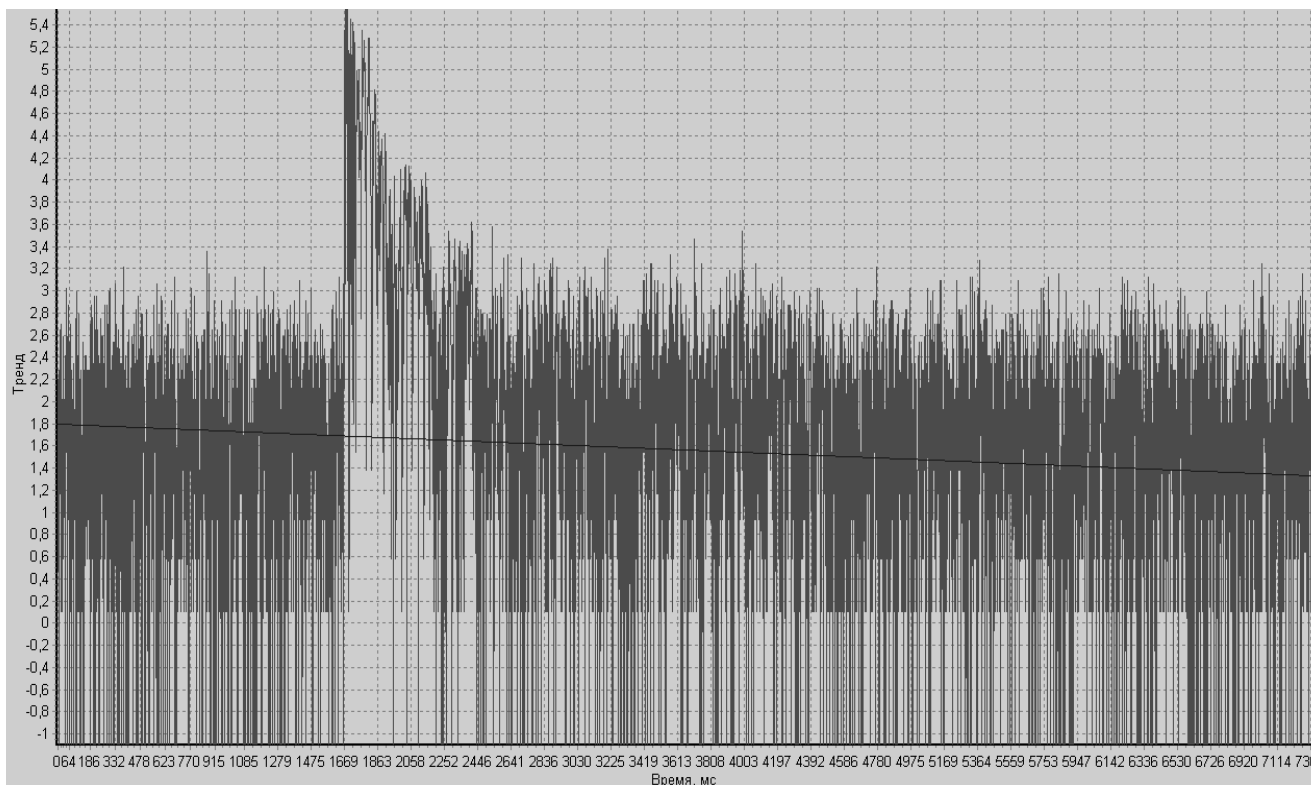


Рис. 8. Акселерограмма собственных затухающих колебаний объекта испытаний

Акселерометр	Направление воздействия усилия	Ось координат	Резонансная частота, Гц	Относительный уровень мощности, отн. ед.	Декремент затухания, отн. ед.
АТМ-1	Горизонтальное	X	16,75	0,083	0,328
		Y	21,00	0,020	0,437
		Z	–	–	–
	Вертикальное	X	–	–	–
		Y	28,75	0,008	0,519
		Z	26,25	0,002	0,975
АТМ-2	Горизонтальное	X	21,25	0,011	0,407
		Y	19,75	0,124	0,398
		Z	–	–	–
	Вертикальное	X	–	–	–
		Y	25,25	0,012	0,933
		Z	22,15	0,173	0,110

ключение о необходимости проведения антисейсмических мероприятий (дополнительного закрепления, применения гасящих вибрацию демпферов).

Акселерометры позволяют регистрировать вибрацию оборудования в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц при ускорении от 0,005 до 50 м/с<sup>2</sup> с абсолютной погрешностью, равной 0,001 м/с<sup>2</sup>.

В качестве перспективных направлений применения акселерометров, созданных на основе MEMS-технологии, являются работы по исследованию и расчетам вибрационного состояния систем главных паропроводов турбогенераторов с определением мероприятий по снижению вибрации и использование акселерометров в системах вибродиагностики при неразрушающем контроле.

#### Список литературы

1. Алиев Т.А. Экспериментальный анализ / Т.А. Алиев. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
3. Белазовский М.Я. Неразрушающие методы контроля / М.Я. Белазовский. – М.: Машиностроение, 1964. – 43 с.
4. Романько В.Н. Определение собственных частот и декрементов затухания методом авторегрессионного спектрального анализа / В.Н. Романько, Э.А. Корецкий, В.В. Скляр // Украинський метрологічний журнал. – 2012. – № 2. – С. 4–9.
5. Кармалита В.А. Цифровая обработка случайных колебаний / В.А. Кармалита. – М.: Машиностроение, 2006. – 280 с.
6. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости: ГОСТ 30546.1-98. – [Введ. 2000-07-01]. – К.: Госстандарт Украины, 2000. – 47 с. – (Межгосударственный стандарт).
7. Испытания на сейсмостойкость машин, приборов и других технических изделий. Общие положения и методы испытаний: ГОСТ 30546.2-98. – [Введ. 2000-07-01]. – К.: Госстандарт Украины, 2000. – 24 с. – (Межгосударственный стандарт).
8. Методы определения сейсмостойкости машин, приборов и других технических изделий, установленных на месте эксплуатации, при их аттестации или сертификации на сейсмическую безопасность: ГОСТ 30546.3-98. – [Введ. 2000-07-01]. – К.: Госстандарт Украины, 2000. – 17 с. – (Межгосударственный стандарт).