

# ЭКОФИЗИКА-111В

ЭКОФИЗИКА-111В – это развитие линейки трехканальных виброметров «Белая ЭКОФИЗИКА-110В», предназначенных для оценки воздействия вибрации на человека, конструкцию зданий и сооружений, для исследований вибрационной активности машин и для научных исследований.



## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

- Оценка воздействия вибрации на человека (производственные и коммунальные вибрации) и окружающую среду
- Оценка воздействия вибрации на здания и сооружения
- Измерение вибрационных характеристик машин

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

- Количество каналов: 3 (прямое подключение вибродатчиков со встроенной электроникой)
- Спектральный анализ: 1/1 и 1/3-октавный, БПФ
- Частотный диапазон: до 20 кГц по каждому каналу
- Диспетчер датчиков: выбор единиц измерений, датчиков, калибровочных настроек
- Экспресс-анализ: графическая хронограмма, виброакустический калькулятор, постобработка мультizaписи, групповая обработка многократных замеров, текстово-графический блокнот
- Запись в память: ручная и автоматическая (автозамер, мультizaпись, групповой замер).
- Регистрация сигналов (цифровой магнитофон): запись сигналов по трем каналам и их постобработка на экране прибора
- Каналы телеметрии, дистанционное управление
- Расширение режимов измерений при подключении цифровых измерительных преобразователей (шум, микроклимат, переменные и постоянные ЭМП, световая среда)

# Оценка воздействия вибрации в помещениях на чувствительное оборудование.

## Обзор подходов и практический опыт



В статье разобраны подходы к оценке вибрации в помещениях с виброчувствительным оборудованием. Основная часть статьи описывает проведение измерений на соответствие вибрационным критериям ВС и требованиям к виброперемещению на низких частотах. Разобраны типовые проблемы при проведении рассматриваемых исследований и методы их решения. Приведены рекомендации по средствам измерений.

Группа «Октава ЭлектронДизайн», г. Москва

### Подходы к оценке воздействия вибрации

Высокоточное оборудование, работающее с малыми объектами или физическими процессами с малыми характерными размерами, в большей или меньшей степени чувствительно к воздействию вибрации. Существуют разные подходы к оценке вибрации в помещениях, к которым предъявляются повышенные требования. Их можно разделить на методы, учитывающие собственные вибрационные характеристики чувствительного оборудования, и упрощенные методы. Первый способ оценки более точный, но требует исходных данных об оборудовании (резонансные частоты, добротность), которых, как правило, нет. Подобные способы оценки вибрации изложены в стандартах серии ГОСТ Р ИСО/ТС 10811.

Упрощенные методы заключаются в измерении вибрации в помещении, где будет устанавливаться оборудование, с последующим сравнением с заданными предельными значениями. Такая оценка проводится безотносительно к наличию или отсутствию виброчувствительного оборудования в обследуемом помещении, например, на этапе оборудования цеха или лаборатории. Тип и величину предельных значений задает производитель чувствительного оборудования. Далее мы

рассмотрим подробнее упрощенные методы.

### Какие вибрационные характеристики измеряются

Чтобы разобраться в методах измерения и оценки вибрации, важно понять, что «вибрация» — это не какая-то величина, а физическое явление. Численно это явление характеризуется несколькими физическими величинами: ускорением, скоростью, частотой, фазой и т. п. Поэтому, например, выражение «вибрация превышает допустимые значения» некорректно — необходимы уточнения, какие конкретно параметры вибрации рассматриваются.

При контроле воздействия вибрации на чувствительное оборудование, как правило, измеряют ускорение, перемещение или скорость вибрации. Обычно эти параметры вибрации оцениваются не «одним числом», а вместо этого проводится частотный анализ, и с предельными значениями сравниваются величины ускорения (скорости, перемещения) в определенных частотных диапазонах.

Ускорение (а также скорость и перемещение) вибрации — это быстроменяющиеся процессы. Для их оценки проводят среднеквадратическое (СКЗ, RMS) усреднение по времени, обычно за 1...10 с, или выделяют мак-

симальные мгновенные значения (Пик, Pk, Peak или Пик-Пик). Конкретный выбор зависит от того, как производитель виброчувствительного оборудования задает требования по вибрации.

Мощность вибрации на полузданий сосредоточена преимущественно в диапазоне ниже 100 Гц. При этом характерные частоты вибрации, создаваемые техногенными источниками, лежат выше 1 Гц, чаще всего — выше 8–10 Гц. Примеры распространенных требований к вибрации:

- ▶ определены предельные значения к средней (СКЗ) виброскорости в третьоктавных полосах частот 4...80 Гц (этот способ еще называют определением вибрационного критерия);

- ▶ определены предельные значения среднего (СКЗ) ускорения на частотах от 10–16 Гц. Могут задаваться критерии как к ускорению в широкой полосе частот, например 10–100 Гц, так и к спектру, например к ускорению в третьоктавах;

- ▶ определены предельные значения перемещения на низких частотах — до 10 Гц. Чаще всего рассматриваются пиковые значения перемещения, или характеристики Пик-Пик. Как правило, при таком способе задания не оговаривается частотный диапазон, хотя это и важно для проведе-

ния измерений и анализа. Из нашей практики таких измерений следует, что если рассматривается воздействие техногенных источников вибрации, например работа оборудования в смежных помещениях или транспортные потоки, то достаточно рассматривать вибрацию на частотах от 1...4 Гц.

#### Вибрационные кривые VC

Один из наиболее популярных методов оценки вибрации в помещениях, предназначенных для установки высокоточного оборудования, – вибрационные критерии (vibration criteria), они же кривые VC. Этот метод оценки изложен в рекомендации IEST RP-CC012 и статье [1].

Суть такого метода оценки вибрации заключается в измерении среднеквадратичных значений виброскорости в третьоктавных полосах частот

Таблица 1. Названия вибрационных критериев в различных документах

| Максимально допустимая $V_{\text{СКЗ}}$ в $1/3$ -октавных полосах 8–80 Гц | Обозначения IEST | Обозначения ASHRAE <sup>1</sup> |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| 100 мкм/с                                                                 |                  | Curve F                         |
| 50 мкм/с                                                                  | VC-A             | Curve E                         |
| 25 мкм/с                                                                  | VC-B             | Curve D                         |
| 12,5 мкм/с                                                                | VC-C             | Curve C                         |
| 6,3 мкм/с                                                                 | VC-D             | Curve B                         |
| 3,1 мкм/с                                                                 | VC-E             | Curve A                         |

<sup>1</sup> Обозначения, применяемые в Sound and Vibration control handbook ASHRAE и другой литературе.

4–80 Гц и сравнении их с предельными значениями. Предельные значения скорости заданы отдельно для каждой из третьоктав и объединены в группы, которые еще называют «кривыми» или «критериями» (рис. 1). Для удобства эти кривые имеют названия: VC-A, VC-B... VC-E (где VC-A – самый слабый критерий, а VC-E – наиболее жесткий). Если уровень ско-

рости хотя бы в одной из третьоктав превышает предельное значение для данного критерия, то вибрация считается несоответствующей этому критерию.

Кривые VC устроены таким образом, что в третьоктавах 8–80 Гц скорость не должна превышать постоянного определенного значения, а в третьоктавах 4–8 Гц кривые имеют наклон 6 дБ на октаву, то есть фактически на частотах 4–8 Гц ограничивается не скорость, а ускорение. В некоторых документах могут рассматриваться расширенные кривые в частотном диапазоне от 1 до 100 Гц.

В литературе встречаются и другие названия вибрационных критериев. Так, например, по классификации ASHRAE, кривые вибрационных критериев называются иначе. Соответствие названий вибрационных критериев в различных документах изложено в табл. 1.

Жесткость требований к вибрации в помещении с вибросенситивным оборудованием зависит от типовых размеров объектов, с которыми это оборудование работает. В табл. 2 приведен ряд типовых вибрационных критериев для различных видов оборудования.

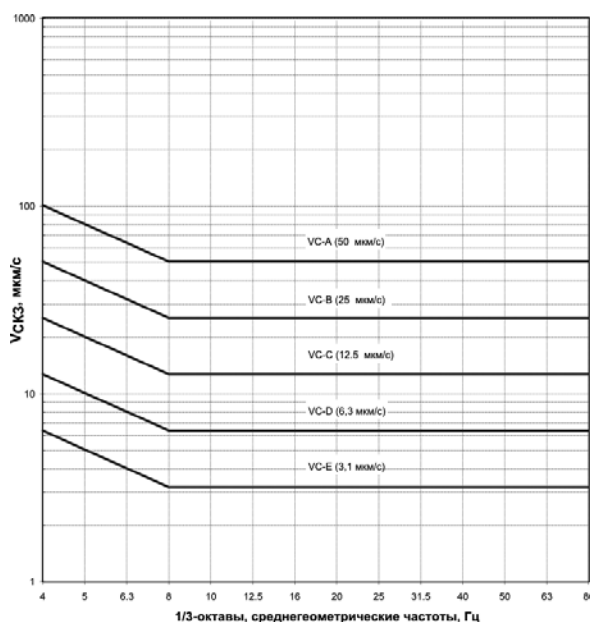


Рис. 1. Кривые вибрационных критериев VC

Таблица 2. Типовые вибрационные критерии для различных видов оборудования

| Вибрационный критерий | $V_{\text{СКЗ}}$ в $1/3$ -октавах 8–80 Гц | Тип оборудования                                                                                                                                            | Типовой размер объекта, с которым работает оборудование |
|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| VC-A                  | 50 мкм/с                                  | Лабораторное оборудование общего назначения, микроскопы с увеличением до 400х, метрологические лаборатории, производство микроэлектроники общего назначения | 8 мкм                                                   |
| VC-B                  | 25 мкм/с                                  | Микроскопы с увеличением до 1000х, оборудование для литографии (характерные размеры до 3 мкм)                                                               | 3 мкм                                                   |
| VC-C                  | 12,5 мкм/с                                | Литография (характерные размеры – 1 мкм), электронные микроскопы с увеличением 30000х, магниторезонансная томография (МРТ)                                  | 1 мкм                                                   |
| VC-D                  | 6,3 мкм/с                                 | Электронные микроскопы с увеличением более 30000х, масс-спектрометры, оборудование для фотолитографии                                                       | 0,3 мкм                                                 |
| VC-E                  | 3,1 мкм/с                                 | Нанотехнологии, оборудование со сверхточным позиционированием, прецизионные лазерные и оптические системы                                                   | 0,1 мкм                                                 |

В последнее время стали использоваться еще критерии VC-F (1,56 мкм/с на частотах 8–80 Гц) и VC-G (0,78 мкм/с на частотах 8–80 Гц). Эти критерии соответствуют сверхмалым уровням вибрации, сложно достижимым на практике даже в специально подготовленных помещениях, и используют их для промежуточных расчетов. Кроме того, следует учесть, что провести измерение вибрации на соответствие таким критериям чаще всего невозможно ввиду отсутствия достаточно малошумящих датчиков.

#### Метод измерения вибрации для оценки соответствия критериям VC

Оценка с использованием вибрационных критериев VC построена на предположении, что вибрация имеет постоянный или слабо меняющийся характер. В этой ситуации можно измерить среднеквадратичное значение виброскорости в третьоктавных полосах частот напрямую с помощью датчиков скорости либо опосредованно с помощью датчиков ускорения (акселерометров) и с последующим пересчетом. Вторая возможность важна, так как большинство датчиков виброскорости обладают существенными ограничениями по частотному диапазону и массогабаритным размерам.

Если непосредственно измеряли уровни виброускорения в третьоктавных полосах, то произвести пересчет измеренных значений в виброскорость в третьоктавных полосах можно по формуле:

$$v(f) = \frac{10^{-6}}{2\pi f} \times 10^{L_{a,f}/20},$$

где  $f$  — номинальная среднегеометрическая частота третьоктавной полосы в Гц,  $L_{a,f}$  — измеренные уровни виброускорения в соответствующей третьоктаве в дБ отн. мкм/с<sup>2</sup>. Но если вибрация имеет импульсный характер или состоит из переходных процессов, то приведенная выше формула будет давать лишь ориентировочные значения.

#### Оценка вибрации с заданием перемещения или ускорения

В ряде случаев производители чувствительного оборудования определяют требования к вибрации не через вибрационные критерии, а нормируют ускорение или скорость.

Метод измерения ускорения вибрации в таких случаях сводится к измерению третьоктавных спектров. Если требование к виброускорению задано в широкой полосе частот, например 10–100 Гц, то искомое значение получают методом энергетического суммирования соответствующих третьоктав.

Метод измерения перемещения зависит от характера вибрации и того, какая именно характеристика перемещения нормируется.

Если требования предъявляются к среднему перемещению, то руководствуются следующим алгоритмом:

- измеряют третьоктавные спектры СКЗ ускорения в искомом диапазоне частот;
- вычисляют СКЗ перемещения в искомом диапазоне частот по формуле  $D(f) = \frac{10^{-6}}{4\pi^2 f^2} \times 10^{L_{a,f}/20}$ ;
- проводят энергетическое суммирование перемещения по искомому диапазону частот.

Для более надежной оценки можно проводить не энергетическое суммирование, а амплитудное, то есть просто складывать  $D(f)$  для всех третьоктав со средними частотами  $f$ , которые попали в рассматриваемый диапазон. Это даст завышенную, но более надежную оценку вибрации.

Если требования предъявляются к пиковому перемещению, например, норматив задан для характеристики

Пик-Пик перемещения, то измеряют временную форму сигнала перемещения. Один из способов ее получить — это измерить временную форму сигнала ускорения и наложить двойной интегрирующий фильтр, такую процедуру реализует ПО Signal+3G RTA с записями, полученными приборами «Экофизика».

#### Практические вопросы оценки вибрации в помещениях с чувствительным оборудованием

При планировании и проведении измерений вибрации в помещениях часто возникают два вопроса.

- На вибрацию по каким направлениям (горизонтальным, вертикальному) распространяются требования?
- За какой период времени проводить измерение виброскорости и что вообще считать результатом: средние за период контроля значения, среднюю за наихудшие 5 или 10 секунд вибрацию или что-то еще?

Рассмотрим эти два вопроса.

Вибрацию оценивают по трем взаимоперпендикулярным направлениям. Характеристикой виброскорости (ускорения, перемещения) будут три компоненты для каждой третьоктавы. Каждая из компонент должна соответствовать критерию VC.

При этом на полу зданий вибрация в вертикальном направлении практически всегда превышает вибрацию в горизонтальных направле-

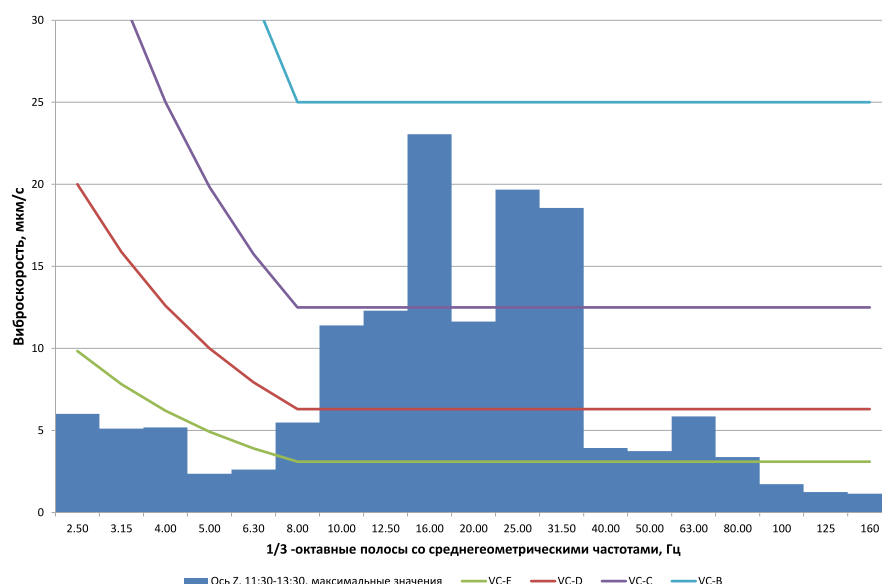


Рис. 2. Пример результатов измерений вибрации и сравнения с критерием: при оценке по максимальным значениям скорости вибрация соответствует критерию VC-B и не соответствует более строгим; измеренный спектр соответствует спектру вибрации транспортных потоков — метро, железнодорожного и автотранспорта

При статистическом анализе оценивалась вибрация в диапазоне частот 4–80 Гц.

**Рабочее время:**

**Вертикальное направление (ось Z)**

|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| VC-A | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-B | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-C | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-D | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |

**Горизонтальное направление (ось X)**

|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| VC-A | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-B | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-C | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |

**Горизонтальное направление (ось Y)**

|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| VC-A | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-B | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-C | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |

**Нерабочее время:**

**Вертикальное направление (ось Z)**

|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| VC-A | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-B | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-C | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-D | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |

**Горизонтальное направление (ось X)**

|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| VC-A | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-B | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-C | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |

**Горизонтальное направление (ось Y)**

|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| VC-A | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-B | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |
| VC-C | Критерий выполнен минимум 99 % времени измерения |

Рис. 3. Статистический анализ вибрации

ниях. Поэтому для упрощения измерения часто проводят только в одном направлении — вертикальном (рис. 2). Это допущение особенно снижает затраты, если вибрацию сравнивают со строгими критериями VC-D или VC-E, так как при таких измерениях задействуют дорогостоящие однокомпонентные малошумящие акселерометры.

К вопросу выбора интервала измерения можно подойти по-разному. Если источники вибрации известны, то измерения могут проводиться в течение короткого представительного промежутка времени. При таких измерениях инженер, который проводит исследование, следит, чтобы результаты измерений не были искажены помехами. За результат измерений в этом случае принимают наибольшие за период измерений показания СКЗ скорости (ускорения, перемещения). Время усреднения при расчете

СКЗ, как правило, принимают 1 секунду или 5 секунд.

Если же источники вибрации неизвестны или неизвестен их режим работы, то проводят длительные мониторинговые измерения — от нескольких часов до нескольких суток, в течение которых произойдут все представляющие интерес вибрационные события. При таком способе измерений в мониторинговую запись результатов измерений попадает множество помех: вибрация, связанная с деятельностью людей, искажения от разовых непредставительных процессов, например ремонтных работ. Если выбирать из всей длительной мониторинговой записи максимальные уровни виброскорости (ускорения, перемещения), то наверняка такие результаты измерений не будут соответствовать даже самым слабым критериям. Но вывод о непригодности помещения в такой ситуации будет

некорректен: когда чувствительное оборудование и всё помещение введут в эксплуатацию, то вибрация будет уже другая.

Наша лаборатория в подобных ситуациях использует риск-ориентированный подход к оценке помещения. Для этого мы проводим длинные мониторинговые измерения с автоматической записью в память. После этого осуществляем статистический анализ данных (рис. 3), например, определяем, какой процент всего времени измерения вибрация соответствует тому или иному критерию.

Для упрощенной оценки соответствия вибрационным критериям VC в статье [1] применяют такой алгоритм:

- для каждой третьоктавы вычисляются средние за период измерения значения виброскорости;
- за результат измерения виброскорости в третьоктаве принимают

Таблица 3. Рекомендации по выбору первичного преобразователя

| Датчик вибрации                                                                                    | Возможности измерения с приборами «Экофизика-111В» и «Экофизика-110А»                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                    | вибрационные критерии                                                                                       | ускорения и перемещения                                                                                                                                                                                                                                                 |
| AP2006-500 – высокочувствительный однокомпонентный акселерометр с низким уровнем собственного шума | VC-A, VC-B, VC-C, VC-D, VC-E.<br>На частотах от 8 Гц подходит для измерений по VC-F и VC-G                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ускорения в третьоктавах 1...1000 Гц: 30 мкм/с<sup>2</sup>...35 м/с<sup>2</sup></li> <li>СКЗ-перемещения в полосе частот 1–10 Гц: 2 мкм до 9 мм</li> <li>СКЗ-перемещения в полосе частот 4–10 Гц: 0,1 мкм до 9 мм</li> </ul>     |
| AP2099-100 – однокомпонентный акселерометр с повышенным разрешением                                | VC-A, VC-B, VC-C, VC-D                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ускорения в третьоктавах 1...1000 Гц: 130 мкм/с<sup>2</sup>...160 м/с<sup>2</sup></li> <li>СКЗ-перемещения в полосе частот 1–10 Гц: 8 мкм до 40 мм</li> <li>СКЗ-перемещения в полосе частот 4–10 Гц: 0,5 мкм до 40 мм</li> </ul> |
| AP2098-100, AP2037-100 – однокомпонентные акселерометры                                            | VC-A, VC-B, VC-C                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ускорения в третьоктавах 1...1000 Гц: 1 мм/с<sup>2</sup>...160 м/с<sup>2</sup></li> <li>СКЗ-перемещения в полосе частот 4–10 Гц: 4 мкм до 40 мм</li> </ul>                                                                       |
| AP2082М-100, AP2038Р-100 – трехкомпонентные акселерометры                                          | VC-A, VC-B.<br>Если конкретный датчик имеет низкие собственные шумы, то возможно измерение по критерию VC-C | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ускорения в третьоктавах 1...1000 Гц: 1 мкм/с<sup>2</sup>...160 м/с<sup>2</sup></li> <li>СКЗ-перемещения в полосе частот 4–10 Гц: 4 мкм до 40 мм</li> </ul>                                                                      |

среднее значение плюс среднеквадратичное отклонение.

#### Требования к измерительному оборудованию

При выборе оборудования для проверки вибрации на соответствие тем или иным вибрационным критериям следует обратить внимание на следующие нюансы:

- ▶ количество измерительных каналов виброметра. Измерения рекомендуется проводить одновременно по трем взаимоперпендикулярным направлениям;
- ▶ диапазон измерений виброускорения или виброскорости в третьоктавах;
- ▶ частотный диапазон измерений;
- ▶ погрешность измерений вибрации;
- ▶ возможность проведения автоматического мониторинга с записью в память.

Приборостроительное объединение «Октава-ЭлектронДизайн» предлагает следующие измерительные системы для оценки вибрации:

- ▶ виброметр-анализатор спектра «Экофизика-111В» (3 измерительных канала) или «Экофизика-110А» в исполнении HF (4 измерительных канала). Если вибрация сравнивается с критериями VC-E, VC-D или иными строгими критериями, то применяют «Экофизика-110А» (рис. 4);
- ▶ встроенное в приборы ПО (наборы «Инженерная виброметрия», «Санитарная виброметрия») и внешнее ПО для обработки результатов измерений — Signal+3G RTA;



Рис. 4. Прибор «Экофизика-110А» в режиме мониторинговых измерений вибрации

- ▶ датчики вибрации — по числу измерительных каналов; тип акселерометра зависит от строгости критериев к оцениваемой вибрации. Рекомендации по выбору акселерометров — в табл. 3;

- ▶ адаптеры, с помощью которых датчики вибрации устанавливают на пол обследуемого помещения, — напольная платформа 004 ОП, магниты АМ-01-ОКТ, мастика АW-01.

При необходимости это оборудование может быть оснащено каналом связи с интернетом для передачи данных в режиме реального времени на удаленный сервер.

#### Литература

1. Colin G. Gordon. Generic Vibration Criteria for Vibration-Sensitive Equipment / Colin G. Gordon, Eddy A. Derby и др. // Optomechanical Engineering and Vibration Control. Denver. 1999. URL: [https://indico.esss.lu.se/event/258/attachments/1795/2782/DOI\\_10.1117\\_12.363802.pdf](https://indico.esss.lu.se/event/258/attachments/1795/2782/DOI_10.1117_12.363802.pdf) (дата обращения: 08.10.2019).

А. А. Воронков, ведущий инженер,  
Группа «Октава ЭлектронДизайн»,  
г. Москва,  
тел.: +7 (495) 225-5501,  
e-mail: [info@octava.info](mailto:info@octava.info),  
сайт: [www.octava.info](http://www.octava.info)

## Мнение профессора Московского авиационного института (национального исследовательского университета) Л. В. Маркина.

У нас в работе немало научно-исследовательских стендов, с помощью которых мы получаем результаты, оказывающие влияние на развитие целых научных направлений. Поэтому их оснащение различными системами мониторинга — задача достаточно актуальная. Если же говорить о стационарных системах вибромониторинга оборудования, то их наличие на стендах для динамических испытаний в ряде случаев просто необходимо.

В нашей отрасли (авиационно-космической) на некоторых стендах, связанных со сверхзвуковым течением газовых потоков, такие мониторинговые системы способны принести пользу не только с точки зрения научных результатов, но и как дополнительное средство безопасности. Ведь благодаря вибромониторингу и анализу данных возможно заранее предсказать нештатную работу оборудования и предотвратить возникновение аварийной ситуации.