



Общество с ограниченной ответственностью

## **«Техническая Диагностика и Мониторинг»**

Россия, 198329, Санкт-Петербург, ул. Тамбасова, дом 12, офис 49  
Тел: (812) 934-90-40, info@tdm-spb.ru, www.tdm-spb.ru

---



### **Мониторинг и диагностика состояния вращающегося оборудования**

## **Датчики вибрации**

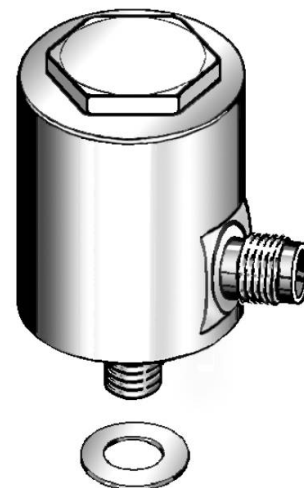
### **Общая информация:**

**общее описание,  
основные принципы работы,  
 типовые характеристики  
и особенности**

**2021**

## Датчики вибрации с зарядовым выходом

Принцип действия: компрессионный пьезоэлектрический датчик виброускорения. Датчик имеет внутри себя пьезоэлемент, «придавленный» подпружиненной измерительной массой, т. е. определенной относительно массивной деталью датчика, имеющей некоторую свободу перемещения внутри датчика. Свобода перемещения измерительной массы ограничена пластинчатой пружиной внутри датчика. При воздействии внешней вибрации на датчик измерительная масса приходит в ограниченное колебательное движение, пропорциональное внешней вибрации по своей интенсивности, и оказывает переменное силовое компрессионное воздействие на пьезоэлемент датчика. В результате пьезоэлемент создает переменный заряд, пропорциональный внешней вибрации, воздействующей на датчик, а именно заряд, пропорциональный мгновенному значению ускорения такой вибрации (виброускорению). Поэтому датчик имеет широко распространенное общетиповое название «акселерометр» («измеритель ускорения»).



Созданный заряд снимается проводами с пьезоэлемента и является выходным сигналом датчика.

Типовой датчик измеряет вибрацию, воздействующую только вдоль одной оси датчика соответственно его конструкции. Датчик более сложной конструкции может иметь несколько отдельных пьезоэлементов и выполнять измерения вибрации по всем 3-м своим осям.

Датчик с зарядовым выходом не требует внешнего питания.

**Плюсы:** отсутствие электронных компонентов внутри датчика позволяет изготавливать малогабаритные легковесные датчики и датчики, пригодные для работы при более высоких температурах.

**Минусы:** очень слабый выходной сигнал датчика требует применения специальных коаксиальных кабелей и ограничивает максимально возможную длину кабеля. Применяются более высокие требования к обеспечению электромагнитной помехозащищенности кабельных линий и входных цепей специальной измерительной аппаратуры. Кабели специального исполнения также не должны создавать помехи в виде трибоэлектрического заряда при изгибе/вибрации самого кабеля в результате внутреннего трения внутренних компонентов / слоев кабеля между собой (обычные коаксиальные кабели не специального исполнения создают достаточно большие трибоэлектрические заряды при своем изгибе / вибрации, поэтому обычные кабели не пригодны для применения с такими датчиками).

**Характеристики выходных сигналов:** датчик создает выходной сигнал в виде переменного заряда, создаваемого его пьезоэлементом. Мгновенное значение выходного заряда (пКл, пикокулон) пропорционально мгновенному значению виброускорения ( $m/c^2$ ) или (g), воздействующего на датчик. Выбор ( $m/c^2$ ) или (g) делается автором технической документации на датчик. Коэффициент пропорциональности называется чувствительностью датчика и выражается в пКл/ $(m/c^2)$  или в пКл/g, т. е. этот коэффициент выражается в отношении величины мгновенного заряда (пКл), создаваемого датчиком, к величине мгновенного виброускорения в ( $m/c^2$ ) или (g), воздействующего на датчик.

Данный тип выходного сигнала называется динамическим, т.е. сигнал отражает в непрерывной динамике изменения мгновенного значения измеряемого параметра вибрации.

Частотный диапазон, в котором сохраняется допустимая линейность чувствительности датчика (в котором чувствительность датчика остается более-менее одинаковой в пределах специфицированного отклонения), называется линейным частотным диапазоном датчика и составляет в общем случае от долей Гц (минимум) до 5-15 кГц (максимум). Выбор способа крепления датчика (на винте, на шпильке, на клею, на магнитном основании и пр.) дополнительно существенно влияет на линейность частотного диапазона датчика, которая также зависит и от свойств механической связи датчика с местом его установки.

Датчик может также использоваться совместно с отдельно установленным усилителем-преобразователем зарядового сигнала. При этом сам датчик может работать в зоне высокой температуры, а усилитель-преобразователь при этом работает в зоне умеренной температуры, достаточно благоприятной для его электронной «начинки». Типовой функцией усилителя-преобразователя является усиление исходного зарядового сигнала и преобразование его в более помехозащищенный сигнал по напряжению (мВ, милливольт) - сигнал мгновенного напряжения, пропорционального мгновенному виброускорению ( $\text{мВ}/(\text{м}/\text{с}^2)$ ) или  $\text{мВ}/\text{г}$  - для передачи через более длинные кабельные линии до удаленной измерительной аппаратуры.

Измерительная аппаратура выполняет обработку сигнала виброускорения и его математическую интеграцию для преобразования в сигнал виброскорости. Двойная математическая интеграция сигнала преобразует сигнал виброускорения в сигнал виброперемещения.

Измерительная аппаратура измеряет и рассчитывает различные параметры вибрации - пиковые, межпиковые и среднеквадратичные значения виброускорения, виброскорости, виброперемещения и другие параметры. Непосредственно датчиком измеряются только мгновенные значения виброускорения, поэтому все остальные параметры вибрации получаются расчетным путем в измерительной аппаратуре. Простейший виброметр рассчитывает только среднеквадратичное значение виброскорости - наиболее широко употребляемый параметр вибрации при мониторинге и диагностике состояния вращающегося производственного оборудования. Среднеквадратичные значения параметров рассчитываются не по всему возможному линейному частотному диапазону датчика, а только по специфицированной полосе частот. В общем случае наиболее широко применяемые стандарты измерений и оценки вибрации предписывают проводить измерения среднеквадратичной виброскорости по полосе частот от 2 или 10 Гц до 1000 Гц.

Более сложные приборы могут рассчитывать и другие параметры вибрации, еще более сложные приборы могут записывать в свою память временные сигналы виброускорения, виброскорости, виброперемещения, а также математически рассчитывать частотные спектры записанных временных сигналов методом быстрых преобразований Фурье (сокращенно БПФ, в английской транскрипции FFT - Fast Fourier Transform). Анализ временных сигналов и спектров дает информацию о характере и составляющих вибрации, что позволяет определять конкретные причины и неисправности оборудования, вызывающие конкретную измеренную вибрацию.

При выборе датчика, кроме выбора его паспортных технических параметров и цены, существенное значение имеет качественное исполнение датчика, обеспечивающее максимально возможное соответствие его рабочих параметров паспортным данным в различных условиях работы в течение длительного срока службы.

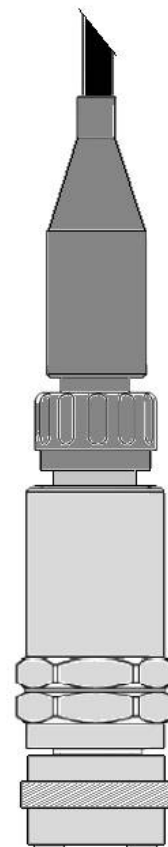


## Датчики вибрации с выходом по напряжению

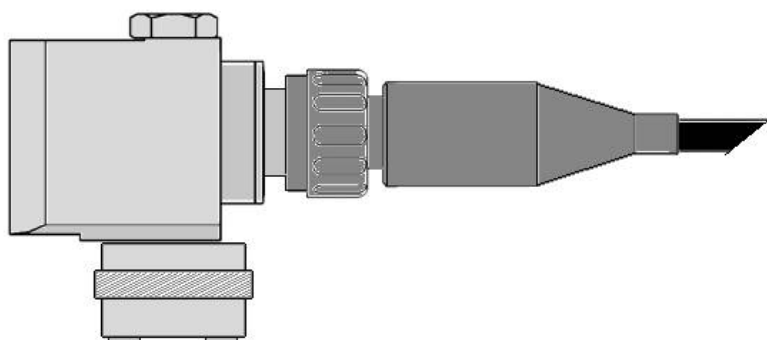
Датчик вибрации с выходом по напряжению конструктивно является датчиком вибрации с зарядовым выходом, внутри которого дополнительно встроен электронный усилитель и преобразователь заряда с функцией управления выходным напряжением датчика.

Принцип действия: компрессионный пьезоэлектрический датчик виброускорения. Датчик имеет внутри себя пьезоэлемент, «придавленный» подпружиненной измерительной массой, т.е. определенной относительно массивной деталью датчика, имеющей некоторую свободу перемещения внутри датчика. Свобода перемещения измерительной массы ограничена пластинчатой пружиной внутри датчика. При воздействии внешней вибрации на датчик измерительная масса приходит в ограниченное колебательное движение, пропорциональное внешней вибрации по своей интенсивности, и оказывает переменное силовое компрессионное воздействие на пьезоэлемент датчика. В результате пьезоэлемент создает переменный заряд, пропорциональный внешней вибрации, воздействующей на датчик, а именно заряд, пропорциональный мгновенному значению ускорения такой вибрации (виброускорению). Поэтому датчик имеет широко распространенное общетиповое название «акселерометр» («измеритель ускорения»).

Созданный заряд снимается проводами с пьезоэлемента и поступает на электронный усилитель и преобразователь заряда, встроенный внутри датчика. Выходной сигнал встроенного усилителя является выходным сигналом датчика.



Типовой датчик измеряет вибрацию, воздействующую только вдоль одной оси датчика соответственно его конструкции. Датчик более сложной конструкции может иметь несколько отдельных пьезоэлементов и выполнять измерения вибрации по всем 3-м своим осям. Датчик требует внешнего питания, которое он обычно получает от измерительной аппаратуры по своей же измерительной кабельной линии, т.е. питание датчика совмещается с выходным сигналом датчика в одной электрической цепи.



**Плюсы (по сравнению с датчиком с зарядовым выходом):** значительно более мощный выходной сигнал датчика позволяет использовать соединительные кабели значительно большей длины. Применяются более простые требования по обеспечению электромагнитной помехозащищенности кабельных линий и входных цепей специальной измерительной аппаратуры. Отсутствует проблема помех в виде трибоэлектрического заряда при изгибе / вибрации самого кабеля в результате внутреннего трения одних внутренних компонентов / слоев кабеля о другие. В результате более простых требований к

кабелям допускается использование стандартных экранированных кабелей типа «витая пара». Имеется техническая возможность автоматического контроля состояния линии датчика на обрыв, короткое замыкание, ухудшение контакта в линии (например, из-за окисления или ослабления контактов в разъемах или соединениях), снижение сопротивления изоляции внутри линии (например, из-за попадания влаги в разъемы или соединения).

**Минусы (по сравнению с датчиком с зарядовым выходом):** наличие электронных компонентов внутри датчика ограничивает возможность изготовления малогабаритных легковесных датчиков, а также ограничивает рабочий температурный диапазон датчика.

**Характеристика выходного сигнала:** на датчик подается напряжение питания (например, 24 В пост. тока) от измерительной аппаратуры с определенным внутренним сопротивлением и ограничением макс. тока (например, не более 5 мА). Электронный встроенный усилитель датчика, находящегося в покое, автоматически создает падение напряжения на датчике, называемое напряжением смещения, которое после стабилизации становится равным примерно половине напряжения питания (например, около 12 В). Вторая половина падения напряжения питания при этом приходится на внутреннее сопротивление измерительной аппаратуры. В связи с этим применяется такой параметр датчика, как «время стабилизации» до начала измерений (обычно 3-5 сек), которое требуется для успокоения переходных процессов после подачи питания на датчик. При воздействии внешней вибрации на датчик электронный встроенный усилитель датчика «раскачивает выше-ниже» падение напряжения на датчике относительно своего исходного напряжения смещения пропорционально вибрации, воздействующей на датчик. Выходным сигналом датчика в таком случае является переменное изменение падения напряжения на датчике.

При ухудшении контакта в кабельной линии датчика напряжение смещения (падение напряжения на выходе измерительной аппаратуры к датчику, т. е. падение напряжения на полевой кабельной линии датчика) возрастает сверх специфицированного порога. При обрыве полевой кабельной линии напряжение смещения на выходе измерительной аппаратуры к датчику возрастает примерно до напряжения питания. При снижении сопротивления изоляции внутри линии датчика (например, из-за попадания влаги в разъем на этой линии) напряжение смещения падает ниже специфицированного порога. При коротком замыкании в кабельной линии напряжение смещения падает примерно до нуля. Эти свойства позволяют применять автоматическое определение состояния линии датчика с помощью измерительной аппаратуры.

Мгновенное значение изменения падения напряжения на датчике (мВ, милливольт) пропорционально мгновенному значению виброускорения ( $m/s^2$ ) или (g), воздействующего на датчик. Выбор ( $m/s^2$ ) или (g) делается автором технической документации на датчик. Коэффициент пропорциональности называется чувствительностью датчика и выражается в мВ/( $m/s^2$ ) или в мВ/g, т. е. этот коэффициент выражается в отношении величины мгновенного изменения падения напряжения (мВ), создаваемого датчиком в своей измерительной линии, к величине мгновенного виброускорения ( $m/s^2$ ) или (g), воздействующего на датчик.

Данный тип выходного сигнала называется динамическим, т. е. сигнал отражает в непрерывной динамике изменения мгновенного значения измеряемого параметра вибрации.

Частотный диапазон, в котором сохраняется допустимая линейность чувствительности датчика (т. е. в котором чувствительность датчика остается более-менее одинаковой в пределах специфицированного отклонения), называется линейным частотным диапазоном датчика и составляет в общем случае от долей Гц (минимум) до 10-15 кГц (максимум).



Выбор способа крепления датчика (на винте, на шпильке, на клею, на магнитном основании и пр.) дополнительно существенно влияет на линейность частотного диапазона датчика, которая также зависит и от свойств механической связи датчика с местом его установки.

Измерительная аппаратура выполняет обработку сигнала виброускорения и его математическую интеграцию для преобразования в сигнал виброскорости. Двойная математическая интеграция сигнала преобразует сигнал виброускорения в сигнал виброперемещения.

Примечание: датчик вибрации с выходом по напряжению может также иметь встроенный усилитель и преобразователь с интегрирующей функцией. В этом случае математическая интеграция сигнала виброускорения производится уже внутри самого датчика, а динамический выходной сигнал датчика по напряжению в таком случае будет пропорционален виброскорости, а не виброускорению. Это не очень распространенное решение, потому что в таком случае для пользователя полностью теряется возможность работать с сигналом виброускорения. Однако такие датчики с динамическим выходом по напряжению, пропорциональному виброскорости, также находят свое применение.

Измерительная аппаратура измеряет и рассчитывает параметры вибрации - пиковые, межпиковые и среднеквадратичные значения виброускорения, виброскорости, виброперемещения и другие параметры. Непосредственно датчиком измеряются только мгновенные значения виброускорений, поэтому все остальные параметры вибрации получаются расчетным путем в измерительной аппаратуре. Простейший виброметр рассчитывает только среднеквадратичное значение виброскорости - наиболее широко употребляемый параметр вибрации при мониторинге и диагностике состояния вращающегося производственного оборудования. Среднеквадратичные значения рассчитываются не по всему возможному линейному частотному диапазону датчика, а только по специфицированной полосе частот. В общем случае наиболее широко применяемые стандарты измерений вибрации предписывают проводить измерения среднеквадратичной виброскорости по полосе частот от 2 или 10 Гц до 1000 Гц.

Более сложные приборы могут рассчитывать и другие параметры вибрации, еще более сложные приборы могут записывать в свою память временные сигналы виброускорения, виброскорости, виброперемещения, а также математически рассчитывать частотные спектры записанных временных сигналов методом быстрых преобразований Фурье (сокращенно БПФ, в английской транскрипции FFT - Fast Fourier Transform). Анализ временных сигналов и спектров дает информацию о характере и составляющих вибрации, что позволяет определять конкретные причины и неисправности оборудования, вызывающие конкретную измеренную вибрацию.

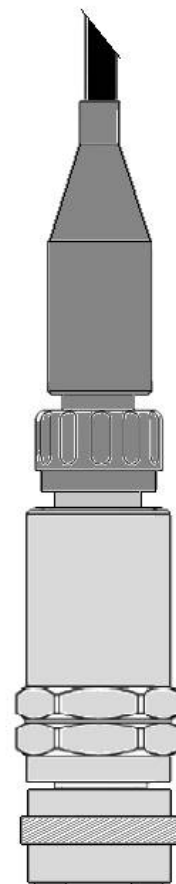
При выборе датчика, кроме выбора его паспортных технических параметров и цены, существенное значение имеет качественное исполнение датчика, обеспечивающее максимально возможное соответствие его рабочих параметров паспортным данным в различных рабочих условиях и в течение длительного срока службы.



## Датчики вибрации с токовым выходом 4-20 мА

Датчик вибрации с токовым выходом 4-20 мА конструктивно является датчиком вибрации с зарядовым выходом, внутрь которого дополнительно встроены электронный усилитель и преобразователь заряда с функцией расчета среднеквадратичных или пиковых значений сигнала и управления выходным током.

Принцип действия: компрессионный пьезоэлектрический датчик виброускорения. Датчик имеет внутри себя пьезоэлемент, «придавленный» подпружиненной измерительной массой, т.е. определенной относительно массивной деталью датчика, имеющей некоторую свободу перемещения внутри датчика. Свобода перемещения измерительной массы ограничена пластинчатой пружиной внутри датчика. При воздействии внешней вибрации на датчик измерительная масса приходит в ограниченное колебательное движение, пропорциональное внешней вибрации по своей интенсивности, и оказывает переменное силовое компрессионное воздействие на пьезоэлемент датчика. В результате пьезоэлемент создает переменный заряд, пропорциональный внешней вибрации, воздействующей на датчик, а именно заряд, пропорциональный мгновенному значению ускорения такой вибрации (виброускорению). Поэтому датчик по своему принципу измерения остается «акселерометром» («измерителем ускорения»), но в результате электронного преобразования измеренного ускорения выдает сигнал другой специфицированной величины. Название «акселерометр» обычно не применяется для данного типа датчиков. Созданный заряд снимается проводами с пьезоэлемента и поступает на электронный усилитель и заряд, встроенный внутри датчика, с последующим расчетом среднеквадратичных или пиковых значений сигнала и управлением выходным током. Изменяющийся ток через датчик в формате 4-20 мА является выходным сигналом датчика.



Типовой датчик измеряет вибрацию, воздействующую только вдоль одной оси датчика соответственно его конструкции. Датчик более сложной конструкции может иметь несколько отдельных пьезоэлементов и выполнять измерения вибрации по всем 3-м своим осям, однако предложение таких 3-х осевых датчиков с выходом 4-20 мА на рынке весьма ограничено.

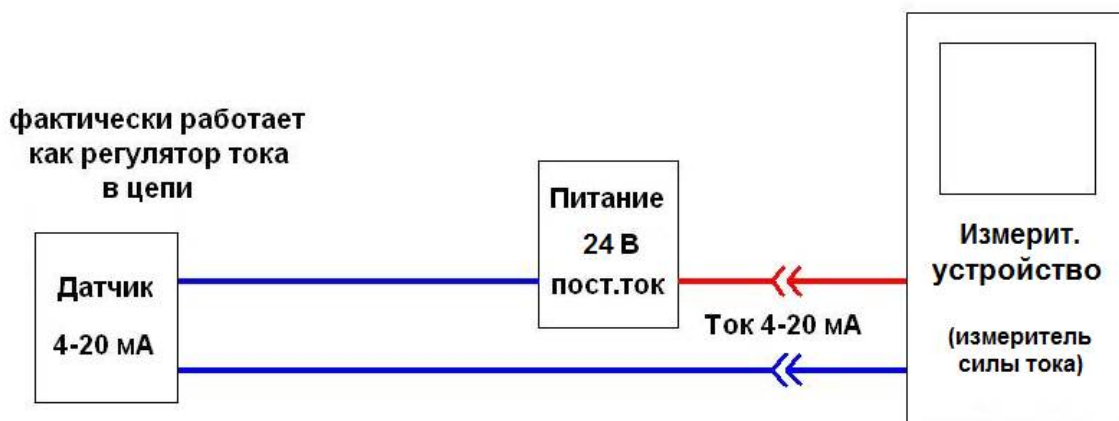
Датчик требует внешнего питания, которое он обычно получает от измерительной аппаратуры по своей же измерительной кабельной линии. т.е. питание датчика совмещается с выходным сигналом датчика в одной электрической цепи.

**Плюсы:** универсальность и простота подключения, измерений и обработки результатов - стандартный формат выходного сигнала по току 4-20 мА позволяет подключать датчик ко множеству разнообразных соответствующих измерительных устройств, в том числе напрямую к входным измерительным каналам АСУ. Мощный выходной сигнал датчика позволяет использовать соединительные кабели относительно большой длины. Применяются относительно простые требования для обеспечения электромагнитной помехозащищенности кабельных линий и входных цепей измерительной аппаратуры. В

результате более простых требований к кабелям допускается использование стандартных экранированных кабелей типа «витая пара». Имеется техническая возможность автоматического контроля состояния линии датчика на обрыв с помощью соответствующих функций измерительных устройств.

**Минусы:** крайне ограниченный объем параметров, выдаваемый датчиком - датчик выдает только один специфицированный параметр вибрации. Принципиально отсутствует возможность анализа временных сигналов и спектров вибрации для диагностики оборудования и выявления конкретных неисправностей. Наличие электронных компонентов внутри датчика ограничивает возможность изготовления малогабаритных легковесных датчиков, а также ограничивает рабочий температурный диапазон датчика.

**Характеристика выходного сигнала:** на датчик подается напряжение питания (как правило, 24 В пост. тока, в общем случае от 12 до 36 В пост. тока) от измерительной аппаратуры или от дополнительного источника питания. Электронный встроенный усилитель и преобразователь датчика, находящегося в покое, автоматически создает ток через датчик, который после стабилизации становится равным 4 мА. В связи с этим применяется такой параметр датчика, как «время включения» до начала измерений (например, до 30-60 сек), которое требуется для успокоения переходных процессов после подачи питания на датчик. При воздействии внешней вибрации на датчик встроенный усилитель датчика рассчитывает один специфицированный параметр вибрации и изменяет ток, протекающий через датчик, пропорционально этому параметру в границах 4-20 мА. Выходным сигналом датчика является сила тока, проходящего через датчик.



При обрыве кабельной линии ток через датчик падает до нуля. Это позволяет применять автоматическое определение состояния линии датчика с помощью измерительной аппаратуры. Специфицированным параметром вибрации, который измеряется и выдается датчиком в формате тока 4-20 мА, в общем случае может быть среднеквадратичное или пиковое (межпиковое) значение виброускорения, или виброскорости, или виброперемещения. Наиболее типовым можно условно считать датчик, измеряющий среднеквадратичную виброскорость. Для датчика специфицируется полоса частот, по которой рассчитывается параметр. Для датчика также специфицируется диапазон измерений параметра, при этом нулевому значению параметра соответствует выходной ток 4 мА, а максимальному значению параметра соответствует выходной ток 20 мА.



Например, для датчиков, измеряющих среднеквадратичную виброскорость, могут применяться такие варианты параметров измерений (только в качестве примера):

	Полоса частот:	Диапазон измерений:	Выходной ток:
Датчик модели 1	2-1000 Гц	0 - 12,5 мм/с	4 - 20 мА
Датчик модели 2	2-1000 Гц	0 - 25 мм/с	4 - 20 мА
Датчик модели 3	10-1000 Гц	0 - 50 мм/с	4 - 20 мА

Данный тип выходного сигнала НЕ является динамическим, так как такой сигнал не отражает в непрерывной динамике изменения мгновенного значения измеряемого параметра вибрации. Результат измерения - среднеквадратичное или пиковое (межпиковое) значение специфицированного параметра вибрации - рассчитывается по вибросигналу, полученному в течение некоторого времени измерения. Увеличение или уменьшение этого рассчитанного результата измерения приводит к соответствующему увеличению или уменьшению тока, проходящего через датчик.

Частотный диапазон, в котором сохраняется допустимая линейность чувствительности датчика (т. е. в котором чувствительность датчика остается более-менее одинаковой в пределах специфицированного отклонения), называется линейным частотным диапазоном датчика и составляет в общем случае не менее полосы частот, по которой производится измерение и расчет специфицированного параметра датчика. Выбор способа крепления датчика (на винте, на шпильке, на клею, на магнитном основании и пр.) дополнительно существенно влияет на линейность частотного диапазона датчика, которая также зависит и от свойств механической связи датчика с местом его установки.

Измерительная аппаратура выполняет измерение токового сигнала 4-20 мА и его математическое преобразование обратно в специфицированный параметр вибрации. Поэтому в измерительной аппаратуре должна быть предусмотрена возможность программирования автоматического обратного пересчета измеренного тока 4-20 мА в величину специфицированного параметра вибрации согласно специфицированному диапазону измерений (например, обратно в значение среднеквадратичной виброскорости).

Измерительная аппаратура 4-20 мА принципиально не может ни измерить, ни рассчитать любые иные параметры вибрации - пиковые, межпиковые и среднеквадратичные значения виброускорения, виброскорости, виброперемещения и другие параметры - кроме измерения одного параметра вибрации, специфицированного для данной модели датчика. Также принципиально невозможна запись временных сигналов виброускорения, виброскорости, виброперемещения, а также невозможен математический расчет частотных спектров методом быстрых преобразований Фурье (сокращенно БПФ, в английской транскрипции FFT - Fast Fourier Transform). Принципиальное отсутствие возможности анализа временных сигналов и спектров не позволяет определять конкретные причины и неисправности оборудования, вызывающие конкретную измеренную вибрацию.

**Правильный выбор датчиков и средств мониторинга и диагностики является одним из ключей к обеспечению надежной работы Вашего производственного оборудования!**

