

УДК 620.178.5.05:006.354

АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ И ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИИ И ПРИЧИН ОГРАНИЧЕНИЯ ОБЛАСТИ РАБОЧИХ ЧАСТОТ

А. Г. Волченко, Д. В. Корнеев, В. Я. Бараш.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»),
Москва, Россия, e-mail: office@vniims.ru

В статье рассматриваются типичные для основных датчиков, измеряющих виброускорение, виброскорость и виброперемещение, амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики, описываются причины и принципы ограничения производителями датчиков области рабочих частот.

Ключевые слова: измерения вибрации, датчики вибрации, фазо-частотные характеристики, акселерометры.

In article deals with the typical mainstream sensors measure acceleration, velocity and displacement amplitude-frequency and phase-frequency characteristics, describes the causes and principles of frequency bands.

Key words: vibration measurements, vibration sensors, phase-frequency characteristics, accelerometers.

Для всех механизмов, в состав которых входят движущиеся части, характерно наличие вибрации, которая при превышении некоторых допустимых значений, характерных для конкретного механизма, приводит либо к преждевременному ремонту, либо, в худшем случае, – к выходу из строя или к аварии. Избежать подобных нежелательных ситуаций позволяют многочисленные системы контроля и защиты, использующие информацию, поступающую от датчиков вибрации.

Рассмотрим, что может предложить современный рынок виброизмерительной аппаратуры для контроля параметров вибрации? Каким образом производители современных датчиков удовлетворяют спрос потребителей по перекрытию частотного диапазона и какими методами это достигается?

На сегодняшний момент принцип выбора датчика определяется

условиями его применения. В системах контроля вибрации используют датчики виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

Первые характеризуют пространственное положение контролируемого объекта в текущий период времени, вторые – быстроту изменения этого положения во времени, а третьи – быстроту изменения скорости. Эти три характеристики вибрационного движения являются взаимосвязанными, и, измерив, например, виброускорение, легко вычислить остальные два параметра путем однократного или двукратного интегрирования.

Применение трех типов датчиков обусловлено необходимостью контроля вибрации на объектах с различными частотными характеристиками.

В высокочастотной (ВЧ) области используются акселерометры – датчики, измеряющие виброускорение

механических колебаний. Считается, что виброускорение – наилучшая для контроля характеристика вибрационного процесса, которую целесообразно использовать во всех областях виброметрии, пока по той или иной причине не возникает необходимость определения скорости или перемещения этих колебаний.

При измерениях в более узкой частотной полосе, в частности при измерениях механических колебаний, создаваемых машинным оборудованием вращательного действия, целесообразно измерять скорость.

Перемещение наиболее часто используется при измерениях низкочастотных (НЧ) механических колебаний с большими амплитудами, например, колебаний крупных конструкций, в том числе зданий, мостов, плотин и др.

Поведение датчиков в частотной области, то есть отклик их чувствительных элементов на изменения частоты колебаний поверхности, на которой они установлены, описывается с помощью двух характеристик. Первая характеристика описывает изменения чувствительности (коэффициента преобразования) датчика в зависимости от изменений частоты колебания поверхности при неизменной амплитуде колебаний – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Вторая – фазо-частотная характеристика (ФЧХ) характеризует меру относительного сдвига во времени входного и выходного колебаний.

Рассмотрим типовые частотные и фазовые характеристики, характерные для вышеописанных трех типов, применяемых в виброметрии датчиков.

Как отмечалось, задачей датчиков, измеряющих виброперемещение, является измерение колебаний в области низких (применительно к виброметрии) частот. При изготовлении таких датчиков используются чувствительные элементы с «высокой отдачей», т.е. чувствительность таких НЧ механических систем на порядок, а то и два порядка

выше, чем у акселерометров. Обычно, это достигается за счет укрупнения и, соответственно, утяжеления конструкции датчика. Естественно, при таком подходе к построению механической системы датчика его резонансная частота сдвигается в область НЧ, что существенно ограничивает частотную область применения этих датчиков.

Как видно из рис. 1, для датчиков виброперемещения характерен спад АЧХ и ФЧХ на относительно невысоких частотах.

Для датчиков измеряющих виброскорость, например, для индуктивных датчиков, характеристики имеют уже более ярко выраженную линейность в более широком диапазоне частот. Датчики более легкие, чем предыдущие, но менее чувствительные. На АЧХ появляется завал в области НЧ, где чувствительный элемент датчика «отстает» от входного сигнала, слабо реагируя на прикладываемую к нему виброскорость. АЧХ и ФЧХ велосиметра в частотной области приведен на рис. 2.

Для измерений виброускорений в большинстве случаев применяются акселерометры. Размеры этих датчиков варьируются от относительно небольших до сверхминиатюрных. Область линейности акселерометра более плоская и продолжительная. Присутствуют спад в области НЧ и подъем в области ВЧ. АЧХ и ФЧХ акселерометра в частотной области приведен на рис. 3.

Как видно из приведенных выше графиков, ни одна из характеристик не является линейной во всем рабочем диапазоне, а ведь требование линейности выходных значений в зависимости от изменения влияющего фактора является основным при подключении датчиков к измерительным устройствам и контролирующим приборам. На характеристиках всех трех типов датчиков видны характерные завалы или подъемы на краях рабочих диапазонов. Линейная часть характеристик не является идеальной, а на области нелинейно-

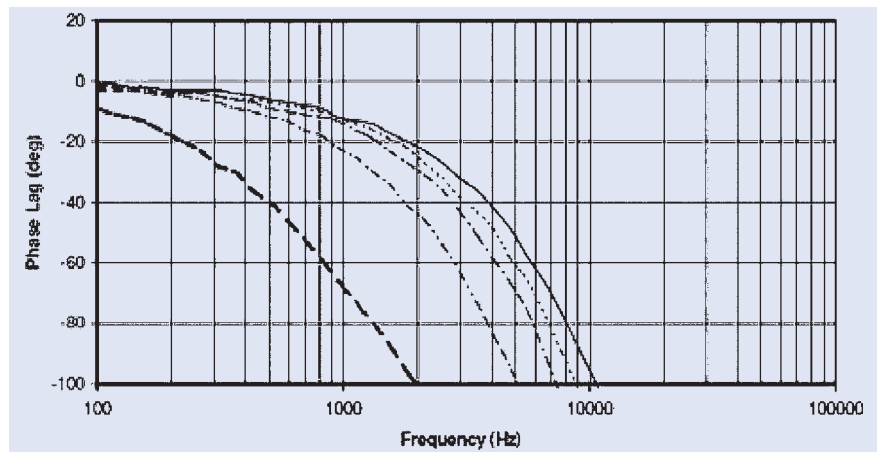
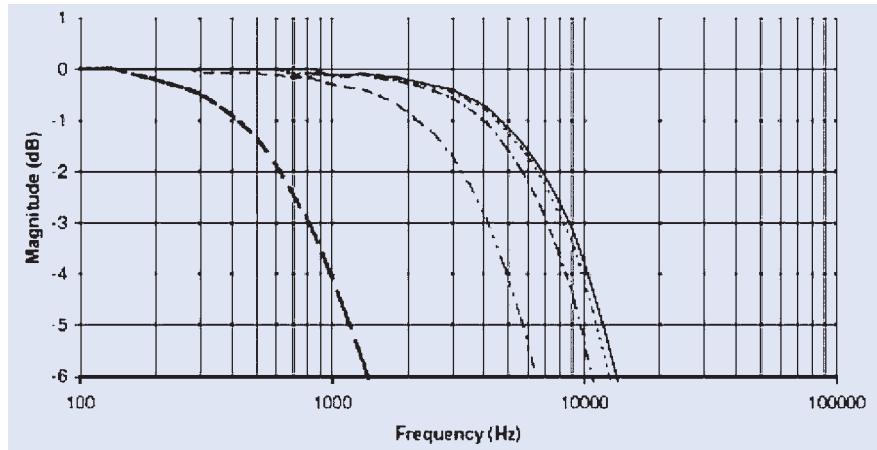


Рис. 1. Типовые графики АЧХ и ФЧХ датчиков виброперемещений

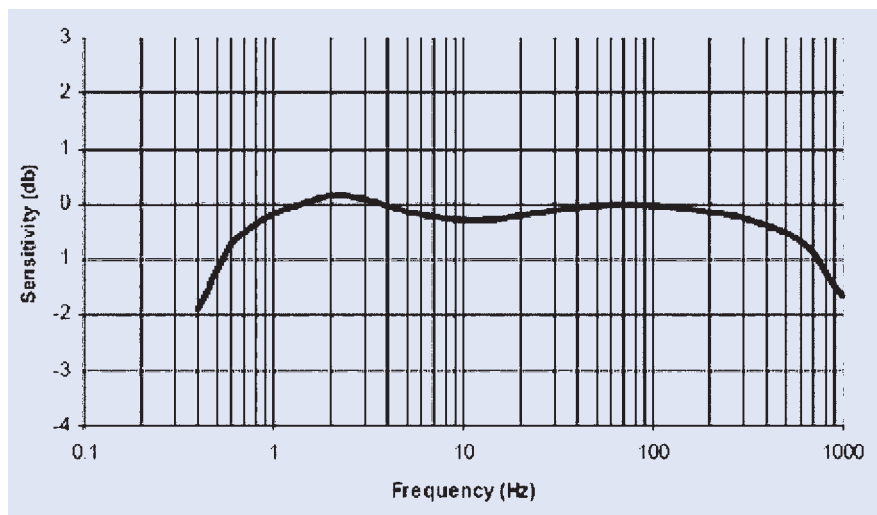


Рис. 2. Типовые графики АЧХ и ФЧХ датчика виброскорости

сти приходится значительная часть диапазона частот, в котором датчик еще работает, но значение его чувствительности все сильнее отклоняется от номинального значения.

Рассмотрим принципы, исходя из которых производитель ограничивает рекомендуемую для использования область АЧХ. На рис. 4 приведена

упрощенная амплитудно-частотная характеристика акселерометра.

Из рис. 4 видно, что верхний предел рабочего частотного диапазона закрепленного акселерометра определяет частота резонанса. Чем больше значение частоты резонанса закрепленного акселерометра, тем шире его рабочий частотный диапазон.

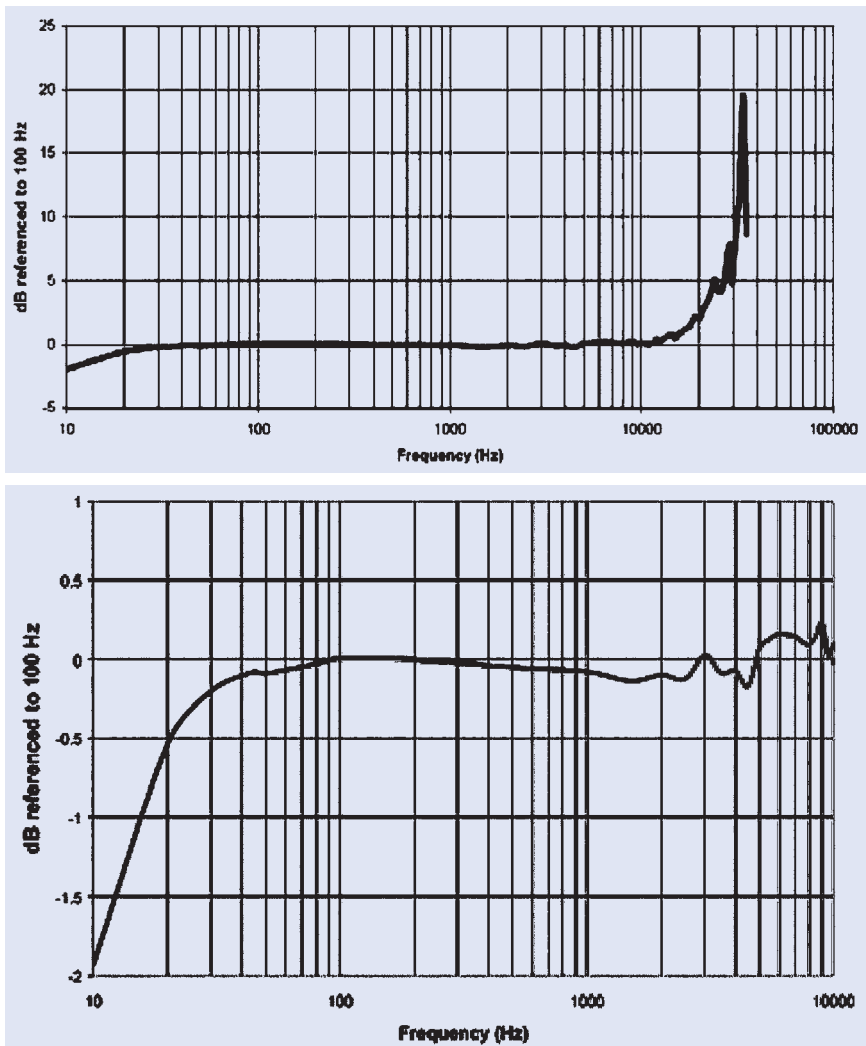


Рис. 3. Типовые графики АЧХ и ФЧХ датчика виброускорения

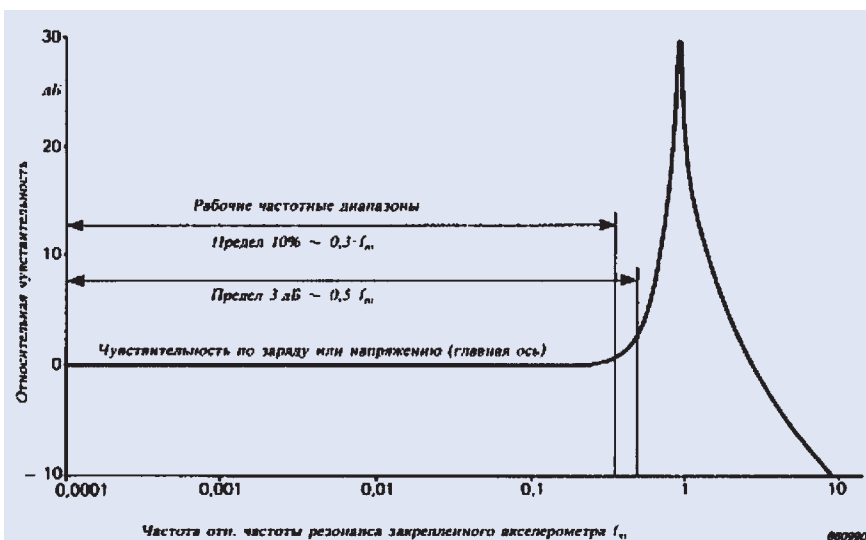


Рис. 4. Типовой график АЧХ акселерометра

Частоту резонанса акселерометра можно увеличить или путем применения более жестких пьезоэлементов – чувствительного элемента акселерометра, или путем уменьше-

ния его общей сейсмической массы. Поскольку жесткость пьезоэлементов обычно нельзя изменять, единственной возможностью является уменьшение сейсмической массы.

Однако, уменьшение сейсмической массы сказывается на амплитуде действующей на пьезоэлемент динамической силы и вызывает уменьшение чувствительности акселерометра. Следовательно, легкие акселерометры с широким рабочим частотным диапазоном менее чувствительны, чем более тяжелые акселерометры. Наоборот, высокочувствительные акселерометры обладают ограниченным верхним рабочим частотным диапазоном и не могут применяться в области высоких частот.

Пьезоэлектрический акселерометр, подвергаемый воздействию механических колебаний с превышающими верхний предел рабочего динамического диапазона амплитудами, постепенно теряет характер линейного датчика и становится нелинейным.

В качестве верхнего предела рабочего диапазона частот акселерометра можно использовать различные значения, связанные с определенными отклонениями получаемых в результате измерений значений амплитуды от действительных значений амплитуды механических колебаний.

При заявлении частотных характеристик датчика производитель, как правило, следует следующему принципу декларирования рабочих диапазонов частот датчика:

- предел 5% – определен частотой, на которой относительное отклонение получаемого в результате измерения значения амплитуды от действительного значения амплитуды воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 5%. С погрешностью не более 5% рекомендуется измерять механические колебания с частотами, меньшими приблизительно деленного на 5 (коэффициент умножения 0,22) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра;
- предел 10% – определен частотой, на которой относительное

отклонение получаемого в результате измерения значения амплитуды от действительного значения амплитуды воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 10%. С погрешностью до 10% рекомендуется измерять механические колебания с частотами, меньшими приблизительно деленного на 3 (коэффициент умножения 0,3) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра;

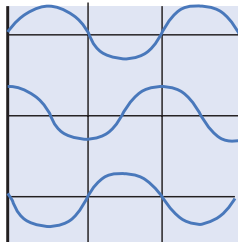
- предел 3 дБ – определен частотой, на которой разность получаемого в результате измерения значения уровня и действительного значения уровня воздействующих на акселерометр механических колебаний составляет 3 дБ. С погрешностью до 3 дБ рекомендуется измерять механические колебания с частотами, меньшими деленного приблизительно на 2 (коэффициент умножения 0,54) значения резонансной частоты закрепленного акселерометра.

Пьезоэлектрические акселерометры являются преобразователями, чувствительные элементы которых генерируют электрический заряд лишь под действием динамических сил. Это означает, что акселерометры не могут измерять механические колебания с частотами близкими к 0 Гц. Параметрами используемого чувствительного элемента определяется и спад АЧХ в области НЧ.

Все вышеописанное характерно для амплитудно-частотной характеристики. Чем же обусловлена нелинейность ФЧХ?

Согласно теории механических колебаний, графиком смещения (перемещения) тела, испытывающего гармонические колебания, является синусоида. Когда смещение максимально, скорость равна нулю, так как в этом положении происходит изменение направления движения тела. Отсюда следует, что временная реализация скорости будет сдвинута

по фазе на 90 градусов влево относительно временной реализации смещения. Другими словами, скорость опережает по фазе смещение на 90 градусов. Ускорение – это скорость изменения скорости, следовательно, ускорение объекта, испытывающего гармонические колебания равно нулю, когда скорость максимальна. И наоборот, когда скорость равна нулю, ускорение максимально (скорость изменяется наиболее быстро в этот момент). Таким образом, ускорение опережает по фазе скорость на 90 градусов. Эти соотношения приведены на рис. 5.



Каждый график сдвинут по фазе на 90 градусов

Рис. 5. Графики смещения виброперемещения, виброскорости и виброускорения

На практике, для акселерометров сдвиг фазы соответствует времени задержки между воздействующими на него механическими колебаниями и генерируемым им электрическим сигналом. В случае, если сдвиг фазы изменяется с частотой, то фазовые соотношения между отдельными

составляющими механических колебаний нарушаются и генерируемый акселерометром электрический сигнал искажен и не отображает точно форму волны действующих механических колебаний.

На рис. 6 показаны идеализированные кривые АЧХ и ФЧХ пьезоэлектрического акселерометра.

В «до резонансной» зоне (частота возбуждающей силы меньше собственной частоты) сдвига фаз между колебаниями чувствительного элемента акселерометра и возбуждающей силы нет. Акселерометр движется с частотой возбуждающей силы.

На частотах, близких к частоте резонанса закрепленного акселерометра, движение сейсмических масс запаздывает за движением основания акселерометра и, следовательно, фазовое искажение увеличивается.

При резонансе колебания системы сдвинуты по фазе на 90 градусов относительно колебаний возбуждающей силы.

В зоне после резонанса колебания системы и возбуждающей силы находятся в противофазе (сдвинуты относительно друг друга на 180 градусов). Резонансные усиления амплитуды отсутствуют. При дальнейшем увеличении частоты возбуждения амплитуда вибрации снижается, однако разность фаз

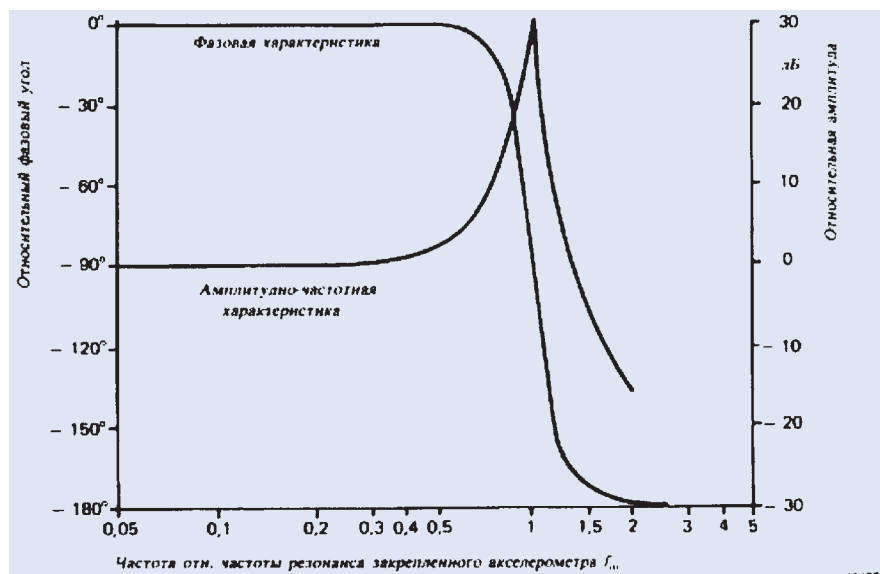


Рис. 6. Типовые графики АЧХ и ФЧХ акселерометра

в 180 градусов сохраняется для всех частот выше резонансной.

При эксплуатации виброметрической аппаратуры необходимо также учитывать фазовую характеристику используемых вместе с акселерометрами преусилителей, т. е. усилителей заряда или напряжения. Особое внимание нужно уделять применению аппаратуры, снабженной электронными интеграторами и/или фильтрами. Вопросы, связанные с фазовой характеристикой и фазовым искажением, особенно важны при исследованиях кратковременных механических колебаний и механических ударов.

Итак, ФЧХ также накладывает свой отпечаток на ограничение рабочего диапазона частот, если необходима жесткая синхронизация производственных процессов во времени.

Таким образом, производитель вынужден выбирать между двумя крайностями:

- желанием увеличить чувствительность датчика, перекрывая тем самым низкочастотную область, но получая, как правило, датчик с высокой массой и низкой верхней границей рабочей частотной области;
- желанием изготовить датчик с широким линейным рабочим

диапазоном, высокой резонансной частотой, низкой массой, миниатюрными размерами и, как следствие этого, низкими удельными затратами на производство единицы продукции.

Пытаясь совместить все вышеперечисленное, физические принципы построения колебательных систем и технические возможности, производитель получает некий субпродукт, с широкой (обрезанной на склонах спада и подъема) рабочей частотной областью. При этом потребителю навязывается некая схема распределения погрешности (неопределенности) в этом диапазоне.

Добросовестные производители, стремясь охватить максимально большой частотный диапазон, выпускают большую номенклатуру продукции, рассчитанную на перекрытие частотного диапазона двумя – тремя датчиками. Соответственно, потребитель вынужден покупать несколько типов датчиков для своих нужд, увеличивать количество точек крепления, усложняя тем самым обслуживаемое оборудование, увеличивая число линий связи и, как следствие, увеличивая количество каналов измеряющей и контролирующей аппаратуры.

Помимо сложностей технического характера, связанных с разработкой

и производством датчиков вибрации, не следует забывать и о факторах сопутствующих применению уже готовых датчиков в процессе их эксплуатации. На характеристику установленного датчика может повлиять довольно обширный перечень внешних факторов, начиная от изменения температурного режима и заканчивая способом крепления его на рабочую поверхность (сотрудники фирмы «PCB Piezotronics, Inc», США, например, проводят демонстрацию, как значительно изменяется АЧХ датчика при попадании между монтажной поверхностью датчика и вибрирующей поверхностью, обычного человеческого волоса).

В настоящее время весьма бурно развивается микропроцессорная техника, TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) – технологии, способы практически мгновенной обработки и переработки поступающей от первичного преобразователя информации. В связи с чем представляется возможным, применив некий алгоритм и имея точное представление об АЧХ закрепленного датчика в конкретных условиях, восстановить выходной переменный сигнал путем коррекции динамических характеристик используемого датчика без внесения в его физическую структуру каких-то бы ни было изменений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Основы измерения вибрации. По материалам фирмы DLI (под редакцией Смирнова В. А.) Дата принятия 15.11.2012*
2. *Леонтьев М. К. Виброметрирование авиационных ГТД. – М.: Издательство МАИ. – 1998.*
3. *Серридж М. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и преусилителям. – 1997.*

