

Примеры применения

Тенденции в градуировке акселерометров

(Перевод статьи, опубликованной в журнале «Технический обзор»
фирмы Брюль и Кьер, № 2, 1987 г., стр. 23 - 42)

Торбен Р. Лихт
Хенрик Андерсен
Брюль и Кьер

Аннотация

В данной статье обсуждаются вопросы точности и потребительских качеств различных методов градуировки акселерометров: методом лазерной интерферометрии, традиционными методами сравнения и методом сравнения с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Обозначения

U_r	случайная погрешность
U_s	систематическая погрешность
U_c	погрешность метода сравнения
U_t	общая погрешность
n	число измерений
x_i	значение измеряемой величины
$\bar{x}$	среднее значение измеряемой величины
s	стандартное отклонение
$\sigma(\text{est})$	оценка стандартного отклонения
t	коэффициент Стьюдента
K	коэффициент нормального распределения
a_{ii}, e_{ii}	односторонние пределы систематической составляющей погрешности
λ	длина волны излучения лазера
R_f	число полос за период
ω	угловая частота
X_0, X	амплитуды перемещения
A_0, A	амплитуды ускорения
S	чувствительность по заряду
H	передаточная функция в зависимости от частоты (частотная характеристика))

Введение

Успехи в создании конструкций и машин в последние годы привели к возникновению новых проблем в области виброметрии. Необходимость точного измерения ударов и механических колебаний стала чрезвычайно важной. Соответственно, предпринимались значительные усилия в областях оптимизации конструкции вибропреобразователей и уточнения методов их градуировки.

Данная статья посвящена методам динамической градуировки пьезоэлектрических акселерометров. Этот тип вибродатчиков стал чрезвычайно популярным благодаря присущему им высокому отношению чувствительности к собственной массе и благодаря малой чувствительности к условиям внешней среды. Кроме того, пьезоэлектрические

акселерометры обладают широкими динамическими и частотными диапазонами, соответствующими параметрам современной измерительной и анализирующей аппаратуры.

В общем случае, градуировка охватывает процедуры определения всех рабочих характеристик преобразователя, которые влияют на точность осуществляемых с его помощью измерений. Даже в том случае, когда характеристики преобразователя мало изменяются или вообще не изменяются с течением времени, а также под воздействием внешних условий, практика качественных измерений и, часто, юридические требования заставляют пользователей пьезоэлектрических акселерометров подтверждать результаты заводской градуировки и проводить повторную градуировку преобразователей через заданные интервалы времени.

Под повторной градуировкой пьезоэлектрических акселерометров обычно понимают определение чувствительности в направлении главной оси на заданной частоте в сочетании с измерением частотной характеристики с целью проверки общего состояния датчика.

В соответствии со сказанным, настоящая статья касается тенденций в методах определения чувствительности и частотной характеристики пьезоэлектрических акселерометров.

В статье рассматривается абсолютный метод градуировки с использованием лазерного интерферометра и два метода сравнения, один - с использованием гармонического возбуждения и второй с использованием случайного возбуждения. Методы сравниваются по точности градуировки и потребительским характеристикам.

Классификация методов градуировки

Чувствительность в направлении главной оси акселерометра определяется методом абсолютной градуировки или методом сравнения.

Градуировка абсолютным методом предполагает, что чувствительность акселерометра определяется путем измерений с использованием основных и производных единиц физических величин, входящих в формулу измерений.

В настоящее время наиболее удобным методом абсолютной градуировки является лазерная интерферометрия. В

связи с появлением лазеров градуировка методом взаимности применяется все реже, поскольку этот метод является весьма сложным и требует очень тщательных измерений с целью получения удовлетворительных результатов.

Градуировка методом сравнения предполагает, что чувствительность поверяемого акселерометра определяется путем сравнения с известной чувствительностью стандартного образцового преобразователя (СОП).

По сравнению с абсолютным методом градуировки при помощи лазерного интерферометра, градуировка методом сравнения проще в реализации и требует менее сложной и дорогостоящей аппаратуры. Поэтому градуировка мето-

дом сравнения является весьма привлекательным методом для среднего пользователя акселерометров, в то время как абсолютный метод градуировки обычно применяется в международных и национальных институтах стандартов и ведущих поверочных лабораториях промышленности.

Точность градуировки, разумеется, зависит от используемого метода. Поскольку градуировка методом сравнения требует использования образцового акселерометра, проградуированного абсолютным методом, точность градуировки методом сравнения будет во всех случаях ниже точности градуировки используемого СОП.

Международная поверочная схема (иерархия градуировки); прослеживаемая связь с первичными эталонами

Чтобы избежать необходимости выполнения градуировки абсолютным методом всех акселерометров общего применения, установлена иерархия образцовых преобразователей - акселерометров, используемых для градуировки.

Как показано на рис. 1, образцовые преобразователи подразделяются на три группы:

Первичные образцовые преобразователи градуируются абсолютным методом. Они хранятся в международных и национальных институтах стандартов или в поверочных лабораториях, где они подвергались градуировке.

Образцовые преобразователи — эталоны сравнения градуируются методом сравнения или абсолютным методом в вышеупомянутых институтах или лабораториях.

Посредством взаимного обмена и повторной градуировки образцовых преобразователей - эталонов сравнения между международными и национальными институтами стандартов обеспечивается нужная согласованность и совместимость.

Путем взаимного обмена и повторной градуировки образцовых преобразователей - эталонов сравнения между институтами стандартов и различными поверочными лабораториями обеспечивается воспроизводимость выполняемых последними градуировок. Чтобы установить прослеживаемую связь с определенным институтом или с определенными институтами стандартов, градуируемые в поверочных лабораториях образцовые преобразователи используются в качестве эталонов сравнения с размером единицы, полученным от эталонов этого института или этих институтов.

Рабочие стандартные образцовые преобразователи используются для осуществляемой методом сравнения градуировки акселерометров общего применения, т.е. акселерометров, используемых при практических измерениях механических колебаний.

Рабочие СОП градуируются в институтах стандартов или поверочных лабораториях с использованием абсолютного метода или метода сравнения.

Рабочие СОП поверяются при помощи образцовых преобразователей - эталонов сравнения. Этим путем обеспечивается согласованность и, следовательно, прослеживаемая связь и воспроизводимость результатов измерений вибродатчиками общего применения.

Погрешность градуировки

Важно отметить, что прослеживаемая связь с эталонами только предполагает близость друг к другу результатов градуировок, выполненных в соответствующем институте или институтах стандартов и, таким образом, предполагает лишь то, что результаты градуировок находятся в пределах допуска.

Это означает, что если поверочная лаборатория имеет более точные средства измерений или более совершенное

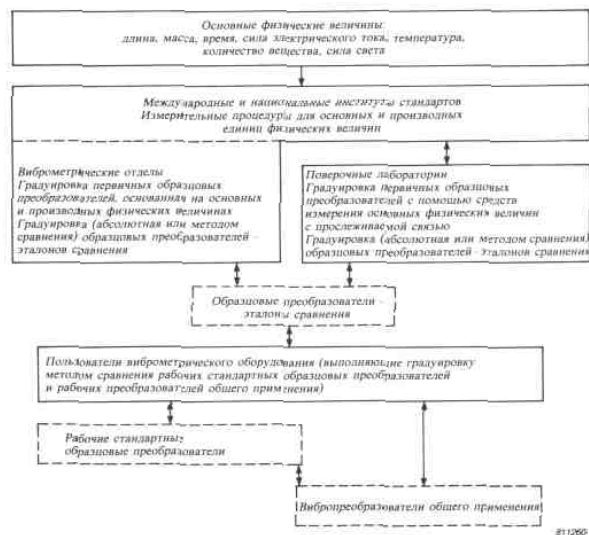
поверочное оборудование (методы проверки) чем институт стандартов, к эталонам которого установлена прослеживаемая связь, то погрешность градуировки, выполненной в поверочной лаборатории будет меньше, чем погрешность градуировки, выполненной в институте стандартов.

Для оценки точности различных методов градуировки необходима единая методика расчета погрешности градуировки. В этой статье будет использован метод, описанный в публикации В 3003 Британской поверочной службы.

Упомянутая публикация описывает метод определения единственного ($\pm$) значения погрешности градуировки с указанием доверительного уровня в терминах вероятности нахождения истинного значения результата внутри установленных пределов ($\pm$).

Для практического удобства составляющие погрешности градуировки разделены на случайные и систематические.

Рис. 1. Иерархия градуировки



Случайная составляющая (U_T) проявляется как вариация результатов наблюдений, когда измерения проводятся по существу в одних и тех же условиях некоторое число раз. Малые независимые случайные факторы, вызывающие эту вариацию, определяют ее количественно как случайную погрешность измерений.

При повторении измерений большое число раз (n) средние значения для арифметического среднего $\bar{x}$ и стандартного отклонения s результатов наблюдений обычно распреде-

лены согласно нормальному распределению вероятностей, охватывая распределение всех возможных результатов по вторяющимся измерениям.

В случае ограниченного числа измерений оценка $\sigma(\text{est})$ стандартного отклонения распределения вероятностей всей совокупности может быть определена из соотношения

$$\sigma^2(\text{est}) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

где X_j - значения индивидуальных результатов и $\bar{x}$ - среднее значение результатов измерений.

Предел случайной погрешности ($\pm U_r$) для оценки среднего значения $\bar{x}$, охватывающий среднее значение по совокупности результатов наблюдений, при заданном доверительном уровне (ДУ) может быть определен с использованием $a(\text{est})$ как

$$U_r = t \left[\frac{\sigma(\text{est})}{\sqrt{n}} \right] \quad (2)$$

где t - коэффициент Стьюдента, соответствующий числу наблюдений, учтенных в оценке $\sigma(\text{est})$, и заданному доверительному уровню, а n - число наблюдений измеряемой величины.

Систематическая погрешность (U_s) определяется составляющими, которые имеют неизменные, но точно не известные значения, во время проведения измерений.

Составляющие систематической погрешности определяют-

ся коэффициентами формулы измерений при градуировке, измерительной аппаратурой, методикой градуировки и параметрами градуируемых датчиков.

Часто сведения о природе упомянутых составляющих настолько ограничены, что им приписывается равномерное распределение вероятностей в диапазоне $\pm \sigma$.

Когда происходит композиция составляющих погрешностей с произвольной формой законов распределения, распределение плотности вероятности композиции приближается к нормальному, т.е. к распределению Гаусса. При использовании пределов a_j для пределов погрешностей, охватывающий среднее по совокупности предел систематической погрешности ($\pm U_s$) выборочного среднего $\bar{x}$ вычисляются по формуле

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (3)$$

где K - коэффициент нормального распределения, соответствующий заданному доверительному уровню.

Единственное значение общей погрешности определяется по

$$U_t = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} \quad (4)$$

Результат градуировки представляют в виде

$$\bar{x} \pm U_t \quad (5)$$

с указанием присущего оценке доверительного уровня. формуле

Градуировка с использованием лазерной интерферометрии

Типовая система для градуировки вибродатчиков интерференционным методом показана на рис. 2. Используемые принципы описаны в различных статьях [2, 3, 4, 5, 6] и включены в рекомендацию ИСО 5347. Все они основаны на чрезвычайно стабильной и хорошо известной длине волны излучения лазера (Л).

Три различных метода используются для получения информации на основе сигнала от фотодиода интерферометра Майкельсона. Простейший из них применяется в диапазоне частот ниже 1000 Гц. Он основан на подсчете числа изменений интенсивности сигнала за период механических колебаний R_f . Этот метод также называют методом «счета интерференционных полос».

Легко показать, что амплитуда перемещения механических колебаний определена выражением

$$X_o = R_f \cdot \frac{\lambda}{8} \quad (6)$$

Для синусоидальных механических колебаний с угловой частотой ω , для которых перемещение описывается зави-

$$X = X_o \sin \omega t \quad (7)$$

ускорение задается выражением

$$A = -\omega^2 X_o \sin \omega t = -A_o \sin \omega t \quad (8)$$

симостью

На основе этого выражения можно определить значение амплитуды ускорения

$$A_o = \omega^2 X_o = \omega^2 \cdot R_f \cdot \frac{\lambda}{8} \quad (9)$$

Отсюда следует, что необходимо учитывать погрешности счета полос и определения частоты механических колебаний. Из представленной на рис. 2 системы видно, что необходимо принимать во внимание погрешности вольтметра и усилителя заряда. Кроме того необходимо учитывать угловые колебания преобразователя во время цикла вибрации, поперечную составляющую вибрации, искажения гармонического движения и влияние температуры. С учетом этих факторов можно оценить погрешность метода.

Оценки погрешностей, относящиеся к осуществляемой на частоте 160 Гц градуировке эталонного акселерометра 8305 фирмы Брюль и Кьер, приведены в таблице 1.

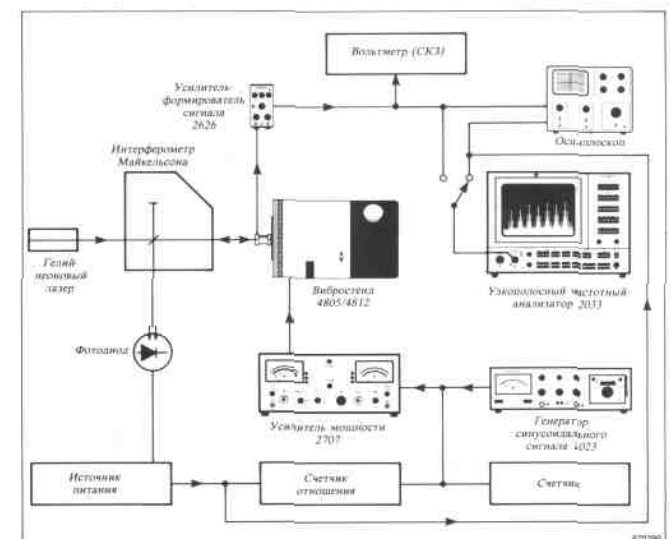


Рис. 2. Система для градуировки методом лазерной интерферометрии

e_1	Вольтметр + усилитель заряда	$\pm 0,08 \%$
e_2	Счетчик $\times 2$	$\pm 0,002 \%$
e_3	Счет полос (R_f)	$\pm 0,02 \%$
e_4	Нелинейность	$\pm 0,1 \%$
e_5	Угловые колебания	$\pm 0,2 \%$
e_6	Температура	$\pm 0,1 \%$
e_7	Поперечная составляющая (макс. 5%)	$\pm 0,1 \%$
σ	Оценка стандартного отклонения (для 3 измерений)	$\pm 0,02 \%$

Таблица 1. Погрешности осуществляемой методом лазерной интерферометрии градуировки эталонного акселерометра 8305 фирмы Брюль и Кьер на частоте 160 Гц

Случайная составляющая погрешности для доверительного уровня 99% определяется по формуле (2) при $n = 3$, $t = 9,92$ и a из последней строки таблицы 1. Следовательно,

$$U_r = 0,12\% \quad (10)$$

Систематическая составляющая погрешности определяется по формуле (3) с использованием табличных значений и $K = 2,58$ (доверительный уровень 99%), т.е.

Простой метод сравнительной градуировки с установкой одного акселерометра на другой

Система для простой градуировки методом сравнения показана на рис. 3. Компаратор чувствительности 2970 фирмы Брюль и Кьер, представляющий собой дифференциальный усилитель, заложен в основу системы на рис. 3. Однако, иногда применяются более простые системы, содержащие переключатель каналов и вольтметр.

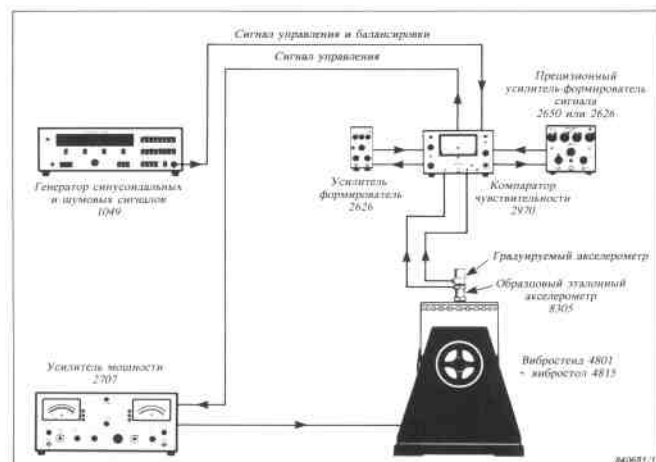


Рис. 3. Простая система для градуировки методом сравнения

Система может быть предварительно сбалансирована путем приложения одинакового заряда на входы обоих каналов (при помощи генератора и двух согласованных конденсаторов).

Чувствительность градуируемого акселерометра определяется путем изменения настройки прецизионного усилителя-формирователя сигнала. Когда достигается минимальное показание измерительного прибора компаратора чувствительности градуируемого акселерометра может быть непосредственно определена по положениям переключателей прецизионного усилителя-формирователя сигнала.

$$U_s = \frac{2,58}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2 + e_7^2} = 0,42\% \quad (11)$$

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} = 0,44\% \quad (12)$$

Следовательно, общая погрешность составляет

Международные градуировки методом круговых сличений показали, что погрешности, вычисленные в соответствии с описанными принципами, находятся в хорошем соответствии с наблюдаемыми отклонениями и подтверждают, что более консервативные методы определения погрешностей, например, принцип непосредственного сложения составляющих, не могут быть оправданы.

Градуировка методами сравнения

Градуировка методом сравнения с установкой одного акселерометра на другой заключается в том, что два акселерометра подвергают одним и тем же синусоидальным механическим колебаниям и сравнивают их выходные сигналы. Чувствительность одного акселерометра может быть определена, если точно известна чувствительность другого акселерометра.

В таблице 2 представлены погрешности системы.

Систематическая составляющая погрешности может быть определена по выражению (3), т.е.

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_6^2} \quad (13)$$

С учетом доверительного уровня 99% и $K = 2,58$ получаем

$$U_s = 0,71\% \quad (14)$$

e_1	Вариация выходного сигнала датчика 8305, связанная с поперечными составляющими вибрации (макс. 3%)	$\pm 0,06\%$
e_2	Погрешность от поперечной чувствительности поверяемого акселерометра	$\pm 0,15\%$
e_3	Погрешность коэффициента преобразования датчика 8305, связанная с отклонениями температуры от температуры, при которой производилась первоначальная градуировка на $\pm 3^\circ\text{C}$	$\pm 0,1\%$
e_4	Вариация коэффициента преобразования поверяемого акселерометра, связанная вариацией температуры на $\pm 3^\circ\text{C}$	$\pm 0,3\%$
e_5	Погрешность установки коэффициента преобразования 2650	$\pm 0,1\%$
e_6	Погрешность балансировки двух входных сигналов при помощи компаратора 2970	$\pm 0,3\%$
e_7	Погрешность градуировки преобразователя 8305 при коэффициенте доверия 99%	$\pm 0,6\%$
σ	Оценка стандартного отклонения по 10 измерениям	$\pm 0,13$

T013708U0

Таблица 2. Погрешности простой градуировки методом сравнения с установкой одного акселерометра на другой на частоте 160 Гц

Стандартное отклонение, приведенное в таблице 2, получено по результатам 10 измерений. Известно, что при доверительном уровне 99% для этого случая t равно 3,25. Таким образом, когда выполняется только одно измерение, используют ранее полученную оценку для a (est) и оценивают случайную погрешность по формуле (2)

$$U_r = 3,25 \cdot \frac{0,13}{\sqrt{1}} = 0,42\% \tag{15}$$

Отсюда погрешность сравнения

$$U_c = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} = 0,82\% \tag{16}$$

Градуировка методом сравнения с установкой одного акселерометра на другой и с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ)

Современные технические средства анализа сигналов открыли возможность расширить область точной градуировки методом сравнения с установкой одного преобразователя на другой на широкий частотный диапазон без существенного увеличения, занимаемого градуировкой времени. Одновременно, в течение последних нескольких лет возросли требования к более тщательному документированию результатов градуировки.

Для того чтобы удовлетворить этим требованиям, была создана эффективная система, показанная на рис. 4. Двухканальный анализатор сигналов 2032 или 2034 фирмы Брюль и Кьер выполняет сравнение на 800 частотах и обеспечивает возбуждающий сигнал случайного характера, перекрывающий все эти частоты.

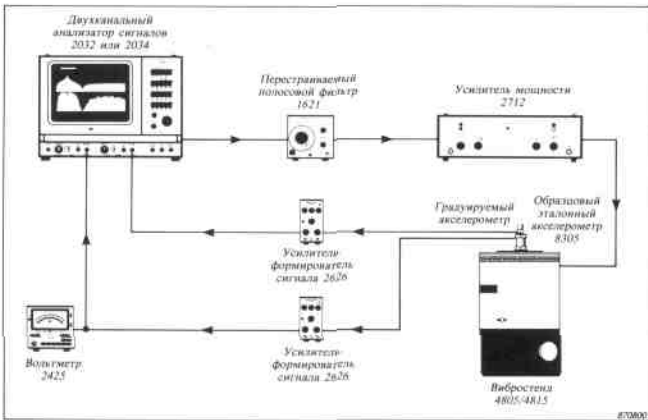


Рис. 4. Система для градуировки методом сравнения с установкой одного акселерометра на другой и с использованием БПФ при случайном возбуждении

Рис. 5 показывает принцип и формулу для определения чувствительности градуируемого акселерометра. Чувствительность теперь является функцией частоты f .

- $S_u(f)$ чувствительность по заряду градуируемого акселерометра
- $S_r(f)$ чувствительность по заряду образцового акселерометра
- $H(f)$ относительная частотная характеристика (показание анализатора)
- $Y_A(f)$ частотная характеристика усилителя-формирователя сигнала в канале А
- $H_B(f)$ частотная характеристика усилителя-формирователя сигнала в канале Б

Общая погрешность теперь может быть определена путем включения погрешности градуировки образцового акселерометра (e), т.е.

$$U_t = \sqrt{U_c^2 + e^2} = 1,02\% \tag{17}$$

Полученный результат относится к доверительному уровню 99%.

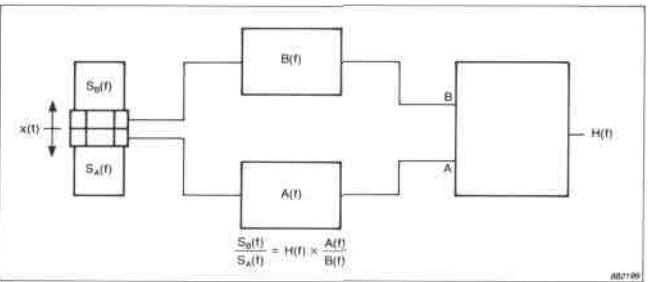


Рис. 5. Иллюстрация принципа градуировки методом сравнения с использованием быстрого преобразования Фурье

При применении системы в простейшем прямом виде и при правильном выборе динамического диапазона анализатора можно определить результирующую погрешность градуировки одного стандартного образцового преобразователя по другому на частоте 160 Гц, используя оценки составляющих погрешностей, приведенные в таблице 3.

e_1	Двухканальный анализатор 2032. Предельная погрешность	$\pm 3,1\%$
e_2	Усилитель заряда 2626 (канал А). Предельная погрешность	$\pm 0,5\%$
e_3	Усилитель заряда 2626 (канал Б). Предельная погрешность	$\pm 0,5\%$
e_4	Погрешность коэффициента преобразования стандартного образцового преобразователя 8305, связанная с вариацией температуры в диапазоне $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$	$\pm 0,1\%$
e_5	Измерительный преобразователь 8305. Погрешность, связанная с поперечными составляющими вибрации (макс. 10%)	$\pm 0,2\%$
e_6	Сигнал с поверяемого акселерометра. Погрешность связанная с поперечными составляющими вибрации (макс. 10%). Относительный коэффициент влияния поперечных ускорений макс. 2%	$\pm 0,2\%$
e_7	Сигнал с поверяемого акселерометра. Погрешность связанная с отличием температуры поверяемого акселерометра от комнатной ($\pm 3^\circ\text{C}$)	$\pm 0,1\%$
e_8	Погрешность градуировки образцового преобразователя 8305 (коэф. доверия 99%)	$\pm 0,6\%$
σ	Оценка стандартного отклонения по результатам 10 измерений	$\pm 0,1\%$

Таблица 3. Погрешности простой градуировки методом сравнения с использованием БПФ (два эталонных акселерометра 8305 фирмы Брюль и Кьер на частоте 160 Гц)

Систематическая составляющая погрешности получается из выражения (3). Следовательно, при доверительном уровне 99%

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2 + e_7^2} = 4,8\% \quad (18)$$

Случайная составляющая погрешности для одного измерения ($n = 1$) и доверительного уровня 99% равна

$$U_r = 0,33\% \quad (19)$$

Погрешность сравнения при $n = 1$ и доверительном уровне 99% равна

$$U_c = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} = 4,81\% \quad (20)$$

Следовательно, общая погрешность градуировки методом сравнения (доверительный уровень 99%) равна

$$U_t = \sqrt{U_c^2 + e_8^2} = 4,85\% \quad (21)$$

Несмотря на то, что погрешность порядка 5% является вполне удовлетворительной в большинстве случаев, часто становится желательным повысить точность. Для реализации этой задачи будут представлены два метода авто коррекций.

Усовершенствованный метод градуировки с использованием БПФ и переключения

После проведения однократного измерения по описанной выше методике, второе измерение проводится по той же схеме, но с переключением кабелей, соединяющих градуируемый и образцовый преобразователи с соответствующими предусилителями. Это позволяет исключить преобладающую часть составляющих систематической погрешности градуировки.

Обозначив соответствующие частотные характеристики $H_{u/r}(f)$ и $H_{r/u}(f)$, можно написать

$$\frac{S_u(f)}{S_r(f)} = H_{u/r}(f) \cdot \frac{H_A(f)}{H_B(f)} \quad (22)$$

и при переключении

$$\frac{S_r(f)}{S_u(f)} = H_{r/u}(f) \cdot \frac{H_A(f)}{H_B(f)} \quad (23)$$

Таким образом,

$$\frac{S_u(f)}{S_r(f)} = \sqrt{\frac{H_{u/r}(f)}{H_{r/u}(f)}} \text{ или } S_u(f) = S_r(f) \cdot \sqrt{\frac{H_{u/r}(f)}{H_{r/u}(f)}} \quad (24)$$

Погрешности для этого случая приводятся в таблице 4.

Предполагая, что поперечные составляющие вибрации и температура не изменяются между двумя измерениями, можно вычислить систематическую погрешность

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot e_1\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot e_1\right)^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2} \quad (25)$$

$$U_s = \frac{2,58}{\sqrt{3}} \cdot 0,324\% = 0,48\% \quad (26)$$

Составляющие, равные $1/2 e_{10}$ связаны с двумя функциями H в формуле (24), а коэффициент $1/2$ связан с тем, что эти составляющие находятся под знаком корня, что следует из отнесенного к средним значениям x_i разложения вида

$$Y(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx Y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \left[\frac{\partial Y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial Y}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial Y}{\partial x_n} \Delta x_n \right] \quad (27)$$

e_1	Двухканальный анализатор 2032 (разрешение по амплитуде) Предельная погрешность	$\pm 0,1\%$
e_2	Стандартный акселерометр 8305. Погрешность связанная с вариацией температуры в диапазоне $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$	$\pm 0,1\%$
e_3	Стандартный акселерометр 8305. Погрешность, обусловленная поперечными компонентами вибрации (макс. 10%)	$\pm 0,2\%$
e_4	Сигнал поверяемого акселерометра. Погрешность, обусловленная поперечными компонентами вибрации (макс. 10%)	$\pm 0,2\%$
e_5	Сигнал поверяемого акселерометра. Погрешность связанная с отличием температуры поверяемого акселерометра от комнатной ($\pm 3^\circ\text{C}$)	$\pm 0,1\%$
e_6	Погрешность, связанная с чувствительностью вспомогательного акселерометра к поперечным компонентам вибрации и вариацией поперечной компоненты (макс. 5%)	$\pm 0,1\%$
σ	Оценка стандартного отклонения, полученная по результатам 10 последовательных измерений функции H	$\pm 0,1\%$

Таблица 4. Погрешности градуировки методом сравнения с использованием БПФ и переключения (два эталонных акселерометра 8305 фирмы Брюль и Кьер на частоте 160 Гц)

Это с учетом случайной природы отдельных составляющих приводит к выражению

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (28)$$

где $0 \cdot j^2$ является вариацией переменной X_j [8].

Аналогично, для случайной погрешности с учетом доверительного уровня 99% можно написать

$$U_r = \frac{3,25}{\sqrt{1}} \sqrt{\left(\frac{1}{2} \sigma\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sigma\right)^2} = 0,23\% \quad (29)$$

$$U_c = \sqrt{0,48^2 + 0,23^2} = 0,53\% \quad (30)$$

Отсюда погрешность сравнения составит

Следовательно, общая погрешность (при доверительном уровне 99%) равна

$$U_t = \sqrt{0,53^2 + 0,6^2} = 0,8\% \quad (31)$$

Усовершенствованный метод градуировки с использованием БПФ и замещения

Данный метод также основан на двух последовательных измерениях. Однако, один из преобразователей (эталонный акселерометр) остается прикрепленным к вибростенду, в то время как градуируемый и образцовый акселерометры градуируются по нему с использованием метода сравнения как это показано на рис. 6.

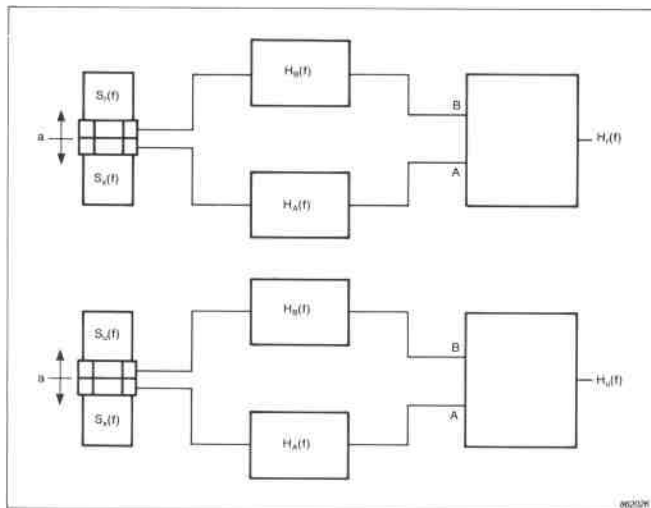


Рис. 6. Иллюстрация принципа градуировки методом сравнения с использованием быстрого преобразования Фурье и замещения

Очевидно, что

$$\frac{S_u(f)}{S_x(f)} \cdot \frac{S_x(f)}{S_r(f)} = \frac{S_u(f)}{S_r(f)} = \frac{H_u(f)}{H_r(f)}$$

$$\text{или } S_u(f) = S_r(f) \cdot \frac{H_u(f)}{H_r(f)} \quad (32)$$

Здесь

$S_u(f)$ = чувствительность по заряду градуируемого акселерометра

$S_x(f)$ = чувствительность по заряду эталонного (образцового) акселерометра

$S_r(f)$ = чувствительность по заряду вспомогательного акселерометра

$H_u(f)$ = частотная характеристика градуируемого акселерометра, отнесенная ко вспомогательному акселерометру

$H_r(f)$ = частотная характеристика образцового акселерометра, отнесенная ко вспомогательному акселерометру

Заключение

В данной статье показано, что методы с авто коррекцией в сочетании с техникой современного аппаратного анализа позволяют повысить точность градуировки современным методом сравнения так, что они становятся лучше или не уступают классическим методам сравнения. Если градуировка стандартного образцового акселерометра выполняется в более широком частотном диапазоне и используются прогрессивные типы вибростендов, крепежных приспособлений и аппаратуры, то с использованием метода замещения можно реализовать точную и высоко-

e_1	Двухканальный анализатор 2032 (разрешение по амплитуде). Предельная погрешность	$\pm 0,1\%$
e_2	Стандартный акселерометр 8305. Погрешность коэффициента преобразования, связанная с изменением температуры в диапазоне $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$	$\pm 0,1\%$
e_3	Стандартный акселерометр 8305. Погрешность связанная с поперечной компонентой вибрации (макс. 10%)	$\pm 0,2\%$
e_4	Сигнал поверяемого акселерометра. Погрешность связанная с поперечной компонентой вибрации (макс. 10%)	$\pm 0,2\%$
e_5	Сигнал поверяемого акселерометра. Погрешность связанная с отклонением температуры поверяемого акселерометра от комнатной ($\pm 3^\circ\text{C}$)	$\pm 0,1\%$
σ	Оценка стандартного отклонения по результатам 10 измерений	$\pm 0,1\%$

Таблица 5. Погрешности градуировки методом сравнения с использованием БПФ и замещения (два эталонных акселерометра 8305 фирмы Брюль и Кьер на частоте 160 Гц)

Составляющие погрешности приведены в таблице 5.

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2}$$

$$\frac{2,58}{\sqrt{3}} \cdot 0,36 = 0,54\%$$

$$(\text{доверительный уровень } 99\%) \quad (33)$$

$$U_r = \frac{3,25}{\sqrt{1}} \cdot \sqrt{\sigma^2 + \sigma^2} = 0,46\%$$

$$(\text{доверительный уровень } 99\%) \quad (34)$$

$$U_c = \sqrt{0,54^2 + 0,46^2} = 0,71\%$$

$$(\text{доверительный уровень } 99\%) \quad (35)$$

$$U_t = \sqrt{0,71^2 + 0,6^2} = 0,93\% \quad (\text{доверительный уровень } 99\%) \quad (36)$$

Следуя указанным выше правилам, имеем

производительную градуировку акселерометров в частотном диапазоне от 5 Гц до 5 КГц. При использовании вычислительной машины для управления системой и обработки информации может быть создана чрезвычайно мощная система поверки акселерометров.

Для того чтобы подтвердить справедливость использования градуировки методом сравнения с переключением и замещением было проведено сравнение результатов с результатами градуировки с использованием лазерного ин-

интерферометра на шести различных частотах в диапазоне от 100 Гц до 650 Гц. При сличении использовались два эталонных акселерометра 8305 фирмы Брюль и Кьер.

Было обнаружено, что максимальное отклонение между тремя различными измерениями составило около 0,1%. Градуировки методом сравнения проводились в тщательно контролируемых лабораторных условиях и предпринимались все меры для исключения промахов.

В течение восьми месяцев было выполнено большое количество градуировок акселерометров с использованием метода сравнения с замещением. Измерения проводились в широком диапазоне параметров внешних условий, а также после транспортировки оборудования по земле и по воздуху [9]. Результаты этих градуировок согласуются с погрешностями, приведенными в данной работе.

Литература

- [1] НМАС Национальная служба стандартизации измерений. *Выражения для оценки погрешности электроизмерений*. В 3003 четвертый выпуск апрель, 1986г.
- [2] Хохман, П. *Измерения механических колебаний с лазерными интерферометрами для градуировки вибродатчиков*. Журнал Акустика, т. 26 (1972г.), с 122 -136
- [3] Хохман, П. и Мартин, Р. *Градуировка образцового вибродатчика - эталона сравнения*. Физико-технический институт ФРГ, Труды Союза германских инженеров № 135 (1969г.)
- [4] Дефerrари, Х.А., *Измерения вибрационных перемещений и фазовых изменений с использованием лазерного интерферометра*. Журнал акустического общества Америки, том 52, 5, с. 982 (1967г.)
- [5] Актли, Р.А. и Лог, С.Х. *Лазерный интерферометр и его применение для измерения амплитуды вибраций*, Институт измерительных приборов (1967 г.), Труды, с. 235-240
- [6] Лихт, Т. Брюль и Кьер, Технический обзор № 1, 1971г.
- [7] ИСО Международная организация по стандартам, ИСО 5347, *Методы градуировки датчиков вибрации и удара*
- [8] Ханнеман, Х.В. *Систематические и случайные погрешности, связанные допусками на элементы электрических схем*, Исследовательские сообщения фирмы Филипс, Эйндховен с. 414-423, 1971г.
- [9] Шоенталь, Е. Частное сообщение