

Литература

1. **ГОСТ Р ИСО 11146-1—2008.** Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Ч. 1. Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки.
2. **Арбеков В. И. и др.** Поверочная установка для средств измерений ОРПЭ в поперечном сечении потока излучения импульсных лазеров // Измерительная техника. 1986. № 11. С. 27—28; **Arbekov V. I. et al.** Apparatus for calibration testing of means of relative energy density distribution (REDD) measurements in emission flux cross section of pulsed lasers // Measurement Techniques. 1986. V. 29. N 11. P. 1032—1035.
3. **Турин В. И. и др.** Получение пучка с равномерным распределением интенсивности в СО₂-лазере с обобщенным конфокальным резонатором // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 5. С. 424—428.

4. **Матизен Ю. Э., Троицкий К. Э.** Получение пучка с равномерным распределением интенсивности в лазере с внутрирезонаторным неоднородным светоделителем // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 3. С. 604—609.

5. **Матизен Ю. Э., Троицкий К. Э.** Получение негауссовых световых пучков в лазере с выходным зеркалом, имеющим плавную амплитудную неоднородность // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 7. С. 1437—1441.

6. **Панов В. А. и др.** Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л.: Машиностроение, 1980.

7. **Гуревич М. М.** Фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Энергоатомиздат, 1983.

8. **Осипенкова М. В., Райцин А. М.** Исследование формирования равномерного пространственного распределения энергии в поперечном сечении пучка лазерного излучения // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: Тез. докл. VII Всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1988. С. 15.

Дата принятия 13.09.2012 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.082.54:53.089.68:681.2.089

Роль ключевых сличений в обеспечении единства измерений в области виброметрии

В. В. ОКРЕПИЛОВ, А. Ю. СМЕРНОВ

ФБУ «Тест-С.-Петербург», С.-Петербург, Россия, e-mail: smirnov@rustest.spb.ru

Описана техническая реализация методики калибровки эталонного вибропреобразователя, соответствующей протоколу ключевых сличений и позволяющей держателям вторичных эталонов обеспечивать единство измерений в области виброметрии.

Ключевые слова: виброметрия, ключевые сличения, вторичный эталон, абсолютный метод, лазерный интерферометр, эталонный вибропреобразователь.

The technical realization for the procedure of calibration of the standard vibration transducer is described. This procedure corresponds to the key comparisons protocol and allows the holders of secondary standards to ensure the uniformity in vibration measurements.

Key words: vibration measurements, key comparisons, uniformity of measurements, secondary standard, absolute method, laser interferometer, vibration transducer.

Четко наметившаяся к началу 90-х годов XX в. тенденция децентрализации воспроизведения размеров единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела [1], выразившаяся в создании ряда вторичных эталонов в ведущих государственных и ведомственных метрологических центрах России, привела в начале XXI в. к расходимости результатов калибровок эталонных виброизмерительных преобразователей абсолютным методом. Так, если при калибровке эталонного вибропреобразователя на базовой частоте 160 Гц при базовом ускорении 10 м/с², как правило, удается обеспечить удовлетворительную сходимость результатов измерений на государственном и вторичных эталонах (не более 0,5 %), то в области высоких частот (от 1000 Гц и выше) расхождения могут достигать более 5 %.

После одобрения на третьем совещании Консультативного комитета по акустике, ультразвуку и вибрации в 2002 г. заключительного протокола ключевых сличений в области виброметрии (воспроизведение единицы ускорения) [2] держатели вторичных эталонов получили четкие рекомендации относительно методики проведения сличений применяемых эталонов сравнения, технологии подготовки измерений, диапазонов применения различных методов воспроизведения единицы ускорения, интерпретации результатов измерений. Главным итогом сличений следует считать признание 12 странами опорных значений коэффициента преобразования эталонов сравнения в диапазоне частот 40 — 5000 Гц, стандартной неопределенности его измерения (0,04 — 0,08 %) и допускаемой степени эквивалентности результатов измерений.

Фактически сличениями были узаконены универсальная относительная частотная характеристика эталонного вибропреобразователя, полученная в определенных условиях измерений, и допускаемые значения стандартной неопределенности на различных частотах.

Использование относительной частотной характеристики эталонного вибропреобразователя, найденной абсолютным методом, в качестве неформального эталона совместно со значением коэффициента преобразования эталона сравнения при базовых частоте и ускорении позволяет держателям вторичных эталонов оценить воспроизводимость результатов собственной калибровки, привести технику измерений в соответствие с международными стандартами [3, 4] и тем самым обеспечить единство измерений в области виброметрии. Для достижения указанной цели методика сличений вторичных эталонов единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела с государственным эталоном должна включать процедуры, соответствующие протоколу ключевых сличений.

Рассмотрим техническую реализацию методики калибровки эталонного вибропреобразователя, отвечающую протоколу ключевых сличений и осуществляемую в «Тест-С.-Петербург».

Эталонный вибропреобразователь (эталон сравнения). В его качестве для сличений необходимо применять двусторонний вибропреобразователь (например, типа 8305 фирмы «Брюль и Кьер» или его аналог). Эталонный вибропреобразователь должен иметь отполированную верхнюю (измерительную) поверхность с коэффициентом отражения не менее 80 % и неплоскостностью не более 1 мкм. Принципиальным является требование измерения движения лазерным интерферометром непосредственно на верхней поверхности эталонного вибропреобразователя без использования эквивалентных грузов или уголкового отражателя.

Эталонный усилитель заряда, применяемый при сличениях, должен быть откалиброван при помощи стандартного эталонного конденсатора и эталонного вольтметра незадолго до проведения измерений при значениях напряжения (заряда) эквивалентных тем, что возникают при калибровке эталонного вибропреобразователя.

Условия проведения сличений. Частоты калибровки в герцах: 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160 (базовая частота), 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000.

Диапазон амплитуд виброускорений должен составлять 10 — 200 м/с². Верхняя граница является принципиальной, так как большинство расхождений наблюдается на высоких частотах (от 1000 Гц и выше), при которых одновременно действуют высокие (более 200 м/с²) ускорения. На базовой частоте 160 Гц следует также определять амплитудную характеристику эталонного вибропреобразователя.

Температура эталонного вибропреобразователя и окружающей среды во время калибровки должна находиться в пределах $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$, при этом необходимо указывать ее фактическое значение с погрешно-

стью не более $\pm 0,3 ^\circ\text{C}$. Относительная влажность окружающей среды должна составлять не более 75 %.

Момент завинчивания эталонного вибропреобразователя должен быть в пределах $(2,0 \pm 0,1) \text{ Н} \cdot \text{м}$. На нижнюю установочную поверхность эталонного вибростенда требуется нанести небольшой слой жидкой смазки.

Для подавления эффектов, связанных с непрямолинейностью движения эталонного вибростенда и особенно угловыми колебаниями измерительной поверхности эталонного вибропреобразователя, измерения лазерным интерферометром необходимо выполнять, по крайней мере, в трех точках, равномерно распределенных по измерительной поверхности вибропреобразователя.

Чтобы проверить стабильность результатов сличений, следует провести минимум пять серий измерений в течение пяти дней с повторными переустановками эталонного вибропреобразователя и повторным закреплением кабеля. При этом вычисляют средние значения коэффициента преобразования в серии на каждой частоте.

Подготовка к сличениям. Перед проведением сличений исследуют долговременную стабильность эталонного вибропреобразователя, например, типа 8305. Ее типовое значение составляет 0,02 % в год. Также изучают линейность его амплитудной характеристики. Типовое значение нелинейности составляет 0,05 %.

Перед выполнением сличений проверяют чувствительность эталонного вибропреобразователя к температуре, выраженную как изменения коэффициента преобразования относительно температуры. Типовое значение составляет $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Также проверяют его чувствительность к моменту завинчивания, выраженную в относительном изменении коэффициента преобразования при отклонении момента завинчивания от номинального значения. Типовое значение составляет $1 \cdot 10^{-4} (\text{Н} \cdot \text{м})^{-1}$.

Методы измерений. Общая схема измерений с применением лазерного интерферометра представлена на рис. 1.

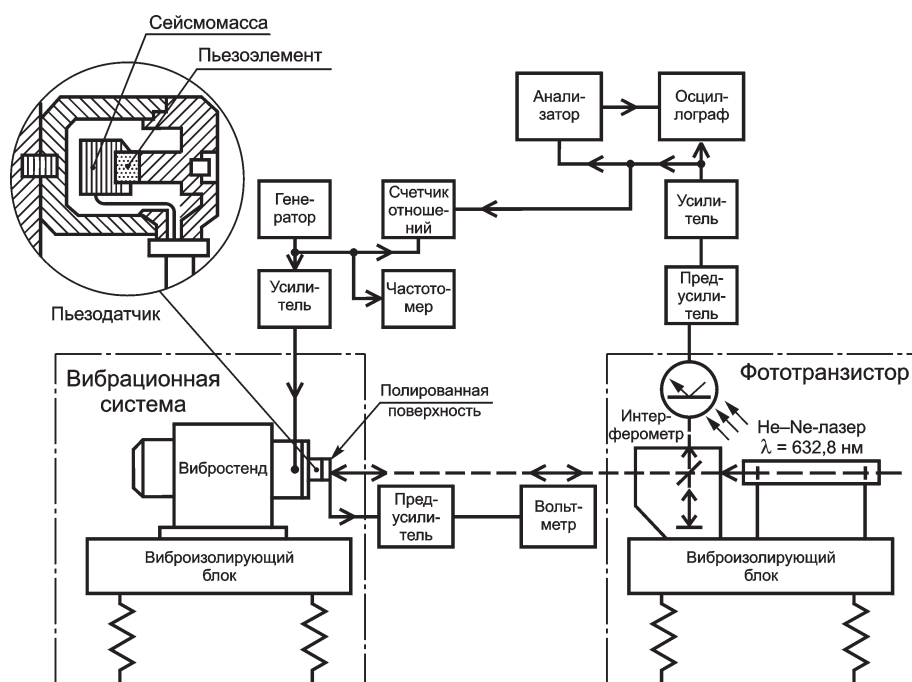


Рис. 1. Общая схема измерений с применением лазерного интерферометра

Окружающие условия должны соответствовать требованиям, указанным выше. К используемой аппаратуре предъявляются следующие требования.

Генератор низкочастотного сигнала и *частотомер* должны иметь допускаемую погрешность по частоте не более 0,01 % показания, нестабильности частоты и амплитуды не более 0,01 % показания за время измерения.

Комплекс, состоящий из *усилителя* мощности и *вибростенда*, должен обладать суммарным коэффициентом нелинейных искажений не более 2 %, поперечным ускорением, ускорениями от изгиба и качания вибропреобразователя не более 5 % ускорения в основном направлении (в частотном диапазоне выше 1000 Гц допускается не более 10 %), шумом не менее чем на 70 дБ ниже уровня выходного сигнала, нестабильностью поддержания амплитуды ускорения не более 0,05 % показания за время измерения. Поверхность вибростенда, к которой крепят вибропреобразователь, не должна вызывать его деформации.

Виброизолирующие блоки вибростенда и лазерного *интерферометра* должны иметь массу по крайней мере в 2000 раз больше суммарной массы движущегося элемента вибростенда, элемента крепления и вибропреобразователя. Блоки необходимо вывесить на слабо демпфированных пружинах. Если вибрация пола оказывает заметное влияние на работу интерферометра или вибропреобразователя, то резонансная частота виброизолирующего блока с пружинами в вертикальном и горизонтальном направлениях должна находиться в пределах 1 — 2 Гц.

Лазер гелий-неонового типа в лабораторных условиях (давление воздуха 101,3 кПа, температура 23 °С и относительная влажность 50 %) должен работать на длине волны $\lambda = 0,632815$ мкм. Одночастотный стабилизированный лазер необходимо откалибровать по длине волны. Если лазер имеет устройство ручной или автоматической атмосферной компенсации, то его следует выключить.

Частотный диапазон *интерферометра* типа Майкельсона с фотодетектором для детектирования интерференционной картины должен составлять 0 — 15 МГц. Допускается применение модифицированного интерферометра Майкельсона, а также интерферометров с другими интерференционными схемами.

Счетчиковая аппаратура (для метода измерения 1 из [4] и частотного диапазона 20 — 800 Гц) должна работать при частотах от 10 Гц до 20 МГц, допускаемая погрешность — составлять 0,01 % показания. Наряду со счетчиком импульсов можно использовать *счетчик отношения* числа импульсов с аналогичной погрешностью (*частотомер*).

Перестраиваемый полосовой фильтр или анализатор спектра (для метода измерения 2 из [4] и частотного диапазона 1000 — 5000 Гц) должны иметь диапазон частот 100 — 50000 Гц, ширину полосы менее 12 % центральной частоты, наклон не менее 24 дБ на октаву, отношение сигнал—шум не менее 70 дБ, динамический диапазон не менее 60 дБ, погрешность измерения отношения гармоник для анализатора спектра (при методе измерения 3 из [4]) не более 0,1 дБ.

Аппаратура для детектирования нуля (если не используется анализатор спектра, т. е. для метода измерения 2) должна работать на частотах 20 — 10000 Гц, ее динамический диапазон должен обеспечивать детектирование шума выходного сигнала полосового фильтра.

Мультиметр для измерения истинного среднеквадратического значения (СКЗ) выходного сигнала вибропреобразователя должна иметь диапазон частот 3 — 10000 Гц, допускаемую погрешность 0,05 % показания (при частотах ниже 20 Гц — 0,1 % показания).

Измеритель нелинейных искажений от 0 до 10 % должен работать на частотах от 20 Гц до 20 кГц, допускаемая погрешность — составлять не более 10 % показания.

Осциллограф (является необязательным) можно использовать для контроля формы кривых сигнала акселерометра и интерферометра в диапазоне частот 0 — 5 МГц.

Метод 1 счета интерференционных полос для диапазона частот 20 — 800 Гц. После настройки интерферометра определяют опорный коэффициент преобразования эталонного вибропреобразователя на базовой частоте 160 Гц (или 80 Гц) при предпочтительном ускорении 10 м/с² (или 100 м/с²) и стандартном положении переключателя диапазонов усилителя двумя путями: измерением частоты полос с помощью счетчика импульсов (используют метод 1 в соответствии с рис. 1); измерением отношения частоты интерференционных полос к частоте вибрации с помощью счетчика отношения. Затем находят коэффициент преобразования при других значениях ускорения и частоты. Результаты выражают в виде отклонения в процентах от опорного значения коэффициента преобразования. Для каждой пары ускорения и частоты измеряют нелинейные искажения, поперечное ускорение, ускорения от изгиба и качания вибропреобразователя, шумы в каналах эталонного вибропреобразователя и интерферометра, значения которых должны быть в пределах, указанных выше.

По результатам измерения отношения частоты полос R_f к частоте вибрации f вычисляют амплитуду ускорения измерительной поверхности вибропреобразователя в метрах в секунду в квадрате по формуле

$$a = 3,1228 \cdot 10^{-6} f^2 R_f,$$

при этом R_f измеряют за период времени по крайней мере в 100 раз больше периода вибрации.

Коэффициент преобразования эталонного вибропреобразователя рассчитывают как

$$S = 0,4528 \cdot 10^6 V/(f^2 R_f),$$

где V — показание в милливольтх вольтметра СКЗ, подключенного к усилителю эталонного вибропреобразователя.

На частоте 800 Гц при амплитуде виброускорения 10 м/с² имеем $R_f = 5,0027$. При этом среднее значение шума отношения частоты полос к частоте вибрации, вызванного сейсмическими помехами и вибрационным шумом на столе вибростенда, составляет 0,1, что не соответствует точности интерферометрических измерений. Таким образом, в области частот 500 — 800 Гц при калибровке следует увеличить виброускорение до 100 м/с², при этом на частоте 800 Гц будет $R_f = 50,027$, что обеспечит удовлетворительную погрешность измерений. Для коэффициента преобразования необходимо указывать расширенную неопределенность калибровки, которую вычисляют согласно [4].

Метод 2 минимумов интерференционного сигнала для диапазона частот 800 — 5000 Гц. С помощью полосового фильтра с центральной частотой, равной частоте колебаний вибростенда, фильтруется сигнал фотодетектора. Отфильтрованный сигнал имеет ряд минимумов, соответствующих

определенным амплитудам перемещения вибропреобразователя.

После установки частоты регулируют амплитуду вибростенда, начиная с нулевого значения до достижения максимума отфильтрованного сигнала фотодетектора и далее до его минимального значения. Это минимальное значение — первый минимум отфильтрованного сигнала — соответствует амплитуде перемещения 0,1930 мкм. Амплитуды перемещения для второго и третьего минимумов равны соответственно 0,3533 и 0,5123 мкм.

Амплитуду ускорения измерительной поверхности вибропреобразователя в метрах в секунду в квадрате вычисляют по формуле

$$a = 39,478 \cdot 10^{-6} f^2 \xi,$$

где ξ — амплитуда виброперемещения для соответствующего минимума (в микрометрах).

Коэффициент преобразования эталонного вибропреобразователя определяется как

$$S = 0,3582 \cdot 10^5 V / (f^2 \xi).$$

Полученные методом 2 коэффициенты преобразования используют для расчета отклонений от опорного коэффициента преобразования, полученного на частоте 160 Гц и при ускорении 10 м/с² методом 1.

На частоте 800 Гц при амплитуде виброперемещения 0,1930 мкм СКЗ виброускорения составляет 3,448 м/с². Для повышения значения воспроизводимого виброускорения рекомендуется использовать на частоте 800 Гц третий минимум интерференционного сигнала, который будет соответствовать СКЗ виброускорения 9,152 м/с², а на частоте 1000 Гц второй минимум, который будет соответствовать 9,862 м/с². Однако следует учитывать, что с повышением номера детектируемого минимума ухудшается отношение сигнал—шум интерферометра, что снижает достоверность разрешения минимального значения сигнала.

Метод 3 отношения двух гармоник интерференционного сигнала для диапазона частот 5000 — 10000 Гц. Метод 2 (минимумов интерференционного сигнала) по существу означает метод нулевых значений функции Бесселя 1-го порядка согласно формуле

$$J_1(4\pi\xi/\lambda) = 0,$$

где ξ — амплитуда виброперемещения в микрометрах для нулевого значения функции Бесселя 1-го порядка J_1 .

При частоте колебаний 5000 Гц амплитуда виброускорения составляет 190,5 м/с², что находится на границе диапазона, рекомендуемого в протоколе ключевых значений. Поэтому для более высоких частот калибровки следует применять расширение метода 2, т. е. вычислять отношение третьей U_3 и первой U_1 гармоник сигнала интерферометра на частоте вибростенда для функций Бесселя 3-го и 1-го порядка по формуле

$$J_3(4\pi\xi/\lambda) / J_1(4\pi\xi/\lambda) = U_3 / U_1.$$

Графики отношения функций Бесселя 3-го и 1-го порядка J_3/J_1 и функции J_1 в зависимости от амплитуды виброперемещения представлены на рис. 2.

Для минимизации погрешности измерений представляется оптимальным использовать диапазон ξ вибропереме-

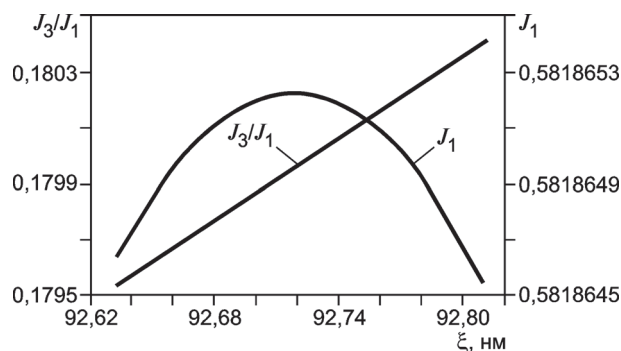


Рис. 2. Графики отношения функций Бесселя 3-го и 1-го порядков J_3/J_1 и функции J_1

щений, в котором функция J_1 достигает максимального значения. Тогда на частоте 8 кГц амплитуда виброускорения составит 234 м/с², а на частоте 10 кГц следует использовать меньшие значения виброперемещения.

Необходимое условие реализации метода 3 — применение анализатора спектра сигнала интерферометра с расширенным, по крайней мере до 50 кГц, частотным диапазоном.

Результаты измерений. Погрешность калибровки эталонного вибропреобразователя рассмотренными выше методами [3] составляет: 0,5 % на опорных частоте (160 Гц) и амплитуде (10 или 100 м/с²); 1 % на частотах до 1000 Гц включительно; 2 % на частотах свыше 1000 Гц.

Частотная характеристика эталонного вибропреобразователя и границы относительной стандартной неопределенности, полученные абсолютным методом по измерительным процедурам, рекомендуемым в протоколе ключевых сличений, приведены в таблице.

Частотная характеристика эталонного вибропреобразователя и границы относительной стандартной неопределенности

Частота f , Гц	Коэффициент преобразования S , пКл · с ² /м	Относительная частотная характеристика $S_{отн} = S/f \cdot S^{160}$	Стандартное отклонение u_S/S , %
40	0,12658	1,000	0,04
50	0,12658	1,000	0,04
63	0,12654	0,999	0,04
80	0,12658	1,000	0,04
100	0,12658	1,000	0,04
125	0,12658	1,000	0,04
160	0,12663	1,000	0,04
200	0,12660	1,000	0,04
250	0,12663	1,000	0,04
315	0,12665	1,000	0,04
400	0,12666	1,000	0,04
500	0,12662	1,000	0,04
630	0,12663	1,000	0,04
800	0,12673	1,001	0,04
1000	0,12680	1,001	0,04
1250	0,12683	1,002	0,04
1600	0,12696	1,003	0,04
2000	0,12713	1,004	0,04
2500	0,12732	1,005	0,06
3150	0,12776	1,009	0,07
4000	0,12843	1,014	0,07
5000	0,12936	1,022	0,08

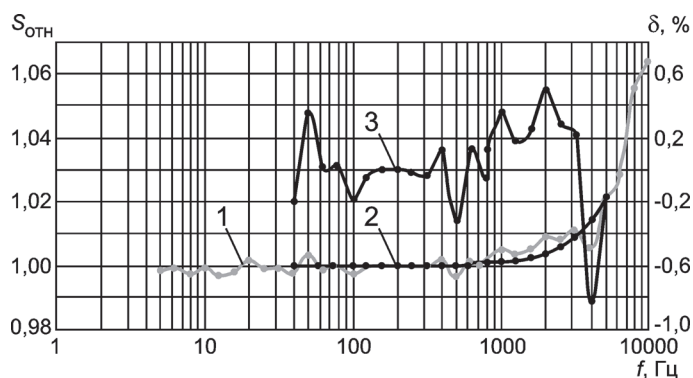


Рис. 3. Относительные частотные характеристики, полученные на вторичном эталоне ВЭТ 58-2—94 (1) и в процессе ключевых сличений (2), а также разница δ значений этих характеристик (3)

Несмотря на кажущуюся сложность и ряд предосторожностей при реализации измерительных процедур, результат измерений оказывается достаточно тривиальным [2]. Частотная характеристика эталонного вибропреобразователя без нагрузки в диапазоне частот 40 — 5000 Гц с высокой степенью точности совпадает с частотной характеристикой одномассовой колебательной системы с собственной частотой 35 кГц. Расчетное значение динамической погрешности (относительной частотной характеристики) эталонного вибропреобразователя на частоте 5000 Гц составляет 2,0 %, что близко к экспериментальному значению 2,2 %.

Заключение. В настоящее время в «Тест-С.-Петербург» осуществляется поверка эталонных вибропреобразователей на вторичном эталоне ВЭТ 58-2—94 методами 1 и 2 в автоматизированном режиме измерений. Сравнение относительных частотных характеристик, полученных на ВЭТ 58-2—94 и в результате ключевых сличений [2], иллюстрирует рис. 3. Отметим, что в целом результаты калибровки эталонного вибропреобразователя на вторичном эталоне соответствуют погрешностям, приведенным в [3], так как разность $|\delta|$ значений относительных частотных характеристик, полученных на ВЭТ 58-2—94 и при ключевых сличениях [2] не превышает 0,8 % на частоте 4 кГц и 0,5 % в остальном диапазоне частот. Вместе с тем, такой сравнительный анализ показывает направления дальнейшего совершенствования методов измерений при помощи этого эталона.

Вариация расхождения относительных частотных характеристик, определенных в процессе ключевых сличений и

на ВЭТ 58-2—94, указывает на необходимость применения в его составе вибростенда с воздушным центрированием подвижной системы в стакане из пористого графита и выполненной из бериллия для исключения возможных резонансов, а также поперечных и угловых колебаний подвижной системы в рабочем диапазоне частот вибростенда. Подобный вибростенд включен в Госреестр средств измерений РФ.

Представляется целесообразным использование альтернативных, цифровых методов обработки сигнала лазерного интерферометра (метод синусной аппроксимации) [4], которые позволяют оценить сходимость и достоверность традиционных методов обработки сигнала [3].

Планируемое осуществление указанных мероприятий позволит главным и региональным метрологическим центрам подготовиться к последующим ключевым сличениям в области виброметрии [5] и провести анализ результатов сличений государственного и вторичных эталонов единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в расширенном частотном диапазоне.

Л и т е р а т у р а

1. **МИ 2070—90.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений виброперемещения, виброскорости и виброускорения в диапазоне частот $3 \cdot 10^{-1} — 2 \cdot 10^4$ Гц.
2. **Martens H.-J. e. a.** Final report on key comparison CCAUV.V-K1. PTB-1.22. Braunschweig, Oct., 2002.
3. **ГОСТ ИСО 5347-1—96.** Калибровка датчиков вибрации и удара. Ч. 1. Первичная вибрационная калибровка методами лазерной интерферометрии.
4. **ISO 16063-11:1999.** Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Pt. 11: Primary vibration calibration by laser interferometry.
5. **Future** needs for metrology in acoustics, ultrasound and vibration. CCAUV/02-33 [Электрон. ресурс]. <http://www.bipm.org/cc/CCAUV> (дата обращения: 10.09.2012).

Дата принятия 08.10.2012 г.