

**ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА**

**ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИЙ**

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 192(252)



THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS DEPARTMENT
5712 S. UNIVERSITY AVE.
CHICAGO, ILL. 60637



1000000

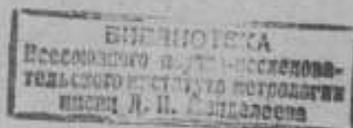
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 192 (252)

Под редакцией В. С. Шкаликова



«ЭНЕРГИЯ»
ЛЕНИНГРАД 1976

№ 16599 e

В сборнике изложены результаты научных исследований в области измерения параметров движения. После утверждения государственного специального эталона и общесоюзной поверочной схемы для средств измерения перемещения, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот $0,5-10^4$ Гц (ГОСТ 8.138-75) перед метрологией встала задача дальнейшего усовершенствования эталона и разработки новых методов измерения параметров вибраций. Рассмотрены вопросы расширения частотного диапазона воспроизводимого колебательного движения в сторону как низких, так и высоких частот путем создания новых средств воспроизведения колебаний. Приводятся новые типы виброметров, разработанных для поверки установок и измерения параметров движения, дается анализ погрешностей низкочастотных акселерометров. Освещаются вопросы поверки стационарных установок и виброметров.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников, занимающихся измерениями параметров движения.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДРОБНЫХ ДОЛЕЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ АМПЛИТУДЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

Измерение амплитуды перемещений вибратора государственного специального эталона единицы длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела производится на двухлучевом лазерном интерферометре методом однонаправленного счета порядков интерференции за определенное число периодов колебаний вибратора [1—3]. Цена деления одного интерференционного порядка составляет для плоских зеркал половину длины волны монохроматического источника света, что обеспечивает погрешность измерения менее 1% для амплитуд перемещения свыше 30 мкм. Для обеспечения такой же точности измерения амплитуд перемещений от 0,2 до 10 мкм необходимо определить дробную часть порядка интерференции.

Характерной особенностью измерения параметров колебательного движения является периодическое изменение скорости прохождения интерференционной картины относительно диафрагмы и фотодетектора от нуля до некоторого максимального значения. Другая особенность, также являющаяся следствием колебательного движения, — изменение начальной фазы интерференционной картины вследствие незначительных изменений начальной разности хода лучей интерферометра, вызванных, например, микросейсмическими помехами. Все это ограничивает область применения известных методов определения дробной части порядка интерференции [4]. Так, например, метод умножения частоты сигнала интерференционной картины для этой цели непригоден, поскольку величина изменения сигнала не остается постоянной. Метод преобразования четвертьволнового перемещения в соответствующий электрический сигнал также неосуществим, поскольку начальная фаза интерференционной картины за время измерений не остается постоянной. Метод однонаправленного счета порядков интерференции дает возможность скомпенсировать влияние фазовых изменений интерференционного сигнала, так как их влияние на результат измерений противоположно при прямом и обратном перемещении интерференционной картины. Таким образом, определение дробной части порядка интерференции возможно, если при измерении каждой амплитуды перемещения находить начальную и конечную фазу интерференционной картины в долях от половины длины волны. Наиболее простой способ определения дробной части заключается в измерении напряжения, соответствующего дробной части интерференционного сигнала, с помощью дифференциального дискриминатора, поскольку известна зависимость между перемещением и соответствующим ему электрическим сигналом. Произведя статическую градуировку и увеличив число каналов дискриминации, например, до 100, можно определять значение дробной части порядка интерференции с точностью до 1/400 длины волны. Однако на практике при реализации этого метода было установлено, что начальная градуировка не остается постоянной за время измерений и что необходимую стабильность трудно обеспечить даже для десятиканального

дискриминатора. Таким образом, дискриминаторы с фиксированными порогами дискриминации непригодны для измерения дробной части порядка интерференции.

Для отсчета числа интерференционных полос был разработан специальный формирователь счетных импульсов, который одновременно выдает информацию о дробной части интерференции, при этом уровень сигнала меньше половины амплитуды счетного импульса округляется до нуля, свыше половины — до единицы. Несмотря на то, что такой формирователь предназначен для определения дробной части полосы с точностью только до половины цены деления, он может применяться и для более точных измерений.

Принцип отсчета дробной части поясняет рисунок. Пусть при первом измерении размах колебаний укладывается на отсчетной шкале в единицах длины

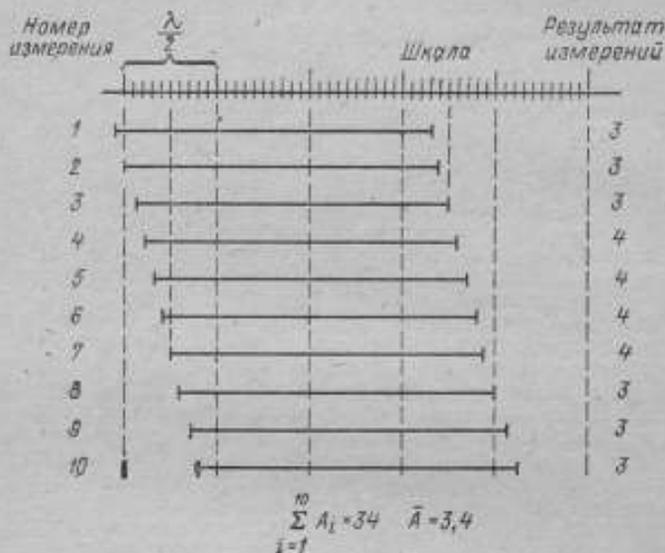


Схема отсчета дробной части порядка интерференции

волны монохроматического источника света интерферометра. Счетчик числа порядков интерференции регистрирует три отсчета, поскольку дробная часть составляет меньше половины длины волны. Если в измерительной системе имеется устройство, которое сдвигает шкалу относительно размаха колебаний на 0,1 цены деления, то во втором измерении будет зарегистрировано три отсчета. Очевидно, в четвертом, пятом и шестом измерениях будет зарегистрировано по четыре отсчета, поскольку их дробные части превышают половину цены деления, а в восьмом, девятом и десятом — по три. В третьем и седьмом измерениях дробная часть составляет половину цены деления. Считая равновероятным для этого случая формирование как нуля, так и единицы, можно предположить, что измерительная система определяет в одном случае три и в другом четыре отсчета. Таким образом, за 10 измерений отсчетное устройство регистрирует 34 единицы, причем точность измерения среднего значения амплитуды перемещения повысится в 10 раз.

При дальнейшем увеличении числа измерений с соответствующим уменьшением сдвига шкалы можно получить результат с более высокой точностью. Осуществить такое смещение шкалы можно, например, путем перемещения опорного зеркала интерферометра. Для этого оно устанавливается на пьезокерамическую пластинку, на которую подается пилообразное напряжение та-

ким образом, чтобы частота была во много раз ниже частоты колебаний ин-вбратора.

На имеющихся установках осуществлять это не представляется возможным, так как, помимо перемещения под действием пилообразного импульса, происходят перемещения за счет теплового дрейфа и микросейсмических помех. Поэтому для определения дробной части цены деления был применен метод получения среднего значения в результате суммирования размахов перемещений, дробные части которых статистически распределены в промежутке нуля—цена деления. Необходимая точность может быть получена в результате суммирования большого числа амплитуд перемещений. Учитывая, что погрешность округления каждого отсчета до целого деления шкалы распределена равномерно, получим среднее квадратическое отклонение для единичного измерения

$$\sigma = \frac{\lambda}{4\sqrt{3}}$$

Среднее арифметическое значение погрешности округления распределено асимптотически нормально, т. е.

$$\sigma_{s/n} = \frac{\lambda}{4\sqrt{3}2\sqrt{701}} = \frac{\lambda}{8\sqrt{3n}}$$

где σ — среднее квадратическое отклонение; n — число периодов колебаний ин-вбратора. Например, при $n=791$ имеем $\sigma_{s/n}=0,0016$ мкм, что обеспечивает достаточную точность при измерении амплитуд перемещений свыше 0,25 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордюловский А. Ф., Шкаликов В. С. Лазерные методы измерения параметров вибрации. Изд. ЛДНТП, 1974, 32 с.
2. Бордюловский А. Ф. Устройство для измерения амплитуды вибрации. Авт. свид. № 230434. — «Визлетель изобретений», 1968, № 34, 124 с.
3. Бордюловский А. Ф. Интерференционный метод измерения амплитуды перемещений. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 118(178), М., Изд-во стандартов, 1971, с. 87—95.
4. Зорин Д. И., Трофимова Н. В., Шестопалов Ю. Н. Измерение длины штриховых мер счетом интерференционных полос. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 78(138), М., Изд-во стандартов, 1965, с. 59—67.

Поступил в редакцию 6. 3. 1975 г.

УДК 681.327

В. В. ДАНИЛОВ, А. И. КАШЕЕВ

ВНИИМ

УСТРОЙСТВА ВЫВОДА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЭТАЛОНЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Многие эталонные и поверочные установки имеют цифровую форму представления результатов измерений, которые затем необходимо обработать на электронной цифровой вычислительной машине (ЭЦВМ). При обработке информации в реальном масштабе времени установки должны подключаться к вычислительной машине, но по ряду причин применение для этих целей имеющейся ЭЦВМ М-222 не представляется возможным, поэтому обработку информации целесообразно вести в режиме разделения времени измерения и вычисления характеристик. При работе в таком режиме в состав измерительных установок должны входить устройства автоматической регистрации информации (устройства вывода — УВ) для промежуточной регистрации результатов измерений.

С целью сокращения времени подготовки информации, удобства ввода ее в вычислительную машину, исключения ошибок, возникающих при дополнительной перезаписи (перезапись производится в том случае, когда примененный для промежуточной регистрации носитель или форма представления информации не соответствует принятым в ЭЦВМ), регистрация должна осуществляться на одном из машинных носителей, применяемых в данной ЭЦВМ.

После изучения различных способов и средств регистрации и оценки возможности применения соответствующих носителей в ЭЦВМ М-222 был разработан и изготовлен для государственного специального эталона единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот $0,5-10^4$ Гц комплекс устройств вывода информации. Эти устройства обеспечивают регистрацию информации с требуемой скоростью, име-



Рис. 1. Порядок расположения кодов чисел 12345678 и 1245690

ют достаточно большую накопительную емкость (порядка 2^{18} двоичных знаков) при непрерывной регистрации с предельной скоростью, низкую стоимость оборудования из расчета на единицу хранимой информации, просты в эксплуатации, позволяют производить визуальный контроль информации, ее многократное использование, а также вводить зарегистрированную информацию в различные ЭЦВМ.

Вывод информации во всех устройствах осуществляется перфоратором ПЛ-80 на перфоленту, являющуюся удобным носителем для промежуточной регистрации и хранения информации.

В составе эталонной установки ДЦ-1 работает УВ цифровой информации на перфоленту. Значения ускорения в цифровой форме снимаются с частотомера ЧЗ-30 в параллельном двоичнодесятичном коде 1—2—4—8 в виде 32-разрядного числа (восемь десятичных разрядов). УВ осуществляет преобразование параллельного кода в параллельно-последовательный и его построчную запись на перфоленту. В каждой строке по 1—4 дорожкам записывается один десятичный разряд. Запись производится, начиная с младших разрядов. В первой строке по 5-й дорожке отпечатывается служебная единица—символ, отделяющая измерения друг от друга.

Порядок расположения информации на носителе показан на рис. 1.

На носителе занято пять дорожек, поэтому можно применять перфоленту шириной 17,4; 22,4; 25,4 мм.

Предельная скорость работы перфорационного механизма—80 строк в секунду, что при принятом расположении информации соответствует 320 двоичным знакам в секунду. На стандартном рулоне длиной 200 м может быть записано $0,3 \cdot 10^6$ двоичных знаков.

Количество регистрируемых десятичных разрядов можно изменять от трех до восьми, при этом максимальная скорость вывода соответственно составит 27—10 измерений в секунду.

Если скорость поступления информации превышает предельно допустимую, то происходит выборочная регистрация результатов. Пропускаются те значения, которые поступают до окончания записи предыдущего значения.

Структурная схема этого устройства представлена на рис. 2, а.

Для эталонной виброиспытательной установки ЭУВ-1 разработано более сложное устройство вывода. Регистрация порядкового номера измерения и четырех параметров движения производится одновременно шифропечатающей машиной ЦПМ-1 и перфоратором. Цифровая информация снимается с выходов

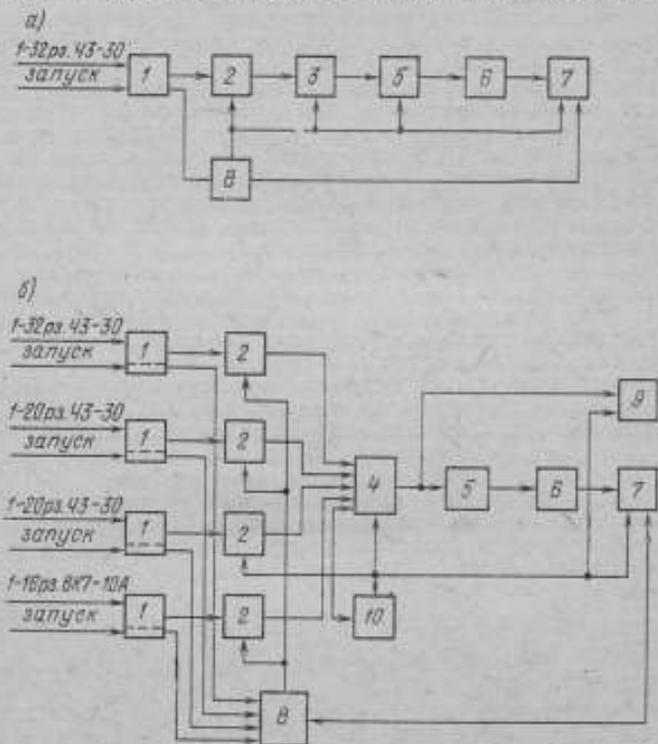


Рис. 2. Структурные схемы устройств вывода эталонных установок

п — ЦП-1; 4 — ЭУВ-1; 1 — схема согласования; 2 — ключевые схемы; 3 — блок буферной памяти; 4 — коммутатор; 5 — блок преобразования параллельного кода в параллельно-последовательный; 6 — блок усилителей; 7 — перфоратор ПЛ-80; 8 — блок управления; 9 — цифропечатающая машина ЦПМ-1; 10 — счетчик

трех частотомеров ЧЗ-30 (32, 24 и 20 разрядов) и вольтметра ВК7-10А (16 раз) в параллельном двоично-десятичном коде.

Информационные сигналы поступают в блок коммутации, а служебные — в блок управления через схемы электрического согласования. Структурная схема устройства автоматической регистрации результатов измерений дана на рис. 2, б. С приходом стартовых сигналов «запуск ЦПМ» от всех приборов запускается программа вывода. Параллельные коды: номера измерений, амплитуды перемещения (мкм), частоты колебаний (Гц) или длительность (с), ускорения (m/s^2), напряжения поверяемого образцового акселерометра (mV) — с выхода коммутатора поступают на ЦПМ-1, которая построчно регистрирует параметры в указанном порядке. Одновременно параллельный код каждого

параметра преобразуется в параллельно-последовательный и регистрируется на перфоленте в той же последовательности, что и при цифрпечати. Это устройство вывода, в отличие от описанного выше, не имеет буферных регистров, что позволяет на 40% сократить количество элементов.

В течение всего цикла печати информации хранится на регистрах приборов. Однако при таком построении УВ увеличивается время работы измерительной системы, так как следующий цикл измерений начинается только после окончания регистрации.

Скорость работы УВ ограничивается скоростью регистрации ЦПМ-1, которая составляет два числа в секунду. Время регистрации результатов одного цикла измерений 2,5 с.

Для регистрации цифровой информации, поступающей в режиме точных измерений от эталонной установки ДЦ-1 со скоростью до $6 \cdot 10^3$ двоично-десятичных знаков в секунду, разработано устройство У-253. Код порядкового номера измерения (20 разрядов), коды трех параметров движения (60 разрядов) и служебная информация записывается по 14 дорожкам в накопитель на магнитной ленте (НМЛ), который выполнен на базе студийного магнитофона МЭЗ-28. Скорость движения магнитной ленты в режиме записи 47 см/с.

По окончании регистрации НМЛ останавливают, магнитную ленту перемагнитывают в начало и производят перепись любого из параметров с магнитной ленты на перфоленту. По 6—8 дорожкам перфоленты напротив соответствующих чисел записывается каждый десятый номер измерения. Переписываемая на перфоленту информация контролируется на четность построчно и сравнивается с контрольным кодом, записанным на магнитной ленте. В случае несопадения контрольных кодов с соответствующей строке перфоленты на 5-й дорожке делается приписка, обозначающая ошибку.

Для согласования количества информации, считываемой с магнитной ленты в единицу времени, с техническими возможностями перфоратора скорость движения ленты в режиме переписки снижена в 10 раз.

Разработанные устройства позволили автоматизировать процесс регистрации информации в специальном эталоне единиц перемещения, скорости и ускорения при гармоническом колебании твердого тела. Они могут применяться для автоматизации обработки информации измерительных систем, территориально удаленных от ЭЦВМ.

Поступила в редакцию 26. 6. 1975 г.

УДК 621.373.826.038.823.001.5

В. Е. ПРИВАЛОВ
ВНИИМ

ТЕХНИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Наибольшую точность при измерении параметров движения, длин волн, больших расстояний и углов обеспечивают газовые лазеры. Погрешность измерений и воспроизводимость результатов при этом определяется флуктуациями их излучения. Флуктуации излучения принято делить на естественные и технические. Естественные флуктуации довольно хорошо изучены [1], хотя некоторые предельные значения требуют уточнения. Например, предельной естественной шириной излучения He—Ne-лазера в работе [2] считают 10^{-3} Гц. Однако эта величина обусловлена добротностью резонатора и при увеличении последней техническими средствами может быть значительно снижена. Чтобы производить измерения на уровне естественных флуктуаций, т. е. обеспечить их предельную точность, необходимо устранить технические флуктуации. Выпускаемые промышленностью газовые лазеры из-за значительных технических флуктуаций излучения не могут быть использованы в метрологии. В связи с этим возникла необходимость создания газового лазера метрологического назначения, что в свою очередь потребовало более глубокого исследования тех-

нических флуктуаций. Благодаря максимальной монохроматичности и минимальным техническим флуктуациям He—Ne-лазеры получили широкое распространение в измерительной технике.

Технические флуктуации делится на флуктуации активной среды, оптического пути и потерь. Для практических целей более удобно другое деление: флуктуации активного элемента, резонатора и источника питания разряда.

Выходные характеристики лазера (интенсивность I и частота излучения ν) могут быть записаны следующим образом:

$$I_i = \frac{\alpha_i}{\beta_i F(\Gamma) + \Omega_i + \Omega_{ik}},$$

$$\nu_i = \Omega_i + \sigma_i + (\rho_i + \tau_i) I_k + \tau_{ik} I_k + 2\chi (I_1 + I_2),$$

где α_i , β_i и θ — амплитудные коэффициенты Лэмба; $F(\Gamma)$ — функция давления; Ω_i — собственные частоты «пустого» резонатора; σ_i , ρ_i , τ и χ — частотные коэффициенты Лэмба [3].

Коэффициенты в правых частях приведенных выражений определяются параметрами активной среды, длиной оптического пути и потерями, флуктуации которых приводят к нестабильности параметров излучения. Поэтому чтобы увеличить стабильность интенсивности и частоты излучения, необходимо создать такие условия, при которых число этих коэффициентов и соответствующие им флуктуации будут минимальными (одномодовый режим). Практически это сводится к максимальной стабилизации параметров разряда и резонатора. Не вдаваясь в анализ выражений для I и ν , перечислим основные причины технических флуктуаций излучения He—Ne-лазера, способы их устранения или снижения.

Длиной резонатора определяется модовый состав и расстройка. Флуктуации длины вызывают изменение частоты и интенсивности (последняя в одномодовом режиме практически незаметна). Угловые смещения отражателей могут привести к изменению потерь и появлению неаксимальных типов колебаний. Изменение оптического пути вызывается механическими (в том числе атмосферным давлением) и температурными воздействиями. Если материал (инвар, кварц, ситалл) и конструкции резонатора обеспечивают максимальную жесткость и минимальное тепловое расширение, то можно добиться стабильности частоты порядка $1 \cdot 10^6$. Конструкции разрядной трубки резонатора должна обеспечивать не только механическую стабильность, но и стабильность разряда. Особое внимание следует обратить на соединение окон с трубкой [4] и на связь их с отражателями. Наконец, большое значение имеет тепловой режим внутри резонатора, так как температура трубки в зависимости от тока разряда и типа катода может колебаться от 50 до 200° С. Эффективная стабилизация параметров излучения лазера возможна при одновременном достижении стабильности потерь и стабилизации плазмы. Флуктуации потерь, в основном, коррелируют с флуктуациями оптического пути, за исключением потерь, обусловленных флуктуациями в разряде (линзовые эффекты [5]).

Флуктуации в активной среде (прежде всего флуктуации усиления) наименее изучены и являются основной причиной снижения точности измерений. К ним относятся колебания в разряде, помехи, передаваемые в разряд от источника питания и наведенные в цепи извне. Борьба с такими флуктуациями является основной задачей проводимых исследований [6, 7].

Флуктуации в разряде He—Ne-лазера могут носить регулярный и шумовой характер. Среди регулярных колебаний: реактивных, локальных и страт, наибольшую глубину модуляции индуцированного излучения вызывают реактивные. Они определяют минимальный ток горения разряда и, как правило, порог генерации с длиной волны 0,63 мкм. В некоторых типах He—Ne-лазеров, выпускаемых промышленностью, разряд гаснет при токах, обеспечивающих генерацию, а начальная стадия реактивных колебаний может прекращать область генерации с 0,63 мкм [8]. Эффективным методом борьбы с реактивными колебаниями является снижение граничного тока [7]. Страты и локальные колебания модулируют излучение слабее реактивных (глубина модуляции менее

1%), но их смещение в меньшей степени зависит от параметров внешней цепи. Все эти колебания могут быть устранены при уменьшении длины разряда. Поскольку мощность генерации пропорциональна длине разряда, используют трубки, состоящие из секций разного диаметра, либо двуханодные трубки. Последние позволяют уменьшать амплитуду колебаний за счет излучения лазера, не устраняя самих колебаний [9, 10]. По-видимому, это наиболее эффективный способ борьбы с флуктуациями излучения, обусловленными неустойчивостью разряда. Его существенно дополняет специально разработанный источник питания с двойной стабилизацией [11]. На основе проведенных исследований можно сделать некоторые рекомендации относительно конструкции газового лазера метрологического назначения [2]. Резонатор и разрядный промежуток должны быть совмещены в одном корпусе (моноблок) из теллурического кварца или ситалла. Отражатели, обеспечивающие потери не более 0,1%, посажены на оптический контакт. Прямолинейный разрядный промежуток (без изгибов и отрезков) с двумя катодами и общим анодом из высокоомного материала обеспечивает малый уровень колебаний в разряде. Синхронизация колебаний еще более снижает уровень флуктуаций излучения.

Для повышения воспроизводимости измерений в резонатор следует поместить кварцевую ячейку с иодом. В этом случае стабильность частоты излучения будет определяться шириной пика поглощения в иоде (около 5 МГц) и воспроизводимостью будет составлять не менее 10^6 . Если использовать кольцевой газовый лазер, то ширина пика одноволновой генерации составит сотни киллогерц, т. е. стабильность повысится более чем на порядок при той же воспроизводимости (при наличии поглощающей ячейки). Погрешности, влияющие на частоту излучения лазеров (ЛГ-56, ОКГ-13) приведены в таблице [3, 6, 7, 11].

Источник погрешности	Отклонение от нормального значения	Значение погрешности, МГц
Ток разряда (смещение среднего значения)	$10 \pm 0,1$ мА	0,1
Ток разряда (возникновение колебаний, девиация)	$5 \pm 0,5$ мА	5,0
Изменение температуры окон трубки	$\pm 1^\circ\text{C}$	100
Изменение температуры резонатора	$\pm 1^\circ\text{C}$	100
Изменение атмосферного давления	± 1 тор	10
Вибрации	Уровень шума в помещении 100 дБ	10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зейгер С. Г., Климонтович Ю. Л., Ланда П. С. и др. Волновые и флуктуационные процессы в лазерах, М., «Наука», 1974, 416 с.
2. Javan A., Balik E., Bond L. Frequency characteristics of He-Ne laser. Journ. Opt. Soc. America v 52, 1962, p. 96-103.
3. Привалов В. Е., Филатов Ю. В. Влияние насыщения усиления на затухание частот линейного и кольцевого He-Ne-лазеров. — «Квантовая электроника», 1975, № 7, 2192-2199.
4. Захаренко Ю. Г., Привалов В. Е., Ткаченко Л. П. О механических напряжениях в окнах, установленных под углом Брюстера. — «Оптико-механическая промышленность» 1974, № 7, с. 51-53.
5. Привалов В. Е., Юдин С. Ф. Влияние формы сечения разрядного промежутка на усиление активной среды газового лазера. — «Квантовая электроника», 1974, № 11, с. 2484-2487.

6. Привалов В. Е. Измерение параметров движения с использованием ОКГ. — «Метрология и измерительная техника», 1974, № 7, с. 11—13.

7. Захаренко Ю. Г., Привалов В. Е. Об устранении колебаний в разряде He—Ne-лазера. — «Автоматика», 1974, № 6, с. 99—101.

8. Захаренко Ю. Г., Покровская Е. И., Привалов В. Е. Исследование устойчивости разряда и частотных характеристик реактивных колебаний в He—Ne-лазерах. — «Квантовая электроника», 1974, № 12, с. 2500—2583.

9. Захаренко Ю. Г., Привалов В. Е. Взаимодействие колебаний в разряде. — «Журнал технической физики», 1974, № 7, с. 1566—1568.

10. Захаренко Ю. Г. О модуляции стратами излучения He—Ne-лазера. — «Оптика и спектроскопия», 1974, № 5, с. 989—991.

11. Захаренко Ю. Г., Мельников И. А., Привалов В. Е. Влияние стабильности источника питания КОКГ на параметры ИПУС. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 156(216), М., Изд-во стандартов, 1974, с. 125—129.

Поступила в редакцию 6. 5. 1975 г.

УДК 531.714.2 : 531.715.1 : 621.375.826

В. Л. ШУР

ВИННИМ

ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ЧАСТОТЕ 30 МГц

Основными особенностями измерения амплитуд вибраций в инфракрасном диапазоне частот с помощью двухлучевого интерферометра с большой разностью хода является нестабильность сигнала регистрации полос, вызванная расходямостью лазерного излучения; воздействие неизмеряемых колебаний отражателя; флуктуирующая амплитуда и фазы сигнальной волны, вызванные турбулентным движением воздуха. Интерферометры с прямым счетом интерференционных полос и гальваническими связями по тракту прохождения измерительных сигналов из-за дрейфа сигналов фотодетекторов и усилителей, непригодны для применения в указанных условиях.

Существенные преимущества имеют интерферометры с модуляцией разности фаз интерферирующих лучков: они позволяют преобразовывать измерительный сигнал с помощью усилителей переменного тока. Такие приборы применяются для исследования механических колебаний с амплитудой, не превышающей длину световой волны [1].

Первая гармоника фототока, величина которого пропорциональна световому потоку, при фотоэлектрической регистрации интерференционной картины определяется по формуле [1]

$$I = a J_1(k\Delta) \sin \Phi \sin \Omega t, \quad (1)$$

где J_1 — функция Бесселя 1-го порядка, 1-го рода; k — волновое число; Δ — амплитуда модулирующего колебания; Φ — текущее значение разности фаз; Ω — круговая частота модуляции; a — постоянная, пропорциональная интенсивности источника света. Из приведенной формулы видно, что при измерении малых амплитуд синусоидальных колебаний максимальная чувствительность наблюдается при начальной разности фаз $\sin \Phi = 1$ и узкой полосе электрического фильтра. Однако интерферометр с фазовой модуляцией позволяет измерять также колебания с амплитудой, превышающей длину волны излучения, т. е. в условиях значительного изменения разности фаз Φ . Выделяемый сигнал отбрасывает частоты модуляции Ω позволяет производить счет числа интерференционных полос при перемещении отражателя измерительного плеча интерферометра (амплитуда модуляции Δ поддерживается постоянной). Большое значение имеет частота фазовой модуляции, которая должна на порядок превышать максимальную частоту прохождения интерференционных полос. Например, при максимальной скорости перемещения отражателя 0,5 м/с

при длине волны $\lambda=0,633$ мкм частота модуляции должна быть не ниже 10 МГц.

Схема двухлучевого интерферометра изображена на рисунке. В качестве источника светового излучения применен одночастотный стабилизированный He-Ne-лазер. Коалимирующая система обеспечивает расхождение излучения $\theta=5 \cdot 10^{-6}$ рад.

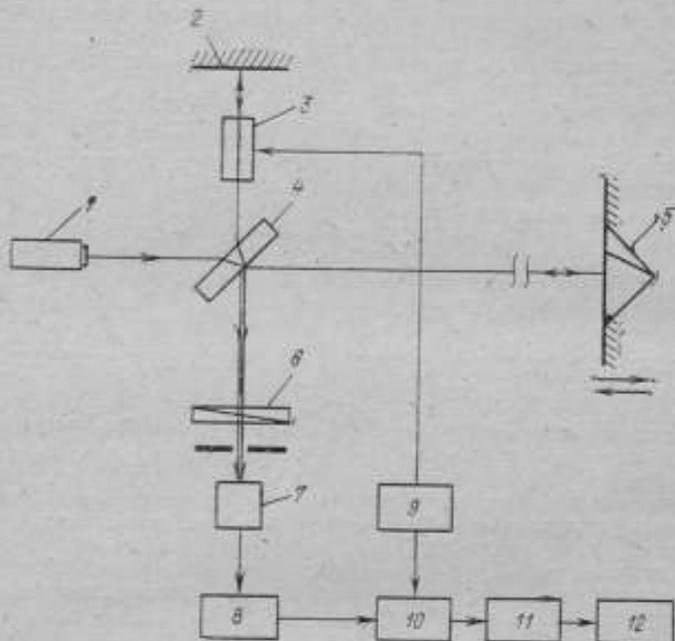


Схема двухлучевого интерферометра

1—He—Ne-лазер; 2—референтное зеркало; 3—модулятор; 4—светоразделительная пластинка; 5—измерительный отражатель; 6—поляризатор; 7—фотодетектор; 8—усилитель; 9—модулирующий генератор; 10—демодулятор; 11—формирователь импульсов; 12—счетчик

В референтном плече интерферометра [2] размещен одноосный кристалл типа КДР, обладающий линейным электрооптическим эффектом и модулирующей разность фаз. Для уменьшения модулирующего напряжения использовался поперечный электрооптический эффект и при соотношении длины кристалла (вдоль распространения света) к толщине (в направлении электрического поля) $l/d=10$, модуляция разности фаз при этом равна примерно d/b на частоте 30 МГц.

С целью температурной компенсации естественного двулучепреломления применялись два идентичных кристалла, оптические оси которых развернуты на 90° .

Измерительный сигнал с помощью фотоприемника преобразуется в электрический и демодулируется. При перемещении отражателя формируются импульсы в соответствии с изменением огибающей сигнала при прохождении интерференционных полос. Для упрощения на схеме не показаны элементы, обеспечивающие реверсивность регистрации полос.

Шумовой сигнал амплитудной модуляции, возникающий вследствие неоднородности материала модулятора и неточности ориентирования его осей

относительно плоскости поляризации излучения лазера, обуславливает ограниченные диапазоны возможных изменений разности хода в интерферометре.

Как показали экспериментальные исследования, отношение сигнал — шум при разности хода, соответствующей максимальному сигналу модуляции, равно $1 \cdot 10^3$, причем это значение определялось, в основном, флуктуациями излучения лазера. Изменение максимума сигнала модуляции при изменении разности хода интерферирующих лучей от 0 до 6 м не превышает 10%.

Следует отметить целесообразность применения фазового модулятора с использованием линейного электрооптического эффекта и для измерения малых амплитуд колебаний, когда для достижения наибольшей чувствительности необходимо создавать плавно регулируемый фазовый сдвиг, однако в этом случае следует учитывать некоторое уменьшение соотношения сигнал — шум по сравнению со значением, определяемым дробным шумом сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик П. С. Некоторые микрофазометрические методы в радиофизике и оптике. — «Измерительная техника», 1955, № 3, с. 11—19.
2. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М., «Наука», 1970, 295 с, с ил.

Поступила в редакцию 6.6.1975 г.

УДК 531.714.2 : 681.786.24.069.24

С. Н. ИВАШЕВСКИЙ
ВНИИМ

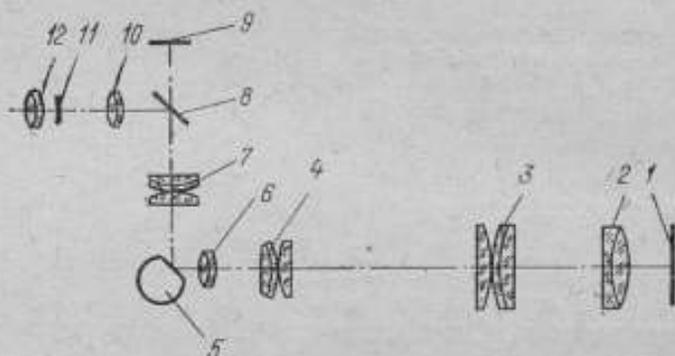
ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МЕТОДОМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Метод определения результирующей погрешности и ее зависимости от погрешностей отдельных преобразователей при измерении перемещений объектов включает в себя два вида преобразования: прямое и уравнивающее. В фотоэлектрических устройствах метод уравнивающего преобразования при достаточно стабильной цепи обратной связи обеспечивает более высокую точность измерений за счет уменьшения чувствительности в цепи прямого преобразования.

В оптико-электронном компенсационном измерительном устройстве (ИУ) уравнивающего преобразования для измерения перемещений объектов в качестве управляемого источника света использована электронно-лучевая трубка. На рисунке приведена оптическая схема ИУ. Световой поток от светящейся точки на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) 1 с помощью оптической системы 2, 3, 4, 6 собирается на в кромке отражающей поверхности объекта 5 (движение происходит перпендикулярно плоскости рисунка). Часть светового потока отражается от кромки объекта и направляется объективом 7 на фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 9. Контроль наведения пятна на отражающую фаску осуществляется визуальной системой 8, 10, 11, 12 (увеличение $60\times$) с погрешностью 3 мкм. Для измерения перемещений в диапазоне 20 мкм—3,5 мм была выбрана оптическая система со сменой увеличения $0,1\times$ и $0,4\times$. В плоскости фотокатода ФЭУ изображается входной зрачок проекционной системы, что обеспечивает постоянство условий освещения фотокатода ФЭУ при движении пятна по экрану ЭЛТ. Применение ЭЛТ с малым временем послесвечения люминофора (порядка 10^{-6} с) позволяет получить ИУ с хорошими динамическими характеристиками. При неподвижном объекте изображение светящейся точки с экрана ЭЛТ устанавливается посередине относительно края объекта (например, по фототоку ФЭУ). При движении объекта фототок ФЭУ начнет меняться. Соответственно входное напряжение усилителя изменится по величине и по знаку. Усиленное до определенной степени напряжение подается на вертикальные отклоняющие пластины ЭЛТ, в результате чего

устанавливается обратная связь между контрастной границей объекта и отклоняющим напряжением, являющимся выходным параметром ИУ. С помощью напряжения обратной связи удерживается изображение пятна посередине относительно края объекта. Проведенные расчеты свидетельствуют о линейности характеристики изменения светового потока (смещение контрастной границы объекта) в пределах $\pm 1/3$ от центра пятна, что является достаточным для следящей системы. Экспериментально были определены коэффициенты преобразования отдельных звеньев ИУ. Статическая погрешность составила $3 \cdot 10^{-3}$.

Смещения объектов (импульсные или периодические) регистрируются запоминающим осциллографом. В процессе измерений осуществляется градуировка его по сигналу от генератора синусоидальных напряжений, измеряемому цифровым вольтметром, амплитуда сигнала на экране измеряется отсчетным микроскопом. При этом осциллограф используется в режиме компаратора напряжений.



Оптическая схема ИУ

Градуировка и аттестация ИУ потребовала создания специального оборудования и разработки соответствующей методики. Это объясняется сложностью теоретического расчета коэффициента преобразования. Градуировка осуществлялась в динамическом режиме и с необходимой точностью. Для этого использовался диск-модулятор с несколькими прорезями полусинусоидальной формы. Глубина прорезей менялась от 0,03 до 3,5 мм. Модулятор выполнен в виде усеченного конуса и располагался под углом 45° к оптической оси ИУ, при этом движение луча на экране ЭЛТ происходило по той же траектории и в том же направлении, что и при измерениях движения объекта. При градуировке использовались также цилиндрические модуляторы с прорезями вдоль основания цилиндра. На экране осциллографа регистрировалась одновременно реакция ИУ на несколько смещений при заданном увеличении оптической системы. Осциллограф градуировался указанным выше способом. Градуировочный диск может вращаться с переменной скоростью, что позволяет изменять длительность импульсов смещения. Глубины пазов измерялись на микроскопе УИМ-21 с погрешностью 1–2 мкм. Для определения реакции ИУ на единичный скачок смещения объекта использовался диск с прорезью по радиусу. По экспериментально определенной переходной функции ИУ, которая является полной метрологической характеристикой системы, рассчитывались динамические погрешности измерения пикового значения импульса ускорения. По крутизне переходной характеристики удобно контролировать граничную частоту ИУ (60 кГц). Длительность фронта воспроизводимого единичного скачка — менее 0,01 времени установления показаний. Следует заметить, что при измерениях однонаправленных ударных смещений удалось почти полностью исключить влияние послесвечения люминофора ЭЛТ. При этом граничная частота ИУ превышает 100 кГц.

Для определения реакции $IУ$ на периодические смещения от 0,3 до 4 мкм был разработан интерферометр по схеме однообъективного микроинтерферометра типа Захаревского, позволяющий наблюдать смещение ахроматической полосы интерференции при колебаниях зеркала с частотой до 2 кГц. В качестве источника света в интерферометре использовалась импульсная лампа ИСШ-15, зеркало интерферометра соединялось с пьезоэлектрическим вибратором. На отражающую фаску этого зеркала фокусируется светящееся пятно с экрана ЭЛТ. Возбуждение вибратора и питание стробоскопической лампы осуществляется от генератора синусоидальных колебаний. Для компенсации возможных фазовых сдвигов между колебаниями зеркала и импульсной подсветкой интерференционного поля производилась регулировка фазы запускающих импульсов стробоскопической лампы относительно напряжения от генератора [1].

Экспериментально определенная чувствительность $IУ$ при различных увеличениях оптической системы составляет от 0,5 до 2 мкм. Аналогичные измерения производились при гармоническом движении объектов. Нестабильность показаний $IУ$ — 0,7%, коэффициенты нелинейности градуировочной характеристики при увеличениях $0,1^{\times}$ и $0,4^{\times}$ — 0,8% и 0,4% соответственно. Показатель энергетической добротности 0,68, энергетический порог чувствительности цепи прямого преобразования $5 \cdot 10^{-13}$ Вт.

Система измерения кратковременных смещений используется для определения пиковых ускорений при ударном движении от 10^2 до 10^5 м/с² в диапазоне длительностей 50—200 мкс [2]; а также в виброметрии для измерения амплитуды перемещения от 50 до 1000 мкм на частотах $0,5$ — $2 \cdot 10^4$ Гц.

Результирующая погрешность измерения смещения объекта определяется нестабильностью коэффициентов преобразования отдельных звеньев $IУ$ — коэффициента усиления, чувствительности ФЭУ и яркости свечения точки на экране ЭЛТ. Эти составляющие погрешности исследовались экспериментально, а их вклад в суммарную погрешность (как и измерения коэффициента отражения поверхности объекта) вычислялся с коэффициентом влияния порядка 0,01, так как общий коэффициент преобразования $IУ$ порядка 100. В связи с этим нестабильность элементов в цепи прямого преобразования проявляется незначительно. При движении светящейся точки по экрану ЭЛТ может происходить изменение функции распределения яркости в изображении пятна, что приведет к изменению коэффициента преобразования $IУ$. Измерения функции распределения в крайних положениях источника света на экране производились при разомкнутой цепи обратной связи по фототоку ФЭУ движением непрозрачного полукрана относительно изображения пятна. Функция распределения яркости, действительно, менялась, но наклон рабочей части характеристики оставался неизменным. Таким образом, определялась суммарная погрешность от изменения aberrаций в пределах поля $IУ$, дефектов люминофора экрана ЭЛТ и aberrаций электронных линз ЭЛТ. Измерялась составляющая погрешности, вызванная неравномерностью зональной чувствительности ФЭУ. Эта погрешность сводится к минимуму, если перед фотокатодом ФЭУ поместить матированную стеклинную пластину. Действительно, при движении изображения пятна по отражающей поверхности в пределах поля изменения анодного тока ФЭУ составляли ~1%. Суммарная погрешность $IУ$ составляет 1,5—2%. Применение измерительных преобразователей — ЭЛТ и ФЭУ с достаточно малой постоянной времени, большими статическими коэффициентами передачи при обеспечении необходимой стабильности обратного преобразования позволило получить измерительное устройство с высокой энергетической добротностью.

Разработанное метрологическое средство может найти широкое применение при измерениях параметров движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карташев А. И., Ивашевский С. Н. Градуировка оптико-электронной системы измерения кратковременных смещений. — «Приборы и техника эксперимента», 1972, № 5, с. 17—20.

2. Барков Е. А., Ивашевский С. Н., Пелливец В. С. Установка для градуировки измерительных преобразователей при амплитудах импульсов ускорения свыше 50 км/с^2 . — «Вибрационная техника», 1971, № 1, с. 8—13.

Поступила в редакцию 25.5.1975 г.

УДК 534.647.083.2 : 539.122.074.3.037.92

В. И. ГУДОВ, Б. И. РОГОЗЕВ, В. Л. ФЕДОРИН,
Н. К. ЧЕРЕЗОВ, В. С. ШКАЛИКОВ

ВНИИМ

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО СЦИТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА В КАЧЕСТВЕ ГАММА-РЕЗОНАНСНОГО ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

При измерении параметров вибраций методом ядерного гамма-резонанса (эффекта Мессбауэра) эффект резонансного поглощения гамма-квантов определяется как функция относительной скорости движения источника гамма-излучения и поглотителя. Непосредственно в эксперименте измеряют число (или интенсивность) проходящих через поглотитель квантов N в зависимости от скорости движения источника относительно поглотителя v . На основании этих данных резонансный эффект ϵ определяется по формуле

$$\epsilon_v = \frac{N_{\text{пр}} - N_0}{N_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где N_0 — интенсивность квантов при относительной скорости движения источника и поглотителя v ; $N_{\text{пр}}$ — интенсивность квантов при отсутствии резонанса, т. е. при достаточно большой (предельной) скорости.

Максимальное значение резонансного эффекта ϵ_0 достигается при полном перекрытии линий испускания и поглощения. Если источник и поглотитель изготовлены из одного материала и находятся в одинаковых условиях, то линии поглощения совпадает по энергии с линией испускания (изомерный сдвиг равен нулю), и максимальная величина резонансного поглощения наблюдается при относительной скорости, равной нулю, т. е.

$$\epsilon_0 = \frac{N_{\text{пр}} - N_0}{N_{\text{пр}}}. \quad (2)$$

При колебательном движении источника относительно поглотителя происходит периодическое изменение резонансного поглощения, и, если время измерения значительно больше периода колебаний, то будет получено некоторое среднее значение резонансного поглощения $\bar{\epsilon}$. Если резонансная линия имеет лоренцеву форму (при одиночной линии и небольших толщинах источника и поглотителя) и происходит гармоническое движение, то среднее значение резонансного эффекта следующим образом зависит от скорости [1, 2]:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_0}{\sqrt{1 + 4v^2}}, \quad (3)$$

где v — амплитуда скорости, измеряемая в единицах ширины экспериментальной линии Γ ; ϵ_0 — максимальный резонансный эффект при отсутствии вибраций.

При таком методе измерения параметров вибраций для коэффициента преобразования, определяемого отношением $k = \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\Delta v}$, из формулы (3) получаем

$$k \sim \epsilon_0. \quad (4)$$

Для относительной погрешности измерений амплитуды гармонических колебаний из формулы (3) находим также

$$\frac{\Delta v}{v} \sim \frac{1}{\epsilon_0}$$

Из формул (4) и (5) следует, что для уменьшения погрешности измерений и увеличения коэффициента преобразования необходимо добиваться возможно большего резонансного эффекта. Когда измеряют эффект Мессбауэра методом «пропускания», при котором детектор регистрирует интенсивность прошедших сквозь поглотитель квантов, максимальный эффект резонансного поглощения не превышает 100%. Для изотопа ^{119}Sn эта величина составляет 25–35%.

Экспериментально наблюдаемый резонанс можно значительно увеличить путем селективного (резонансного) детектирования квантов, испускаемых без отдачи. При этом вещество, резонансно поглощающее гамма-кванты (наполнитель), вводится непосредственно в чувствительный объем детектора. Конструктивно детектор выполняется таким образом, чтобы он обладал низкой эффективностью регистрации нерезонансных излучений и высокой эффективностью регистрации конверсионных электронов, испускаемых при резонансном поглощении. Значение резонанса, измеряемое с помощью такого детектора, зависит также от соотношения между сечением резонансного поглощения и сечениями нерезонансных взаимодействий с веществом наполнителя и детектора. Например, для изотопов ^{57}Fe и ^{119}Sn эффективное сечение резонансного поглощения более чем на порядок превышает сечения нерезонансных процессов. Это способствует получению большого значения эффекта при резонансном детектировании.

В работе [3] для измерения вибраций в качестве гамма-резонансного преобразователя был применен газовый резонансный детектор. Он представлял собой газовый счетчик, катод которого изнутри покрыт тонким слоем поглотителя (SnO_2 или BaSnO_3), обогащенного резонансным изотопом олова [4]. Счетчик обладал весьма малой чувствительностью к гамма- и рентгеновскому излучению ^{119}Sn и эффективно регистрировал электроны внутренней конверсии, испускаемые возбужденными в результате резонансного поглощения ядрами олова. Это позволило получить максимальный резонансный эффект около 500%.

В настоящей работе для измерения вибраций был применен сцинтилляционный резонансный мессбауэровский преобразователь с максимальным резонансным эффектом около 2000%. Преобразователь представляет собой тонкий слой (около 0,1 мм) приклеенного к ФЭУ пластического сцинтиллятора (полистирол с *p*-терфенилом), внутри которого находится резонансный поглотитель в виде мельчайшего порошка $^{119}\text{SnO}_2$. Применение столь тонкого слоя вещества с низким атомным номером в качестве сцинтиллятора позволяет свести к минимуму чувствительность детектора к нерезонансному излучению, в то время как электроны внутренней конверсии, испускаемые при высвечивании возбужденных при резонансном поглощении ядер ^{119}Sn , регистрируются сцинтиллятором с эффективностью почти 100%.

Сцинтилляционный детектор имеет и другие преимущества перед газовым счетчиком. Во-первых, он отличается простотой конструкции и связанной с этим высокой стабильностью характеристик, а также надежностью и удобством в эксплуатации; конструкции же газового счетчика должна предусматривать наличие тонких входных окон, тонкого катода со слоем поглотителя, высокую герметичность и возможность смены отработанной газовой смеси. Во-вторых, пластические сцинтилляторы имеют оптимально-временные характеристики (время высвечивания около 10^{-8} с) и поэтому могут работать при очень больших нагрузках, в то время как максимальная скорость счета газовых счетчиков (особенно при работе в гейгеровском режиме) не превышает несколько тысяч импульсов в секунду. Все это позволяет при работе со сцинтилляционным резонансным детектором применять мощные источники и тем самым существенно уменьшить время измерений, необходимое для достижения стати-

стической точности измерения. Кроме того, у сцинтилляционного резонансного детектора эффективность регистрации конверсионных электронов практически равна 100%, тогда как для газовых счетчиков она не превышает 50%, поэтому даже при одинаковой толщине резонансного поглотителя сцинтилляционный счетчик обеспечивает большую скорость счета, чем газовый.

Для измерений параметров вибраций методом ядерного гамма-резонанса требуется предварительная градуировка рабочей пары источник—поглотитель, т. е. измерение эффекта резонансного поглощения в зависимости от скорости. Такая градуировка была выполнена во ВНИИМ на установке постоянных скоростей и на образцовой инфразвуковой вибрационной установке ОИВУ-2 с погрешностью 2%.

Контрольные измерения амплитуд вибраций с помощью описанного выше резонансного сцинтилляционного детектора выполнены на ультразвуковой вибрационной установке ВНИИМ в диапазоне частот 10—50 кГц. Измерения проводились интегральным методом с применением источника $^{119m}\text{SnO}_2$ активностью около 20 мКи. В указанном диапазоне часто были измерены амплитуды перемещения 0,001—0,05 мкм с погрешностью 3—5%.

Сопоставив полученные данные с результатами работы [3], где использовался газовый счетчик, можно сделать вывод, что при применении сцинтилляционного резонансного детектора с большим эффектом в качестве измерительного гамма-резонансного преобразователя уменьшается погрешность измерения параметров вибраций и повышается чувствительность метода. Еще более эффективно применение сцинтилляционного резонансного детектора при измерениях дифференциальным методом [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкалик В. С., Федорин В. Л. Измерение параметров вибраций, М., Изд-во стандартов, 1971, 121 с.
2. Витман В. Д., Федорин В. Л., Шкалик В. С. Комплекс аппаратуры для измерения параметров вибраций с помощью эффекта Мессбауэра. — «Труды метрологических институтов СССР». Вып. 139(199), М., Изд-во стандартов, 1972, с. 72—77.
3. Гудов В. И., Степаненко В. И., Федорин В. Л., Шкалик В. С. Резонансный мессбауэровский преобразователь для измерения параметров вибраций. — «Тезисы докладов на XXII Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра», Киев, 1972, ч. 11, 94 с.
4. Митрофанов К. П., Илларионова Н. В., Швинель В. С. Счетчик с избирательной эффективностью для регистрации испускаемых без отдачи гамма-лучей. — «Приборы и техника эксперимента», 1963, № 42, с. 15—19.

Поступила в редакцию 6.5.1975 г.

УДК 531.714.2 : 681.787.7

Н. О. КРЫЛОВА

ВНИИМ

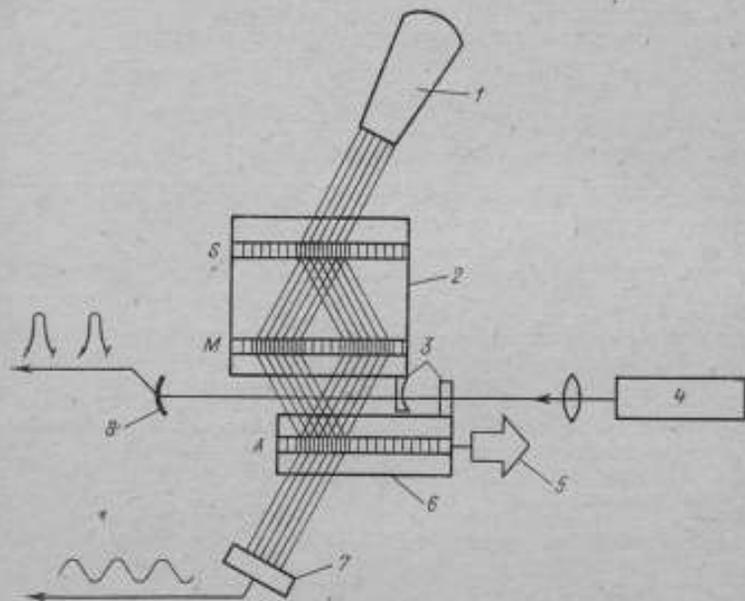
РЕНТГЕНОВСКИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУД ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОТ 10^{-2} ДО 10^2 нм

В настоящее время возникла необходимость создания интерферометров для измерения амплитуд перемещения порядка 10^{-2} — 10^2 нм. В наибольшей мере для этой цели подходят рентгеновские интерферометры, позволяющие производить сверхпрецизионные физические измерения перемещений порядка 0,1 мкм с абсолютной погрешностью ± 2 нм [1].

Рентгеновская интерферометрия стала развиваться в последнее десятилетие с созданием высококачественных монокристаллов кремния. Долгое время интерференцию рентгеновских лучей не удавалось получить по двум причи-

нам: во-первых, волны длиной 0,01—1 нм невозможно сфокусировать с помощью линзы, так как показатель их преломления отличается от единицы на величину 10^{-3} — 10^{-5} ; во-вторых, стабильность взаимного расположения частей интерферометра должна контролироваться с погрешностью до нескольких десятых нанометра. Изготовление прибора из высококачественных монокристаллов кремния позволило Бонзэ и Харту преодолеть эти трудности и создать первый рентгеновский интерферометр [2].

По используемому отражению рентгеновские интерферометры делятся на три типа: по Лауэ, по Брэггу и смешанного. Наибольшее распространение получил интерферометр с отражением по Лауэ. В этом интерферометре три рав-



Принципиальная схема оптико-рентгеновского интерферометра для прецизионного измерения постоянной решетки кристалла

1—источник рентгеновского излучения; 2—блок совершенного монокристалла с пластинами S и M; 3—эталон Фабри-Перо; 4—лазер; 5—механизм для параллельного сдвига пластины A относительно пластин S и M; 6—блок совершенного монокристалла с пластиной A; 7—детектор рентгеновского излучения; 8—оптический детектор

ностоящие кристаллические пластины, перпендикулярные общему основанию, вырезаны из одного блока монокристалла. Этим обеспечивается точное совпадение направлений соответствующих атомных плоскостей трех кристаллических пластинок.

На рисунке приведена принципиальная схема интерферометра. Рентгеновское излучение, падающее на поверхность интерферометра, вследствие отражения от атомных плоскостей кристаллической пластинки S расщепляется на две когерентные волны. После отражения от атомных плоскостей пластинки M перед поверхностью анализаторной пластинки A образуется картина стоячих волн P, являющаяся оптическим изображением атомных плоскостей в кристалле. В выходящих лучах R или T можно наблюдать картину муара вследствие суперпозиции картины стоячих волн P и системы атомных плоскостей пластинки A. В качестве источника рентгеновского излучения используются

рентгеновские трубки MoK_α - и CuK_α -излучениями. Картина муара регистрируется ионизационным методом или на фотопластинку. Рентгеновский муар, образующийся при прохождении излучения через кристаллические решетки, по своей природе аналогичен муару, возникающему на штриховых дифракционных решетках. При наложении двух одинаковых решеток с периодом d и поворотом относительно друг друга на небольшой угол θ наблюдается картина муара с полосами, параллельными вектору дифракции, и с периодом

$$D = \frac{d}{\theta}. \quad (1)$$

Если штрихи решеток параллельны, но периоды d_1 и d_2 несколько отличаются друг от друга, то получается картина муара с периодом

$$D = \frac{d_1 - d_2}{d_1 - d_2}. \quad (2)$$

И наконец, при наложении двух решеток с разными периодами и с разной ориентацией наблюдаются полосы муара, которые составляют угол $\arctg \frac{d_1 - d_2}{d_2 \theta}$ с дифракционным вектором и имеют период

$$D = d_1 \left[\frac{(d_1 - d_2)^2}{d_2^2} + \theta^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Толщина кристаллических пластинок выбирается такой, чтобы на выходных поверхностях каждой из пластинок заметную интенсивность имели только волны с аномально низким коэффициентом поглощения.

Зависимость положения картины стоячих волн от фазового сдвига между интерферирующими лучами дает возможность использовать рентгеновский интерферометр для измерения показателя преломления рентгеновских лучей и толщины различных предметов. Показатель преломления рентгеновских лучей может быть измерен таким методом с относительной погрешностью 0,1–0,5% [3]. Никакими другими методами такой точности достичь невозможно.

Чувствительность картины муара к вращению третьей пластинки интерферометра относительно двух других дает возможность производить измерения малых углов. Из соотношения (1) следует, что таким методом можно измерить углы от десятых до тысячных долей угловой секунды.

Абсолютные измерения малых длин с помощью рентгеновского интерферометра основываются на следующем принципе. Третью пластину интерферометра (анализатор) перемещают строго по нормали к плоскостям отражения (см. рисунок). При перемещении анализатора A на расстояние d , равное расстоянию между этими плоскостями, наблюдается одна полоса муара. Пересчитывая n полос муара при одновременном измерении перемещения, равного nd , с помощью оптического интерферометра можно измерить расстояние d в метрах. Кристалл, в котором постоянная решетки измерена с высокой точностью, в дальнейшем применяется в качестве линейки с делениями в виде «атомных плоскостей» для измерения малых перемещений. Практически осуществить этот метод очень сложно. Однако в ряде национальных лабораторий установили для прецизионного измерения постоянной кристаллической решетки созданы и с успехом применяются для точных измерений [1, 4, 5].

В предварительных экспериментах, выполненных в Англии [1], расстояние порядка 0,1 мкм измерялось с абсолютной погрешностью ± 2 нм. Это позволит создать вторичный эталон длины в области длин порядка 0,1 нм для рентгеновской и γ -спектроскопии.

В США постоянная решетки кремния была измерена с относительной погрешностью $3 \cdot 10^{-7}$ [4, 5], что дало возможность провести абсолютные измерения длин волн эталонных линий рентгеновского излучения $\lambda(\text{MoK}_\alpha)$ и $\lambda(\text{CuK}_\alpha)$ с относительными погрешностями соответственно $6 \cdot 10^{-7}$ и $1 \cdot 10^{-6}$ и

определить со значительно большей точностью значения постоянной Зигбана—переводного множителя от рентгеновских kX -единиц к ангстремам.

Измерение постоянной решетки кремния с относительной погрешностью $0,25 \cdot 10^{-6}$ позволило определить значение числа Авогадро с относительной погрешностью $1,65 \cdot 10^{-6}$ [5].

Применение оптико-рентгеновского интерферометра в виброметрии позволит повысить на два порядка точность измерения параметров вибрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hart M. An angstrom ruler.—Brit. J. Appl. Phys., 1968, ser. 2, v. 1, № 11, p. 1405—1408.
2. Bonse U., Hart M. X-ray interferometer.—Appl. Phys. Letters, 1965, v. 6, p. 155—156.
3. Дроздовский В. Б., Михайлюк И. П., Рарапский Н. Д. Определение показателя преломления методом рентгеновской интерферометрии.—Украинский физический журнал, 1972, № 7, с. 1212—1214.
4. Deslattes R. D., Henins A. X-ray to Visible Wavelength Ratios.—Phys. Rev. Letters, 1973, v. 31, № 16, p. 972—975.
5. Deslattes R. D., Henins A., Schoonover R. M. и др. Determination of the Avogadro Constant.—Phys. Rev. Letters, 1974, v. 33, № 8, p. 463—466.

Поступила в редакцию 25.5.1975 г.

УДК 534.232.089.6—6

Ж. Д. ДАШИННИКОВ

ВНИИМ

АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОГО ВИБРАТОРА

Разработана и изготовлена вибрационная установка для воспроизведения больших и плавно регулируемых амплитуд перемещения. Она предназначена для проверки и градуировки инфранизкочастотных [1, 2] виброметров. Для создания гармонического движения платформы был разработан электромеханический вибратор, в котором приводом служит кривошипно-шатунный механизм с дополнительным прицепным шатуном. Функциональная схема вибратора приведена на рис. 1. Кривошип r приводится в движение электродвигателем с червячным редуктором и фрикционным вариатором, позволяющим изменять его обороты в диапазоне частот $2 \cdot 10^{-2}$ —2 Гц. Ползун D прицепного шатуна связан шарнирной передачей с одним концом рычага 3, второй конец которого приводит в движение платформу 1 в направляющих 2. Размах колебаний платформы определяется соотношением плеч рычага, которое плавно изменяется при перемещении ручкой 6 подвижной опоры 4, скользящей по направляющим 5. В первом приближении закон движения поводка-конца рычага, связанного с платформой, можно принять тот же, что и у ползуна. Уравнение движения ползуна имеет вид [3]

$$x = l_2 - l_1 + r \cos \omega_1 t + \frac{r^2}{2l_1} \left(l_2 - \frac{l_1^2}{l_2} \right) \sin^2 2\omega_1 t + \\ + \frac{r^4}{8l_1} \left(l_2 - \frac{l_1^2}{l_2} \right) \sin^4 3\omega_1 t + \dots \quad (1)$$

При $l_2 - \frac{l_1^2}{l_2} = 0$ и пренебрегая членами, содержащими отношение r/l_1 в степени выше второй, можем записать

$$x = m(l_2 - l_1) + mr \cos \omega_1 t, \quad (2)$$

где m — коэффициент, учитывающий соотношение плеч рычага. Уравнение движения платформы не содержит членов, искажающих гармоническое дви-

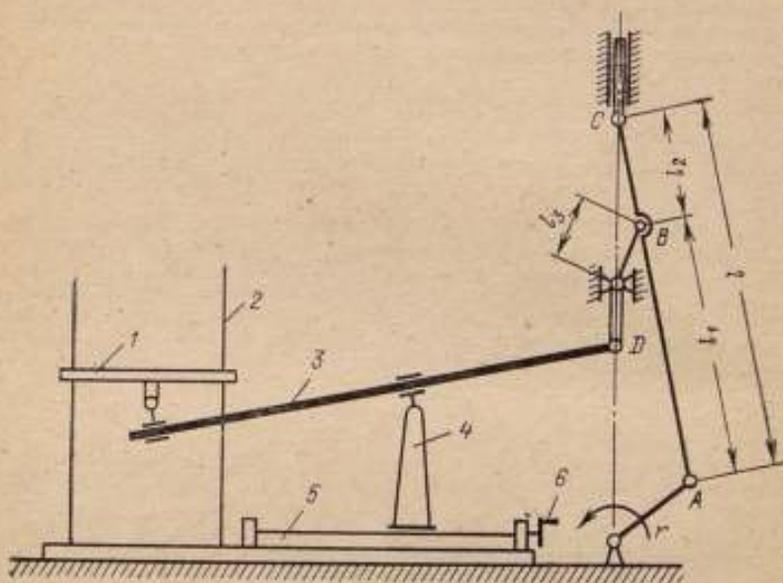


Рис. 1. Функциональная схема вибратора

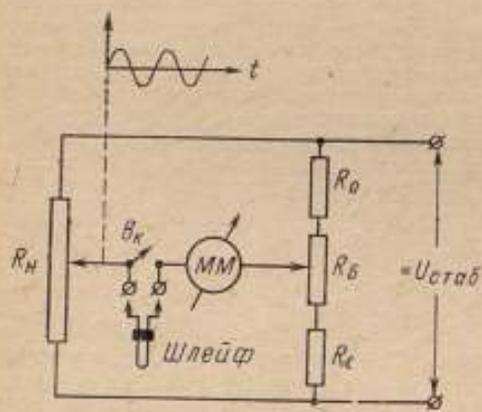


Рис. 2. Схема моста для измерения амплитуды перемещения платформы вибратора

жение платформы, а также четных гармонических составляющих. Анализ виброграмм позволит оценить коэффициент гармоник подвижной системы вибратора, связанный с конструктивными особенностями механического вибратора. В этом случае колебания могут быть записаны в виде

$$x = A_0 + A_1 \cos \omega_1 t + \sum_{l=2}^M A_l \cos (l\omega_1 t + \varphi_l), \quad (3)$$

где A_1 и ω_1 — амплитуда и частота первой гармоники соответственно; A_l , ω_l и φ_l — амплитуда, частота и начальная фаза l -й гармоники. Коэффициент нелинейных искажений определяется по формуле

$$k_{\tau} = \frac{\sum_{l=2}^M A_l^2}{A_1^2}. \quad (4)$$

Выбор средств измерения амплитуд колебаний зависит от величины перемещения, требуемой точности измерения и типа регистратора. Для преобразования колебаний платформы в электрический сигнал был изготовлен потенциометрический преобразователь, обеспечивающий измерение сравнительно больших линейных перемещений (от 20 до 400 мм).

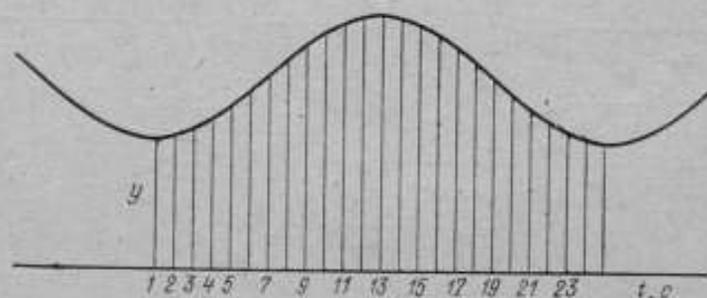


Рис. 3. Запись колебаний вибратора с отметками времени через 0,1 с. Амплитуда перемещения 160 мм на частоте 0,05 Гц

Выходной сигнал преобразователя представляет собой отношение плеч измерительного моста, которое определяется сравнением с показаниями других плеч (рис. 2).

Мостиковая схема измерения была применена благодаря ее высокой чувствительности, широкому диапазону, отсутствию дрейфа нуля и наличию точки равновесия, индикатором которого служит миллиамперметр с последовательно включенным шлейфом магнитоэлектрического осциллографа. Шкала миллиамперметра (с нулем посередине) проградуирована в миллиметрах и сантиметрах.

Потенциометрический преобразователь с ходом до 400 мм выполнен в виде цилиндра с равномерной намоткой, что обеспечивает постоянное приращение напряжения вдоль линии движения токоъемника, связанного с платформой. Выходной сигнал преобразователя регистрируется шлейфовым осциллографом.

На рис. 3 приведена виброграмма колебаний платформы с амплитудой перемещения 160 мм при частоте колебаний 0,05 Гц. Произведен графический

анализ. Для вычисления коэффициентов Фурье разобьем период функции T на $2n$ частей. Число $(2n-1)$ может быть одним из чисел 12, 24, 48 в зависимости от числа ординат схем анализа. Из формулы (1) видно, что для определения коэффициента нелинейных искажений достаточно ограничиться вычислением перах шести гармоник. Воспользуемся методом трапеции, тогда искомые коэффициенты определяются [4] следующим образом:

$$A_0 = \frac{\sum_{k=0}^{2n-1} y_k}{n}; \quad a_i = \frac{\sum_{k=0}^{2n-1} y_k \cos \frac{k_i \pi}{n}}{n}; \quad b_i = \frac{\sum_{k=0}^{2n-1} y_k \sin \frac{k_i \pi}{n}}{n}. \quad (5)$$

Математическая обработка виброграмм по формулам (5), несмотря на кажущуюся простоту, довольно трудоемка и может быть значительно сокращена при использовании ЭВМ.

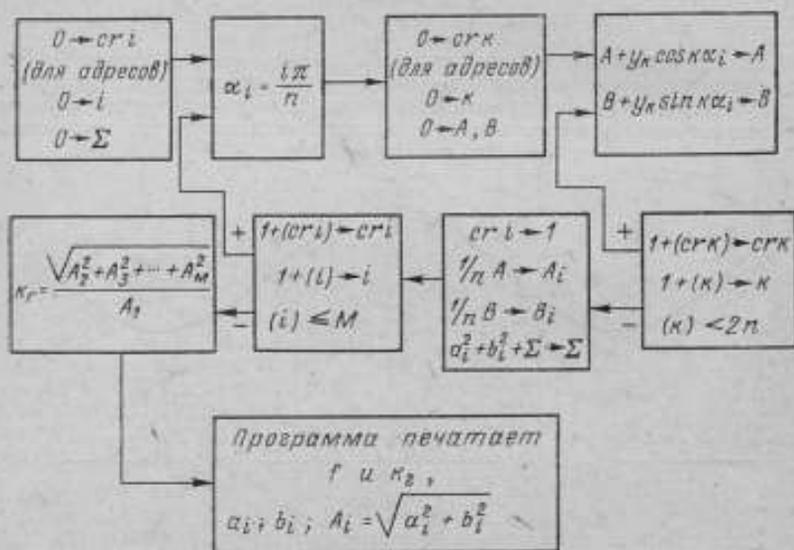


Рис. 4. Блок-схема программы

В качестве примера, иллюстрирующего вычисление машинной коэффициентов Фурье, амплитуд гармоник, коэффициента нелинейных искажений, приведем развернутый анализ виброграммы, изображенной на рис. 3. Программа, составленная для машины «Наир-2» (рис. 4), занимает ячейки 305—383. Исходные данные в плавающем режиме (ординаты кривой y_k , количество определяемых гармоник M и др.) определяются следующим образом: $y_0 \rightarrow 240$, $y_1 \rightarrow 341$, $y_2 \rightarrow 242$, ..., $y_{2n-1} \rightarrow 240 + 2n - 1$, затем $n \rightarrow 300$, $2n \rightarrow 301$, $M \rightarrow 302$, $f \rightarrow 303$.

Пуск программы начинается с 305-й команды. Вводимые в машину исходные данные и вычисленные коэффициенты приведены в табл. 1. На основании полученных данных можно будет построить частотный спектр функции. Последний представлен на рис. 5 в виде дискретной величины с одинаковыми интервалами между линиями спектра. Необходимо проверить точность самого метода определения коэффициентов Фурье, когда функция задана не непрерывно, а рядом $1, 2, 3, \dots, 2n$ значений $f(y_k)$, следующих с интервалом $\Delta = T/2n$. Для этой цели были использованы четырехзначные табличные зна-

$$y_0, y_1, y_2, \dots, y_{2n-1}, y_{2n}$$

$1) 2n - 1 = 12$	56,5	54,0	48,1	41,8	35,0	30,0	28,2	31,0	36,7	43,0	50,0	55,0											
$2) 2n - 1 = 24$	28,3	30,9	33,2	36,3	39,3	43,0	46,3	49,9	52,8	55,0	56,1	57,0	56,1	54,1	52,0	48,6	45,7	42,0	38,5	35,5	32,5	30,5	29,0

1)

$$f = 0,05 \Gamma \mu$$

$$k_T = 2,7852 \%$$

2)

$$f = 0,05 \Gamma \mu$$

$$k_T = 0,0473 \%$$

t	a_t	B_t	A_t	a_t	B_t	A_t
0	84,88333	0,00000	84,88333	85,149999	0,00000	85,15000
1	13,83902	-0,88719	13,86743	-13,91616	0,50782	13,92542
2	-0,00705	-0,02503	0,02501	0,05084	-0,05686	0,07627
3	0,31073	-0,12780	0,33599	-0,23960	0,03240	0,24178
4	-0,07115	0,03655	0,07999	-0,06150	-0,02697	0,06715
5	-0,01396	0,16240	0,16300	-0,05447	-0,08426	0,10610
6	-0,04998	0,01129	0,05124	0,02225	0,02781	0,03562

чения синуса на одном периоде, разбитом на 12 интервалов; при этом значения коэффициентов Фурье получились весьма малыми. Табулиграмма данной поверочной операции приведена в табл. 2. Усредненный коэффициент гармоник

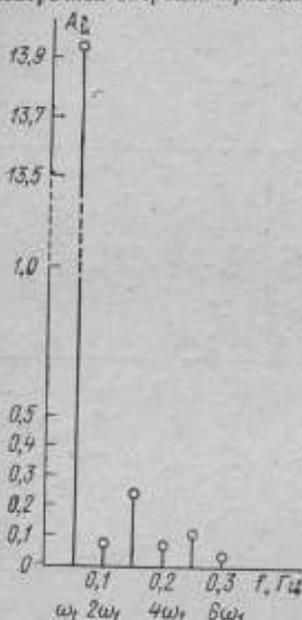


Рис. 5. Частотный спектр колебаний платформы вибратора

электрохимического вибратора равен 2,5%. Это позволяет отнести его к образцовым установкам 2-го разряда. Из табл. 1 видно, что амплитуды четных гармоник значительно меньше, чем нечетных,

Таблица 2

0,000; 0,500; 0,866; 1,000; 0,866; 0,500; 0,000; -0,50; -0,866; -10; -0,866; -0,75					
$k_r = 0,000122$					
	i	a_i	b_i	A_i	
	0	0,00000	0,00000	0,00000	
	1	0,00019	1,00001	0,00001	
	2	0,00000	-0,00009	0,00009	
	3	0,00000	-0,00005	0,00005	
	4	0,00000	-0,00004	0,00004	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дашинимаев Ж. Д. Механический вибратор для воспроизведения больших амплитуд перемещения на инфранизкой частоте. Л., Изд. ЛДНТП, 1973, 32 с. с ил.
2. Дашинимаев Ж. Д. Инфранизкочастотный вибростенд. Улан-Уде, Бургаз, 1974, с. 27—31.
3. Васманов В. В. Приборы для математической обработки и построения кривых. М., «Машиностроение», 1973, 175 с.

Поступила в редакцию 6. 5. 1975 г.

ОБРАЗЦОВЫЙ ВИБРОМЕТР ДЛЯ ПОВЕРКИ ВИБРАЦИОННЫХ
УСТАНОВОК ОВУ-1М И ОИВУ-2М

Образцовые вибрационные установки 2-го разряда требуют периодической поверки и аттестации по образцовым средствам 1-го разряда согласно ГОСТ 8.138-75.

Для вибрационных установок ОВУ-1М и ОИВУ-2М разработан образцовый виброметр, с помощью которого удалось уменьшить погрешность поверки до $\pm 5\%$ в диапазоне частот 1—10000 Гц. Образцовый виброметр состоит из насадки, которая навинчивается на штоки вибратора, и электронного измерительного прибора. В комплект входит две насадки. Первая из них (рис. 1).

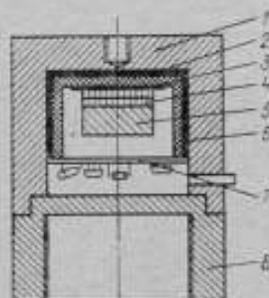


Рис. 1. Образцовый измерительный преобразователь

1—корпус; 2—клевое соединение; 3—подложка; 4—пьезоэлемент; 5—масса; 6—керамический стакан; 7—плата СУ; 8—основание

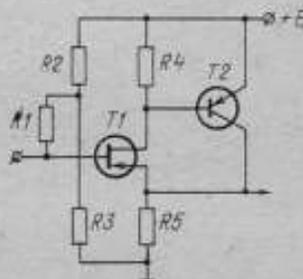


Рис. 2. Схема согласующего устройства

предназначена для измерения параметров вибраций в диапазоне частот 0,5—600 Гц с амплитудой виброускорений 10^{-3} — $1,5 \cdot 10^2$ м/с². В корпусе насадки

вмонтирован пьезоэлектрический измерительный преобразователь. Пьезоэлемент ЦТС-19 преобразователя помещен в керамический стакан, обладающий малым коэффициентом линейного расширения и малой теплопроводностью. Предварительный усилитель и согласующее устройство помещены также в корпус насадки. Применение керамического стакана позволило устранить частные погрешности от влияния деформации корпуса на пьезоэлемент и изменения температуры штока, в результате чего порог чувствительности снизился до 10^{-3} м/с². Согласующее устройство (рис. 2) представляет собой истоковый повторитель с входным сопротивлением 1,5 ГОм и выходным 600 Ом. Размещение высокоомного согласующего устройства с преобразователем непосредственно в корпусе насадки дает возможность исключить ограничения в длине кабелей и тем самым расширить нижний диапазон частот измерения до 0,5 Гц. Насадка второго типа построена по той же схеме, что и первая, но без согласующего устройства в корпусе. Она предназначена для измерения параметров вибраций в диапазоне частот 5—10000 Гц с амплитудой ускорений 10^{-2} — $1,5 \cdot 10^2$ м/с².

На рис. 3 приведена функциональная схема электронного измерительного блока, представляющего собой универсальный виброметр ускорения, скорости

максимальных (грубая оценка) и произведений средневыпрямленных значений двух взаимно перпендикулярных компонент виброускорений (измерение и запись).

Блок-схема одного из каналов представлена на рис. 1. Для получения средневыпрямленных значений виброускорения выходное напряжение виброизмерительного преобразователя B преобразуется в частоту. Затем осуществляется интегрирование в счетчике за выбранное время усреднения и преобразование кода счетчика в напряжение, подаваемое на вход шестиканального самопишущего потенциометра.

Тракт преобразования измерительного сигнала начинается корректирующей цепью, которая через разделительный конденсатор подключена к входу усилителя заряда УЗ. Напряжение, усиленное услителем заряда, через масштабный усилитель и ограничитель поступает на вход преобразователя на-

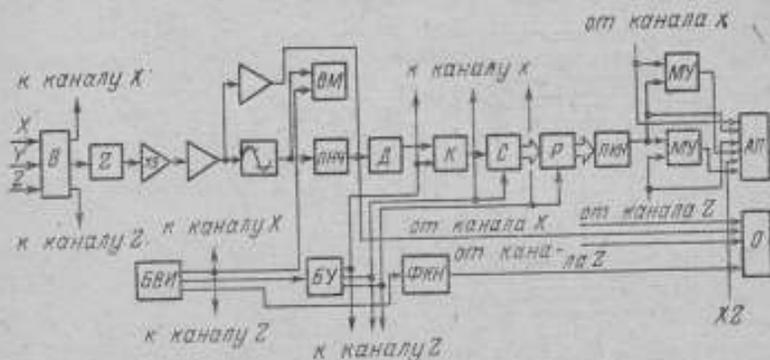


Рис. 1. Блок-схема канала.

применяя в частоту ПНЧ. Ограничитель служит для устранения двухзначности характеристики ПНЧ, имеющей максимум. Частота, пропорциональная измеряемому ускорению, делится делителем D с переменным коэффициентом деления соответственно выбранному времени усреднения и через ключ K заводит счетчик C . Ключ K управляется блоком управления $БУ$, общим для всех трех каналов. По истечении времени усреднения код счетчика переписывается в регистр P и хранится там в течение следующего интервала усреднения. Одновременно на выходе преобразователя код—напряжение PKH возникает напряжение, пропорциональное средневыпрямленному значению виброускорения. Это напряжение (0—50 мВ) регистрируется самопишущим потенциометром AP , причем время регистрации, благодаря наличию буферного регистра P , не вычитается из общего времени сбора информации с объекта.

Осциллографирование мгновенных значений виброускорений производится с помощью светолучевого осциллографа O , вибраторы которого подключаются к выходам масштабных усилителей через буферные усилители. Для оценки величины виброускорения предусмотрена возможность калировки осциллограмм путем подачи стандартного сигнала частоты 50 Гц от формирователя калибровочного напряжения FKH .

Для грубой оценки максимальной амплитуды ускорения за время усреднения каждый канал снабжен выявителем максимумов BM , осуществляющим индикацию превышения пиками ускорения пяти уровней, равномерно распределенных по каждому пределу измерения.

Выходные напряжения преобразователей код—напряжение подаются также на три множительных устройства MU , каждое из которых осуществляет перемножение средневыпрямленных значений двух компонент виброускорения.

Выходные напряжения множительных устройств также подзуются на самопишущий потенциометр.

Время усреднения задается блоком временных интервалов *БВИ*, импульсы которого возбуждают блок управления и устанавливают выключатели максимумов в нулевое положение. Отрицательный фронт импульса *БВИ*, соответствующий концу очередного интервала усреднения, поступает на вход блока управления и вызывает на его выходах три импульса, первый из которых закрывает ключ *К*, второй переписывает код счетчика в регистр, а третий осуществляет сброс счетчика на нуль. Затем с некоторой задержкой открывается ключ *К* и в счетчик *С* записывается новое число.

В аппаратуре используется пьезоэлектрический вибропреобразователь, основным узлом которого является сейсмическая система (рис. 2). В центре системы расположена масса *1*, в которую вклеены шесть чувствительных элементов *2*. Чувствительный элемент представляет собой пластину из пьезокерамики

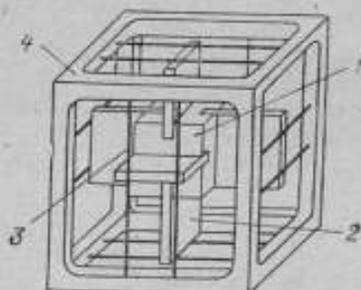


Рис. 2. Сейсмическая система

ЦТС, армированную двумя стальными полосками, между которыми вклеена полоска свинца. При изгибании элемента в плоскости, расположенной вдоль стальных полосок, его нейтральная плоскость находится близко от границы между пьезокерамикой и металлом, так как жесткости пьезокерамического и металлического слоев близки. Ввиду этого при изгибе пьезокерамическая пластинка как бы является частью биморфа, т. е. чувствительна к изгибающим усилиям. Чувствительные элементы прикреплены к струнам *3*, концы которых зажаты в раме *4*. Каждая пара элементов, расположенных на противоположных гранях, чувствительна к ускорению, направленному перпендикулярно плоскости этой пары. При воздействии такого ускорения сила инерции массы стремится изогнуть элементы, концы которых фиксированы на серединах струн. Остальные четыре элемента, плоскости которых параллельны вектору ускорения, испытывают при этом значительно меньшие напряжения, поскольку концы их, закрепленные на струнах, могут свободно перемещаться в направлении ускорения. Поскольку продольная жесткость струн во много раз превышает изгибную жесткость чувствительных элементов, те из них, плоскости которых перпендикулярны направлению ускорения, испытывают такое же напряжение, как если бы их концы находились на жестких опорах. Остальные элементы подвергаются незначительным напряжениям ввиду малой поперечной жесткости струн и обеспечивают тем самым чрезвычайно малую поперечную чувствительность.

Устройство имеет следующие технические характеристики:

Пределы измерения вибрационных ускорений	$7 \cdot 10^{-5}$ —5 м/с ²
Пределы измерения аппаратуры (по мгновенному значению)	0,005; 0,015; 0,05; 0,15 0,5; 1,5; 5 м/с ²
Частотный диапазон (по 3 дБ)	0,5—200 Гц
Время усреднения	1 с, 3 с, 10 с, 30 с, 1 мин, 3 мин, 10 мин

Результирующая погрешность:

измерения и записи средневыпрямленных значений виброускорений	4%;
измерения и записи мгновенных значений виброускорений	6%;
измерения и записи произведений средневыпрямленных значений двух взаимно перпендикулярных компонент виброускорений	6%
Поперечная чувствительность	не более 2%;
Размеры	163 × 168 × 137 мм;
Масса	2,3 кг

Поступила в редакцию 6. 5. 1975 г.

УДК 621.375.4.049.74 : 534.647.082.73.067.92

В. Н. ТИХОМИРОВ

ВНИИМ

СОГЛАСУЮЩИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ НИЗКИХ ЧАСТОТ

Для неискаженного воспроизведения и усиления сигналов низкой частоты, вырабатываемых пьезоэлектрическим вибропреобразователем, требуется предусилитель с достаточно большой постоянной времени входной цепи. Кроме того, предусилитель должен обеспечить согласование входных параметров регистрирующих устройств с выходными параметрами преобразователя.

Погрешность воспроизведения сигнала преобразователя определяется формулой [1]:

$$\delta = 1 - \left[V \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega R_{\text{экв.вх}} C_{\text{экв.вх}})^2}} \right]^{-1},$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; $R_{\text{экв.вх}} C_{\text{экв.вх}} = \tau_{\text{экв.вх}}$ — постоянная времени эквивалентной входной цепи.

При определении эквивалентной входной емкости $C_{\text{экв.вх}}$ и сопротивления $R_{\text{экв.вх}}$ учитывается емкость и сопротивление преобразователя.

Для измерения низкочастотных вибраций был разработан согласующий предусилитель на интегральной микросхеме К2СС842А, серии 284 (см. рисунок).

Интегральные микросхемы обладают рядом преимуществ [2]. Габариты, масса и потребление энергии аппаратуры на этих схемах заметно снижаются, что особенно важно при установке ее на подвижных объектах. (Уменьшение габаритов аппаратуры характеризуется увеличением плотности упаковки). Если для обычного монтажа плотность упаковки составляет 0,1–0,2 элемента на 1 см², то для полупроводниковых интегральных микросхем она возрастает до 1000 элем/см². Значительно повышается также надежность аппаратуры как за счет снижения интенсивности отказов основных элементов, так и за счет уменьшения объема внешнего монтажа. В настоящее время надежность одной интегральной микросхемы примерно равна надежности кремниевого транзистора (10^{-2} – 10^{-3} 1/ч), хотя в нее могут входить десятки транзисторов и других элементов. Повышение надежности при переходе от транзисторной аппаратуры к аппаратуре на интегральных схемах составляет 1–2 и более порядков. При переходе на микросхемы снижается стоимость разработки аппаратуры, стоимость деталей и материалов, а также стоимость сборки и испытаний. Входное сопротивление согласующего измерительного предусилителя (см. рисунок) было измерено различными способами [3]. Оно составляет не менее 10^6 Ом, входная емкость — не более 3 пФ.

Учитывая, что на низких частотах пьезоэлектрический преобразователь имеет активное сопротивление 10^7 Ом и емкость 1000 пФ , по приведенной формуле можно рассчитать погрешность разработанного усилителя. Результаты расчета представлены в таблице.

$f, \text{ Гц}$	0,01	0,1	0,159	0,3	0,5	1
$\%U, \%$	94	47	30	12	5	1,25

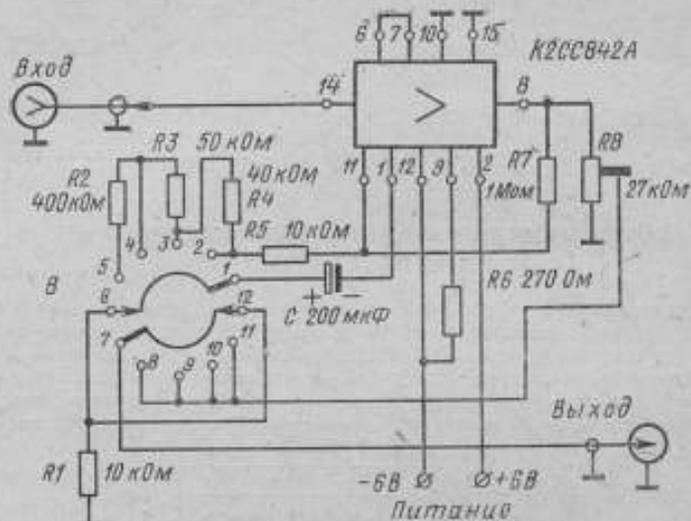


Схема согласующего измерительного предусилителя

Диапазон входных напряжений от $0,5 \text{ мВ}$ до 1 В разделен на пять поддиапазонов с пределами $10, 50, 100, 500$ и 1000 мВ .

Основные технические предусилителя:

Коэффициент усиления	< 200
Выходное сопротивление	$< 10 \text{ кОм}$
Напряжение собственных шумов	$< 50 \text{ мкВ}$
Выходное напряжение	$< 2\text{В}$
Рабочий диапазон частот	$0,2 \text{ Гц} - 100 \text{ кГц}$
Коэффициент нелинейных искажений	$< 0,7\%$
Неравномерность амплитудной и амплитудно-частотной характеристик (в рабочем диапазоне)	$0,5 \text{ дБ}$

Основным достоинством предусилителя является высокое входное сопротивление, позволяющее применить его в качестве согласующего на инфранизких частотах до $0,5 \text{ Гц}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейбенгардт Г. И., Пеллинец В. С. Согласующие усилители пьезоэлектрических измерительных преобразователей. Изд. ЛДНТИ, 1971, 46 с.

2. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных приборах. Л., «Энергия», 1974, 223 с.
 3. Грибанов Ю. И. Измерения в высокоомных цепях. Л., «Энергия», 1967, 128 с.

Поступила в редакцию 6.5. 1975 г.

УДК 531.768.089.6

А. Б. КУРЗНЕР
 ВНИИМ

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ СТАТИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ЦЕНТРИФУГАХ И МЕТОДЫ ИХ ИСКЛЮЧЕНИЯ

Наиболее распространенными методами статической и динамической градуировки линейных низкочастотных акселерометров при ускорениях более $1g$ являются методы, основанные на использовании одианных и двойных центрифуг [1—4]. Среди погрешностей особое место занимают погрешности передачи размера ускорения от центрифуг к акселерометру, обусловленные неопределенностью положения центра инерции и перемещением его чувствительного элемента [1, 2, 5, 6]. Эти погрешности уменьшают путем увеличения длины плеча центрифуг или с помощью различных методических приемов [1, 3, 4, 5]. Однако увеличение размеров центрифуг сопряжено с техническими трудностями и появлением дополнительных погрешностей, а предложенные методы их исключения недостаточно точны, поскольку в них используются упрощающие предположения о свойствах акселерометров и не учитываются их случайные погрешности [3, 4, 8].

В настоящей работе предложены методы исключения погрешностей статической градуировки акселерометров на центрифуге, учитывающие реальные свойства последних. Известно, что наиболее удобным для практического использования представлением статической градуировочной характеристики является функциональное (ГОСТ 16263-70). Для большинства акселерометров эта характеристика близка к линейной функции, и поэтому аппроксимируется полиномиальной зависимостью, степень и коэффициенты которой определяются в результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов [5, 7, 8]. Коэффициенты полинома можно считать случайными величинами вследствие нестабильности и разброса значений входного сигнала при градуировке, случайной погрешности измерения выходного сигнала, нестабильности параметров самого акселерометра и т. д.

Таким образом, статическая градуировочная характеристика акселерометра может быть представлена выражением

$$U = F(a) = \sum_{k=0}^N \alpha_k a^k = \alpha_0 + \alpha_1 a + \dots + \alpha_N a^N, \quad (1)$$

или

$$a = f(U) = \sum_{k=1}^N \beta_k (U - U_0)^k = \beta_1 (U - U_0) + \dots + \beta_N (U - U_0)^N, \quad (2)$$

где U — выходной сигнал акселерометра; a — ускорение на его входе; α_k , β_k и N — искомые коэффициенты аппроксимирующего полинома и его порядок; U_0 — выходной сигнал при $a=0$. Проведем анализ для представления статической характеристики по формуле (2). Рассмотрим сначала погрешность, обусловленную неопределенностью положения центра инерции чувствительного элемента акселерометра. При статической градуировке акселерометра на центрифуге ускорение в центре инерции чувствительного элемента акселерометра может быть представлено следующим образом:

$$a = R\omega^2 = (R_0 + \delta R)\omega^2 = a_0 \left(1 + \frac{\delta R}{R_0}\right) = a_0(1 + \varepsilon), \quad (3)$$

где ω — угловая скорость вращения центрифуги; R и R_0 — фактическое и номинальное значения расстояний от оси вращения до центра инерции чувствительного элемента акселерометра; a и a_0 — фактическое и номинальное значения ускорения; δR — погрешность из-за неопределенности положения центра инерции; $\varepsilon = \frac{\delta R}{R_0}$ — относительная погрешность задания ускорения. С учетом

(3) выражение (2) примет вид

$$a_0(1 + \varepsilon) = \sum_{k=1}^N \beta_k (U - U_0)^k; \quad a_0 = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\beta_k}{1 + \varepsilon}\right) (U - U_0)^k, \quad (4)$$

Следовательно, при экспериментальном определении коэффициентов полинома (2) их оценка из-за δR будет смещена на величину

$$\beta_k \left(\frac{1}{1 + \varepsilon} - 1\right), \quad (5)$$

а относительная погрешность δ_k из-за смещенности оценки составит

$$\delta_k = \left| \frac{1}{1 + \varepsilon} - 1 \right| \approx |\varepsilon|, \quad (6)$$

поскольку $|\varepsilon| \ll 1$. Для дисперсии оценки $\hat{\beta}_k$ коэффициентов получаем

$$D(\hat{\beta}_k) = \frac{D(\beta_k)}{2n(1 + \varepsilon)^2} \approx \frac{D(\beta_k)}{2n} (1 - 2\varepsilon), \quad (7)$$

где $2n$ — число экспериментальных точек; $D(\beta_k)$ — дисперсия коэффициентов β_k .

Для исключения систематической погрешности градуировки акселерометров на центрифуге из-за δR предлагается следующая схема эксперимента и алгоритм обработки результатов. Акселерометр устанавливается на плече центрифуги на расстоянии R_1 и снимается масса показаний объемом n при различных значениях ω . Затем акселерометр сдвигается на точно заданное расстояние ΔR и на новом R_2 снова снимается n показаний для того же набора значений ω . Для обеспечения градуировки акселерометра в требуемом диапазоне ускорений величины R_1 и R_2 могут быть известны приближенно.

Математическая основа и схема обработки результатов измерений заключается в следующем.

Как следует из (2), имеем при $R = R_1$

$$a_1 = R_1\omega^2; \quad \omega^2 = \sum_{k=1}^N \frac{\hat{\beta}_k}{R_1} (U_1 - U_0)^k = \sum_{k=1}^N C_{1k} (U_1 - U_0)^k; \quad (8)$$

при $R = R_2$

$$a_2 = R_2\omega^2; \quad \omega^2 = \sum_{k=1}^N \frac{\hat{\beta}_k}{R_2} (U_2 - U_0)^k = \sum_{k=1}^N C_{2k} (U_2 - U_0)^k; \quad (9)$$

$$\Delta R = R_2 - R_1; \quad C_{1k} = \frac{\hat{\beta}_k}{R_1}; \quad C_{2k} = \frac{\hat{\beta}_k}{R_2}; \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

При обработке результатов предлагается определять коэффициенты полиномов C_{1k} и C_{2k} зависимостей выходных сигналов U_1 и U_2 не от ускорений

(поскольку они точно не известны из-за δR), а от квадратов угловых скоростей. Исключая из системы (10) R_1 и R_2 , получим

$$R_1 = \frac{\beta_k}{C_{1k}}; \quad R_2 = \frac{\beta_k}{C_{2k}}; \quad \Delta R = \frac{\beta_k}{C_{2k}} - \frac{\beta_k}{C_{1k}}, \quad (11)$$

откуда

$$\hat{\beta}_k = \frac{\Delta R}{(C_{2k})^{-1} - (C_{1k})^{-1}} = \frac{C_{1k} C_{2k}}{C_{1k} - C_{2k}} \Delta R; \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (12)$$

При выводе формулы (12) исходили из следующего: в формуле ускорения на центрифуге $a = R\omega^2$ для модели (2) неизвестный из-за δR радиус R выступает в роли масштаба: вид функции вход-выход не зависит от масштаба R , в частности, если эта зависимость была полиномиальной, то она останется такой же, но уже с другими коэффициентами; при неизвестных масштабах R_1 и R_2 разность этих масштабов $R_2 - R_1 = \Delta R$ известна достаточно точно.

На основе (12) могут быть получены рабочие формулы для оценок коэффициентов $\hat{\beta}_k$

$$\hat{\beta}_k = \frac{\hat{C}_{1k} \hat{C}_{2k}}{\hat{C}_{1k} - \hat{C}_{2k}} \Delta R; \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (13)$$

где \hat{C}_{1k} и \hat{C}_{2k} — полученные в результате обработки оценки коэффициентов C_{1k} и C_{2k} .

Оценим погрешность предложенного алгоритма определения коэффициентов полинома, выраженную через их статистические характеристики и параметры установки R_1 и R_2 . Используя (10), представим

$$\hat{C}_{1k} = \frac{\{\beta\} + \delta\beta_{1k}}{R_1}; \quad \hat{C}_{2k} = \frac{\{\beta\} + \delta\beta_{2k}}{R_2}, \quad (14)$$

где $\{\beta_k\}$ — математическое ожидание β_k ; $\delta\beta_{1k}$ и $\delta\beta_{2k}$ — отклонения средних значений коэффициентов β_k от $\{\beta_k\}$ в каждой серии, т. е. при $R = R_1$ и $R = R_2$ (малые независимые случайные величины). Для приближенного определения $\hat{\beta}_k$ подставим (14) в (13), разложим в ряд Тейлора в окрестности $\{\beta_k\}$ по членам, включая второй порядок малости, и применим к результату операцию математического ожидания

$$\langle \hat{\beta}_k \rangle = \{\beta_k\} \left[1 + \frac{2R_1 R_2}{(\Delta R)^2} \cdot \frac{\sigma_k^2}{n} \right]; \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

где σ_k^2 — относительная дисперсия β_k . Из (15) видно, что оценки коэффициентов состоятельны, но смещены на очень небольшую величину. Опуская промежуточные выкладки, приведем выражение дисперсии оценки коэффициентов

$$D(\hat{\beta}_k) = \{\beta_k\}^2 \frac{R_1^2 + R_2^2}{(\Delta R)^2} \cdot \frac{\sigma_k^2}{n}; \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (16)$$

Рабочая формула для оценки дисперсии коэффициентов выводится аналогично формуле (13) и имеет вид

$$\hat{D}(\hat{\beta}_k) = \frac{\hat{D}(C_{1k}) \hat{D}(C_{2k})}{\left[\sqrt{\hat{D}(C_{1k})} - \sqrt{\hat{D}(C_{2k})} \right]^2} (\Delta R)^2; \quad k = 1, \dots, N. \quad (17)$$

Оценки $\hat{D}(C_{1k})$ и $\hat{D}(C_{2k})$ получают в результате обработки зависимостей (8) и (9). Величины относительных дисперсий в (15) и (16) могут быть приближенно представлены как

$$\sigma_k^2 \approx (\hat{\sigma}_k^2) = \frac{\hat{D}(\beta_k)}{(\hat{\beta}_k)^2} \quad (18)$$

и использованы в соответствующих формулах оценок погрешностей.

Для акселерометров с симметричным диапазоном измерений погрешность передачи размера ускорений из-за δR можно исключить следующим образом. Акселерометр устанавливают на поворотной платформе, расположенной на конце плеча центрифуги, совмещая с погрешностью δR центр инерции чувствительного элемента с осью платформы. Расстояние между осью вращения центрифуги и осью поворотной платформы R_0 известно с высокой точностью. В этом положении снимают n показаний при различных значениях ω . Затем платформу с закрепленным на ней акселерометром разворачивают на 180° и снимают такое же количество показаний для тех же значений ω . Для двух положений акселерометра в результате обработки зависимостей

$$\left. \begin{aligned} a_1 = R_1 \omega^2 \\ R_1 = -R_0 + \delta R \end{aligned} \right\}; \quad -\omega^2 = \sum_{k=1}^N \frac{\beta_k}{R_0 - \delta R} (U_1 - U_0)^k = \\ = \sum_{k=1}^N C_{1k} (U_1 - U_0)^k; \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} a_2 = R_2 \omega^2 \\ R_2 = R_0 + \delta R \end{aligned} \right\}; \quad \omega^2 = \sum_{k=1}^N \frac{\beta_k}{R_0 + \delta R} (U_2 - U_0)^k = \\ = \sum_{k=1}^N C_{2k} (U_2 - U_0)^k; \quad (20)$$

$$\Delta R = R_2 - R_1 = 2R_0; \quad C_{1k} = \frac{\beta_k}{R_0 - \delta R}; \quad C_{2k} = \frac{\beta_k}{R_0 + \delta R}; \\ k = 1, \dots, N. \quad (21)$$

получают оценки коэффициентов полинома \hat{C}_{1k} и \hat{C}_{2k} и их дисперсий $\hat{D}(C_{1k})$, $\hat{D}(C_{2k})$.

В этом случае рабочие формулы для оценок коэффициентов $\hat{\beta}_k$ принимают вид

$$\hat{\beta}_k = \frac{\hat{C}_{1k} \hat{C}_{2k}}{\hat{C}_{1k} + \hat{C}_{2k}} 2R_0, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (22)$$

Для математических ожиданий оценок $\{\hat{\beta}_k\}$ и дисперсий оценок $D(\hat{\beta}_k)$ коэффициентов β_k соответственно имеем

$$\{\hat{\beta}_k\} = \{\beta_k\} \left[1 - \frac{1}{2} (1 - s^2) \frac{2k^2}{n} \right] \approx \{\beta_k\} \left(1 - \frac{\sigma_k^2}{2n} \right); \quad (23)$$

$$D(\hat{\beta}_k) = \{\beta_k\}^2 \frac{1}{2} (1 + s^2) \frac{\sigma_k^2}{n} \approx \{\beta_k\}^2 \frac{\sigma_k^2}{2n}. \quad (24)$$

Рабочая формула оценки дисперсии коэффициентов имеет вид

$$\hat{D}(\beta_k) = \frac{\hat{D}(C_{1k}) \hat{D}(C_{2k})}{\left[\sqrt{\hat{D}(C_{1k})} + \sqrt{\hat{D}(C_{2k})} \right]^2} (2R_0)^2. \quad (25)$$

Из полученных результатов видно, что и в этом случае оценки коэффициентов состоятельны, хотя и имеют незначительное смещение. Сравнение двух вариантов метода исключения погрешностей, обусловленных δR , показывает, что вариант с поворотом дает более точные результаты при одинаковых объемах выборок.

Рассмотрим теперь, насколько точнее можно определить коэффициенты полинома β_k предложенным методом (вариант с поворотом акселерометра), чем традиционным для $k=1$ (главного коэффициента). Составим относительные погрешности определения коэффициента из-за смещенности его оценки. Целесообразность применения предложенного метода будем определять из условия

$$\frac{\sigma_1^2}{2n} < \varepsilon; \quad \tau_1 < \sqrt{2n\varepsilon}. \quad (26)$$

Если, например, $n=10$; $\varepsilon=5 \cdot 10^{-4}$, то $\sigma_1 < 10^{-1}$. Следовательно, предложенные методы наиболее эффективны для высокоточных акселерометров. Перейдем к учету перемещения x чувствительного элемента акселерометра при его статической градуировке на центрифуге. Предположим, что это перемещение пропорционально ускорению [9, 10]. В этом случае на центрифуге

$$cx = ma = m(R+x)\omega^2, \quad (27)$$

где c — жесткость пружины; m — масса чувствительного элемента. Если ввести обозначение $\omega_0^2 = \frac{c}{m}$ (ω_0 — круговая частота свободных колебаний чувствительного элемента акселерометра), то из (27) получим

$$\omega_0^2 x = \omega^2 (R+x); \quad x = \frac{\omega^2 R}{\omega_0^2 - \omega^2}; \quad a = \frac{\omega_0^2 \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} R. \quad (28)$$

При известной ω_0 формула измерений при градуировке акселерометров на центрифуге принимает вид

$$a = \Omega^2 R = \sum_{k=1}^N \beta_k (U - U_0)^k; \quad \Omega^2 = \frac{\omega_0^2 \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \dots \quad (29)$$

и далее по вышеописанной методике. Если величина ω_0 заранее не известна, то она может быть определена методом [6, 9], либо одновременно с определением коэффициентов C_{1k} и C_{2k} методом наименьших квадратов из уравнений

$$R = R_1; \quad \frac{\omega_0^2 \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} = \sum_{k=1}^N C_{1k} (U_1 - U_0)^k, \quad C_{1k} = \frac{\beta_k}{R_1}; \quad (30)$$

$$R = R_2; \quad \frac{\omega_0^2 \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} = \sum_{k=1}^N C_{2k} (U_2 - U_0)^k, \quad C_{2k} = \frac{\beta_k}{R_2};$$

$$R_2 - R_1 = \Delta R.$$

При использовании в (30) выражения ускорения из (28) может иметь место дополнительная погрешность градуировки из-за приближенного соотношения (27) и погрешности определения ω_0 . Опуская промежуточные выкладки, приведем формулу для максимальной относительной погрешности

$$\delta_{\max} = \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{2\Delta\omega_0}{\omega_0} \right) \omega_{\max}^2, \quad (31)$$

где $\frac{\Delta U}{U}$ — показатель максимальной нелинейности статической градуировочной характеристики; $\Delta\omega_0$ — погрешность определения ω_0 ; ω_{\max} — максимальная угловая скорость центрифуги.

Пример. Пусть $\frac{\Delta U}{U} = 10^{-2}$; $\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = 10^{-2}$; $\omega_{\max} \approx 18$ рад/с (при $a=10g$, $R=0,4$ м); $\omega_0=90$ рад/с (≈ 15 Гц). Тогда $\delta_{\max} = 1,2 \cdot 10^{-3}$. Без учета перемещения погрешность равна $\delta_{\max} = \frac{\omega_{\max}^2}{\omega_0^2}$ и для приведенного примера составляет $\delta_{\max} = 4 \cdot 10^{-3}$.

В заключение отметим, что полученные результаты могут быть использованы при аттестации образцовых акселерометров, а также при разработке методики статической градуировки акселерометров на центрифугах, у том числе малого радиуса (0,4—1 м) и на двойных центрифугах в режиме одинарной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смельников А. Е. Вопросы поверки низкочастотных акселерометров. — «Измерительная техника», 1968, № 5, с. 89—91.
2. Смельников А. Е., Блантер Б. Э. Градуировка и поверка низкочастотных акселерометров. Изд. ЛДНТИ, 1971, 24 с.
3. Статическая градуировка акселерометров и акселерографов с помощью центробежной установки. — «Измерительная техника», 1959, № 7, с. 17—20.
4. Норш Ю. И. Виброметрия. М., Гостехиздат, 1963, 275 с.
5. Sporn S. R. Use of a Centrifuge for the Precision Measurement of Accelerometer Characteristics. — Transactions of the ASME, 1961, May, p 202—206.
6. Курзнер А. Б. Особенности динамической градуировки акселерометров на двойной центрифуге. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 156 (216), М., Изд-во стандартов, 1974, с. 142—147.
7. Grady S. Nicholson. A Lorgé Ultra—precise Centrifuge Testing. — Inst. Environment Sei. Annual Techn. Meet Proc, Philadelphia, Pa, 1964, Mt. Prospect, Ill, 1964, p. 529—535.
8. Thomas J. L., Evans R. H. Performance Characteristics and Methods of Testing of Force—Feedback Accelerometers. — Reports and Memoranda, 1967, August, N 3601.
9. Блантер Б. Э., Ибрагимов И. Х., Курзнер А. Б., Смельников А. Е. Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик линейных низкочастотных акселерометров. — «Метрология», 1975, № 1, с. 32—35.

Поступила в редакцию 6. 5. 1975 г.

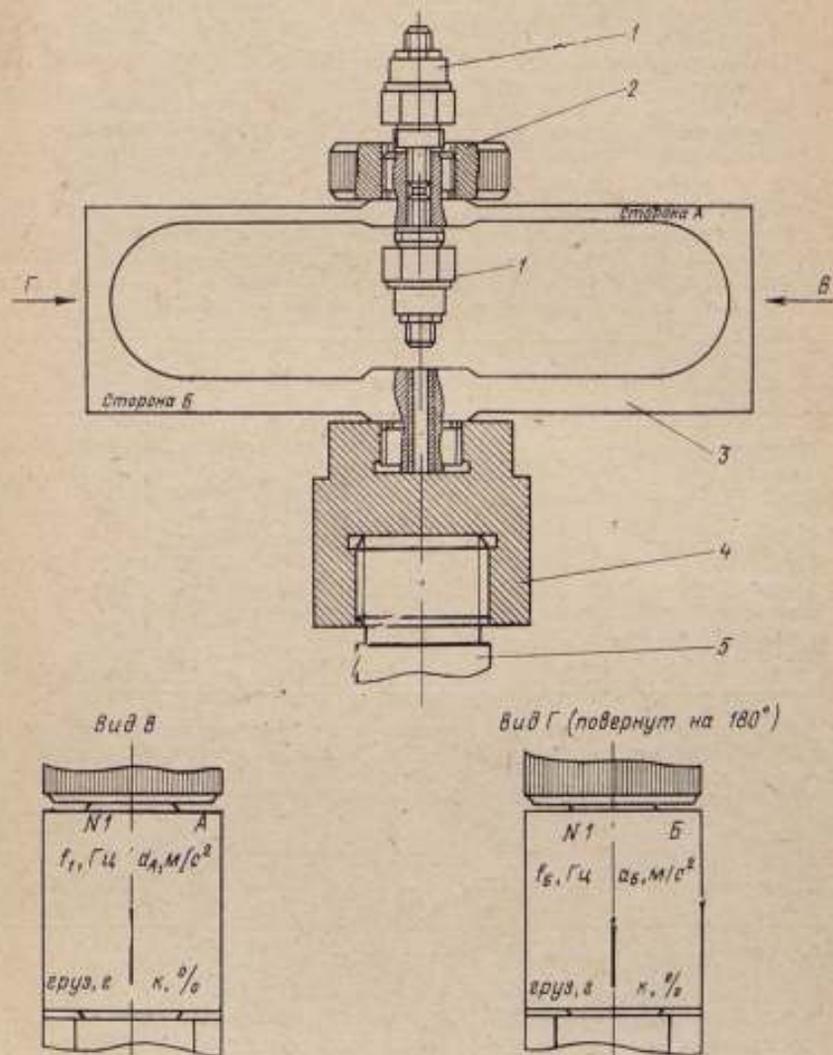
УДК 534.647.089.62

Е. В. КУЛИКОВ
ВНИИМ

КОМПЛЕКС ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ УСТРОЙСТВ

Комплекс виброизмерительных резонансных устройств служит для воспроизведения синусоидальных механических колебаний на дискретных частотах в диапазоне 100—5000 Гц при ускорениях 100—2000 м/с² [1, 2]. Комплекс УВР-2 изготовлен из титана марки ВТ1-0.

Резонансное устройство (см. рисунок) состоит из упругого элемента, корпуса-переходника, грузов (100 и 200 г) и двух виброизмерительных преобразователей Д-14. В комплексе входит пять упругих элементов. Резонансный упругий элемент возбуждается вибратором ОБУ-1, на штоке которого он жестко закрепляется через переходник винтовым соединением. Амплитуда ускорения



Виброизмерительное резонансное устройство типа УВР-2

1—вibroизмерительный преобразователь Д-14; 2—груз 100 или 200 г.; 3—упругий элемент;
4—корпус—переходник; 5—шток виброустановки

ПОГРЕШНОСТИ ЗАДАНИЯ УСКОРЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Направленные свойства акселерометра исчерпывающим образом определяются его диаграммой направленности — зависимостью его выходного сигнала от ориентации акселерометра относительно заданного вектора ускорения с постоянным модулем $[a]$.

Диаграмму направленности определяют как в статическом, так и в динамическом режиме. В первом случае для этого применяют установки типа поворотных платформ (задаваемые ускорения до $1g$), центрифуги (ускорения $>1g$) и т. п. В динамическом режиме используются установки, воспроизводящие гармонические ускорения, например, вибростенды, двойные центрифуги. При этом измеряется только переменная составляющая выходного сигнала прибора и исключается влияние поля силы тяжести. Погрешности задания ускорения при определении диаграмм направленности акселерометров на одинарной центрифуге связаны как со спецификой задания ускорения с помощью центрифуги, так и с характеристиками исследуемого акселерометра.

Рассмотрим погрешности, обусловленные отклонением центра инерции чувствительного элемента акселерометра от номинального положения, перемещением центра инерции под действием ускорения, неточной установкой центра инерции в заданную точку центрифуги, несовпадением центра инерции с осью поворота акселерометра и, наконец, отклонением истинного направления измерительной оси акселерометра от номинального. Погрешностями задания ускорения, которые вызваны изменением угловой скорости центрифуги, удлинением и отклонением плеча центрифуги, пренебрегаем.

Диаграмму направленности определяют путем измерения выходного сигнала в зависимости от угла поворота измерительной оси акселерометра вокруг оси вращения, проходящей через центр инерции чувствительного элемента акселерометра. Выберем вращающуюся прямоугольную систему координат так, чтобы ось Z совпала с осью вращения центрифуги, а оси X и Y были направлены вдоль ее радиусов. Исследуемый акселерометр устанавливается так, чтобы центр инерции находился на оси Y на расстоянии R от начала координат, а измерительная ось была направлена вдоль оси Y . При этом акселерометр измеряет номинальное ускорение $a_n = \omega^2 R$ (ω — угловая скорость центрифуги). Определим истинную проекцию ускорения на измерительную ось акселерометра. Для каждого акселерометра направление измерительной оси наносят непосредственно на его корпусе (так называемая номинальная измерительная ось). Однако истинное направление этой оси всегда отличается от номинального [1, 2], что вносит погрешности в измерения ускорения и, в частности, в определение диаграмм направленности.

Рассмотрим случай, когда центр инерции, точка R'' , сдвинут относительно номинального на малые величины ΔR по оси Y , Δl — по оси X и Δz — по оси Z , а измерительная ось, задаваемая единичным вектором N также не совпадает с номинальным направлением (ось Y) и имеет составляющие $N_x (\cos \alpha \sin \beta)$, $N_y (\cos \alpha \cos \beta)$, $N_z (\sin \alpha)$.

Ускорение, измеряемое акселерометром, с центром инерции, находящимся в точке R'' , и с измерительной осью, определяемой вектором N , будет равно $a_{\Phi} = (a_n N) - (gN) = \omega^2 \Delta l N_x + \omega^2 (R + \Delta R) N_y + g N_z$ или, с учетом малости α , β , ΔR , Δl и членов только первого порядка малости,

$$a_{\Phi} = \omega^2 R + \omega^2 \Delta R + g \alpha. \quad (1)$$

Диаграмму направленности определим в двух плоскостях: при вращении акселерометра вокруг оси, параллельной Z и проходящей через точку R , и вокруг оси, параллельной X и проходящей через эту же точку.

Для первой плоскости после поворота на угол φ (все повороты по часовой стрелке) N будет иметь составляющие

$$N'_{xy} = \beta \cos \varphi + \sin \varphi, \quad N'_{y\varphi} = -\beta \sin \varphi + \cos \varphi, \quad N'_{z\varphi} = N_z.$$

Составляющие ускорения, создаваемого центрифугой в точке R'_φ , в которую попадает центр инерции после поворота акселерометра, будут равны $a_{x\varphi} = \omega^2 (\Delta R \sin \varphi + \Delta l \cos \varphi)$, $a_{y\varphi} = \omega^2 (R - \Delta l \sin \varphi + \Delta R \cos \varphi)$. Таким образом, измеремое акселерометром ускорение составит

$$a_{\varphi z\varphi} = (a_\varphi N'_\varphi) - (gN'_\varphi) = \omega^2 R \cos \varphi + \omega^2 (\Delta R - \beta R \sin \varphi) + g\alpha. \quad (2)$$

Аналогично этому для второй плоскости имеем:

$$N'_{x\psi} = N_{x\psi}, \quad N'_{y\psi} = \cos \psi + \alpha \sin \psi, \quad N'_{z\psi} = -\sin \psi + \alpha \cos \psi.$$

Составляющие создаваемого ускорения соответственно равны

$$a_{x\psi} = \omega^2 \Delta l, \quad a_{y\psi} = \omega^2 (R + \Delta R \cos \psi + \Delta z \sin \psi).$$

Следовательно, ускорение составит

$$a_{\varphi x\psi} = (a_\psi N'_\psi) - (gN'_\psi) = \omega^2 R \cos \psi + \omega^2 (R\alpha \sin \psi + \Delta R \cos^2 \psi + \Delta z \sin \psi \cos \psi) + g \sin \psi - g\alpha \cos \psi. \quad (3)$$

Введем в рассмотрение погрешность установки Δr номинального центра инерции в точку R (т.е. примем $R = R_0 + \Delta r$) и перемещение центра инерции Δr под действием ускорения (т.е. $R_1'' = R'' + \Delta r$). Перемещение Δr является малым и направлено вдоль измерительной оси, поэтому R_1'' дает на оси X, Y, Z проекции $\Delta l + \Delta r\beta$, $\Delta R + \Delta r$ и $\Delta z + \Delta r\alpha$. Величину Δr можно найти из соотношения, описывающего условие упругого равновесия чувствительного элемента, $k\Delta r = \omega^2 (R'' + \Delta r) m \cos \gamma$, где $k = m\omega_0^2$ (k —модуль упругости, ω_0 —собственная частота, m —масса чувствительного элемента, γ —угол между измерительной осью и действующим ускорением), откуда

$$\Delta r = \frac{\omega^2 R'' \cos \gamma}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \gamma} \approx \frac{\omega^2 R \cos \gamma}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \gamma}.$$

Ограничиваясь членами 1-го порядка малости, окончательно получим

$$a_{\varphi z\varphi} = \omega^2 R \cos \varphi + \omega^2 (\Delta R + \Delta r \cos \varphi - \beta R \sin \varphi) + \frac{\omega^4 R \cos \varphi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \varphi} + g\alpha; \quad (4)$$

$$a_{\varphi x\psi} = \omega^2 R \cos \psi + \omega^2 (R\alpha \sin \psi + \Delta R \cos^2 \psi + \Delta z \sin \psi \cos \psi + \Delta \cos \psi) + \frac{\omega^4 R \cos^2 \psi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \psi} + g \sin \psi - g\alpha \cos \psi. \quad (5)$$

Погрешности задания ускорения на измерительную ось акселерометра, связанные с величинами $\alpha, \beta, \Delta R, \Delta l, \Delta z, \Delta r, \Delta \rho$ и погрешностями задания углов поворота $\Delta \varphi$ и $\Delta \psi$, равны

$$\delta_z = \omega^2 (\Delta R - R\Delta\varphi \sin \varphi + \Delta r \cos \varphi - \beta R \sin \varphi) + \frac{\omega^4 R \cos \varphi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \varphi} + g\alpha; \quad (6)$$

$$\delta_x = \omega^2 (R\alpha \sin \psi - R\Delta\psi \sin \psi - \Delta R \cos^2 \psi + \Delta z \sin \psi \cos \psi + \Delta \cos \psi) + \frac{\omega^4 R \cos^2 \psi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \psi} + g\Delta\psi \sin \psi - g\alpha \cos \psi. \quad (7)$$

Как и в предыдущих формулах, в (6) и (7) ограничиваемся членами 1-го порядка малости, поэтому в (6) от $\frac{\omega^4 R (\cos \varphi - \Delta\varphi \sin \varphi)}{\omega_0^2 - \omega^2 (\cos \varphi - \Delta\varphi \sin \varphi)}$ оставляем только главную часть $\frac{\omega^4 R \cos \varphi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \varphi}$, аналогично и в формуле (7).

Очевидно θ_x и θ_z характеризуют погрешности определения диаграммы направленности для обеих плоскостей.

Различные частные погрешности по-разному влияют на величины θ_x и θ_z . В (6) и (7) $\beta R \sin \varphi$, $R \alpha \sin \psi$, $g \alpha$ и $g \alpha \cos \psi$ являются членами 2-го порядка малости по сравнению с другими, поэтому ими можно пренебречь.

Члены $\frac{\omega^4 R \cos \varphi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \varphi}$ в (6) и $\frac{\omega^4 R \cos^3 \psi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \psi}$ в (7) при $\omega_0 \gg \omega$ также малы, но перестают быть таковыми при ω , составляющих заметную долю ω_0 , и если при этом $\cos \varphi$, $\cos \psi \rightarrow 1$. И, наконец, основную роль играют члены с множителем $\Delta \varphi$ или $\Delta \psi$, вносящие преобладающий вклад в θ_x и θ_z . Теперь (6) и (7) можно представить как

$$\theta_z = \omega^2 (\Delta R - R \Delta \varphi \sin \varphi + \Delta r \cos \varphi) + \frac{\omega^4 R \cos \varphi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \varphi} \quad (6a)$$

$$\theta_x = \omega^2 (\Delta R \cos^2 \psi + \Delta z \sin \psi \cos \psi + \Delta r \cos \psi) + \frac{\omega^4 R \cos^3 \psi}{\omega_0^2 - \omega^2 \cos \psi} + g \Delta \psi \sin \psi, \quad (7a)$$

Оценим значения относительных погрешностей, связанных с каждым из слагаемых в формуле (7a) для $\psi = 45^\circ$, $\omega_0 = 300$ рад/с, $\omega = 8$ рад/с. Полагаем ΔR , Δr , $\Delta z \approx 1 \cdot 10^{-3}$ м, $R \approx 2,5$ м, $\Delta \psi \approx 1 \cdot 10^{-3}$. Тогда

$$\frac{\omega^2 \Delta R \cos^2 45^\circ}{a_n(45^\circ)} \approx 3 \cdot 10^{-4}, \quad \frac{\omega^2 \Delta z \sin 45^\circ \cos 45^\circ}{a_n(45^\circ)} \approx 3 \cdot 10^{-4},$$

$$\frac{\omega^2 \Delta r \cos 45^\circ}{a_n(45^\circ)} \approx 3,8 \cdot 10^{-4}, \quad \frac{\omega^4 R \cos^3 45^\circ}{(\omega_0^2 - \omega^2 \cos 45^\circ) a_n(45^\circ)} \approx 3,4 \cdot 10^{-4},$$

$$\frac{g \Delta \psi \sin 45^\circ}{a_n(45^\circ)} \approx 6 \cdot 10^{-5},$$

здесь

$$\omega^2 R \cos 45^\circ + g \sin 45^\circ = a_n(45^\circ).$$

Первые четыре погрешности являются систематическими, последняя — случайной. Очевидно, что систематические погрешности превышают случайную, их исключение оправдано, а необходимость исключения этих погрешностей зависит от требуемой точности определения диаграммы направленности. Из примера видим, что если задаваемая погрешность определения диаграммы направленности превышает значение наибольшей погрешности ($4 \cdot 10^{-4}$), то θ_x не следует учитывать. С другой стороны, если задаваемая погрешность не более $3 \cdot 10^{-4}$, то необходимо учитывать частные погрешности, связанные с ΔR , Δr , Δz и $\Delta \psi$. В других случаях следует исключать только те погрешности, которые превышают заданное значение. При необходимости величины ΔR , Δr , Δz могут быть определены путем обработки результатов совместных измерений по методу наименьших квадратов при задании различных по модулю значений $|\mathbf{a}|$ и определении соответствующих выходных сигналов. Тогда θ_x и θ_z будут зависеть только от погрешностей задания углов поворота акселерометра $\Delta \varphi$ и $\Delta \psi$.

В заключение следует отметить, что исследование направленных свойств акселерометра должно быть составной частью его поверки и градуировки, и полученные выражения могут быть использованы для оценки выполненных измерений при определении диаграммы направленности акселерометра в статическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инерциальные системы управления. Под ред. Д. Питтмана, М., Воениздат, 1964, 453 с. с ил.
2. Thomas I. L., Evans R. H. Performance Characteristics and Methods of Testing of Force Freed-Back Accelerometers.—Reports and Memoranda*, 1967, № 3601, p. 272—344.

Поступила в редакцию 25. 5. 1975 г.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ

Основной погрешностью измерений на инфразвуковых вибраторах является коэффициент гармоник. В электродинамических вибраторах гармоники возникают в результате неоднородности магнитного поля в рабочем зазоре и нелинейной упругости подвеса.

Как показали исследования распределения магнитной индукции в рабочем зазоре вибратора образцовой инфразвуковой вибрационной установке ОИВУ-2, дифференциальные уравнения колебательного движения платформы при наличии одной или двух магнитных систем соответственно имеют вид

$$mx'' + \frac{B_0^2 I_1^2}{R_1 h^2} (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x' + cx + bx^3 = \frac{B_0 I_1}{h} I (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \sin \omega t, \quad (1)$$

$$2mx'' + \frac{4B_0^2 I_1^2}{R_1 h^2} (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x' + cx + bx^3 = 2B_0 \frac{I_1}{h} I (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \sin \omega t. \quad (2)$$

где m — масса подвижной системы вибратора при наличии одной рабочей катушки; B_0 — индукция в равномерной части магнитного поля; I_1 и R_1 — длина провода и сопротивление рабочей обмотки соответственно; h — длина подвижной катушки; $67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4$; $67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4$ — полиномы, определяющие неравномерность магнитного поля в рабочем зазоре вибратора соответственно при наличии одной или двух магнитных систем.

В электродинамических вибраторах на подвижную катушку, кроме рабочей обмотки, наматываются обмотки магнитной подвески, обратной связи и др. При работе вибратора в этих обмотках индуцируются трансформаторная э. д. с. и э. д. с. движения. Созданные этими э. д. с. токи, взаимодействуя с постоянным магнитным полем, создают дополнительные силы, которые направлены против движения. На низких частотах влияние трансформаторной э. д. с. значительно. В уравнениях (1) и (2) силы сопротивления, созданные обмотками магнитной подвески, для одной и двойной магнитной системы соответственно равны

$$F_1 = \frac{B_0^2 I_2^2}{R_2 h^2} (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x_1'; \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{B_0^2 I_2^2}{R_2 h^2} (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x_1', \quad (4)$$

где I_2 и R_2 — длина провода и сопротивление обмотки магнитной подвески соответственно.

В электродинамических вибраторах применяются механические подвески колебательной системы в виде мембранных пружин, закрепленных на фикси-

рованной опоре. Экспериментальным путем была исследована жесткость плоской пружины, применяемой в вибраторе ОИВУ-2. К подвижной системе прикладывали восстанавливающую силу и измеряли перемещение платформы. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Восстанавливающая сила, Н		Перемещение, мм	Восстанавливающая сила, Н		Перемещение, мм
расчетная	экспериментальная		расчетная	экспериментальная	
0	0	0	370	350	11,6
50	50	5	425	400	12,2
103,5	100	7	484	450	12,8
155,5	150	8,3	547	500	13,4
206,5	200	9,3	610	550	13,9
256,5	250	10,1	682	600	14,5
314,5	300	10,9			

Зависимость перемещения подвижной системы от приложенной силы выглядит следующим образом:

$$F_B = 5x + 0,2x^2 \text{ (Н)}, \quad (5)$$

где x — перемещение, мм. Полученная зависимость дает хорошую сходимость с результатами эксперимента (см. табл. 1 и рисунок).

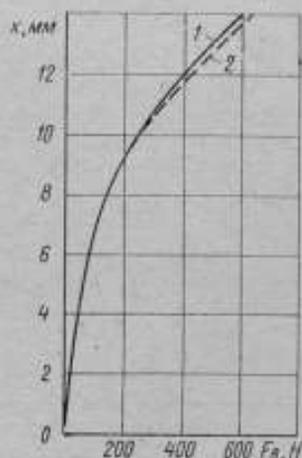


График зависимости восстанавливающей силы от перемещения x
1 — экспериментальная кривая; 2 — расчетная кривая

С учетом выражений (3), (4), (5) уравнения колебательного движения (1) и (2) примут вид:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + \frac{B_0^2}{h^2} \left(\frac{l_1^2}{R_1} + \frac{l_2^2}{R_2} \right) (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - \\
 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \dot{x} + (5 + 0,2x^2) x = B_0 I \frac{l_1}{h} (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + \\
 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \sin \omega t; \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$2\pi x'' + \frac{4B_0^2}{h^2} \left(\frac{I_1^2}{R_1} + \frac{I_2^2}{R_2} \right) (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x' + (5 + 0,2x^2) x = B_0 I \frac{I_1}{h} (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \sin \omega t. \quad (7)$$

Влияние неоднородности магнитного поля и непостоянной жесткости подвеса на коэффициент гармоник были рассчитаны на ЭВМ. Колебательные движения платформ вибратора при наличии одной или двух магнитных систем соответственно описываются уравнениями

$$x'' + \alpha (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x' + (5 + 0,2x^2) x = \beta I (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \sin \omega t; \quad (8)$$

$$x'' + \alpha (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x' + (5 + 0,2x^2) x = \beta I (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \sin \omega t. \quad (9)$$

Уравнения для колебательных движений платформ вибратора при постоянной жесткости подвеса имеют вид

$$x'' + \alpha (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x' + 5x = \beta I (67 - 0,35x - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 + 0,42 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \sin \omega t; \quad (10)$$

$$x'' + \alpha (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4)^2 x' + 5x = \beta I (67 - 11,1 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,625 \cdot 10^{-5} x^4) \sin \omega t. \quad (11)$$

Для случая, когда магнитное поле однородно в рабочем зазоре, а жесткость подвески непостоянна, имеем

$$x'' + \alpha 67^2 x' + (5 + 0,2x^2) x = \beta 67 I \sin \omega t, \quad (12)$$

где

$$\alpha = \frac{B_0^2}{k^2 m} \left(\frac{I_1^2}{R_1} + \frac{I_2^2}{R_2} \right); \quad (13)$$

$$\beta = B_0 \frac{I_1}{hm}.$$

Применительно к вибратору ОИВУ-2 значения коэффициентов из (13) и (14) соответственно будут равны $\alpha = 0,08$; $\beta = 160$.

Расчеты были проведены на частотах от 0,01 до 5 Гц. Для наглядности в табл. 2 приводятся результаты расчета на частоте 0,1 Гц при силе тока 2,5 А. На остальных частотах получены аналогичные результаты.

Результаты гармонического анализа колебательного движения платформы позволяют сделать следующие выводы: влияние неоднородности магнитного поля на коэффициент гармоник снижается благодаря применению двойной магнитной системы; в спектре колебательного движения основными являются первые три гармоники; первая и третья гармоники мало отличаются в вибраторах с двойной и одиночной магнитной системами, четные гармоники при двойной магнитной системе отсутствуют; спектр колебательного движения двойной магнитной системы совпадает со спектром для случая постоянной индукции в зазоре; основным источником нелинейных искажений вибратора является нелинейная жесткость подвески.

Таблица 2

Тип магнитной системы	$A_{\text{макс}}$, мм	$-A_{\text{макс}}$, мм	a_0 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	a_3 , мм	a_4 , мм	a_5 , мм	K , %
С непостоянной жесткостью подвеса	10,045	-10,633	0,369	11,06	0,138	0,886	0,0424	0,1768	8,28
Двойная с непостоянной жесткостью подвеса	10,334	-10,334	0,012	11,06	0,012	0,885	0,012	0,18	8,17
С постоянной жесткостью подвеса	12,286	-15,823	0,91	15,17	0,41	0,15	0,053	0,018	2,9
Двойная с постоянной жесткостью подвеса	-15,023	-15,023	0,1138	15,1	0,11	0,09	0,097	0,093	1,75
В рабочем зазоре магнитное поле однородно, жесткость подвеса непостоянна	10,34	-10,45	0,012	11,165	0,012	0,87	0,012	0,172	7,94

Следовательно, для образцовых вибрационных установок рекомендуется создавать вибраторы с двумя магнитными системами. При этом применение аэростатических и магнитных подвесок позволит снизить коэффициент гармоник.

Поступила в редакцию 12. В. 1975 г.

УДК 534.232.087.92 : 534.143

А. А. ПШЕНИЧНОВ

ВНИИМ

ВИБРАТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ УСТАНОВОЧНОГО РЕЗОНАНСА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Под установочным резонансом понимается совпадение нижней собственной частоты закрепленного на вибраторе виброизмерительного преобразователя (ВИП) с частотой вынужденных механических колебаний. Зная его частоту, можно определить максимальный коэффициент преобразования ВИП в области верхних частот по формуле

$$k = k_g \left[1 - \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]^{-1},$$

где k_d — действительное значение коэффициента преобразования ВИП, измеренного на базовой частоте в диапазоне 63—1000 Гц; f — частота вынужденных механических колебаний ВИП; f_p — частота установочного резонанса.

Как видно из формулы, на верхней границе рабочего частотного диапазона ВИП, составляющего $\frac{f}{f_p} = 0,3$, коэффициент преобразования не будет превышать 11%. Частота установочного резонанса является одной из основных характеристик ВИП. Зарубежные фирмы измеряют эту величину на стальных кубках весом 180—200 г.

Во ВНИИМ для создания вынужденных механических колебаний был применен вибратор с нижней собственной частотой более 70 кГц, пригодный для определения установочного резонанса большинства ВИП.

Вибратор изготовлен из стали 35 (рис. 1), к торцу его жестко присоединен пьезокерамический диск ЦТС-19 диаметром 8 мм и толщиной 1 мм. Схема соединения приборов приведена на рис. 2. При изменении частоты генератора на осциллографе отмечается первый резонанс по фазовому углу между напряжением выходного сигнала ВИП и напряжением опорного сигнала генератора.

Известно, что при резонансе фазовый угол составляет 90° . Значение частоты установочного резонанса принималось по шкале генератора.

Собственная частота пьезовибратора определялась магнитострикционным методом возбуждения механических колебаний (рис. 3). На катушку индук-

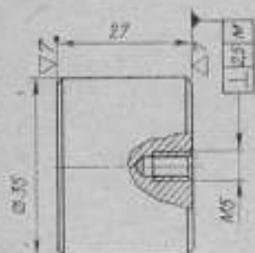


Рис. 1. Цилиндр

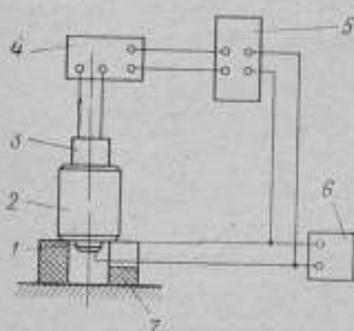


Рис. 2. Схема соединения приборов при пьезоэлектрическом методе возбуждения

1—пьезоэлемент; 2—присоединительная масса; 3—измеряемый ВПЭ; 4—вольтметр; 5—осциллограф С1-1; 6—генератор ГЗ-35; 7—амортизатор

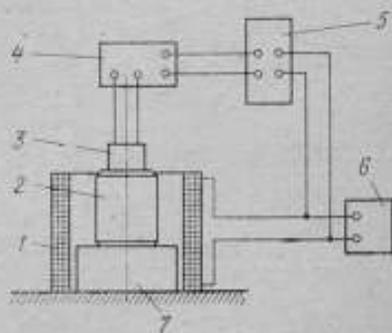


Рис. 3. Схема соединения приборов при магнитострикционном методе возбуждения

1—катушка индуктивности; 2—присоединительная масса; 3—пьезоэлемент или измеряемый ВПЭ; 4—вольтметр ВЗ-7; 5—осциллограф; 6—генератор ГЗ-35; 7—амортизатор

тивности подавалось максимальное напряжение от генератора при выходном сопротивлении 5 Ом.

Тип и номер ВПЭ	Частота свободного резонанса, кГц	Частота установочного резонанса, кГц	
		Возбуждение вибратором	Возбуждение магнитострикционное
ИПА-9 № 14	3,2	2,9	2,9
ИПА-10В № 2451	5,0	4,6	4,6
Д-13 № 3114	31,0	17,5	18,0
Д-14 № 3005	47,5	32,0	32,0
КД-13 № 04359	57,0	26,0	25,5
КД-35а № 02208	39,0	18,0	18,5
ИС-313А № 102600	44,5	44,5	44,5
4333 № 328009	58,0	36,0	36,0

Катушка индуктивности представляет собой бумажный каркас диаметром 50 мм, на котором намотано 10 витков многожильного провода марки МГТФ, сплетенного из трех концов, соединенных параллельно. Магнитоотрицательный метод может быть использован и для измерения частоты установившегося резонанса. Однако этот метод требует применения более мощного генератора и подбора катушки индуктивности, так как у ВИП, не обладающих высокой добротностью резонанса (например, типа КД-13), при малом уровне возбуждения фазовые изменения проявляются не явно. Результаты измерений приведены в таблице.

Поступила в редакцию 25.5.1975 г.

УДК 534.647.089.6 : 006.2

В. М. МИХАЙЛОВ, А. И. КАШИНИЦЕВ, А. Н. МОРОЗОВИЧ
ВНИИМ

ПЕРЕДВИЖНАЯ ПОВЕРОЧНАЯ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

В настоящее время промышленность оснащена большим количеством различных вибрационных установок, требующих метрологической аттестации. Ввиду того, что эти установки являются стационарными, их аттестация производится на местах эксплуатации с помощью специальных и универсальных средств измерений. В зависимости от диапазона изменения параметров виброустановок и точности их воспроизведения применяются различные методы и средства измерений. Отсутствие единых методов измерений и многообразие измерительной аппаратуры приводит к различию результатов аттестации однотипных установок и невозможности сопоставления этих результатов. Регламентация типов и основных параметров аппаратуры изложена в ГОСТ 19118—73 «Установки электродинамические вибрационные. Методы и средства проверки». Описываемая передвижная поверочная виброизмерительная лаборатория позволяет: обеспечить единство методов и средств измерений при аттестации вибрационных установок; обеспечить оперативное метрологическое обслуживание предприятий в области высокочастотных измерений параметров вибрации; периодически и планомерно производить аттестацию испытательных виброустановок на местах их эксплуатации; обеспечить неизменность характеристик комплекса измерительных средств при транспортировке; исключить необходимость оснащения каждой ЛПН и предприятия, эксплуатирующего виброустановки, дорогостоящим комплексом измерительных средств, необходимых для аттестации виброустановок.

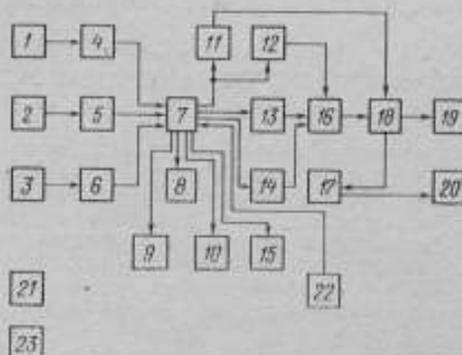
ППВЛ обеспечивает проведение измерений основных параметров вибрации в диапазоне частот 5—10000 Гц. При этом диапазон измеряемых ускорений определяется коэффициентом преобразования преобразователя, коэффициентом усиления усилителя и чувствительностью измерительных приборов.

Особое внимание при разработке ППВЛ было уделено автоматизации измерения нелинейных искажений и спектра колебаний, а также автоматизации записи результатов измерений на цифрочасть и перфоратор для последующей обработки их на ЭВМ. Структурная схема ППВЛ приведена на рисунке. В качестве измерительных преобразователей 1, 2, 3 обычно используются вибропреобразователи Д13, Д14. Выбор трехканальной измерительной системы обусловлен необходимостью снимать как трехкомпонентные составляющие вибрации в вибрационной точке вибратора, так и однокомпонентные составляющие в трех точках стола. Применение коммутатора дает возможность снимать показания с большего числа точек.

Для обеспечения дистанционного подключения ППВЛ к аттестуемым виброустановкам в схему введен предусилитель 4, 5, 6. Измерительные преобразователи вместе с предусилителями составляют выносное устройство, размещаемое на установке на расстоянии до 50 м. Напряжение с преобразователей

1, 2, 3, пропорциональное уровню воздействующего ускорения, поступает через коммутатор 7 на цифровые вольтметры 12, 13, 14, измеритель нелинейных искажений 15, а также на частотомер 11, анализатор спектра 10, низкочастотный вольтметр 8, осциллограф 9. При этом цифровой частотомер 11 подключен к основному каналу измерения параллельно с вольтметром 12. Значения частоты и уровня ускорения с выхода цифровых приборов 11, 12, 13, 14 подаются на транскриптор 18 и электроуправляемую машинку 19. Потребность в согласующем устройстве 16 возникает в том случае, когда выходные сигналы цифровых вольтметров и частотомера не совпадают с входными сигналами транскриптора.

В описываемой ППВЛ применено трехканальное цифроречитательное устройство Ф595КМ и разработано согласующее устройство к нему. Предпочтительнее использовать в данном случае описываемое производством пятиканальное цифроречитательное устройство Ф5033.



Структурная схема ППВЛ

1, 2, 3—измерительные вибропреобразователи типа Д13, Д14, ИС-312, ИС-313А; 4, 5, 6—предусилитель (из комплекта ВА-2); 7—коммутатор; 8—вольтметр ВЗ-40, ВЗ-42; 9—электронный осциллограф типа С1-18; С1-19; С1-55, С1-65; 10—анализатор спектра звуковых частот типа С5-3А; 11—электронный частотомер типа Ф5030; 12, 13, 14—электронный вольтметр типа В7-16; 15—измеритель нелинейных искажений типа С6-2, С6-1А, С6-1, ИНИ-12; 16, 17—согласующее устройство; 18—транскриптор типа Ф5033, Ф595КМ; 19—электроуправляемая машинка типа ЭУМ-23П; ЭУМ-23; 20—устройство перфорирующее типа ПЛ-80, ПЛ-150П; 21—измеритель магнитной индукции; 22—генератор типа Г3-35, Г3-102; 23—информетр типа ВА-2, ИШВ-1

Разрабатывается согласующее устройство 17 для преобразования кода транскриптора 18 в код перфоратора 20. Особого внимания заслуживают определение нелинейных искажений и колебаний. В процессе аттестации возникает необходимость в нахождении спектра колебаний, коэффициент гармоник которых превышает заданное значение. Наиболее эффективно для этих целей применять измеритель нелинейных искажений 15 типа С6-5 или С6-1А. Для определения спектра колебаний следует использовать анализатор 10 типа С5-3А.

Аналоговые измерители нелинейных искажений типа С6-1 имеют ряд существенных недостатков. К ним следует отнести ограниченный снизу частотный диапазон, обусловленный сложностью изготовления, инфранизкочастотных заградительных фильтров, а также сложность и трудоемкость методики измерения (на измерение k_f затрачивается 0,5—2 мин). При этом на частотах ниже 20 Гц (нижняя граница частотного диапазона измерителей нелинейных искажений) значение k_f приходится определять опосредствованно, например, пересчетом амплитуд гармоник. Значительных затрат времени требуют также

измерения спектра колебаний. Указанные недостатки можно устранить, если совместить процесс измерения k_r и спектра в одном приборе и автоматизировать процессы измерения и записи результатов. Для этих целей разработан аналого-цифровой измеритель k_r на интегральных схемах. Он позволит сократить время измерения и регистрации k_r и спектра колебаний, повысить точность измерений k_r , особенно в нижней части частотного диапазона, и тем самым расширить диапазон в сторону нижней границы. Разработанный цифровой измеритель k_r позволит исследовать колебания в частотном диапазоне 1—10000 Гц по первой гармонике при входном напряжении 10^{-2} —10 В и обеспечить измерения коэффициента гармоник до 100%. Результаты измерений выводятся на цифropечать и на внутренний цифровой индикатор. В приборе предусмотрена дополнительная сигнализация о превышении коэффициентом гармоник заданного уровня. В ППВЛ включен задающий генератор 22 для внешнего запуска электродинамических виброустановок, измеритель магнитной индукции 21 для измерения магнитной индукции на площадке вибростола, виброметр 23 и др. Предусмотрена система защиты измерительных приборов от вибраций и тряски при транспортировке системы, электропитания, отопления, вентиляции, освещения и микротелефонной связи между салоном автобуса и выносным устройством.

УДК 620.178.5 : 62—218-752

Д. П. ПЕРШИН, В. Н. ЛЕБЕДЕВ, Л. К. МАЛЮТИНА
ВНИИМ

ИСПЫТАНИЕ ВИБРОИЗОЛИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

При испытании изделий на механические воздействия на определенных частотах сила реакции изделия на платформу вибратора может достигать больших значений и быть достаточной, чтобы изменить закон движения плат-

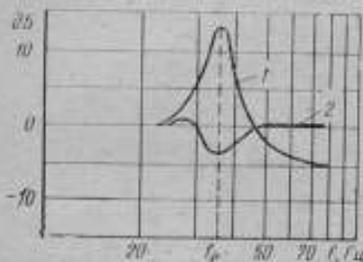


Рис. 1. Влияние резонирующего изделия (кривая 1) на платформу вибратора (кривая 2) при $\mu=0,5$

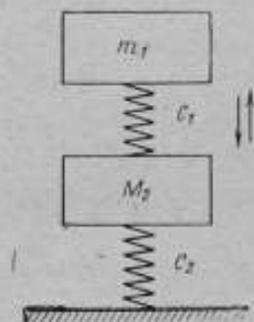


Рис. 2. Система с двумя степенями свободы: M —масса подвижной системы вибратора; m —масса испытуемого изделия; c —жесткость подвижной системы; c_0 —жесткость крепления изделия

формы и тем самым снизить уровень ускорения (рис. 1). Частота, при которой изделие имеет максимальную реакцию на возбуждение, называется частотой антивиброанса или частотой собственных колебаний изделия на неподвижном основании.

Пренебрежение влиянием реакции изделия на основание в ряде случаев приводит к разрушению конструкций, обладающих большим запасом прочности. На частоте антирезонанса наблюдается искажение формы сигнала, а измерение уровня ускорения с помощью пьезоэлектрического преобразователя приводит к неверным результатам.

Настоящая работа была проведена с целью исследования воздействия испытуемого изделия на основание в зоне антирезонанса и разработки рекомендаций по испытанию амортизированных изделий.

Рассмотрим систему, приведенную на рис. 2. Под действием вынуждающей силы $P_0 \sin \omega t$ на подвижную массу вибратора M_2 с жесткостью c_2 к платформе прикреплено изделие массой m_1 с жесткостью крепления c_1 . Уравнение составляется при учете следующих сил: $M_2 \ddot{z}$ — сила инерции подвижной массы вибратора; $c_2 z$ — сила упругого сопротивления пружин вибратора; $c_1(z - z_1)$ — сила упругого сопротивления амортизации изделия.

Тогда уравнение движения будет

$$M_2 \ddot{z} + c_2 z + c_1(z - z_1) = P_0 \sin \omega t \quad (1)$$

или

$$M \ddot{z} + (c - c_n) z - c_n z_1 = P_0 \sin \omega t \quad (2)$$

На амортизированный прибор действует сила инерции массы прибора $m_1 \ddot{z}_1$ и сила упругой амортизации $c_1(z - z_1)$.

Уравнение движения примет вид

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1(z - z_1) = 0 \quad (3)$$

Платформа вибратора возбуждается синусоидальной силой, а ее перемещение составляет $z = A \sin \omega t$. Амортизированное изделие будет колебаться аналогичным образом, но с другими параметрами, т. е. $z_1 = B \sin \omega t$.

Продифференцируем выражения для смещений z и z_1

$$\begin{aligned} \dot{z} &= A \omega \cos \omega t; & \dot{z}_1 &= B \omega \cos \omega t; \\ \ddot{z} &= -A \omega^2 \sin \omega t; & \ddot{z}_1 &= -B \omega^2 \sin \omega t. \end{aligned}$$

Подставим значения $z, z_1, \dot{z}, \dot{z}_1$ в (1) и (3)

$$\begin{aligned} M_2 (-A \omega^2 \sin \omega t) + (c_2 + c_1) A \sin \omega t - c_1 B \sin \omega t &= P_0 \sin \omega t; \\ m_1 (-B \omega^2 \sin \omega t) + c_1 B \sin \omega t - c_1 A \sin \omega t &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

После сокращения синусов получаем

$$M A \omega^2 + (c_2 + c_1) A - c_1 B = P_0; \quad (5)$$

$$-m B \omega^2 + c_1 B - c_1 A = 0. \quad (6)$$

Вводим следующие обозначения для преобразования (5) и (6) и их анализа: $\omega_n = \sqrt{\frac{c_1}{m_1}}$ — частота собственных колебаний амортизированного изделия;

$\omega_n = \sqrt{\frac{c_2}{M_2}}$ — частота собственных колебаний вибратора; $\nu = \frac{\omega_n}{\omega}$ — отношение

собственных частот колебаний вибратора и изделия; $\mu = \frac{m_1}{M_2}$ — отношение массы изделия к подвижной массе вибратора; $A_n = \frac{P_0}{c_2}$ — перемещение платформы под действием силы, равной амплитуде синусоидальной нагрузки.

Разделим левую и правую части (5) на c_2 , а (6) — на c_1

$$A \left(-\frac{M_2}{c_2} \omega^2 + \frac{c_1}{c_2} + 1 \right) - B \frac{c_1}{c_2} = A_n; \quad (7)$$

$$B \left(-\frac{m_1}{c_1} \omega^2 + 1 \right) - A = 0.$$

Из (7) находим

$$A = B \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right). \quad (8)$$

Подставим (8) в (6)

$$\frac{B}{A_n} = \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + \frac{c_1}{c_2} \right) - \frac{c_1}{c_2} \right]^{-1}. \quad (9)$$

Определим из (8)

$$B = \frac{A}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}$$

и подставим его в (7)

$$\frac{A}{A_n} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + \frac{c_1}{c_2} \right) - \frac{c_1}{c_2}}. \quad (10)$$

Из (10) видно, что при равенстве частот собственных колебаний амортизированного прибора и подвижной системы вибратора амплитуда колебаний платформы равна нулю.

Из выражения (9) при $\omega_n = \omega_0$ имеем

$$B = \frac{A_n}{c_1} = \frac{P_0}{c_1},$$

т. е. амплитуда возбуждающей силы вибратора уравновешивается упругой силой амортизатора изделия, а следовательно, всегда противоположна ей.

Рассмотрим влияние на колебания амортизированного прибора на платформе таких параметров, как ν и μ . Так как $\omega_0 = \nu^2 \omega_n$, то

$$\frac{c_2}{M_2} = \nu \frac{c_1}{m_1}, \quad (11)$$

откуда

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{m_1}{M_2 \nu^2} \quad \text{или} \quad \frac{c_1}{c_2} = \frac{\mu}{\nu^2}. \quad (12)$$

Подставив (12) в (9) и (10), получим

$$\frac{A}{A_n} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\nu^2 \omega_n^2} + \frac{\mu}{\nu^2} \right) - \frac{\mu}{\nu^2}}; \quad (13)$$

$$\frac{B}{A_n} = \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\nu^2 \omega_n^2} + \frac{\mu}{\nu^2} \right) - \frac{\mu}{\nu^2} \right]^{-1}. \quad (14)$$

При резонансных колебаниях системы вибратор — амортизированное изделие амплитуда колебаний как платформы, так и изделия должны стремиться к бесконечности. Так как знаменатели в (13) и (14) одинаковы, их можно приравнять нулю и найти значения собственных частот указанной системы.

$$\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_n^2} \right) \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\nu^2 \omega_n^2} + \frac{\mu}{\nu^2} \right) - \frac{\mu}{\nu^2} = 0. \quad (15)$$

После преобразования уравнение (15) принимает вид

$$\left(\frac{\omega_g}{\omega_n}\right)^4 - \left(\frac{\omega_g}{\omega_n}\right)^2 (\nu^2 + \mu - 1) + \nu^2 = 0. \quad (16)$$

Решая (16), находим

$$\left(\frac{\omega_g}{\omega_n}\right)^2 = \frac{\nu^2 + \mu + 1}{2} \pm \sqrt{\frac{\nu^2 + \mu + 1}{4} - \nu^2}.$$

На платформу при резонансе амортизированного изделия действует сила реакции, равная $c_1 z_1$ и уравновешивающая вынуждающую силу $P_0 \sin \omega t$. Чтобы этого не происходило, подвижная система вибратора должна иметь бесконечно большую массу или механический импеданс, равный бесконечности. Поэтому приведенные в [1] выводы о том, что антирезонансная частота и коэффициент усиления на ней не зависят от упругих характеристик вибратора, а целиком определяются характеристиками амортизированного изделия справедливы для испытаний в дорезонансном диапазоне. Однако несомненно, что отсутствие провалов в амплитудно-частотной характеристике вибратора с $M_2 = \infty$ при работе амортизированного изделия в резонансе не ослабит воздействие на изделие, а его ускорения будут определяться потерями в амортизаторах.

Таким образом, с увеличением частоты резонанса изделия при одной и той же его массе увеличивается воздействие на платформу вибратора; на частоте антирезонанса коэффициент нелинейных искажений достигает максимума, при этом в спектре содержится частота, ускорение на которых может превосходить в несколько раз ускорение на вынуждающей частоте; измерение ускорений на резонансных частотах следует производить с применением полосовых или ограничивающих фильтров; форсирование вибратора на частоте антирезонанса недопустимо, так как при этом изделие может испытывать ускорения, больше заданных в несколько раз; испытания изделий на вибропрочность на частотах антирезонанса требует учета «провалов» в амплитудно-частотной характеристике платформы в том случае, когда масса подвижной системы вибратора на порядок превышает массу изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания. М., Физматгиз, 1960, 580 с.
2. Ильинский В. С. Вопросы изоляции вибраций и ударов. М., «Советское радио», 1960, 160 с.
3. Кренделл С. Случайные колебания. М., «Мир», 1967, 356 с.

Поступила в редакцию 6.5.1975 г.

СОДЕРЖАНИЕ

А. Ф. Бордиловский. Определение дробных долей интерференционных полос при измерении амплитуды перемещений	3
В. В. Данилов, А. И. Кащеев. Устройства вывода цифровой информации в эталоне параметров движения	5
В. Е. Привалов. Технические флуктуации излучения газовых лазеров метрологического назначения	8
В. Л. Шур. Лазерный интерферометр с фазовой модуляцией на частоте 30 МГц	11
С. Н. Иваишевский. Измерение параметров движения методом оптико-электронной обратной связи	13
В. И. Гудов, Б. И. Rogozev, В. Л. Федорин, Н. К. Черезов, В. С. Шкаликот. Применение резонансного сцинтилляционного детектора в качестве гамма-резонансного виброизмерительного преобразователя	16
Н. О. Крылова. Рентгеновские интерферометры для измерения амплитуд перемещения от 10^{-2} до 10^2 нм	18
Ж. Д. Даширмаев. Анализ записей инфранизкочастотного вибратора	21
Д. П. Першин, Г. П. Целищев. Образцовый виброметр для поверки вибрационных установок ОВУ-1М и ОИВУ-2М	27
В. Д. Мазин, Е. С. Левшина, В. И. Лобан. Устройство для измерения малых виброускорений	28
В. Н. Тихомиров. Согласующий измерительный предусилитель для низких частот	31
А. Б. Курэнер. Анализ погрешностей статической градуировки акселерометров на центрифугах и методы их исключения	33
Е. В. Куликов. Комплекс виброизмерительных резонансных устройств	38
С. А. Яушева. Погрешности задания ускорения при определении диаграмм направленности акселерометров в статическом режиме	41
В. В. Мариамидзе, В. С. Шкаликот. Некоторые вопросы исследования инфранизкочастотных электродинамических вибраторов	44
А. А. Пшеничнов. Вибратор для измерения частоты установочного резонанса пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователей	47
В. М. Михайлов, А. И. Кашинцев, А. Н. Морозевич. Передвижная поверочная виброизмерительная лаборатория	49
Д. П. Першин, В. И. Лебедев, Л. К. Малюткина. Испытание виброизолированных изделий	51
Рефераты публикуемых статей	56

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 531.714.2.028.6 : 535.412.082

Определение дробных долей интерференционных полос при измерении амплитуды перемещений. Бордизовский А. Ф. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 3-5.

Приводится описание метода определения дробной части порядка интерференции при измерении амплитуды перемещения. Показана возможность определения амплитуд перемещений, сопоставимых с длиной волны монохроматического источника света с точностью до 0,01 длины волны. Дается анализ погрешностей результатов измерений.

Ил. 1. Библи. 4.

УДК 681.327

Устройства вывода цифровой информации в эталоне параметров движения. Данилов В. В., Кашаев А. Н. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 5-8.

Для эталона параметров движения разработаны устройства автоматической регистрации цифровой информации на перфоленту. Информация снимается с цифровых приборов ЧЗ-30 и ВК7-10А. Предельная скорость регистрации составляет 2,27 и 100 измерений в секунду.

Ил. 2.

УДК 681.373.826.039 : 623.001.5

Технические флуктуации излучения газовых лазеров метрологического назначения. Привалов В. Е. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 8-11.

Дан обзор основных флуктуаций в газовых лазерах метрологического назначения. Устранение флуктуаций позволяет повысить точность и воспроизводимость измерений, проводимых с помощью газовых лазеров. Основное внимание уделено флуктуациям в активной среде, рассмотрены основные методы их устранения.

Табл. 1. Библи. 11.

УДК 531.714.2 : 531.715.1 : 621.375.626

Лазерный интерферометр с фазовой модуляцией на частоте 30 МГц. Шур В. Л. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 11-13.

Рассматривается принцип построения интерферометра с модуляцией разности фаз интерферирующих лучей на фиксированной частоте для измерения перемещений и механических колебаний с амплитудами, превышающими длину световой волны. В исследуемой схеме фазовая модуляция осуществлялась на частоте 30 МГц с помощью кристалла типа КДР, размещенного в референтном плече интерферометра.

Ил. 5. Библи. 2.

УДК 531.714.2.681.766.24.069.24

Изменение параметров движения методом оптико-электронной обратной связи. Ивашевский С. Н. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 13—16.

Рассматривается оптико-электронное устройство уравновешивающего преобразования для измерения перемещений объектов. В устройстве использована электронно-лучевая трубка в качестве управляемого источника света.

Ил. 1. Библ. 2.

УДК 534.647.083.2 : 539.122.074.3.037.92

Применение резонансного синтиллиационного детектора в качестве гамма-резонансного виброизмерительного преобразователя. Гудов В. И., Rogozev B. И., Федорин В. Л., Черепанов Н. К., Шкадилов В. С. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 16—18.

Разработан новый источник-поглотитель, обеспечивающий измерение малых уровней вибраций.

Библ. 5.

УДК 531.714.2 : 681.787.7

Рентгеновские интерферометры для измерения амплитуд перемещения от 10^{-2} до 10^6 нм. Крылова Н. О. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 18—21.

Дан обзор последних достижений в области применения рентгеновских интерферометров в метрологии. Описан принцип действия рентгеновского интерферометра. Рассмотрена возможность использования оптико-рентгеновского интерферометра для измерения амплитуд перемещений от 10^{-2} до 10^6 нм.

Ил. 1. Библ. 4.

УДК 534.232.089.6—6

Анализ записей инфранизкочастотного вибратора. Дашиницаев Ж. Д. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 21—26.

Разработана методика анализа экспериментальных данных образцовой инфразвуковой установки.

Табл. 2. Ил. 5. Библ. 3.

УДК 534.647.089.6

Образцовый виброметр для поверки вибрационных установок ОВУ-1М и ОВВУ-2М. Першин Д. П., Цезарев Г. П. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 27—28.

Дано описание образцового виброметра с насадками, позволяющего повысить точность поверки вибрационных установок 2-го разряда. Он может применяться для точных измерений параметров вибраций в лабораторных условиях.

Ил. 3. Библ. 2.

УДК 531.768.082.4 : 534.647

Устройство для измерения малых виброускорений. Мазин В. Д., Левшина Е. С., Лобан В. И. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 28—31.

Разработана, построена и исследована аппаратура для измерения вибрационных ускорений по трем взаимно перпендикулярным каналам.

Ил. 2.

УДК 621.375.4.049.77 : 534.647.082.73.087.92

Согласующий измерительный преусилитель для низких частот. Тихомирров В. Н. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192(252), 1976, с. 31—33.

Разработан согласующий преусилитель на интегральной микросхеме для пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователей. Высокое входное сопротивление преусилителя (10^6 Ом) позволяет измерить параметры вибрации начиная с 0,5 Гц.

Табл. 1. Ил. 1. Библи. 3.

УДК 531.768.086.6

Анализ погрешностей статической градуировки акселерометров на центрифугах и методы их исключения. Кураниер А. Б. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192(252), 1976, с. 33—38.

Предлагается два варианта метода исключения систематических погрешностей статической градуировки акселерометров на центрифугах. Погрешности обусловлены неопределенностью положения центра инерции и перемещением чувствительного элемента акселерометра. Получены рабочие формулы оценки коэффициентов погрешности, аналогизирующего статическую градуировочную характеристику, и найдены их погрешности. Приведены числовые примеры.

Библи. 9.

УДК 534.617.089.62

Комплекс виброизмерительных резонансных устройств. Кудников Е. В. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192(252), 1976, с. 38—40.

Разработано виброизмерительные резонансные устройства для расширения динамического диапазона образцовой вибродвижной установки типа ОВУ-1, а также других установок, применяемых при поверке виброметров (СОВКУ-68, ПВУ-1 и т. п.).

Табл. 2. Ил. 1. Библи. 2.

УДК 531.768.086.6

Погрешности задания ускорения при определении диаграмм направленности акселерометров в статическом режиме. Мушенин С. А. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192(252), 1976, с. 41—43.

Рассмотрены погрешности задания ускорения при определении диаграмм направленности акселерометров в статическом режиме, связанные как со спецификой средств задания ускорения (одинарная центрифуга), так и с характеристиками исследуемых приборов. Получены оценки погрешности задания ускорения, обусловленной указанными причинами.

Библи. 2.

УДК 531.714.2 : 681.783

Некоторые вопросы исследования инфранизкочастотных электродинамических вибраторов. Марьямидзе В. В., Шкальников В. С. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192(252), 1976, с. 44—47.

Анализируются искажения формы колебаний подвижной системы вибратора, связанные с неравномерностью магнитного поля магнитопровода.

Табл. 2. Ил. 1.

УДК 534.232.087.92 : 534.143

Вибратор для измерения частоты установочного резонанса пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователей. Пшеничников А. А. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192(252), 1976, с. 47—49.

Приводится описание вибратора для определения частоты установочного резонанса пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователей. Применено два метода возбуждения механических колебаний: пьезоэлектрический и магнитострикционный. Приведены результаты измерения частоты установочного резонанса некоторых типов преобразователей.

Табл. 1. Ил. 3.

УДК 534.547.089.6:006.2

Передвижная поперечная виброизмерительная лаборатория. Михайлов В. М., Кашинцев А. И., Морозевич А. Н. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 49—51.

Разработана и исследована передвижная поперечная виброизмерительная лаборатория ППВЛ с автоматизированной системой измерения и регистрации параметров вибрации и дистанционным подключением к исследуемому объекту. Лаборатория позволит сократить время аттестации и значительно повысить точность измерений.

Ил. 1.

УДК 680.178.5:62-218-732

Испытание виброизолированных изделий. Першин Д. П., Лебедев В. И., Мадюгина Л. К. — «Труды метрологических институтов СССР», вып. 192 (252), 1976, с. 51—54.

Приведены результаты исследования воздействия испытуемого изделия на основание в зоне антирезонанса и даны некоторые рекомендации по испытанию виброизолированных изделий.

Ил. 2. Библи. 3.

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ**

Труды метрологических институтов СССР

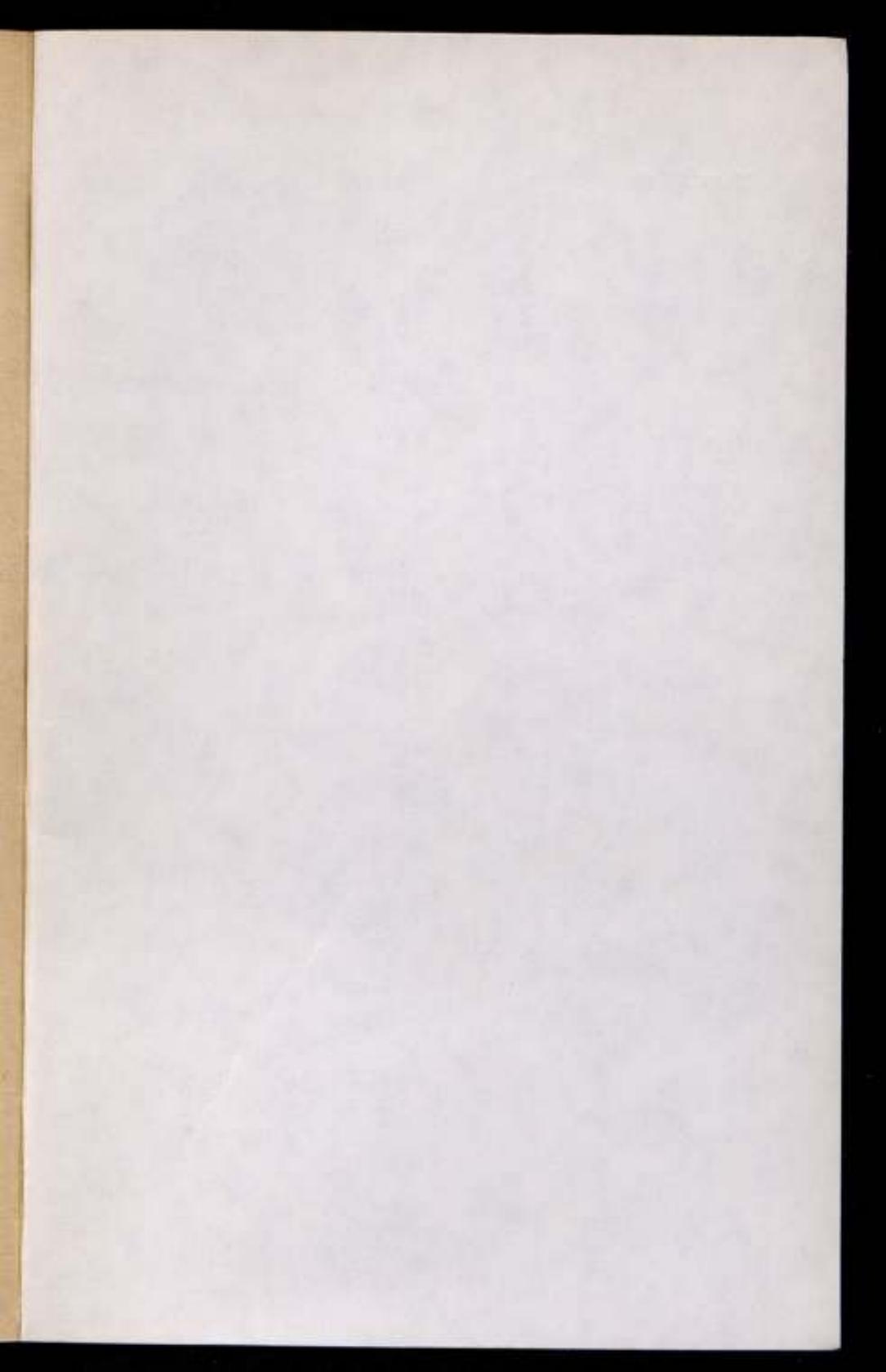
Выпуск 192(252)

Редактор *Л. Ф. Садовская*
Технический редактор *О. С. Жиганова*

Сдано в набор 17/II 1976 г. Подписано к печати 23/V 1976 г.
М-23017. Формат 60×90/16. Бумага типографская № 2.
Печ. л. 3,75. Уч.-изд. л. 5,47. Тираж 1000. Заказ № 100.
Цена 55 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия»
192041, Ленинград, Марсово поле, 1.

Типография Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательского института гидротехники им. В. Е. Веденеева,
195220, Ленинград, Гжатская ул., 21.



Цена 55 коп.