

В. Г. ВИТКОВСКИЙ, Л. Д. ГИК, В. Н. ЗАТОЛОКИН,
 В. П. КОРОНКЕВИЧ, Г. А. ЛЕНКОВА, Г. Г. ТАРАСОВ
 (Новосибирск)

ЦИФРОВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР

Тарировка виброизмерительной аппаратуры в настоящее время производится с помощью эталонов длины и времени. Известно [1] применение для этой цели интерференционных методов измерения длины как наиболее точных. Однако низкая когерентность монохроматических источников света не позволяла использовать интерферометры для измерения больших амплитуд вибраций. Недостаточная яркость препятствовала автоматизации процесса измерения. Создание лазерных интерферометров [2], отличающихся высокой точностью, стабильностью, малыми размерами конструкции и большой светосилой, открыло новые возможности в использовании интерференционных методов, и в частности, как средства в технике измерения вибраций. Результаты исследований в данном направлении составляют содержание настоящей работы.

Схема интерферометра приведена на рис. 1. Здесь 1 — лазер; 2 — блок полупрозрачных зеркал; 3 и 4 — фотоприемники. Элементы 1—4 крепятся на неподвижном основании. Подвижное зеркало 5 укрепляется на вибрирующей платформе. Перемещение его приводит к изменению разности фаз интерферирующих лучей, а значит, и к изменению интерференционной картины на выходе прибора. Использование тройной призмы в качестве отражателя 5 позволяет существенно уменьшить чувствительность прибора к угловым колебаниям.

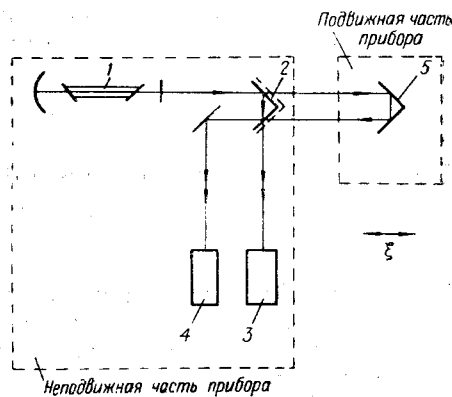


Рис. 1.

Процесс измерения вибраций с помощью лазерного интерферометра можно осуществить как посредством системы, чувствительной к направлению движения зеркала (влево или вправо), так и с помощью системы, безразличной к этому направлению. Сравним эти две возможности. Система, чувствительная к направлению движения, требует использования двух фотоприемников, фазовые соотношения между сигналами в которых и дают информацию о направлении перемещения. Используя

такое устройство, процесс измерения можно выполнить следующим образом. При одном направлении перемещения осуществляется сброс показаний виброметра, при противоположном — включается счетчик импульсов. Показания такого прибора, очевидно, равны размаху измеряемых вибраций. Число импульсов, поступающих на счетчик, равно

$$N = \frac{k \xi}{\frac{\lambda}{2}}$$

Здесь k — коэффициент деления импульсов по уровню; λ — длина световой волны лазера.

Поскольку для гелий-неонового лазера длина световой волны составляет 6328 Å и, таким образом, не является числом «круглым» в метрической системе исчисления, то для удобства отсчета в прибор должно быть введено пересчетное устройство.

Порог чувствительности данного прибора, очевидно, такой же, как и в лазерном измерителе перемещений [2], а именно 0,1 мк. Эта же цифра определяет и абсолютную погрешность измерения. Верхний предел измеряемого смещения ограничивается быстродействием счетчика. Затруднения из-за этого могут возникнуть только при измерении очень значительных вибраций, параметров интенсивных ударов. Частотный диапазон прибора практически не ограничен.

Рассмотрим второй возможный путь построения виброметра, в котором индикатор перемещения безразличен к направлению движения. Здесь выходной сигнал пропорционален суммарной абсолютной величине перемещения в течение всего интервала измерения. Поскольку интегральный путь в продолжение некоторого интервала времени τ определяется скоростью, то такой прибор в принципе является измерителем скорости вибраций. Для периодических вибраций абсолютная величина перемещения за интервал времени τ равна $\xi_{\text{ср}} \tau$. Здесь $\xi_{\text{ср}}$ — средняя величина виброскорости. Число импульсов на выходе интерферометра в этом случае равно

$$N = k \frac{\xi_{\text{ср}} \tau}{\lambda/2}$$

Чувствительность прибора может быть выражена

$$S = \frac{N}{\xi_{\text{ср}}} = k \frac{2\tau}{\lambda}$$

Таким образом, данный прибор является измерителем средней величины виброскорости. Естественно, что при гармонических вибрациях, что обычно и имеет место при тарировке виброизмерительной аппаратуры, прибор может быть протарирован как измеритель пиковой величины. В этом случае

$$S' = \frac{N}{\xi_{\text{макс}}} = \frac{4}{\pi} k \frac{\tau}{\lambda}$$

Удобством данного способа измерения является возможность выбора интервала измерения кратным длине световой волны. Число импульсов будет выражать виброскорость непосредственно в метрической (или любой иной) системе мер, благодаря чему пересчетного устройства, как в ранее описанном варианте, не потребуется.

Рассмотрим вопрос о необходимой длительности интервала измерения, обеспечивающего достижение требуемой точности. Ограничимся

случаем синусоидальных вибраций, поскольку он наиболее важен для вибротарировочной техники. Итак, измеряемой величиной является абсолютная (без учета направления движения) величина перемещения зеркала, что можно выразить

$$\xi_{\Sigma} = \int_0^{\tau} |\dot{\xi}_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)| dt.$$

Здесь φ_0 — начальная фаза вибраций. Используя разложение функции $|\sin x|$ в ряд Фурье и выполняя интегрирование, получим

$$\xi_{\Sigma} = \frac{2}{\pi} \dot{\xi}_0 \tau - \frac{2}{\pi} \frac{\dot{\xi}_0}{\omega_0} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k(4k^2-1)} \cos(k\omega_0\tau + \varphi) \sin k\omega_0\tau.$$

Второй член последнего выражения определяется соотношением ω_0 и τ , которое в процессе измерения может быть случайным. Поэтому этот член выражает погрешность измерения

$$d\xi_{\Sigma} = \frac{1}{\omega_0\tau} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k(4k^2-1)} \cos(k\omega_0\tau + \varphi) \sin k\omega_0\tau.$$

Максимальная величина погрешности имеет место, когда соотношение ω_0 и τ таково, что произведение тригонометрических функций в первых членах ряда близко к единице. Тогда

$$\delta \xi_{\Sigma} \cong 0,06 \frac{T_0}{\tau}.$$

Здесь T_0 — период измеряемых вибраций. Последнее выражение позволяет определить минимальную допустимую величину интервала измерения τ для заданных технических характеристик прибора — погрешности измерения и нижней границы диапазона измеряемых вибраций.

Рассмотрим вопрос о пороге чувствительности лазерного виброметра. Изменение освещенности фотоприемника циклически повторяется при перемещении зеркала на $\lambda/2$. Поэтому в простейшем случае, когда выделяются однотипные фазы интерференционной картины, например состояния максимума или минимума освещения, один такт срабатывания счетчика будет иметь место при $\xi_1 = \frac{\lambda}{2} = 0,3164 \text{ мк}$. Практически без уменьшения надежности срабатывания счетчика можно построить прибор так, чтобы счетчик срабатывал дважды за период как при максимуме, так и при минимуме освещенности; тогда порог чувствительности составит $\xi_2 = \frac{\lambda}{4} = 0,1582 \text{ мк}$.

Дальнейшее дробление периода интерференционной картины требует срабатывания счетчика при изменении освещенности лишь на долю максимальной величины. Так, если порог чувствительности принимается равным $\xi_n = \frac{\lambda}{4n}$, то изменение освещенности при перемещении зеркала на величину ξ_n может быть выражено

$$\Delta I_i = I_i - I_{i-1} = 2 I_0 \sin \frac{T}{2\pi} \cos \frac{\pi}{2n} (2i-1).$$

Здесь принято $\xi_i = \frac{\lambda}{4n} i$. Минимальная относительная величина изме-

нения освещенности (с учетом того, что максимум ее не превышает средней величины более чем на I_0) как функция n приведена в таблице.

Очевидно, что общая нестабильность источника света и оптических систем, а также нестабильность чувствительности фотоприемника, усилителя и порогового элемента должны быть в несколько раз меньше

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | 16 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $\xi_n, \text{ мк}$ | 0,16 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| $\frac{\min \Delta I}{I_0}$ | 2 | 1 | 0,09 | 0,29 | 0,07 | 0,02 |

$\frac{m \ln \Delta I}{I_0}$ в целях обеспечения надежности результата измерения. Поэтому едва ли реально принимать n более 2 или 4. Поскольку увеличение n по сравнению с единицей усложняет аппаратуру,

снижая надежность, то порог чувствительности рассматриваемого виброметра лежит вблизи 0,1 мк. Имеется возможность улучшить порог чувствительности прибора, используя многократное отражение лазерного луча от вибрирующего зеркала. При этом улучшение порога чувствительности пропорционально числу отражений.

Наличие порога чувствительности прибора по виброперемещению ограничивает также порог чувствительности по виброскорости и ускорению. Пороговые значения по скорости представлены на рис. 2, а по ускорению на рис. 3 (кривые 1). На тех же рисунках указаны минимальные значения измеряемого параметра, которые могут быть измерены с погрешностью 1% (кривые 2), и минимальные значения параметра, которые могут быть измерены с погрешностью 0,1% (кривые 3).

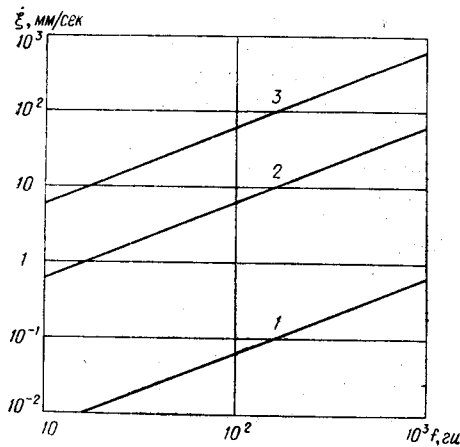


Рис. 2.

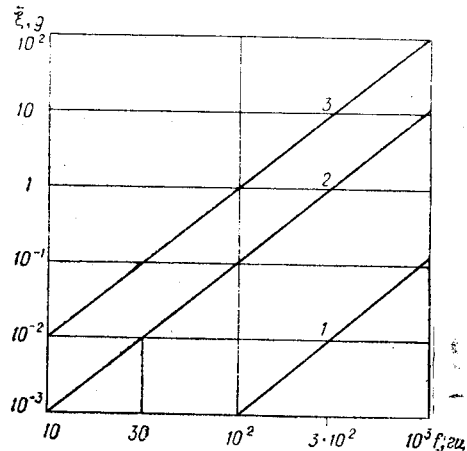


Рис. 3.

Поскольку улучшение порога чувствительности лазерного виброметра связано со значительными трудностями, то в случае измерения весьма малых вибраций представляет интерес совместное использование данного прибора с преобразователями другого типа. В первую очередь представляет интерес датчик магнитоэлектрического типа как наиболее чувствительный к скорости. Обозначим чувствительность такого датчика S_{ξ} , а порог чувствительности используемого измерительного усилителя $U_{\text{ш}}$. Тогда порог чувствительности устройства по скорости составит

$$\min \dot{\xi} = \frac{U_{\text{ш}}}{S_{\xi}}.$$

При оптимальном согласовании с транзисторным усилителем сопротивление катушки магнитоэлектрического датчика должно быть порядка 1000 ом [3]. В этом случае $U_{ш} \cong 0,5 \div 1$ мкв в инфразвуковом диапазоне частот, а S_{ξ} для датчиков средних размеров около 30 мв/мм/сек. В итоге $\min \xi \cong 3 \cdot 10^{-5}$ мм/сек. Порог чувствительности по смещению на частоте 100 гц составляет $\min \xi = \frac{1}{\omega} \dot{\xi} = 5 \cdot 10^{-8}$ мм, т. е. примерно на 4 порядка лучше, чем у лазерного прибора. На частоте 1000 гц порог чувствительности по смещению будет соответственно еще в 10 раз лучше.

Благодаря практически идеальной линейности магнитоэлектрический датчик может быть при совместной работе с лазерным виброметром первоначально прокалиброван, а затем при малых вибрациях использован как измеритель. Так будут достигнуты и малый порог чувствительности, и малая погрешность.

Рассмотрим вопрос о точности прибора. Отсчетной величиной является число импульсов, поступающее от фотоприемника:

$$N = \frac{\int_0^{\tau} |\dot{\xi}| dt}{\lambda}$$

Причиной погрешности, таким образом, может быть нестабильность λ и τ . При наличии системы стабилизации [2] длина световой волны лазера может быть стабилизирована с погрешностью порядка 10^{-6} . Такой же и даже лучше может быть стабильность интервала времени. Однако пока нет необходимости иметь столь высокую точность измерения. Действительно, подавляющее большинство виброизмерительных приборов предназначается для контроля вредных вибраций. В этом случае погрешность порядка 5—10% считается удовлетворительной. Лишь в редких случаях требуется, чтобы погрешность измерения не превышала 1—2%. Поэтому при поверке и градуировке подавляющего большинства виброизмерительной аппаратуры желательно, чтобы погрешность эталонной

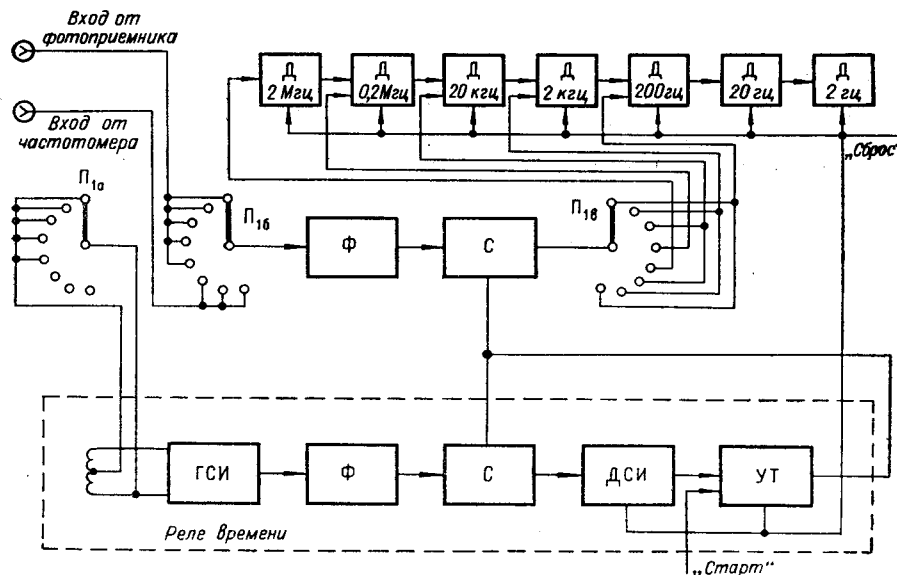


Рис. 4.

аппаратуры не превышала 0,5%. Именно эта цифра принята для данного прибора.

Чтобы обеспечить погрешность 0,5%, цифровой индикатор должен иметь не менее 3 отсчетных декад. Требуемая нестабильность λ для гелий-неонового лазера обеспечивается автоматически с запасом для без системы стабилизации. Стабильность интервала измерения τ должна быть в этом случае в пределах 0,5%. Однако если использовать полную возможность трех декад, то, естественно, нужно обеспечить постоянство τ с погрешностью не хуже 0,1%.

Блок-схема прибора показана на рис. 4. Здесь Д — пересчетные двоично-десятичные декады; Ф — формирователь импульсов; С — селектор; ГСИ — генератор селекторных импульсов; ДСИ — делитель селекторных импульсов; УТ — управляющий триггер. Все элементы, исключая блок питания лазера, выполнены на полупроводниковых приборах. Декадные делители, декадные делители с дешифраторами к цифровым лампам типа ИН-4 и усилители-ограничители выполнены по схемам, рекомендованным Б. И. Швециком [4].

Реле времени построено на основе LC генератора, работающего на частоте 100 кГц, импульсного счетчика и бесконтактного коммутатора. В лабораторных условиях работы нестабильность интервала времени реле лежит вблизи 0,2%.

Всего в приборе содержится 165 транзисторов, 170 полупроводниковых диодов, около 600 других радиотехнических элементов. Габариты электронного измерительного блока 520×480×195 мм; вес около 14 кг. Габариты интерференционного датчика 310×120×100 мм; вес приблизительно 5 кг.

Основные технические характеристики прибора: 1) пять пределов измерения по виброскорости от 0,1 до 1000 мм/сек на всю шкалу; 2) три предела измерения по частоте от 0,1 до 10 кГц на всю шкалу; 3) частотный диапазон от 5 до 1000 гц; 4) порог чувствительности 0,16 мк; 5) погрешность измерения около 0,2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Иорш. Виброметрия. М., Машгиз, 1956.
2. Г. А. Ленкова, А. И. Лохматов, С. Я. Волохова, Е. И. Гурин, Э. Б. Колесова, В. П. Коронкевич, Г. Г. Тарасов. Лазерный интерферометр для измерения длины. — Тезисы докладов Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1968.
3. Л. Д. Гик, А. Г. Козачок, В. М. Кунов, Ю. А. Щепеткин. Анализ порога чувствительности измерительных усилителей. — Автометрия, 1967, № 6.
4. Б. И. Швецкий. Электронные измерительные приборы с цифровым отсчетом. Киев, «Техника», 1964.

Поступила в редакцию
10 ноября 1969 г.