

Л. Д. ГИК  
(Новосибирск)

## РАЗВИТИЕ ВИБРОМЕТРИИ

Виброметрия — это область измерения параметров ускоренных движений, чаще всего периодических колебаний. В соответствии с общим прогрессом измерительной техники [1] в настоящее время бурно развивается и виброметрия. Если в первые послевоенные годы основные потребности техники удовлетворяли датчики, пригодные для измерения вибросмещений от 0,01 до 1,0 мм в диапазоне частот от 10 до 200 гц, то сейчас возникает необходимость измерения ускорений в тысячные доли  $g$  с частотами в несколько килогерц, что соответствует перемещениям порядка межатомных расстояний. В других случаях требуется измерять перемещения с размахом в несколько метров и даже более. Частотный диапазон современных приборов простирается от сотых долей герца до десятков килогерц.

Особенностью виброметрии является большое разнообразие существующей измерительной аппаратуры: создать универсальные средства измерения крайне затруднительно, ибо удовлетворение ряда требований оказывается взаимно противоречивым. Так, например, повышение чувствительности акселерометров находится в прямом противоречии с расширением частотного диапазона; конструктивная простота и высокая надежность обычно приводят к сужению пределов измерения; миниатюризация датчиков связана с уменьшением их выходной мощности.

Существенно разными в каждом конкретном случае оказываются величины, которые требуется измерять. Так, при исследованиях, связанных с вопросами прочности, первостепенный интерес представляют пиковые значения ускорений, при анализе шумов — действующие значения скоростей, при некоторых исследованиях усталостных явлений — виброперемещения и т. д. К сожалению, в вопросе о том, в каких случаях какие параметры вибраций нужно измерять, есть много неясностей. Например, в энергетике вибрации, допустимые с точки зрения усталостных нагрузок, нормируются по смещениям, а в авиации — по ускорению. Дискуссия о том, что и когда правильно измерять, была бы очень полезной на одной из конференций по виброметрии.

Характерно, что потребность в некоторых виброизмерительных приборах может быть весьма острой и в то же время немногочисленной. Поэтому требует серьезного внимания развитие теории измерения вибраций, популяризация этой науки, что должно облегчить решение многочисленных частных задач. Эта же причина объясняет целесообраз-

ность поиска новых решений в виброметрии, которые, не будучи оптимальными в массовых измерениях, могут оказаться крайне полезными в отдельных случаях.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ

Измерение вибраций можно осуществлять, либо определяя положение вибрирующего объекта относительно некоторой инерциальной системы, имеющейся вблизи него или искусственно созданной, либо используя эффекты, проявляющиеся при ускоренном движении тел в неинерциальных системах. Поскольку объект измерения почти всегда имеет механические связи с окружающими его предметами, то найти неподвижное опорное тело вблизи него (естественную инерциальную систему), как правило, не удастся. Это служит причиной того, что подавляющее большинство виброизмерительных приборов приходится создавать на основании использования второго метода [2], поэтому в дальнейшем внимание будет уделяться только им.

Из физических явлений, имеющих место при наличии ускорений, в виброметрии используется только одно — возникновение силовой реакции, так называемой псевдосилы инерции, при ускоренном движении массы. Есть ли другие физические явления, которые принципиально можно использовать? Теоретически ответ на этот вопрос положителен. Так, например, свойством неинерциальной системы является излучение электромагнитной энергии ускоряющимися электрическими зарядами [3]:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{d^2}{dt^2} \vec{e}_r. \quad (1)$$

Здесь  $E$  — напряженность поля в некоторой точке пространства;  $\vec{e}_r$  — единичный вектор, проведенный из этой точки к точке расположения заряда;  $q$  — заряд;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость пустоты;  $c$  — скорость света.

Из (1) видно, что для ускорений, представляющих практический интерес, эффект излучения исчезающе мал. Все же анализ возможности его применения, как и других эффектов, позволяющих измерять ускорения, желателен в обобщающих монографиях по виброметрии. Такой анализ облегчил бы поиски новых методов измерения.

Подавляющее большинство виброизмерительных приборов основывается на использовании инерционных свойств твердых тел. Возможны три вида связи с исследуемым объектом — упругая, жесткая и свободная. Применимость последних двух ограничена [4]. Поэтому принципы виброметрии фактически сводятся к измерению взаимодействия объекта с упруго связанной массой. За такими системами укрепилось название сейсмических.

Поиски новых путей развития сейсмических систем непрерывно продолжаются. Это, конечно, вызвано тем, что существующие методы и устройства не в состоянии полностью удовлетворять нужды практики. Предпринимается много попыток использовать инерционные свойства жидкостей [5, 6]. Интересные возможности имеются в использовании инерции газов [7, 8], а также носителей зарядов [9]. Большинство названных работ имеет поисковый характер, и лишь некоторые [5] уже нашли практическое применение.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ВИБРОМЕТРИИ

В настоящей статье будут затронуты, главным образом, научные стороны развития виброметрии. Исследования в области виброметрии мы подразделяем на пять главных направлений, касающихся анализа частотных характеристик, чувствительности, точности, миниатюризации и надежности измерительной аппаратуры.

Прежде всего нужно указать проблему расширения частотного диапазона виброизмерительных приборов. Большинство работ, проводившихся в этом направлении, представляет собой попытку решения задачи конструктивным и технологическим совершенствованиями аппаратуры. Проблема высоких частот разрешалась в основном совершенствованием пьезодатчиков: увеличением их собственной частоты, устранением паразитных резонансов элементов конструкции, увеличением жесткости соединения датчика и объекта измерения. Указанными методами оказалось возможным расширить частотный диапазон аппаратуры до нескольких десятков килогерц [10].

Возможен, однако, и существенно иной путь построения вибродатчиков высоких частот, основанный на использовании низкочастотных сейсмических систем. Если массу пружины выбрать пренебрежимо малой в сравнении с сейсмической, то верхняя граничная частота такого виброметра может быть весьма высокой, а нагрузка на исследуемый объект — небольшой. Масса корпуса датчика должна быть в этом случае по возможности минимальной, чтобы не создавать лишней нагрузки на исследуемый объект.

Из работ, касающихся улучшения характеристик приборов в области низких частот, большинство также посвящено конструктивному совершенствованию датчиков. Улучшением конструкции упругих направляющих движения, главным образом подвесов низкочастотных маятников, удалось создать датчики с собственной частотой в доли герца [11]. К сожалению, в обращении с подобными низкочастотными датчиками требуется очень большая осторожность, что не позволяет применять их в переносных приборах.

Существенно отличаются от названных выше работы по улучшению частотных свойств виброизмерительных приборов путем применения электрической коррекции и электромеханической обратной связи. Электрическая коррекция заключается в присоединении к датчику такой частотнозависимой электрической цепи, которая преобразует его частотную характеристику в желаемый вид [12, 13]. Особый практический интерес представляет нормальная коррекция, введение которой не повышает порядка дифференциального уравнения, описывающего датчик. Можно показать, что это соответствует наилучшему возможно для виброметрии случаю минимальных фазовых искажений, а стало быть, и минимальному искажению формы сложных вибраций при фиксированном диапазоне частот. Так, при коррекции по методу умножения частотных характеристик требуется фильтр с коэффициентом передачи, равным

$$v_k = \frac{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2 - j2\beta_1 \frac{\omega_1}{\omega}}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega}\right)^2 - j2\beta_2 \frac{\omega_2}{\omega}} \quad (2)$$

Здесь  $\omega_1$  и  $\beta_1$  — собственная частота и степень успокоения исходного датчика, а  $\omega_2$  и  $\beta_2$  — характеристики, которые желательно получить в

результате коррекции. В [12] изложен синтез типовых корректирующих фильтров, позволяющих улучшить параметры как акселерометра ( $\omega_2 \gg \omega_1$ ), так и виброметра ( $\omega_2 \ll \omega_1$ ) при оптимальном успокоении, достигаемом в результате коррекции.

При решении с помощью коррекции проблемы низких частот ограничением является только снижение чувствительности прибора. Так, расширение частотного диапазона виброметров связано с потерей чувствительности пропорционально квадрату снижения граничной частоты диапазона измерения. Как показали исследования, проведенные в ИАЭ СО АН СССР [14], это обстоятельство не является препятствием для осуществления коррекции. Коррекция магнитоэлектрических вибродатчиков позволяет расширить их частотный диапазон в 20—40 раз. В самом деле, при измерении вибраций порядка  $\xi = 10$  мк магнитоэлектрическим датчиком с собственной частотой  $f_1 = 20$  гц и чувствительностью  $S_v = 10$  мв·сек/мм нижняя граница частотного диапазона определяется равенством [12]

$$f_{\min} = \sqrt[3]{\frac{U_{\text{ш}} f_1^2}{S_v \xi}} \approx 1 \text{ гц}.$$

Здесь порог чувствительности электрического измерительного устройства (транзисторного усилителя) выбран равным  $U_{\text{ш}} = 3 \cdot 10^{-7}$  в. Автор глубоко убежден, что названный путь является оптимальным для создания аппаратуры измерения малых виброперемещений низких и инфранизких частот и весьма удобным для построения универсальных приборов средних частот [14]. В настоящее время коррекцию начинают применять и за рубежом [15].

Электромеханическая обратная связь заключается в том, что электрический сигнал сейсмического датчика после усиления и интегрирующего (иногда дифференцирующего) преобразования оказывает обратное силовое воздействие на сейсмическую массу. Это приводит к изменению параметров датчика. Так, выражение для его собственной частоты принимает вид

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C - k_1}{m - k_3}}. \quad (3)$$

Здесь  $C$  и  $m$  — жесткость пружины и масса сейсмической системы;  $k_1$  и  $k_3$  — коэффициенты обратной связи по относительному смещению и ускорению.

Из (3) непосредственно следует, что снижение  $\omega_0$  возможно как за счет введения отрицательной обратной связи по ускорению ( $k_3 < 0$ ), так и за счет введения положительной обратной связи по смещению ( $k_1 > 0$ ). Реализация первого пути требует глубоких обратных связей, так как эффективность их проявляется лишь при  $|k_3| \gg m$ , а это связано со значительными техническими трудностями. Кроме того, введение отрицательной обратной связи имеет принципиальный недостаток: расширение частотного диапазона с помощью этого метода сопровождается такой же потерей чувствительности, как и при коррекции. Значительно интереснее положительная обратная связь по смещению [16, 17]. Здесь возможно расширение частотного диапазона без видимых потерь: механическая прочность датчика сохраняется, так как жесткость пружины соответствует высокочастотному варианту сейсмической системы; чувствительность тоже не изменяется.

устойчивости работы системы автоматического регулирования с обратной связью. Расширение частотного диапазона виброметров в три-пять раз вполне реально и, видимо, оптимально при построении сравнительно простых приборов средних частот с магнитоэлектрическими датчиками.

Графики, приведенные на рис. 1, иллюстрируют качественную картину расширения частотного диапазона виброметра. Здесь 1 — частотная характеристика исходного датчика; 2 — частотная характеристика, достигаемая при коррекции, а 3 — при электро-механической обратной связи. Из графиков видно также, что расширение частотного диапазона возможно не только за счет снижения эквивалентной резонансной частоты сейсмической системы, но и за счет сглаживания резонансного пика.

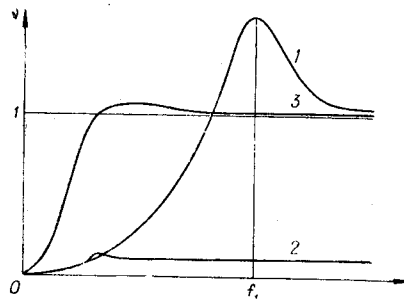


Рис. 1.

Ко второму направлению научных исследований виброметрии можно отнести проблему чувствительности. Эта проблема связана с предыдущей. В самом деле, чувствительность акселерометров обратно пропорциональна полосе пропускания:

$$S_w = \frac{y}{\xi} = \frac{1}{\omega_1^2}$$

(здесь  $y$  — относительное перемещение сейсмической массы). Кроме того, как было указано, расширение частотного диапазона акселерометров вверх и виброметров вниз (при наличии коррекции) ограничивается потерей чувствительности прибора. В то же время эта проблема имеет и самостоятельное значение: увеличение чувствительности датчика может существенно упростить аппаратуру, а уменьшение чувствительности позволяет решить некоторые специальные задачи, как, например, измерение больших виброперемещений датчиками малых размеров.

В поисках решения проблемы чувствительности, как и проблемы частотного диапазона, подавляющее большинство усилий было направлено на техническое совершенствование аппаратуры. В данном случае имеется в виду в первую очередь улучшение преобразователей относительного движения сейсмической массы в электрический сигнал. Возможности датчиков при этом могут быть определены однозначно на основе энергетических соотношений [18]. Анализ показывает невыгодность с энергетической точки зрения режима акселерометра при использовании преобразователей любых типов. В режиме виброметра предельные (в смысле чувствительности) возможности достигаются при использовании датчиков кинетической энергии, например магнитоэлектрических. Тот же анализ указывает возможности совершенствования преобразователей, если они еще имеются. Так, например, чувствительность пьезодатчиков теоретически может быть увеличена не более чем в 30 раз по сравнению с тем, что дает использование в качестве пьезоэлементов керамики титанита бария. При анализе чувствительности параметрических вибродатчиков можно использовать достижения теории измерения параметров электрических цепей [19].

Возможен, однако, и существенно иной путь решения задачи изменения чувствительности вибродатчика. Так, в режиме виброметра относительное движение сейсмической массы может быть больше измеряемого, равно как и чувствительность акселерометра принципиально может быть увеличена без ущерба для его частотного диапазона [20]. Идея заключается в том, что сейсмическая масса выбирается с малой средней плотностью и погружается в жидкость с большой плотностью. Тогда «архимедовы» силы оказываются значительно выше сил инерции, в результате чего отношение относительного смещения массы  $y$  к измеряемому  $\xi$  возрастает:

$$\frac{y}{\xi} = \eta \nu.$$

Здесь  $\nu$  — обычная частотная характеристика виброметра, а  $\eta$  — коэффициент «увеличения», равный

$$\eta = \frac{m_{ж} - m_0}{m_0 + m_{пр}},$$

где  $m_0$  — сейсмическая масса,  $m_{ж}$  — масса вытесненной ею жидкости;  $m_{пр}$  — присоединенная масса — некоторая эквивалентная масса жидкости, участвующая в движении.

Увеличение чувствительности акселерометров определяется тем же самым коэффициентом  $\eta$ .

Исследования, проведенные в ИАЭ СО АН СССР, показали, что в сравнении с обычными сейсмическими системами, имеющими массу с большей плотностью, чем у окружающей среды, чувствительность вибродатчиков может быть увеличена таким способом, по крайней мере, на порядок. Для увеличения чувствительности необходимо стремиться к конструкции, для которой неравенство  $m_0 + m_{пр} \ll m_{ж}$  является по возможности более сильным. По этому же принципу можно решать задачу уменьшения чувствительности датчиков. В последнем случае необходимо стремиться к соотношению  $m_0 \approx m_{ж}$ , при котором  $\eta$  оказывается менее единицы.

Чувствительность сейсмических систем может быть изменена также и введением электромеханической обратной связи. Выше уже указывалось, что отрицательная обратная связь уменьшает относительное движение сейсмической массы. Аналогично можно показать, что положительная обратная связь по ускорению повышает чувствительность в режиме виброметра, а по смещению — в режиме акселерометра. Поэтому совместное применение обоих видов связи позволяет получить изменение не только частотной характеристики, но и чувствительности. На рис. 2 качественно представлено действие различных способов изменения чувствительности вибродатчиков

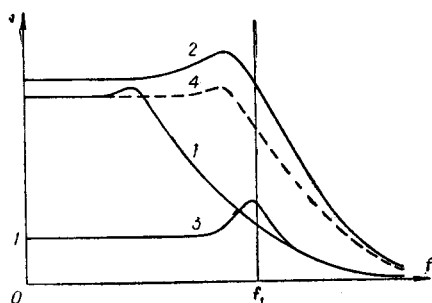


Рис. 2.

в режиме акселерометра. Так, использование архимедовых сил, возникающих при погружении массы в тяжелую жидкость, увеличивает чувствительность (кривая 2) в сравнении с исходной (кривая 1), мало влияя на собственную частоту. Кривая 3 иллюстрирует эффект от введения положительной обратной связи по смещению, а кривая 4 — по ускорению.

Увеличение чувствительности сейсмических систем устройствами,

умножающими перемещения, например рычагом, затрудняется из-за влияния момента инерции последнего. Устранить это препятствие было бы можно, если бы удалось создать сейсмическую систему с резко нелинейной характеристикой, преобразующей знакопеременные движения в однонаправленные. Иными словами, хотелось бы иметь механические устройства, аналогичные электрическим выпрямителям. В качестве примера полезного применения нелинейных явлений в виброметрии можно назвать устройство для измерения боковых составляющих вибраций вертикальных вибростендов с использованием нелинейного характера сухого трения [21]. Необходимые нелинейные характеристики сейсмических систем могут быть получены с помощью «магнитных пружин» определенной конфигурации. Кроме того, можно использовать нелинейные свойства демпферов, например, резко несимметричных сейсмических масс, погруженных в жидкость (рис. 3). Вибрации будут приводить к статическому перемещению массы в такой конструкции, а статическое перемещение легко может быть увеличено механическими множительными устройствами. Представляется, что исследования в направлении применения нелинейных элементов могут оказаться перспективными для виброметрии.

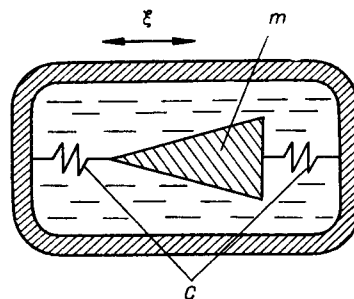


Рис. 3.

Третьей по порядку назовем проблему повышения точности измерения вибраций. Следует оговорить, что большинство виброизмерительных приборов предназначено для контроля вредных вибраций, а в этом случае не предъявляются жесткие требования к точности: погрешность в 5%, а зачастую и более обычно вполне удовлетворительна.

Погрешности измерения вызываются двумя причинами: воздействием внешних помех и нестабильностью чувствительности. Фирмы западных стран из рекламных соображений обычно умалчивают о возможных ошибках измерения и связанных с ними ограничениях диапазонов работы приборов. Исследования специфических погрешностей виброизмерительных приборов наиболее полно выполнены советскими специалистами. Ими проанализированы искажения от высших резонансов пружин [22], ошибки из-за влияния поперечных вибраций [23] и угловых колебаний [24] и др. Разработчики отечественной аппаратуры в противоположность специалистам зарубежных фирм предпочитают указывать диапазоны измерения несколько уже тех, которые имеют место на самом деле. Поэтому часто при совместных испытаниях аналогичные отечественные и зарубежные приборы оказываются близкими по своим характеристикам, хотя рекламные данные последних указаны более высокими.

Помехоустойчивость датчика к внешним воздействиям — поперечным и угловым колебаниям, электромагнитным наводкам и другим факторам — обеспечивается принятием соответствующих конструктивных мер (выбором конфигурации пружин, использованием компенсационной катушки и т. д.).

Для повышения точности измерения (стабилизации чувствительности) в виброметрии весьма часто применяются контрольные методы тарировки. Мы остановимся на двух возможных путях такой тарировки, которые являются, по нашему мнению, наиболее перспективными, — использовании силы тяжести Земли и эффекта обратимости электромеханических преобразователей. Основным достоинством первого направле-

ния является отсутствие необходимости в образцовой калибровочной аппаратуре: лучшего эталона, чем ускорение силы тяжести Земли, меняющегося в зависимости от широты местности не более чем на 0,3%, в виброметрии не требуется. Нашли применение две реализации этого направления: 1) вращение датчика в вертикальной плоскости [14] и 2) вертикальные поступательные колебания датчика, на горизонтальной поверхности которого свободно лежит незакрепленный груз [25].

Метод тарировки, основанный на эффекте обратимости, использует режим как генератора, так и двигателя электромеханического преобразователя [26, 27]. Зная с достаточной точностью возмущающее электрическое воздействие и электрический отклик на входе датчика, можно определить его чувствительность. Так, например, для магнитоэлектрического датчика чувствительность  $Bl$  может быть найдена из уравнений четырехполюсника [28]:

$$U = R_i i + Blv;$$

$$F = Bli + h_{\text{мех}} v$$

(здесь  $U$  и  $i$  — напряжение и ток на выходной стороне;  $R_i$  — сопротивление катушки;  $F$  и  $v$  — сила и скорость на входной стороне;  $h_{\text{мех}}$  — коэффициент демпфирования, обусловленный механическими причинами). Для калибровки нужно пропускать образцовый ток  $i_0$  через катушку и с достаточной точностью определять приращение выходного напряжения  $\Delta U$ , вызванное этим током.

Кроме того, для стабилизации чувствительности виброизмерительного прибора можно использовать отрицательную электромеханическую обратную связь [29], введение которой возможно в датчиках с обратимыми преобразователями.

Серьезной проблемой в виброметрии является миниатюризация датчиков. Здесь дело не столько в общей тенденции к уменьшению габаритов и веса аппаратуры, которая сейчас наблюдается в технике, сколько в принципиальном вопросе: масса датчика представляет дополнительную нагрузку на источник вибраций. Поэтому присоединение датчика искажает движение исследуемого объекта, и стремление к уменьшению искажений требует миниатюризации датчика.

Миниатюризация датчиков ведет к изменению их параметров. Так, степень успокоения при жидкостном демпфировании возрастает, если размеры датчика пропорционально уменьшаются. В самом деле, степень успокоения определяется выражением

$$\beta = \frac{1}{2\omega_0} \frac{h}{m}.$$

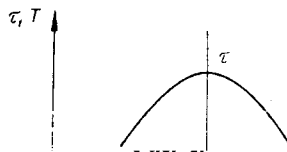
Если собственная частота должна оставаться неизменной, что совершенно естественно, то коэффициент демпфирования  $h$  при миниатюризации будет уменьшаться пропорционально первой степени (течение жидкости считаем ламинарным), а масса  $m$  — пропорционально третьей степени линейных размеров датчика. Параметр  $\beta$  возрастает, что может быть очень полезно для датчиков повышенных частот.

Загрудняют миниатюризацию два обстоятельства: 1) уменьшение мощности выходного сигнала [18] и 2) конструктивные трудности. В параметрических датчиках миниатюризация может сопровождаться не уменьшением, а увеличением чувствительности [30], ибо относительное изменение параметра на единицу перемещения возрастает. Для созда-



ния наиболее миниатюрных датчиков, имеющих вес около грамма [31], в настоящее время используются пьезоэлементы.

Наконец, последняя из научных проблем виброметрии, на которой мы хотим остановиться, это повышение надежности аппаратуры. Острота этой проблемы понятна, ибо вибрация оказывает разрушающее действие на любые механизмы, включая и вибродатчик. Между тем, научных работ, посвященных этому вопросу, очень мало, хотя конечно, каждый разработчик стремится к увеличению срока службы аппаратуры. Анализ некоторых вопросов данной проблемы показывает, что усталостные разрушения упругих элементов датчика  $f_1$ , варьируя толщиной пружины, то при этом будет изменяться и напряжение  $\tau$  в материале пружины (рис. 4). Максимальным напряжениям соответствует минимальный срок службы датчика  $T$ . Отсюда можно заключить, что существуют два противоположных пути увеличения срока службы датчика: увеличение частоты резонанса у акселерометра и уменьшение — у виброметра. Из этого примера следует, что существуют самые разнообразные возможности повышения надежности виброизмерительной аппаратуры.



#### КРАТКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Начнем рассмотрение с датчиков. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические датчики. Причиной этого является ряд существенных достоинств, присущих им: предельная простота конструкции и связанные с этим надежность и вибропрочность, малые габариты и вес, широкий частотный диапазон, большая перегрузочная способность, сравнительно высокие стабильность и чувствительность, хорошая устойчивость к воздействию климатических факторов. Обзору пьезодатчиков посвящены специальные работы (см., например, [10]), поэтому мы лишь кратко назовем некоторые обобщающие характеристики.

В большинстве вибродатчиков используются пьезокерамические материалы. Собственная частота сейсмических систем обычно выбирается порядка нескольких десятков килогерц, что позволяет работать в диапазоне частот от 5—50 гц до 10—40 кгц. При этом чувствительность обычно составляет несколько единиц милливольт на 1 g, а перегрузочная способность — несколько сотен g; вес датчиков не превышает нескольких десятков граммов.

Существуют и разновидности пьезодатчиков, имеющие чувствительность в несколько сотен милливольт на 1 g, но это достигается ценой снижения верхней границы частотного диапазона (примерно на порядок) и увеличением веса и габаритов. Есть и противоположные тенденции — уменьшение веса датчиков до долей грамма, что, однако, связано с потерей чувствительности.

Магнитоэлектрические вибродатчики распространены значительно меньше. В сравнении с пьезоэлектрическими они конструктивно слож-

Тип преобразователя	Собственная частота, гц	Преимущественный режим использования	Чувствительность	Вес, г	Основное применение
Пьезоэлектрический	$(1-100) \cdot 10^3$	Акселерометра	1—300 мв/г	1—100	Измерение вибраций средних и повышенных (до нескольких килогерц) частот и ударов Измерение малых вибраций низких и средних частот Измерение вибраций средних и низких частот, включая статические ускорения
Магнитоэлектрический	5—30	Виброметра	3—30 мв·сек/мм	10—500	
Параметрический (индуктивный)	10—300	Акселерометра Виброметра	1—10 % на 1 мм	10—100	

нее, менее надежны. Однако в области низких частот они обладают значительно более высокой чувствительностью по мощности [18] и могут быть использованы при измерении малых вибраций (применение для этих целей пьезодатчиков крайне затруднительно). Магнитоэлектрические датчики стабильнее во времени, что в ряде случаев существенно. Наконец, они легко согласуются по сопротивлению с низкоомными измерительными устройствами, что легко позволяет измерять их сигнал транзисторными усилителями и даже шлейфовыми осциллографами. Типичные параметры магнитоэлектрических датчиков [2, 14]: собственная частота 5—30 гц, верхняя граница частотного диапазона 200—1000 гц, чувствительность порядка 10 мв·сек/мм при сопротивлении катушки в несколько сотен ом. Обычно в магнитоэлектрических датчиках удается осуществлять электромагнитным путем значительное успокоение, близкое к критическому, что является их существенным достоинством.

Существуют также низкочастотные варианты магнитоэлектрических вибродатчиков (см., например, [33]), сейсмическая система которых выполняется в виде маятника, что позволяет снизить частоту резонанса примерно на порядок.

Меньшее распространение получили вибродатчики с параметрическими преобразователями, хотя в некоторых случаях (при измерении статических ускорений) они не могут быть заменены генераторными. В этой группе датчиков наиболее популярны индуктивные преобразователи [34]. Некоторые обобщенные данные по вибродатчикам с тремя основными видами преобразователей приведены в таблице.

Теперь кратко о виброизмерительных приборах. Различных вариантов их создано очень много (см., например, весьма обстоятельный обзор в [35], а также [36]). Мы коснемся лишь приборов широкого назначения. Из зарубежных приборов этого типа наилучшим считается комплект датской фирмы BRÜEL & KJÆR [25]. Комплект представляет собой набор ряда блоков, среди которых имеются четыре типа пьезодатчиков, два варианта предусилителей, электронный измерительный блок, включающий вольтметр и специальный генератор, анализатор

частот, миниатюрный тарировочный вибростенд. Устройство допускает измерение вибраций в частотном диапазоне от 5—10 до 2000 *гц*. При этом область измеряемых параметров составляет по смещению от 0,0025 до 25 *см*, по скорости от 0,25 до 250 *см/сек* и по ускорению от 0,1 до 1000 *г*; погрешность измерения 4%. Среди отечественных приборов параметрами, близкими к названным, обладает виброметр ВА1, разработанный Таганрогским СКБ «Виброприбор».

Из зарубежных виброметров, использующих магнитоэлектрические датчики, одним из лучших является прибор 1431 английской фирмы DAWE [37]. Прибор позволяет (по данным фирмы) измерять вибрации с частотами от 5 до 1000 *гц* и амплитудами по смещению от 0,0001 до 0,3 *см*, по скорости от 0,001 до 100 *см/сек*, по ускорению от 30 до 30 000 *см/сек<sup>2</sup>*. В последнее время фирма создала новый вариант 1433 — с пьезоэлектрическим датчиком, что может рассматриваться как признание преимущества пьезодатчиков. Автор считает, что такой вывод справедлив лишь для приборов без коррекции. Прибор ВА1-2, разработанный в ИАЭ СО АН СССР и успешно прошедший Государственные испытания, показывает, что с применением коррекции в области средних частот магнитоэлектрические датчики становятся вполне конкурентоспособными с пьезоэлектрическими. Частотный диапазон прибора ВА1-2 составляет 3—500 *гц* при измерении смещений от 0,003 до 1 *мм* и 1—500 *гц* при измерении ускорений от 0,003 до 10 *г*.

Мы не останавливаемся на устройствах обработки сигналов виброизмерительных приборов: анализаторах, корреляторах и других. Эти устройства приобретают очень большое значение в настоящее время, однако их применение в виброметрии должно быть рассмотрено самостоятельно.

В заключение остановимся на некоторых вопросах организационного характера. Как уже было отмечено вначале, вопросами измерения вибраций у нас в стране занимается очень много организаций. В результате ряд работ дублирует друг друга; некоторые разработчики оказываются вынужденными с самого начала осваивать сложную специфику измерений вибраций. Улучшить положение можно лишь созданием приборов, соответствующих самым высоким мировым стандартам, и организацией промышленного выпуска их в достаточном количестве. Содействовать первому, на наш взгляд, должны конкурсы на разработку основных типов приборов, аналогично тому, как было сделано энергетиками [38]. Взяв за основу лучший из представленных на конкурс приборов и дополнив его элементами других образцов, можно будет подготовить достаточно совершенный проект. Выпуск приборов специального назначения может осуществляться предприятиями соответствующих отраслей, а приборов универсального назначения предприятиями, занятыми производством ламповых и транзисторных вольтметров. Во втором случае вибродатчик будет естественным дополнением вольтметра, расширяя возможности его применимости. При этом в комплекте вольтметра можно использовать и другие датчики, например акустические, как сделано в [25], что еще более увеличит универсальность вольтметра, а значит и спрос на него, что тоже немаловажно. Кстати, ряд отечественных предприятий уже пошел по такому пути. Например, Кишиневский приборостроительный завод «Виброприбор», выпускавший шлейфовые осциллографы, стал комплектовать их низкочастотными вибродатчиками, измерителями мощности и другими дополнительными устройствами. Указанные меры должны были бы содействовать значительному улучшению положения с виброизмерительной техникой у нас в стране.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Измерения и прогресс.—Автометрия, 1965, № 1.
2. Ю. И. Иориш. Виброметрия. М., Машгиз, 1963.
3. Р. Фейнман и др. Фейнмановские лекции по физике, т. 6. М., «Мир», 1965.
4. Л. Д. Гик. Измерение ускорений. Новосибирск, «Наука», 1966.
5. В. В. Нешукайтис, С. Э. Валтерис. Низкочастотный виброметр с жидкостной сейсмической массой.—Измерительная техника, 1961, № 6.
6. N. Sion. Mercury Cylinder Accelerometer.—Electro-Technology, 1966, v. 78, № 4.
7. R. S. von Anlefeldt. Accelerometer. Патент США, № 3084557, 19/VI-57 г.
8. M. Menkis. Sensing of Acceleration. Патент США, № 3241374, 12/III-66 г.
9. F. Steel. Superconductive Resonant, Circuit and Accelerometer. Патент США, № 3015960, 9/IV-62 г.
10. К. Р. Цеханский. Обзор существующих конструкций пьезоэлектрических акселерометров.—В сб. «Аппаратура для измерения параметров вибраций». Л., «Знание», 1967.
11. Е. Ф. Саваренский, Д. П. Кирнос. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М., Гостехиздат, 1955.
12. Л. Д. Гик, К. Б. Карандеев. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
13. К. Б. Карандеев, Л. Д. Гик. Улучшение виброизмерительных приборов путем совершенствования их электрических схем.—В сб. «Виброметрия», 1. М., ДНТП, 1965.
14. К. Б. Карандеев, Л. Д. Гик, И. Г. Митюхин и др. Корректированные виброизмерительные приборы с магнитоэлектрическими датчиками.—Передовой научно-технический и производственный опыт, № 18—65—1072/66. М., ГОСИНТИ, 1965.
15. C. Basel. Elektronische Frequenzgangberichtigung mechanischer Schwingungsaufnehmer.—Elektronik, 1963, Bd. 12, № 2.
16. В. И. Петрович. Некоторые методы расширения частотного диапазона сейсмических вибродатчиков.—В сб. «Вибрационная техника» (материалы семинара). № 2. М., ДНТП, 1965.
17. Л. Д. Гик, В. Н. Некурящев. Устройство для измерения параметров вибраций. Авторское свидетельство № 208982. Бюллетень изобретений, 1968, № 4.
18. Л. Д. Гик. Чувствительность генераторных вибродатчиков.—Автометрия, 1967, № 4.
19. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
20. Л. Д. Гик. Пути создания простых виброскопов.—В сб. «Виброметрия», ч. 1. Л., «Знание», 1967.
21. В. П. Репин. Об одном методе исследования вибрационных стендов.—В сб. «Анализ и воспроизведение вибраций». Л., «Знание», 1967.
22. Ю. И. Иориш. Вибродатчик широкого диапазона частот.—Электричество, 1951, № 4.
23. Виброизмерительная аппаратура ЦНИИТМаш. М., Машгиз, 1959.
24. Ю. И. Иориш. Ротационная чувствительность пьезодатчиков.—В сб. «Виброметрия» (материалы II научно-технической конференции), № 2. М., ДНТП, 1965.
25. BRÜEL & KJÆR. Naerum—Denmark, 1965.
26. В. П. Репин. Об использовании обратимости генераторных датчиков для их калибровки.—Труды научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Новосибирск, 1966.
27. В. П. Репин. Способ испытания упругого подвеса генераторного вибродатчика на механическую прочность. Авторское свидетельство № 182911. Бюллетень изобретений, 1966, № 12.
28. А. А. Харкевич. Теория преобразователей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948.
29. М. М. Фетисов. Новые автоматические компенсационные приборы для измерения неэлектрических величин. Л., ДНТП, 1960.
30. Ю. Н. Солодкин. Некоторые оптимальные соотношения в индуктивных и трансформаторных вибродатчиках.—Автометрия, 1965, № 5.
31. Л. А. Осипович. Модернизация пьезокварцевых датчиков ускорений типа ПКД.—Приборостроение, 1965, № 4.
32. Л. Д. Гик. К вопросу о сроке службы виброизмерительного прибора.—Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды VII конференции). Новосибирск, «Наука», 1967 (в печати).
33. Л. А. Бибер. Вибрографы с гальванометрической регистрацией. М., Госэнергоиздат, 1960.
34. Аппаратура ВИ-6-5МА.—В сб. «Приборы для научных исследований». Сводный каталог. М., 1966.
35. Р. В. Васильева. Аппаратура для вибрационных исследований (обзор).—В сб. «Аппаратура для измерения параметров вибраций». Л., «Знание», 1967.

36. В. Н. Некурящев. Аппаратура для измерения параметров вибрации.— VIII конференция по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Тезисы докладов и сообщений. Новосибирск, 1966.
37. В. I. White. The Type 1431 Transistor Vibration Meter. Dawe Digest, 1961.
38. Второй конкурс на лучшие приборы для измерения вибрации и балансировки роторов энергетических машин. Технические условия. Л., 1963.

*Поступила в редакцию  
14 апреля 1967 г.,  
окончательный вариант —  
5 мая 1967 г.*