

УДК 62-1

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ОТРАСЛЯХ

(обзор)

В.Л. Крупенин, А.М. Веприк

Физические принципы. Для машиностроения особенно важно уметь с максимальной возможной точностью измерять величины, называемые механическими: перемещения, скорости, ускорения, силы деформации, давления и др. В то же время, по вполне понятным причинам, всего удобнее измерять электрические величины: силу тока или напряжение в какой-либо цепи, плотность зарядов и т. д. Поэтому «сердце» практически любого современного датчика — так называемый МЭП — механоэлектрический преобразователь, в котором измеряемой механической величине ставится в однозначное соответствие значение некоторой электрической величины.

Известны десятки разновидностей МЭП. Некоторые из них устарели и вытесняются или уже вытеснены более совершенными; некоторые пока существуют большей частью на бумаге; в силу технологических или иных причин их время еще не наступило. Большое разнообразие МЭП не удивительно: случается так, что, например, относительно малые скорости удобнее измерять датчиками одного типа, средние — другого, большие — третьего.

В основу действия любого механоэлектрического преобразователя положен некоторый физический принцип. Зная его, можно понять, как работает датчик. Поэтому вначале наш рассказ именно о принципах.

Реостатные преобразователи. Что такое реостат, видимо, известно каждому читателю, и сам подзаголовок может привести на конструктивную схему простейшего МЭП. (Интересно, что слово «реостат» буквально означает «стоящий поток». Вроде бы ничего общего с теперешним значением.)

Предположим, что необходимо измерить величину линейного перемещения. Представим себе реостат, например, в виде прямой катушки, на которую в один слой равномерно намотана проволока. Чем больше витков (надо, конечно, позаботиться, чтобы они не контактировали между собой), тем больше максимальное сопротивление катушки, вдоль которой под действием внешних усилий может передвигаться ползун, снабженный проводящими щетками, касающимися проволоки. Одна клемма реостата находится на конце катушки, другая — на подвижном ползуне, так что чем больше он «отъедет», тем меньше сила тока в цепи источник фиксированного напряжения — реостат. (Это следует из элементарного закона Ома.)

Таким образом, линейные перемещения легко измерять при посредстве амперметров (ну и, разумеется, вольтметров). Предлагаем читателю убедиться, что столь же легко измерять и угловые перемещения. Для этого ему придется «изобрести» реостатный МЭП несколько другого вида. Но это несложно.

Рассказывая о принципах, мы почти не будем касаться вопросов их реализации «в железе». Разговор о конкретных устройствах впереди.

Тензорезисторы — близкие родственники реостатных преобразователей. Первая часть слова «тензорезистор» обозначает «натягивать», «напрягать», вторая — «сопротивление». При воздействии механических нагрузок на проводящие элементы происходит их деформация, и все величины, от которых зависит электрическая проводимость, изменяются. Следовательно, в тензорезисторах силовым характеристикам — собственно силам, моментам, давлениям — опять-таки сопоставляется определенная сила тока в некоторой цепи.

Электродинамические эффекты. Работа многих МЭП связана с электродинамическими эффектами, проявляющимися, в частности, в силу законов Фарадея и Ампера, которые говорят о двух фундаментальных явлениях — электромагнитной индукции (возникновении электродвижущей силы (ЭДС) в замкнутом проводящем контуре при изменении параметров магнитного поля, в которое этот контур помещен), и возникновении силового взаимодействия между проводником с током и магнитным полем.

Если катушку с намотанным проводом заставить двигаться так, что она будет пересекать силовые линии магнитного поля, то скорость движения оказывается пропорциональной возникающей ЭДС, которую несложно измерить.

Преобразователи такого типа используются весьма широко. Они не требуют привлечения сторонних источников энергии и потому экономичны. Предлагаем читателю придумать схемы электродинамических МЭП для измерения линейных и угловых скоростей.

Емкостные и индуктивные преобразователи. Подобно тому как резисторы оказывают сопротивление постоянному току, конденсаторы (емкости) и катушки с намотанным на них проводом (индуктивности) влияют на проводимость цепей переменного тока. Это известное положение используется при организации работы двух весьма представительных классов МЭП — емкостных и индуктивных.

Если, скажем, уменьшить зазор между пластинами плоского конденсатора, то его емкость вырастет, а реактивное сопротивление, оказываемое переменному току, упадет. Поэтому, если сконструировать преобразователь в виде конденсатора с одной подвижной пластиной, то с его помощью легко мерить даже сверхмалые перемещения. Аналогичные измерения можно проводить и при изменении длины подвижного сердечника, вводимого в катушку индуктивности.

Емкостные и индуктивные преобразователи применяют и для получения информации о силах или сводимых к ним величинах.

Интересно отметить, что силовые факторы могут и непосредственно влиять на индуктивность катушек. Это обстоятельство связано с явлением магнитоупругости: при организации силового воздействия на ферромагнитный сердечник создается механическое напряжение, изменяющее его магнитную проницаемость, а следовательно, и индуктивность катушки, и ток в анализируемой цепи. При помощи этого принципа работают так называемые магнитоупругие преобразователи сил. Надо заметить, что ввиду ряда причин они менее популярны, нежели индуктивные преобразователи других типов.

Пьезоэффект. Слово «пьезо» происходит от греческого глагола «давлю». При растяжении или сжатии некоторых кристаллов (самый известный — кварц) на их границах возникают поверхностные электрические заряды.

В наиболее простом случае это выглядит так. Изготовленный из специальной пьезокерамики или кристалла пьезоэлемент, имеющий, например, форму прямоугольного параллелепипеда, снабжают плоскими металлическими электродами. Один ставят на верхней грани элемента, второй — на нижней. Если кристалл сдавить, то на верхнем электроде образуются, например, отрицательные заряды (на нижнем — соответственно положительные). При растяжении пьезоэлемента полярность изменится. Очевидно, такой элемент может служить прекрасным механоэлектрическим преобразователем.

Наиболее сильно пьезоэлектрический эффект выражен у веществ, называемых сегнетоэлектриками. Такое название они получили в честь своего «родоначальника» — сегнетовой соли. Но сегнетова соль, несмотря на огромную пьезоэлектрическую чувствительность, используется в датчиках нечасто. Она гигроскопична и очень

непрочна. В настоящее время ведется целенаправленный поиск новых пьезоматериалов. Здесь будущее, видимо, за специальными сортами керамик, которые спекаются из смесей мелкодробленых сегнетоэлектрических кристаллов и присадок. Наиболее распространенные керамические пьезоэлектрики приобретают пьезоактивность после соответствующей выдержки в электрическом поле.

Пьезоэлектрические МЭП — одни из самых распространенных. При их посредстве измеряют силы, деформации и ускорения.

О других принципах. Мы кратко обсудили уже несколько видов МЭП. Видно, что хотя они, вообще говоря, достаточно сильно разнятся, у них имеется немало и общих черт, наличие которых позволяет провести классификацию. Мы, конечно, этим заниматься не будем, а отметим одну важную особенность.

Некоторые преобразователи функционируют только тогда, когда в них самих производится работа и при этом им абсолютно не требуется дополнительная внешняя энергия. Таковы, например, МЭП, использующие электродинамические эффекты: ток на выходе системы появляется только, если происходит необходимое перемещение катушки и витки провода пересекают силовые линии магнитного поля. Если же катушка остановится — ток исчезнет. Преобразователи такого типа иногда именуют генераторными. (Сюда, естественно, относятся и пьезопреобразователи.) Они экономичны, надежны и широко используются в технике и при проведении научных экспериментов. Но с их помощью нельзя измерять величины, не изменяющиеся во времени, — это недостаток генераторных МЭП.

Резистивные, емкостные и индуктивные преобразователи относятся к разряду параметрических. Работать без притока внешней энергии они не могут. Однако в ряде случаев без них никак не обойтись.

Существуют также преобразователи и других типов, например, комбинированные. Здесь измеряемая механическая величина вначале преобразуется в промежуточную величину иной природы, а только затем в измеряемую электрическую.

Если обратиться, например, к фотоэффекту — фотоэлектрическими преобразователями удобно пользоваться, скажем, при измерении перемещений, — то здесь измеряемому параметру ставится в соответствие определенный световой поток, которому затем, при посредстве фотоэлемента, в свою очередь, ставится в соответствие ток в анализируемой электрической цепи.

Перечисленные принципы работы МЭП — достаточно ходовые. Но разумеется, приведенный перечень можно существенно дополнить и расширить.

В настоящее время преобразования механических величин в электрические можно проделывать и при помощи электретов (поляризованных диэлектриков, представляющих собой пленки или пластины, несущие на противоположных сторонах связанные электрические заряды), и при посредстве механотронов (электровакуумных приборов с подвижными электродами), и используя разнообразные резонансные, а также многие другие физические принципы. О части из них наш рассказ впереди. А пока мы прервемся, потому что пора, наконец, поговорить собственно о датчиках.

Тензометрия. Измерения деформаций и напряжений — одни из самых распространенных. Без отлаженного и надежного способа получения информации об этих важнейших характеристиках конструкций многие объекты современной техники функционировать не в состоянии.

Напомним: деформация — это изменение положения точек твердого тела, при котором происходит увеличенность¹. Для проволочного константанового тензодатчика чувствительность 1,9—2,1.

¹ Эти понятия — градуировка, линейность, чувствительность — имеют смысл для любых типов

датчиков, и мы еще будем к ним обращаться.

Градуировку осуществляют по специальным стандартным методикам. При тензометрировании, например, пользуются разными видами эталонных нагрузений.

Металлические тензорезисторы позволяют мерить деформации порядка 10^{-6} — 10^{-1} . В ряде случаев для измерения деформаций и напряжений используют емкостные и пьезоэлектрические тензодатчики, а также полупроводниковые тензорезисторы.

Однако традиционные способы тензометрирования вряд ли продержатся достаточно долго. И дело здесь не только в «борьбе за точность». Применение традиционных тензодатчиков, вообще-то, довольно неудобно.

Начнем с того, что если нам надо получить полную картину поля напряжений сложной конструкции, то датчиков должно быть огромное количество: ведь один может дать информацию о состоянии лишь единственной точки! Добавим сюда необходимость применения достаточно сложных систем сбора и обработки информации, невозможность исследования деталей фасонных профилей и со сварными швами, проблематичность надежности работы в условиях сверхвысоких и сверхнизких температур. И наконец, наклейка. Тензодатчики не в состоянии давать информацию, не находясь в теснейшем контакте с исследуемыми поверхностями. Поэтому нужно эти поверхности особым образом подготовить, нужно подобрать клеи, обладающие особыми качествами, словом, «целое дело».

Таким образом, можно с уверенностью прогнозировать «появление на сцене» новых, уже бесконтактных методов измерений.

Виброметрия. Если мы имеем дело, например, с конструкцией моста или с балкой, несущей на себе часть здания, то деформации и напряжения, измеряемые в различных точках, меняются во времени настолько медленно, что их можно считать постоянными. Очень медленно меняются характеристические параметры, определяющие состояния элементов конструкций старых тихоходных машин. В первом случае мы имеем дело со статикой, во втором — с квазистатикой.

Статические и квазистатические измерения очень важны в технике. Если, не дай бог, тензодатчики обнаружат, что несущая балка приобрела деформации, которые превышают допустимые пределы, — это может означать скорое наступление катастрофы.

Однако наряду со статикой инженеры и ученые, занимающиеся проблемами машиностроения, все большее внимание уделяют динамике. Динамические процессы — это, в частности, достаточно быстрые изменения значений физических параметров машинных конструкций. Динамические процессы определяют состояния технических систем, а без их измерений скоростных и высокопроизводительных машин не получить.

Чтобы понять разницу между статикой и динамикой, вспомним основной закон механики — второй закон Ньютона. Возможно, в не самой строгой, но зато в самой «ходовой» формулировке он выглядит так. Сумма всех действующих на тело сил равна величине его массы, умноженной на его же ускорение. Это динамика. Здесь говорится об ускорении — скорости изменения скорости — и о связи этой характеристики с силами. Однако в ряде случаев ускорение может оказаться весь-ма малым, близким к нулевому, тело находится в равновесии или близко к равновесию. Тогда ускорение равно нулю и динамический закон переходит в статический: сумма всех действующих на неподвижное тело сил равна нулю. Интересуясь статикой, мы игнорируем быстрые изменения ситуаций. Это приближенный подход. В некоторых случаях он приемлем, а в некоторых оказывается совершенно недопустимым.

Динамические эффекты проявляются буквально во всем. Не зная их, не умея измерять динамические характеристики, нельзя понять ни сути сложнейших явлений,

происходящих «в недрах» работающих машин, ни даже самих принципов их работы. И уж, конечно, без знания динамических характеристик невозможно обеспечить надежность и долговечность технических средств.

Среди всевозможных динамических процессов, встречающихся в машиностроении, вероятно, главенствующую роль играют вибрационные процессы. Вибрация — это то же самое, что и механические колебания, т. е. систематические изменения во времени величин, характеризующих состояние механических объектов. Однако систематичность не значит упорядоченность: в природе немало и случайных колебаний.

О вибрации написано много. Она, как известно, определяет многочисленные технологические операции. С другой стороны, вибрация может здорово вредить. Сопровождая деятельность большинства технических систем, она часто оказывается причиной их преждевременного выхода из строя.

Обычные «школьные» представления о вибрации — периодические колебания маятника или камертона. Однако это лишь элементарные частные случаи. Реальная вибрация, как мы уже говорили, вовсе не обязательно периодически, а если и периодическая, то существенно более сложной природы, чем синусоидальная. Колебания маятника, или камертона, или грузика, прикрепленного к упругой пружине, подчиняются закону: $x(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$, где x — изменение наблюдаемой координаты с течением времени t , а постоянные величины A , ω , φ — амплитуда, частота и фаза — параметры движения. Однако мир устроен так, что сложнейшие колебания многих технических объектов представимы в виде суммы элементарных маятниковых колебаний. В то же время задача об измерении и анализе реально действующей вибрации весьма сложна и свести все дело к маятнику или даже системе огромного числа маятников можно далеко не всегда. К тому же иметь дело с большим числом маятников совсем непросто.

Итак, задача об измерении сложных вибрационных полей — нетривиальна. Какие же характеристики нужно уметь анализировать в первую очередь?

Вначале снова обратимся к маятнику (рис. 1, а). Мы видим синусоиду (рис. 1, б) — закон движения. Чтобы получить график скорости, надо передвинуть точку начала отсчета времени на четверть периода колебаний $T = 2\pi/\omega$ вправо. Для получения графика ускорения кривую закона движения надо перевернуть. Амплитуда A — максимальный полуразмах колебаний. Частота ω — число полных циклов движения за 2π с. Иногда частотой называют величину $f = \omega/2\pi$. Такая частота измеряется в герцах (Гц). Один герц — это число полных циклов в 1 секунду. Фаза φ характеризует сдвиг нашей синусоиды от начала отсчета времени. При рассмотрении в дальнейшем вибрационных машин мы будем иметь случай удостовериться в важности этой характеристики: специальные датчики систем обратных связей внимательно следят именно за фазами процессов.

На рис. 1, в показана зависимость амплитуды от частоты возбуждающей периодической силы, заставляющей маятник колебаться (на рис. 1, а она показана двойной стрелкой). Наиболее заметная вибрация будет наблюдаться, когда эта частота близка к значению $\omega_{рез} = \omega_0$. Это чрезвычайно важное явление называют резонансом.

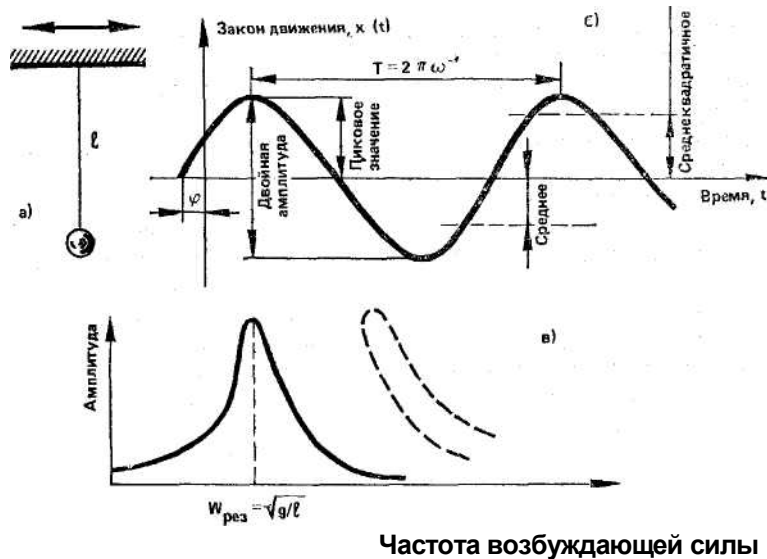


Рис. 1

Итак, движение может описываться с помощью двух типов характеристик. В первом случае текущим параметром выступает время; движение задается в виде его функции. Во втором случае движение характеризуется при помощи функции частоты. Это, вообще говоря, разные подходы: в первом случае мы можем в целом увидеть сам процесс или, скажем, его скорость, но мы напрямую не можем отметить ситуацию, при возникновении которой развивается резонанс и вибропроцесс становится наиболее интенсивным. Здесь необходимо привлекать характеристики второго типа.

Анализ вибрации, основанный на измерении временных реализаций, будем так и называть — временным. Анализ, привлекающий частотные характеристики, — частотным.

Между двумя типами анализа имеется несомненная связь: в сущности, он проводится при посредстве одних и тех же датчиков. Однако подходы и цели измерений могут существенно различаться.

При выполнении измерений, помимо перечисленных, часто интересуются и другими характеристиками: двойной амплитудой, пиковым, средним и среднеквадратичным значениями. Что из себя представляют эти характеристики в случае простейшего синусоидального движения, видно из рис. 1, б.

Инженеры измеряют двойную амплитуду, например, в случае, когда нельзя допустить чрезмерно большого смещения колеблющейся в пределах допустимого зазора детали. Оценка пикового значения особенно важна при исследовании коротких механических воздействий, например ударов. Наконец, среднеквадратичное значение (СКЗ) характеризует энергетику колебаний. Величины СКЗ связаны с разрушающей способностью вибрационных процессов.

Акселерометры. Все три основные функции, измеряемые при проведении временного анализа — закон движения (перемещение), скорость и ускорение, — связаны. Если, например, как функция времени задана скорость, то для получения ускорения ее нужно проинтегрировать, а для нахождения закона движения — проинтегрировать. В технике измерений по ряду причин предпочитают иметь дело с ускорениями. Датчики ускорений называют акселерометрами (по латыни «акселеро» значит «ускоряю»).

Самые распространенные типы акселерометров — пьезоэлектрические. С их помощью проводят измерения не только вибрации, но и удара. Основные качества современных пьезоакселерометров: весьма широкий частотный диапазон анализируемых колебаний (от нуля до десятков килогерц — область ультразвука); ненужность дополнительных источников питания (вспомним: пьезоэлектрические МЭП — генераторные); линейность характеристики датчиков в широком динамическом диапазоне; высокая стойкость в отношении неблагоприятных внешних условий (агрессивность внешних сред, температурные перепады и т. д.); большая долговечность (датчики не содержат движущихся частей).

Конструируются пьезоакселерометры, например, так (рис. 2).

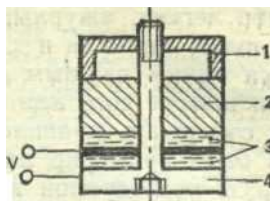


Рис. 2

Две пьезопластинки (3), разделенные металлической полоской, располагаются на основании (4). На пьезоэлемент устанавливают и прижимают специальной пружиной (1) нагрузочное тело (2) массы m (в зависимости от назначения датчиков, а они бывают и миниатюрными и, в специальных случаях, довольно внушительными - значение этой величины варьируется в пределах от сотых долей грамма до сотен граммов). Вот и все. В принципе датчик готов. Если не заставлять акселерометр работать на собственных резонансных частотах, то ускорение основания датчика (давайте обозначим его a), которое крепится к исследуемому объекту, в точности равно ускорению нагрузочного тела, действующего на пьезопластинки в полном согласии с законом Ньютона силой $F = ma$. Дальнейший труд берет на себя пьезоэлемент, который, деформируясь, выдает электрический сигнал, пропорциональный искомому ускорению. В ряде случаев оказывается более удобным, чтобы пьезоэлемент работал не на растяжение-сжатие, а на сдвиг или изгиб. Тогда в конструкцию вносят некоторые изменения, но принципиально ничего не меняется.

Номенклатура пьезоакселерометров, выпускаемых во многих странах мира, чрезвычайно широка. Это, впрочем, вполне объяснимо: ведь перед подобными друг другу датчиками ставятся, вообще говоря, совершенно различные задачи. Современные акселерометры должны измерять и сверхмалые (порядка 10^{-3} м/с²), и сверхбольшие, возникающие при ударах (порядка 10^6 м/с²» ~ 100000 g!) ускорения. Они должны реагировать и на низко-, и на высокочастотные колебания. Должны в случае необходимости давать информацию о параметрах многомерной вибрации. Словом, много чего должны...

Самые маленькие акселерометры-малышки могут иметь массы, равные сотым долям грамма. Их назначение, в частности, — измерять вибрацию со значительными амплитудами и высокими, лежащими в ультразвуковом диапазоне, частотами. Такие сверхминиатюрные датчики используются при контроле колебаний каких-либо легких, ажурных конструкций, тонких оболочек, панелей, мембран и т. п. Необходимость в них определяется одним важным обстоятельством. Дело в том, что при выборе того или иного датчика инженеры стараются соблюдать правило — его собственная масса должна быть примерно на порядок меньше динамической массы

исследуемой конструкции. Хотя данное правило и эмпирическое, однако вполне разумное: если измерительный прибор оказывает на динамику анализируемого объекта заметное влияние, то ценность получаемой информации практически нулевая, ибо без датчика объект может вести себя совершенно по-другому, чем с датчиком.

Вопрос о влиянии средств измерения на исследуемые с их помощью конструкции весьма нетривиален и решается отнюдь не просто. Скажем, выбор правильного расположения акселерометра, способ его крепления — это целая наука или, лучше сказать, искусство. Заметим также, что высокие требования, предъявляемые к датчикам, могут быть удовлетворены только при надлежащих качествах соединительных кабелей и умении ими правильно пользоваться: ясно, что довести снимаемый сигнал до анализирующей аппаратуры нужно предельно бережно, в противном случае ведем усилиям грош цена.

Мы уже отмечали, что пьезоакселерометры способны работать даже при весьма неблагоприятных внешних условиях. Это, разумеется, касается не всех датчиков поголовно, а лишь специального назначения: готовить все измерительные устройства к экстремальным ситуациям, пожалуй, чересчур дорого.

Известно, что современные пьезоакселерометры в принципе сохраняют работоспособность в «тысячном» температурном диапазоне: от -250 до $+750^{\circ}\text{C}$. Однако нормальные акселерометры начинают барахлить уже при $+250^{\circ}\text{C}$. Дело в том, что с повышением температуры может начаться деполяризация пьезоэлементов, и для организации работы при сверхвысоких температурах требуется проведение специальных мероприятий. Особые меры приходится принимать и для того, чтобы заставить датчики и соединительные кабели нормально функционировать в условиях сильной радиации, при воздействии акустических и электромагнитных полей, в присутствии химически агрессивных сред. Надо, впрочем подчеркнуть, что пьезоакселерометры способны на работу в тяжелых условиях и в этом отношении они выгодно отличаются от датчиков других типов.

Говоря о предельных возможностях акселерометров, не надо, конечно, забывать, что большая их часть работает в основном в нормальных условиях и им не нужны сверхмалые массы или сверхвысокая чувствительность или сверхширокий диапазон частот. Обычно массы пьезоакселерометров варьируются в пределах от 1 до 50 г. Они воспринимают частоты от 0,5 до 12-10* Гц и сохраняют линейность характеристик до ускорений порядка $5 \cdot 10^4$ — 10^5 м/с². Что же касается нижней границы измеряемых ускорений, то она расположена где-то вблизи значения 10^{-2} м/с². В то же время (подчеркнем это еще раз!) в специальных случаях все указанные диапазоны могут быть расширены.

Простота, с которой измеряются ускорения, является одним из факторов, определяющих «особое положение» этой характеристики в виброметрии. Существуют, разумеется, и другие важные факторы. Измеряя, например, перемещения и проводя затем их частотный анализ, мы в основном будем сталкиваться с низкочастотными составляющими процессов. При анализе ускорения более отчетливо видны высокочастотные составляющие; в ряде случаев это весьма важно. Надо, впрочем, заметить, что современные электронные интеграторы в два счета трансформируют измеренные ускорения в скорости, а затем и в перемещения. Так что если нам известна запись ускорения какого-либо процесса, то при наличии специальной аппаратуры мы располагаем о нем полной информацией.

Пьезоакселерометры фактически раздавили в конкурентной борьбе другие типы акселерометров — тензорезистивные, емкостные и индукционные. Вряд ли необходимо вдаваться в конструктивные особенности этих устройств. В основе их деятельности лежат МЭП, о которых мы говорили раньше. Заметим лишь, что более всех (кроме,

разумеется, пьезоэлектрических) распространены, по-видимому, полупроводниковые тензорезистивные датчики. Они работают от нулевой частоты и могут в определенных случаях оказаться довольно эффективными. В то же время они совершенно непригодны для измерения ударов и в целом не обладают перед пьезоакселерометрами какими-либо преимуществами.

Выше мы указывали причины, по которым акселерометры стараются применять не только для измерения ускорений, но и скоростей, и перемещений. Между тем иногда эти характеристики удобнее все-таки измерять специальными устройствами. Для измерения виброскоростей, например, часто используют датчики с электродинамическими МЭП; для измерения перемещений — вихретоковые и емкостные датчики. Известно, что в лабораторных условиях емкостной датчик измерял сверхмалые высокочастотные виброперемещения порядка 10^{-9} мкм — малость этой величины говорит о себе сама.

Надо сказать, что каким бы хорошим ни показался тот или иной датчик, его использование все равно сопряжено с известными трудностями. О путях их преодоления мы рассказываем дальше.

Бесконтактные измерения. Любой из датчиков, о которых мы говорили — будь то тензорезистор или сверхчувствительный емкостной датчик или пьезоакселерометр, — не избавлен от одного существенного недостатка: он должен все время пребывать в контакте с контролируемым объектом. Но часто возникает ситуация, когда установить датчик на исследуемую поверхность затруднительно или даже невозможно. В первом случае идут на самые разнообразные ухищрения, а во втором... пока обходятся без замеров. По этим причинам не Прекращается активный поиск бесконтактных методов измерений, т. е. задача сводится к нахождению способа определения того или иного параметра механического состояния объекта без непосредственного касания.

Весьма перспективный прибор для бесконтактного измерения скорости предложен датской фирмой «Брюль и Кьер». Фирма эта выпускает различные образцы измерительной техники и имеет мировую известность. Ее продукция очень популярна и в нашей стране.

Бесконтактный лазерный измеритель скорости, о котором мы сейчас расскажем, работает, используя известный в физике эффект Доплера, заключающийся в изменении длины волны, наблюдаемом при движении источника волн относительно их приемника. При удалении источника от приемника длина волны любой природы — световой, звуковой и т. д. — возрастает на величину, пропорциональную относительной скорости движения источника, при приближении длина волны уменьшается.

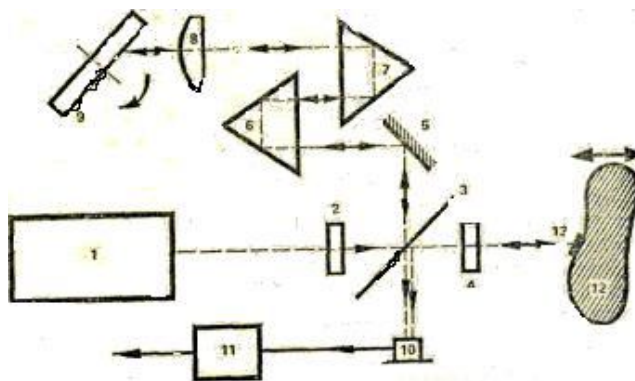


Рис. 3

Принцип действия прибора поясняет рис. 3. Когда монохроматический луч света отражается от колеблющегося объекта (12), то длина отраженной электромагнитной волны отличается от длины падающей волны. Появляющийся сдвиг пропорционален искомой скорости. Если объект уходит от источника, то длина волны возрастает, при возвращении объекта — падает. Таким образом отраженный свет модулируется так называемой частотой Доплера, которая пропорциональна измеряемой скорости.

В рассматриваемом приборе свет дает маломощный (не более двух милливатт) гелий-неоновый лазер (1), устанавливаемый на расстоянии до 80 см от объекта. Испускаемый луч минует фильтр (2) и расщепляется на два. В качестве расщепителей (3) используют, например, полупрозрачные зеркала. Один из двух лучей после прохождения через фильтр (4) действует на исследуемую поверхность; другой (опорный) через зеркало (5), одну подвижную (6) и одну неподвижную (7) призмы, а также цилиндрическую линзу (8) посылается на вращающийся диск (9). Затем оба луча отражаются, встречаются, смешиваются и попадают в фотодетектор (10), электрический сигнал которого обрабатывает блок электроники (11), где после проведения специального анализа выделяется доплеровская частота и, следовательно, возникает электрическое напряжение, прямо пропорциональное мгновенному значению Проекции измеряемой скорости на направление луча. Введение вращающегося диска на пути опорного светового сигнала дает постоянный сдвиг частоты и служит для упрощения определения знака искомой скорости; это облегчает калибровку прибора.

В подобной установке нужно следить за тем, чтобы отраженный луч вернулся от объекта с минимальными потерями мощности и в том же направлении, откуда пришел. Простейшее, но эффективное решение этой задачи — наклеить или каким-то иным способом прикрепить на исследуемую поверхность отражающую ленту из прозрачной пластмассы (13), наполненной мелкими стеклянными сферами, каждая из которых будет действовать подобно отражателю и возвращать падающий луч в направлении его падения. Преимущество такой методикой очевидно: добиваться строгой перпендикулярности лазерного луча к поверхности не нужно.

Бесконтактные методы измерений начинают сейчас внедряться все более активно. Вернемся, например, к тензодатчикам. Пропев им вначале целую оду, мы под конец были вынуждены несколько разочаровать читателя, перечислив длиннейший список недостатков традиционных методов тензометрии.

Английская фирма «Ометрон» разработала бесконтактный анализатор напряжений, использующий в своей работе эффекты Доплера и термоэластичности (изменение температуры объекта при изменении значений механических напряжений). Луч гелий-неонового лазера проходит по поверхности вибрирующей контролируемой детали, и на экране монитора предстает цветная карта распределения вибронпряжений. При этом мы получаем информацию о состоянии буквально всех точек объекта; при проведении традиционного тензометрирования для получения такой карты потребовалось бы несметное число тензодатчиков. Лазерные бесконтактные методы нахождения полей напряжений не требуют особой подготовки исследуемых поверхностей, они легко «обходятся» с составными и сварными конструкциями, им, в общем-то, «безразлично», из какого материала выполнен объект.

Лазерные методы, разумеется, заслуживают особого разговора. Представляется, что магистральное направление бесконтактной техники измерений проходит именно через широчайшее использование лазеров. В основе большинства бесконтактных лазерных методов лежит принцип сканирования измеряемого объекта. Этот термин происходит от английского слова scan — «пристально разглядывать». При пристальном разглядывании какого-либо предмета зрачок глаза для фиксации внимания на каждой существенной его черте совершает как бы небольшое колебательное движение.

Например, от левого края предмета к правому и обратно или как-нибудь по-другому. Вот так и сканаторы. Они дают лазерному лучу поле действия, необходимое для выполнения довольно разнообразных задач.

В настоящее время существует немало различных методов сканирования, и среди них одно из важнейших мест занимают оптико-механические. Это обусловлено возможностью получать при посредстве механических приспособлений относительно небольшие частоты движения луча (диапазон — от единиц до тысяч герц), а именно такие частоты в ряде случаев оказываются особенно важными. Эффективный метод оптико-механического сканирования дают так называемые резонансные виброударные сканаторы, разработанные в лаборатории вибротехнических систем Института машиноведения РАН (ИМАШ). Сканирующее устройство схематично представимо в виде колеблющейся балочки с окончанием, выполненным в виде массивного тела, расположенного посередине между двумя неподвижными ограничителями хода. На теле устанавливается зеркало, отражающее лазерный луч и осуществляющее его развертку. Виброударные сканаторы обеспечивают равномерность движения отраженного луча по исследуемым поверхностям, стабильность амплитуды (она равна половине зазора, в котором расположено тело с зеркалом), возможность получения достаточно высоких частот сканирования при малых энергетических затратах (это обстоятельство связано с рядом нетривиальных результатов теории нелинейных колебаний).

При проведении сканирования луч бежит по исследуемому объекту и, возвращаясь с необходимой информацией, при помощи оптико-электронной аппаратуры, регистрирующей и сравнивающей испускаемый и отраженный свет, может «поделиться» ею с исследователем. Сканирующие лучи лазера достаточно легко осуществляют, например, контроль за линейными размерами тех или иных изделий или, скажем, осуществляют особо точное наведение инструмента. Современные фотоэлектрические микроскопы, оснащенные сканирующими устройствами, позволяют контролировать перемещения с погрешностью, измеряемой сотыми долями микрометра.

Надо сказать, что сканаторы не обязательно должны иметь дело исключительно с лазерами. Они прекрасно работают и с другими источниками излучения, например с ультразвуком. Оптические приборы оказываются весьма «капризными», когда речь заходит о производстве с загрязненной атмосферой. Но там, где с трудом проходит световой луч, легко проникает ультразвук. Если в качестве сканирующего элемента виброударного сканатора выбрать излучатель сфокусированных ультразвуковых волн, измерительные бесконтактные системы можно устанавливать хоть в условиях полной непрозрачности: качество их работы все равно останется высоким.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Проект 05-08-50183).