

ИЗМЕРЕНИЯ В ОТРАСЛЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(обзор)

В.Л. Крупенин

Физические принципы. Для машиностроения особенно важно уметь с максимальной 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 навести 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 «давить». 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 мелкоизмельченных 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 увеличение¹. 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 нагружений.

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.

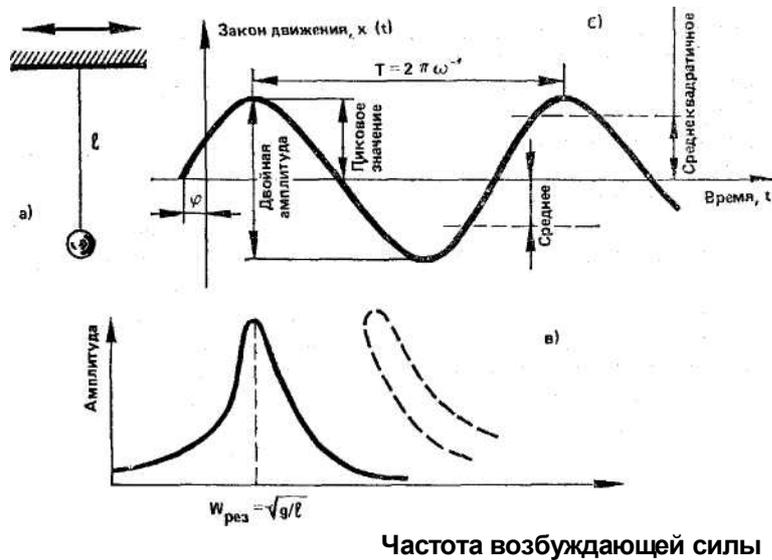


Рис. 1

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 продифференцировать, 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).

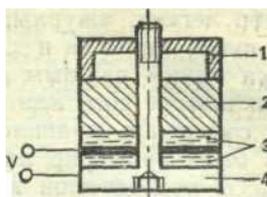


Рис. 2

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/с^2), и сверхбольшие, возникающие при ударах (порядка $10^6 \text{ м/с}^2 \gg \sim 100000 \text{ g!}$) 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 $12 \cdot 10^4$ 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.

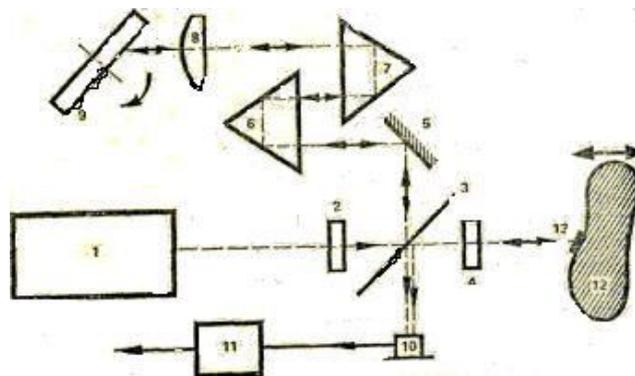


Рис. 3

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 вибронапряжений. 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.

Датчики сил. Вернемся на «грешную землю». Бесконтактные методы — это, что называется, светлое будущее. Подавляющее число измерений и сейчас, и еще, вероятно, значительное время будут все-таки проводиться датчиками, непосредственно контактирующими с контролируруемыми объектами. Здесь сразу же уместно вспомнить и о «мерах контакта», мерах механического действия на тела со стороны других тел, т. е. о силах — возможно, самых важных характеристиках, изучаемых механикой.

Простейший датчик силы — пружинный динамометр: чем сильнее мы сможем сжать или растянуть пружину, тем больше величина ее деформации, которую легко измерить, в зависимости от конструкции динамометра, либо простой линейкой, либо тоже несложным транспортиром. Кстати сказать, «дина» — по-гречески означает «сила». В вышедшей из употребления физической системе единиц СГС дина была единицей измерения силы: 1 дина = 10^{-5} Н.

Из употребления выходят не только системы единиц, но и приборы. Сейчас пружинные динамометры используют разве что для сугубо бытовых целей. Да и то это и не точно, и не слишком удобно.

Современные динамометры — датчики сил работают на совершенно других основах. Они предназначаются для измерений динамических и кратковременных, стати-веских усилий, ударов, сил сжатия, растяжения и т. д. Обычно датчики крепятся к контролируемым объектам с учетом передачи через них измеряемых сил. Существует довольно большое число их разновидностей. Читатель, который внимательно

ознакомился с основными физическими принципами, лежащими в основе деятельности датчиков, сможет легко сообразить, какие из механоэлектрических преобразователей лучше всего согласуются с задачей об измерении сил.

Зная, скажем, о свойствах пьезоэлектриков, без особого труда можно придумать схему пьезоэлектрического датчика знакопеременных сил. Такой датчик устанавливают, например, между источником вибрации и исследуемым объектом. Измеряемая сила действует на резьбовые втулки, связанные с двумя металлическими пластинками, между которыми находится пьезоэлемент — кристалл или керамика. Под действием нагрузок на пластинках появляются заряды, и возникающее электрическое напряжение оказывается пропорциональным искомой силе: $U \sim P$.

Разумеется, это лишь «внутренность» датчика, да и то представленная довольно-таки схематично. В нем могут иметься еще дополнительные конструктивные элементы; его еще нужно одеть в корпус, снабдить удобными крепежными узлами (не только втулками, но и резьбовыми отверстиями), кабелями и т. д. Однако принцип действия пьезодатчиков силы — пьезодинамометров — именно такой.

Для измерения сил привлекают, естественно, и другие способы. Довольно распространены датчики сил с тензорезистивными преобразователями. Они работают как бы в два этапа. Сначала происходит механическое преобразование силы в деформацию, а потом эта деформация измеряется тензорезисторами. С тензометрией мы уже познакомились. Работа же механического преобразователя строится так. В датчике имеется специальный узел, который уравнивает измеряемую силу. При этом он деформируется, и тут-то начинают свою деятельность тензорезисторы. Сходные

методики, связанные опять-таки с уравниванием, используются и при измерении величин крутящих моментов.

Следует заметить, что, так как силы выражаются векторами, то для их описания единственной скалярной величины может оказаться недостаточно. Для измерения некоторых компонент сил иногда применяют датчики, содержащие пьезопластины, чувствительные не только, скажем, к сжатию под влиянием нормальных нагрузок, но и по одной пластинке для каждого направления усилия скалывания.

Дело в том, что пьезоэффект может проявляться как при действии продольных, так и скалывающих сил. Оказалось, что, например, кварцевые пластинки можно вырезать из кристаллов так, чтобы они были чувствительными только к сжатию или же только к скалывающим усилиям, действующим в каких-то выбранных направлениях.

Так вот, элементы, ответственные за различные направления, механически последовательно соединяют между собой. Усилие, измеренное таким образом, незачем разлагать на составляющие в каких-либо обрабатываемых устройствах, ибо каждая из пластинок реагирует лишь на свою компоненту. В типичных случаях взаимные влияния не превышают 1%.

Пьезодатчики одинаковой чувствительности можно включать в измерительные схемы и параллельно. Снимаемый электрический сигнал соответствует алгебраической сумме действующих сил. На основе этого принципа конструируют, например, пьезодинамические платформы, используемые, в частности, для измерений усилий резания при различных видах обработки конструкционных материалов, а также при исследовании динамических характеристик разнообразных технических устройств, например, при испытаниях моделей в аэродинамических трубах. Таким платформам находится дело и в медицине, например в невропатологии и ортопедии, где с их помощью контролируют восстановление двигательных функций, потерянных людьми вследствие заболеваний или травм.

Разумеется, пьезодатчики, «набранные» из различным образом ориентированных элементов, могут служить не только многокомпонентными динамометрами, но и датчиками крутящих моментов.

Для анализа действующих сил иногда привлекают также индуктивные и механотронные датчики. Сила, приложенная к подвижному сердечнику, входящему в катушку индуктивности, в результате изменяет параметры некоторой электрической цепи и, таким образом, добывается искомая информация. В чем-то это сходно с принципом действия диодного механотрона — электровакуумного прибора с подвижным анодом, перемещаемым под действием измеряемой силы, вызывающей изменение вида вольтамперной характеристики, по которой судят об ее величине.

По сведениям справочника «Вибрации в технике» (т. 5) современные датчики сил измеряют в диапазонах от 0,1 до 10^7 Н, но это, так сказать, рекорды. Обычные диапазоны — от 1 до 10^5 Н. Рабочие температуры — от -200 до $+250^\circ\text{C}$.

К датчикам, измеряющим силы, мы будем еще неоднократно возвращаться. Дело в том, что их обязательно включают в качестве составных частей в такие важные для техники приборы, как импедансные головки. Кроме того, далее будет рассказано о новом способе измерения сил, основанном на свойствах авторезонанса.

Сейчас, однако, чтобы продолжить, придется сделать небольшое отступление.

Анализирующая аппаратура. Ведя рассказ исключительно о датчиках, мы до сих пор практически не интересовались, что же происходит с получаемыми при их посредстве электрическими сигналами. При помощи одних только датчиков, естественно, нельзя получить, например, сведения, содержащиеся на графиках рис. 1. Между тем получение подобных сведений весьма часто и является целью исследований. Поэтому (совсем, впрочем, бегло) мы расскажем об анализирующей аппаратуре.

В качестве примера обратимся вновь к уже знакомой нам виброметрии.

Анализирующая виброизмерительная аппаратура выпускается во многих странах мира, и в том числе в России. Впрочем, с большим сожалением приходится констатировать, что здесь пальма первенства не у нас. Ни в коем случае не уступая в смысле идей, мы тем не менее заметно отстаем в «железе». Лучшую виброизмерительную технику производят, видимо, датчане — уже упоминавшаяся фирма «Брюль и Кьер», Будем, однако, оптимистами. Хочется верить, что настанет время, когда аппараты с надписью «Сделано в России» будут котироваться выше других.

Анализирующая аппаратура преобразовывает и обрабатывает поступающую на нее информацию и в том или ином виде доводит ее до пользователя. Измеряемые процессы могут, например, отображаться на экранах мониторов, вычерчиваться различного рода графопостроителями, изучаться, наконец, при помощи стрелочных или цифровых приборов. Имеется также возможность вводить полученную с датчиков информацию в память компьютеров. Надо, кстати, заметить, что многие образцы анализирующей аппаратуры сами по себе являются специализированными ЭВМ, способными обрабатывать результаты измерений по специальным программам. Уже говорилось о двух подходах к анализу — временном и частотном. В первом случае усиленные сигналы, поступающие с акселерометров, во-первых, один или два раза интегрируются — так получают сигналы, несущие сведения о скоростях и перемещениях, а во-вторых, попадают на специальные детекторы, создающие электрическое напряжение, пропорциональное измеряемой величине. Это напряжение подается на регистрирующие или измерительные приборы, и в результате мы получаем информацию о среднеквадратичном или среднем значении процесса или об его двойной амплитуде. С детектором может быть связано запоминающее устройство. При его посредстве исследователь узнает о пиковых значениях процессов, что особенно важно при измерении ударов.

При организации подобных систем обычно предусматривают возможность передачи информации на осциллографы, самописцы, измерительные усилители и магнитофоны, а также другие устройства.

Обратимся теперь к частотному анализу. Как мы видели, вибропроцессы можно представить не только во временном, но и в частотном виде. Сложные процессы несут в себе большое количество частотных составляющих (в некоторых случаях их называют гармониками).

Чтобы пояснить суть дела, вспомним опять о маятнике. Когда он колеблется с какой-то частотой, например, с частотой $\omega = \sqrt{g/l}$, то можно сказать, что его движение содержит единственную гармонику — ту самую синусоиду, которой это движение и описывается. Но вот маятник установили подле стенки. Теперь его колебания сопровождаются ударами; образовалась так называемая виброударная система. Легко увидеть, что характер вибрации существенно изменился, и закон движения соударяющегося маятника оказался весьма далеким от синусоидального. Его можно попытаться описать только очень большим числом синусоид, каждая из коих будет иметь свою частоту.

Любая реальная вибрация несет в себе множество элементарных синусоидальных составляющих разных интенсивностей, с разными, не обязательно кратными, частотами, с разными фазами. При частотном анализе мы как бы раскладываем процессы по этим составляющим, образуя, находимые по специальным правилам, их суммы. Мы узнаем благодаря этому, какие частоты преобладают, а какие выражены слабее, мы определяем тип процесса (периодический, случайный, почти периодический и т. д.), мы получаем возможность приобрести информацию о том, в каких частотных зонах сосредоточена большая часть энергии колебаний. Но это еще далеко не все: частотный анализ дает возможность получить и много других весьма ценных сведений.

При разложении динамического процесса на элементарные частотные составляющие часто говорят о нахождении его спектра, а сами составляющие называют при этом спектральными (слово «спектр», точнее, «спектрум», по латыни означает «представление», «образ»).

Для получения спектральных характеристик вибропроцессов используют разные типы анализирующей аппаратуры: частотные анализаторы и спектрометры, узкополосные цифровые спектроанализаторы, работающие в реальном масштабе времени, и другие приборы. В результате их применения можно, в частности, получать спектры виброускорений, - скоростей, - перемещений и другие характеристики, о некоторых из которых говорится ниже. Заметим еще, что различные методы анализа существуют, разумеется, и для других, а не только вибрационных типов динамических процессов. Для этого также разработана специальная аппаратура.

Одни из главных «участников» виброизмерений — разнообразнейшие усилители и фильтры. Эти устройства используются исключительно широко, и без их участия эффективное проведение анализа просто невыполнимо.

Например, без привлечения особых предварительных усилий нельзя даже подключить анализирующую аппаратуру к вибродатчикам, а если это все-таки сделать, то их чувствительность резко упадет, рабочие диапазоны сузятся, получаемая информация окажется сильно искаженной. На предусилители возлагают и многие другие «обязанности».

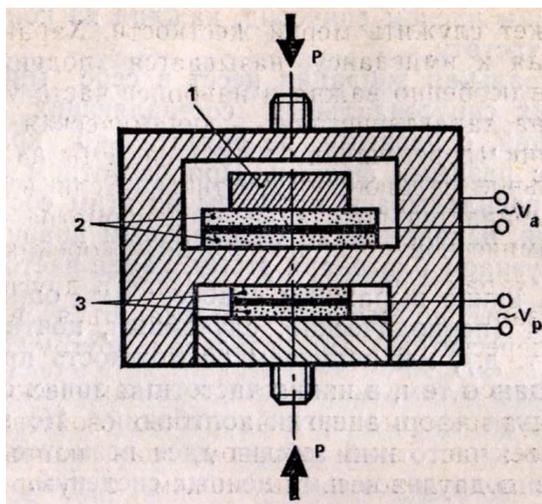


Рис. 4

Чрезвычайно важны в виброметрии фильтры. Их номенклатура огромна, и они идут в дело в самых разных ситуациях. При помощи фильтров проводят настройку и отладку приборов, они же служат для подавления помех. При проведении частотного анализа используются голосовые избирательные фильтры, пропускающие лишь необходимые составляющие анализируемого процесса, находящиеся в соответствующих узких частотных полосах. Разумеется, деятельность фильтров не ограничивается перечисленным, они несут и другие функции.

Теперь, после краткого знакомства с основными типами виброанализирующей аппаратуры, мы опять можем вернуться к датчикам.

Импедансные головки и динамические податливости. На рис. 4 изображена схема на первый взгляд довольно странной конструкции. В верхней ее части явно просматривается акселерометр: нагрузочное тело (1), пьезопластинки (2), разделительная металлическая полоска — словом, сомнений нет — типичный акселерометр. В то же

время в нижней части помещен датчик силы с пьезоэлементом (3). Этот «гибрид» называют импедансной головкой и с его помощью анализируют весьма важные характеристики технических объектов, которые именуют частотными.

Слово «импеданс» значит «препятствовать». Механический импеданс есть отношение силы, возбуждающей конструкцию, к результирующей скорости. Ясно, что импеданс может служить мерой жесткости. Характеристика, обратная к импедансу, называется подвижностью. В механике особенно важна и наиболее часто употребляема еще одна характеристика — динамическая податливость: отклик (перемещение точки) системы на тестовое синусоидальное силовое воздействие. Если в качестве отклика выбирается показание акселерометра, то говорят о динамической податливости по ускорению.

Все эти характеристики (а есть еще и другие) однозначно связаны, но мы не будем вдаваться в детали взаимных пересчетов. Самое главное в другом.

И импедансы, и подвижности, и динамические податливости несут информацию о частотных свойствах исследуемых объектов. Таким образом, зная, например, динамические податливости, мы можем с уверенностью прогнозировать, что произойдет с объектом, если на него подействовать переменной силой, спектр которой содержит определенные частотные составляющие. Зная динамические податливости, т. е., в частности, зная резонансные свойства технических объектов, мы можем обеспечить их нормальное функционирование и даже предотвратить возможные разрушения конструкций.

Вернемся, кстати, к рис. 1, в (см. ВНТР. 2008. №12). С определенными оговорками (динамические податливости определяются не только амплитудо-частотными, но и фазочастотными характеристиками) можно считать, что перед нами как раз спектры динамических податливостей. На точки всплеска этих кривых приходятся частоты нежелательных резонансных колебаний. Если мы сумеем от них «отстроиться», избежать работы на этих частотах, конструкции прослужат гораздо дольше. Это замечание, разумеется, не относится к тем случаям, когда резонансные колебания вызываются специально для повышения эффективности технологических вибрационных машин (см. далее).

С помощью импедансных головок определяют так называемые локальные частотные характеристики, т. е. отклики на воздействия, приложенные в тех точках, где измеряются ускорения. Рассмотрим, например, нахождение локальной динамической податливости. Импедансная головка помещается между источником силового синусоидального воздействия и выбранной точкой исследуемой конструкции. В качестве источника тестовой вибрации чаще всего используют управляемые электродинамические вибровозбудители. Из рис. 4 видно, что импедансная головка формирует два электрических сигнала: один с напряжением U_p , пропорциональным действующей силе, другой с напряжением U_a , пропорциональным ускорению. При проведении измерений электрический сигнал акселерометра после непременно предварительного усиления и последующего интегрирования поступает на измерительный усилитель и фазометр (прибор, анализирующий фазовые соотношения различных процессов). Сигнал с датчика силы, опять-таки после предусиления, также поступает на фазометр и затем на вход аппаратуры, управляющей вибровозбудителем. Тем самым обеспечивается постоянство силы возбуждения при автоматической развертке частоты. Электрические сигналы измерительного усилителя и фазометра подаются на входы двухканального самописца уровня, который в определенном масштабе выдает информацию о локальной динамической податливости.

Надо сказать, что импедансная головка, схема которой показана на рис. 4, предназначена в основном для измерения частотных характеристик легких и нежестких конструкций. Для измерений, проводящихся на более жестких и массивных объектах,

целесообразней применять головки других типов, основные принципы действия которых, в общем-то, аналогичны описанному.

Локальные динамические податливости не дают достаточно полной картины частотных свойств машин и механизмов. Более подробные сведения можно получить, измеряя так называемые проходные динамические податливости — отклики систем на силовые воздействия, приложенные в точках, не совпадающих сточками наблюдения. Иными словами, если в импедансных головках датчики силы и акселерометры совмещены, то при измерении проходных динамических податливостей датчики разносятся: возбуждение прикладывается в одном месте, акселерометр крепится в другом. В остальном схема измерения остается подобной прежней. Остается она прежней и в том случае, когда задача требует, чтобы вибровозбудитель совершал кругительные колебания.

Меняя точки приложения силы возбуждения и крепления акселерометров (или применяя другие методики измерений — об этом речь ниже), можно получать информацию о системах динамических податливостей исследуемых конструкций.

Динамический анализ и техническая диагностика. В старых учебниках по автоделу можно встретить рисунок такого типа. Около грузовика с открытым капотом стоит человек с медицинским стетоскопом и, как врач, выслушивает машину. Эта картинка теперь может показаться наивной. Между тем нарисованный человек занимался отнюдь не бессмысленным делом: опытный механик по характеру шума может многое рассказать о техническом состоянии машины.

Динамические процессы, сопровождающие работу технических средств (шум — одно из их проявлений), несут в себе огромное количество полезной информации. Проблема ее извлечения из регистрируемых различными датчиками сигналов, проблема расшифровки — одна из актуальнейших для современного машиностроения: если бы мы умели ее надежно решать, стало бы возможным ставить точный диагноз о «самочувствии» тех или иных машин, прогнозировать поведение их узлов и подсистем, предотвращать аварии, заблаговременно и действительно в необходимые, а не взятые с потолка сроки проводить ремонтно-профилактические работы.

Сейчас решением проблем технической диагностики занимаются тысячи ученых и инженеров практически во всех индустриально развитых странах мира. В этом деле есть, как часто пишут в газетах, и определенные успехи, но до ситуации, представляющейся идеальной (измерили сигнал, — получили полную и достоверную информацию об объекте), в целом еще далеко.

Принципы современной технической диагностики строятся, в частности, на измерении параметров генерируемых машинами вибрационных процессов и дальнейшей обработке результатов измерений. Вибрация, как мы уже говорили, сопровождает практически каждое движение деталей машин, и в случае, если, скажем, где-то образовался дисбаланс или появились какие-либо дефекты, она сразу же отреагирует на это: изменится ее характер, появятся одни и исчезнут другие спектральные составляющие и т. д. Ну и кроме того, вибрацию очень удобно измерять: для этого не надо «влезать» внутрь работающей машины, вибрирующие поверхности, как правило, доступны если и не контактным, то бесконтактным средствам контроля. Таким образом, датчики и анализирующая аппаратура — одни из главных устройств, участвующих в проведении диагностики со стояния машин и других технических средств.

Диагностика может основываться как на временном, так и частотном анализе механических колебаний. Частотный анализ наиболее информативен. Спектрограммы измеренной вибрации с высочайшей точностью могут сообщать о появлении в машинах дефектов, превосходящих допустимые. В ряде случаев о неисправностях сигналият низкочастотные составляющие, иногда — высокочастотные. Искусство диагностики не только «измерить и преобразовать», но и научить компьютер распознавать

присутствующий на получаемых записях процессов след того или иного фактора, влияющего на работоспособность машины.

Поиски следов возможных неисправностей на основе анализа спектрограмм вибрационных процессов — задача прямо-таки «криминалистическая». Оказывается, например, что если в спектре механических колебаний подшипников электродвигателя появилась составляющая, соответствующая удвоенной скорости вращения, то в системе образовался изгиб вала.

Надо отметить, что лишние спектральные составляющие могут начать сигнализировать даже только еще о зарождении дефекта, и пройдет немало времени, прежде, чем он действительно проявится. Можно ли, скажем, не останавливая машину, определить, что ослабли механические связи конструкции или, говоря проще, появилась ли разболтанность? Оказывается, да! Во многих случаях об этом заблаговременно дают знать так называемые комбинационные гармоники — спектральные составляющие с частотами, равными $1/2$, $3/2$ и т. д. основной частоты вращения.

Подобных примеров можно набрать много. Мы говорили пока об области низких частот. В области средних частот могут быть найдены показатели износа и зарождающихся дефектов редукторов, коробок передач и т. п. Заглядывая в область высоких частот, можно приобрести информацию о дефектах подшипников и многих других узлов. Однако (подчеркнем это снова) проводить накопление данных и эффективную обработку информации можно только с помощью компьютеров: что называется вручную со всеми тонкостями и, к сожалению, многочисленными подводными камнями подобных задач справиться невозможно.

Одно из перспективных направлений в технической диагностике основано на построении моделей анализируемых технических объектов и проведении прогноза их поведения на основе моделирования. При этом самое главное, чтобы модель наиболее полно соответствовала исходному объекту. Обычно модели машин получают в виде систем дифференциальных уравнений движения, включающих в себя группы уравнений механических и немеханических частей (приводов, систем регулирования и др.). Метод моделирования, основанный на использовании дифференциальных уравнений, называют математическим. Математическая модель — это абстракция, не всегда и не во всем адекватная реальной системе. Разумеется, экспериментирование на натуральных технических объектах выглядит заманчивее. Однако сила математического моделирования в его предсказательности. Коль скоро модель разработана, мы можем на ее основе получить достаточно полный прогноз поведения системы в будущем. Если же традиционными методами экспериментировать со сложными техническими объектами, то в этом случае определяются лишь некоторые параметры их состояния в данный момент времени; получить глобальный прогноз поведения пока не просто.

Возможности современных датчиков, анализаторов и компьютеров позволяют предложить методики, синтезирующие два основных способа моделирования технических систем — математический и экспериментальный: оказывается, математическая модель может строиться по результатам натурных измерений. Речь идет не об определении каких-то неизвестных параметров систем, а именно о самой модели целиком. Иными словами, сейчас появляется возможность измерять уравнения движения.

Это высказывание, конечно же, некорректно: уравнения «измерять» нельзя. Но, как мы видели, можно экспериментально определять динамические податливости, которые в ряде случаев вполне заменяют уравнения и которые в определенном смысле даже более информативны. Знание динамических податливостей и еще некоторых экспериментально определяемых характеристик позволяет существенно ослабить роль «умозрительного фактора» при математическом моделировании. В то же время используются его основные преимущества, например, возможность прогноза.

Почему же динамические податливости столь важны? Напомним, что это отклики

механических систем на эталонные силовые воздействия, изменяющиеся по синусоидальному закону. Оказывается, что в ряде случаев, зная вид динамических податливостей интересующих нас объектов, можно ответить на вопрос о том, как будет вести себя система при произвольных видах нагружающих сил. Это и означает, что после измерения динамических податливостей мы можем осуществить прогноз поведения технического объекта.

Раньше говорилось, что динамическая податливость может быть найдена при помощи, например, двух пьезодатчиков (силы и ускорения), вибровозбудителя, создающего эталонное силовое синусоидальное воздействие, и комплекса измерительной аппаратуры. Оказывается, что эта характеристика связана с еще одним эталонным механическим воздействием — ударом. Если по исследуемой системе нанести удар, то спектр ее отклика как раз и будет динамической податливостью.

Для реализации данной методики используются специальные динамометрические молотки, в которые встраиваются пьезокерамические датчики силы и которыми исследуемая конструкция обстукивается в нужных местах. В выбранной точке объекта крепится акселерометр. После предварительного усиления сигналы с обоих датчиков попадают на каналы двухканального спек-троанализатора, являющегося, по существу, специализированной ЭВМ. Здесь происходит их временная дискретизация и, занимающая доли секунды, обработка по специальным программам. Искомая информация о динамической податливости может быть отражена на экране монитора, подана на самописец уровня или передана в память внешней вычислительной машины, откуда она может извлекаться всякий раз, когда понадобится для построения полужэкспериментальной модели и проведения прогнозирования.

Преимущество данного метода в том, что конструкция исследуется в чистом виде, без присоединения чужеродных систем, искажающих динамическую картину. Имеется возможность получения экспресс- информации о системах динамических податливостей откликах различных точек исследуемого объекта на силовые воздействия, также приложенные в различных точках.

Глубокая связь между характеристиками ударных взаимодействий и динамическими податливостями позволяет строить методы исследования таких сложных динамических процессов, как виброударные, появляющиеся при движениях механических систем, сопровождающихся систематическими соударениями их элементов. Методы динамического анализа виброударных процессов, разработанные в ИМАШ РАН, получили наименование частотно-временных, ибо они объединяют в себе оба (временной и частотный) подхода к исследованию механических колебаний. Применяя частотно-временные методы, можно, например, не вводя систему в режим движения с ударами, с высокой точностью предсказать, что с нею произойдет, если соударения все-таки начнутся. Методика предсказания основана на измерении все тех же динамических податливостей и ряда других характеристик исследуемых конструкций и последующей обработке полученных данных по специальным программам на ЭВМ.

Проблемы диагностики и прогнозирования поведения технических средств, конечно же, существенно более многочисленны и многогранны. Однако любой вопрос, возникающий при рассмотрении этих проблем, сразу же «упирается» в измерения. Ни одна задача диагностики не может решаться без надежных и эффективных датчиков: они поставляют исходную информацию, и следовательно, с них все и начинается.

Роль датчиков в машиностроении весьма велика. Вот еще один круг проблем. Речь пойдет об управлении машинами.

Управление машинами. Каждый знает, что большинство окружающих нас машин управляемые. Неуправляемые машины могут выполнять в основном лишь достаточно примитивные операции; их становится все меньше, и в будущем они, видимо, исчезнут совсем. На практике наиболее часто реализуется принцип программного управления. Он,

в сущности, прост: необходимо каким-либо способом сформировать закон изменения определяющего параметра входного воздействия двигателя (напряжение электрического тока, количество горючего и т. д.), обеспечивающего выполнение программных движений рабочих органов.

В современных машинах весьма распространен ещё один важнейший принцип, немислимый без широкого «пользования разнообразнейших датчиков, — принцип обратной связи. Он заключается в том, что система управления получает информацию о законах изменения параметров движения рабочего органа машины или каких-то других важных характеристик и распоряжается этой информацией для проведения необходимой корректировки входного воздействия. Использование обратных связей чрезвычайно важно, в любой сложной динамической системе всегда найдутся факторы (их называют возмущениями), которые своим влиянием вызывают отклонения истинных законов движения от программных. Обратные связи призваны свести на нет вредные влияния возмущающих факторов; при их посредстве организуются замкнутые системы управления.

Система обратной связи включает в себя, кроме датчиков, обязательный элемент сравнения. На его входы вводятся сигналы, несущие информацию как об измеренных контролируемых параметрах, так и об их программных значениях. На выходе элемента сравнения формируется сигнал ошибок. Он поступает в вычислительное устройство, где, наконец-то, преобразуется закон управления, подающийся на исполнительный орган. В некоторых случаях вычислительные устройства как таковые, отсутствуют, законы управления могут формироваться уже на выходах элементов сравнения или получаться после преобразования в простейших электрических цепочках. В наиболее современных системах управления, однако, без настоящих вычислительных устройств — микропроцессоров или более крупных компьютеров — уже не обойтись.

В соответствии со схемами, подобными приведенной, работают очень многие машины, транспортные средства, энергетические установки. Возьмем для примера автомобиль. Здесь программное движение задается определенным перемещением педали газа. Регулированию подлежит угловая скорость коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания. При ее отклонении от номинальной величины, которое может появиться, скажем, из-за изменения нагрузки, обязательный здесь датчик скорости вырабатывает сигнал, в результате чего формируется управляющее воздействие и происходит перемещение золотника гидроусилителя. Затем смещается поршень гидроцилиндра, в движение приходит рейка топливного насоса (или карбюраторная заслонка) и в конечном итоге мы получаем необходимую передозировку топлива. Описанная система работает так, что управляющее воздействие компенсирует возникшее изменение скорости (это именуют отрицательной обратной связью; при возникновении в динамических системах положительных обратных связей ошибки не компенсируются, а наоборот, накапливаются, так что системы могут «идти вразнос»).

Надо заметить, что подобным же образом регулируют работу электрических машин, управляют металлорежущими станками с ЧПУ, ядерными реакторами атомных электростанций, промышленными роботами. При помощи сходных принципов организованы системы автопилотов самолетов и ориентации космических летательных аппаратов. Словом, огромное число управляемых технических средств функционирует, сообразуясь с довольно простой схемой, показанной на нашем рисунке.

Датчики — основной предмет нашего рассказа — занимают здесь почетное место. Их выбор обусловлен прежде всего спецификой объекта регулирования, ну и, разумеется, техническими возможностями. Далеко не все машины могут быть оснащены датчиками, выполненными, что называется, по последнему слову. Заметим, впрочем, что иногда отличные результаты можно получить и без сверхточных и высокочувствительных датчиков. К этому вопросу, мы еще вернемся.

Для многих машин с ДВС, паровыми или газовыми турбинами, где в качестве контролируемых величин выступают угловые скорости вращения валов, измерителями служат одни из старейших и надежнейших датчиков — хорошо известные всем из школьного курса физики центробежные регуляторы. В ряде случаев успешно используются и уже знакомые нам реостатные датчики угловых и линейных перемещений, а также индуктивные датчики.

В технике распространены тахогенераторы («тахо» по - гречески значит «скорость»). Такое устройство можно представить себе как маломощный генератор постоянного тока с независимым возбуждением, имеющий ротор, жестко связанный с валом машины, угловую скорость которой надо контролировать. Этой скорости, очевидно, пропорциональна возникающая ЭДС. Если составить электрическую цепь из последовательно соединенных тахогенератора, постоянного сопротивления (являющегося здесь элементом сравнения) и источника напряжения, которое пропорционально скорости программного движения, то падение напряжения на сопротивлении будет, в свою очередь, пропорционально искомой ошибке по скорости. Зная ее, нетрудно построить нужное управляющее воздействие.

Электрические машины довольно часто используются при организации обратных связей управляемых технических объектов. В следящих системах (т. е. системах, воспроизводящих на своих выходах с определенной точностью входные воздействия, изменяющиеся по заранее неизвестным законам) часто используются сельсины — особые типы машин переменного тока, преобразующие в электрические сигналы углы поворотов. Сельсины состоят из пары идентичных двигателей, имеющих трехфазные обмотки, располагающиеся, как правило, на роторах. Помимо этого каждый двигатель имеет еще однофазовую статорную обмотку. Одноименные обмотки роторов соединены. Первый из двигателей называют сельсин - датчиком, второй — сельсин-приемником. На статорную обмотку сельсин - датчика подают переменный ток. В качестве выходной величины системы берут напряжение на статорной обмотке сельсин - приемника. Его величина пропорциональна разности углов поворота роторов приемника и датчика.

Зададим теперь ротору сельсин - датчика программное движение, а ротор сельсин - приемника свяжем с вращающимся валом управляемой машины. В этом случае выходной сигнал — напряжение на статорной обмотке приемника — будет пропорционален ошибке, и следовательно, сельсины «умеют» не только измерять, но и сравнивать.

В промышленных роботах и станках с ЧПУ в качестве измерителей используются так называемые синусо - косинусные вращающиеся трансформаторы. Эти системы в качестве выходных величин выдают значения синусов и косинусов измеряемых углов поворота. При наличии соответствующих вычислительных устройств оперирование не с самими углами, а с их функциями в ряде случаев даже удобнее. Указанное свойство позволяет использовать вращающиеся трансформаторы и в качестве преобразователей координат.

Разнообразие датчиков, используемых в управляемых системах, огромно. В системах ориентации применяются, в частности, гироскопические датчики: гироскопы стремятся сохранить свое положение неизменным и это свойство используется, например, при полетах летательных аппаратов с автопилотами, когда необходимо автоматически сохранять заданные параметры движения.

При организации систем программного регулирования температур теплообменников энергетических установок используют датчики расхода пара — мерные шайбы. Кстати, саму температуру могут контролировать датчики, называемые термосопротивлениями. В качестве материалов для них используют проводники или полупроводники, обладающие удельными электрическими сопротивлениями, заметно зависящими от температуры окружающей среды.

Электролитические и электронные, газоаналитические и ионизационные фотодатчики — все эти и многие другие устройства используются в системах автоматического управления техническими объектами. Но здесь надо заметить следующее.

В ряде случаев стремление использовать сверхточные и сверхчувствительные датчики не вполне оправдано. Гораздо выгоднее научиться создавать машины, которые бы легко управлялись при помощи «грубых» измерительных систем. Очень важно, например, правильно выбрать контролируемый параметр. В одной и той же машине можно следить за разными характеристиками (они, как правило, все равно взаимосвязаны) и, естественно, выбирать такие, которые проще поддаются измерениям и для которых эта процедура более дешева.

Датчики и резонансные машины. На протяжении всего нашего рассказа мы неоднократно упоминали вибрацию. Обратимся к ней снова, но, так сказать, в другом аспекте.

Вибрационные машины — один из самых распространенных среди управляемых технологических машин, используемых в различных отраслях промышленности и строительства. Вибрация погружает в грунт сваи и трубы, извлекает готовые отливки, интенсифицирует химические реакции, трамбует дороги, шлифует детали, помогает, прокладывая подземные коммуникации. Прикладная наука, занимающаяся вибрационными машинами, именуется вибротехникой.

Из многочисленных задач, стоящих перед вибротехникой, одна из важнейших заключается в обучении технологических вибрационных машин работать с максимальной эффективностью. Эффективно — значит «быстрее», «глубже», «плотнее», «более рыхло», словом, в зависимости от определяющего критерия, который естественно, для каждого типа вибромашин свой, — «более хорошо». Это, однако, еще не все. Эффективность — более емкое понятие. Необходимо конструировать машины так, чтобы они при минимуме энергетических затрат производили бы максимум полезного.

Любая вибрационная машина содержит привод и колебательную систему, которую в простейшем случае можно представить в виде осциллятора — массивного тела, присоединенного к упругой пружине. Привод вызывает колебания системы, и рабочий орган (его-то как раз и моделирует массивное тело) воздействует на обрабатываемую среду.

Наиболее эффективны вибромашин, называемые резонансными: при возникновении резонанса рабочий орган при минимальных затратах внешней энергии совершает колебания с максимально возможной амплитудой.

Пример резонансной кривой был дан на рис. 1, в. Надо заметить, что механические свойства маятника, совершающего малые колебания вблизи устойчивого положения равновесия, вполне аналогичны свойствам осциллятора. Поэтому резонансные кривые обеих этих систем — близнецы. Разница состоит лишь в том, что теперь резонансная частота вычисляется по-другому. Теперь $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{c/m}$, где c — упругость пружины, а m — масса.

Особая эффективность резонансных режимов определяется тем, что при их реализации скорости движения рабочих органов синфазны периодическим силам, поддерживающим колебания. Ясно, что наиболее разумно организовать действие возбуждающей силы так, чтобы она действовала в такт с движением рабочего органа. При этом условии малая внешняя сила способна раскачать систему до больших амплитуд.

Проницательный читатель наверняка догадался: коль скоро речь зашла о фазах, то на сцену непременно должны выйти и измеряющие их датчики. Но не будем забегать вперед. Пока все представляется очень простым: надо обеспечить близость частоты вынуждающей силы к собственной частоте системы, вызвать резонанс, и наилучший режим работы будет достигнут.

Все на самом деле сложнее. Машина есть машина, и ее нельзя рассматривать саму

по себе: всегда присутствующие нагрузки (а машины, собственно, и создаются, чтобы иметь дело с нагрузками) меняют частотные свойства систем. Пусть, например, на холостом ходу резонансная кривая рабочего органа имела вид, показанный на рис. 1,в. Во время рабочего процесса увеличивается сила трения. Наша кривая тут же опустится и делается более пологой. Если, скажем, к рабочему органу присоединить дополнительный инструмент, кривая переместится влево, а если при работе он столкнется с упругими свойствами обрабатываемой среды — «шарахнется» вправо. Сказанное означает, что в зависимости от обстановки резонансная частота, на которую надо настраивать машину, все время изменяется, «плавает». Дело усложняется еще и тем, что в деятельность вибротехнических устройств часто «вмешиваются» так называемые нелинейные факторы. Если, например, вибрирующий орган прижать к обрабатываемой поверхности и заставить его совершать периодические удары (а так поступают весьма часто, удар — очень эффективное средство воздействия), то частотная характеристика может вообще исказиться до неузнаваемости (см. кривую, нарисованную на рис. 1,в пунктиром).

Таким образом, организовать рабочий процесс так, чтобы все время выполнялись бы резонансные соотношения и можно было бы всегда находиться на гребне, — довольно сложно. Необходимо привлекать специальные методики управления, и здесь, разумеется, никак не обойтись без датчиков.

Для управления резонансными машинами часто используют два датчика. Один следит за фазой возбуждения колебаний; это может быть, например, датчик угла поворота дебаланса. Другой датчик контролирует какие-либо параметры движения рабочего органа (перемещение, скорость, ускорение или другие, наиболее удобные для данного конкретного случая). Сигналы обоих датчиков сравниваются, и если фиксируется нежелательный сдвиг фаз, управляющее воздействие изменяет скорость вращения дебалансов и возникшее фазовое рассогласование исключается.

Более универсальные и эффективные способы организации самых разнообразных вибротехнических устройств заключаются в создании авторезонансных систем возбуждения. Относящиеся сюда проблемы в течение последних лет активно изучались в Лаборатории вибротехнических систем ИМАШ РАН. Авторезонанс — это резонанс под действием сил, порождаемых движением самой колебательной системы. При реализации авторезонанса вибротехническое устройство само выбирает наиболее эффективные и энергетически выгодные для данной ситуации режимы работы.

Разумеется, при создании авторезонансной машины опять-таки не обойтись без датчика обратной связи, который регистрирует колебания механической системы и через фазосдвигающий элемент, а также усилитель подает сигнал, питающий двигатель. Изменение фазы сигнала в цепи обратной связи позволяет регулировать частоту колебаний, и при выполнении определенных фазовых соотношений система будет реализовывать колебания максимально возможной амплитуды. Авторезонансным системам не страшны изменения характеристик нагрузок, износ инструмента, смена температурных режимов работы и другие факторы, приводящие к искажению амплитудно-частотных характеристик. Датчики обратной связи бесстрастно фиксируют определяющие параметры рабочего процесса и помогают сформировать управляющие сигналы, всегда обеспечивающие оптимальные режимы работы.

О резонансных и авторезонансных машинах написано уже немало. Здесь уместно рассказать о том, как резонансные принципы позволяют конструировать... сами датчики.

Резонансные устройства для измерения сил. Посмотрим, теперь, как с помощью резонансных процессов можно организовать сверхточное измерение сил в различных механических устройствах. В частности, речь может идти о резонансном взвешивании. Вспомним об осцилляторе. Он может служить весь-па своеобразными динамическими

весами. Если к такой системе присоединить взвешиваемое тело, то резонансная частота понизится: суммарная масса стала больше. Поэтому новая резонансная частота однозначно определяет массу присоединенного тела. На аналогичном принципе можно измерять и силы другой природы. Точность и быстрдействие динамического способа не идут в сравнение со статическим, но все же и здесь имеются существенные недостатки.

Дело в том, что, например, при небольшой массе присоединенного тела резонансная частота может измениться на очень малую, трудно регистрируемую величину

— ведь амплитуда колебаний может уменьшиться крайне незначительно (при малом

изменении частоты движение качественно сохраняет свой характер). Это хорошо видно из рис. 2, в (см. ВНТР.2008. №12.): при малом отходе от значения максимальное значение величины амплитуды изменяется также мало. Поэтому чувствительность подобного способа относительно невысока. Не очень велико здесь и быстрдействие. Резонансная частота определяется после окончания переходного процесса, появляющегося вследствие присоединения взвешиваемого тела, а время его прохождения в подобных системах может быть достаточно большим.

Способ измерения, о котором мы сейчас расскажем, был разработан в ИМАШ. Он представляется перспективным для измерения самых разнообразных сил, а не только сил веса, но для простоты изложения мы ограничимся именно взвешиванием.

Организуем нашу систему так, чтобы между присоединенным телом и колебательной системой типа той, о которой только что говорилось, возникли интенсивные периодические соударения. Если, изменяя частоту возбуждения колебаний, ввести систему в резонансный виброударный режим с максимально возможной амплитудой колебаний, то по значению резонансной частоты снова можно однозначно определить искомую силу веса. Но теперь это гораздо проще и, что главное, надежнее.

Взвешивание в виброударном режиме резко изменяет частотные свойства системы. Оказывается, что резонансная кривая имеет здесь вид, подобный той, что показана на рис. 1, в пунктиром. Кроме того, теперь взвешивание сопровождается не понижением частоты резонансных колебаний. При отходе от резонанса характер движения может измениться качественно (максимальная амплитуда находится на границе срыва колебаний), а возможность получения более резких изменений характеристик движения и определяет в конечном итоге чувствительность системы.

Помимо этого, ввиду повышения частоты возрастает и темп прохождения переходного процесса, следовательно, заметно возрастает быстрдействие. Техническая реализация описываемого способа достаточно проста. В качестве

колебательной системы выбирают, например, пьезокерамическую пластинку, которая при подаче на ее обкладки переменного тока начинает колебаться с определенной периодичностью. К пластинке присоединяют взвешиваемое тело, и после того как на определенной частоте возбуждаются виброударные резонансные колебания, по значению этой частоты и определяют искомую силу веса. Поддерживать наиболее интенсивные колебания можно с помощью, например, авторезонансной схемы или другими способами. Расчеты показывают, что чувствительность прибора резко увеличивается. Описанный датчик может быть применен в самых различных отраслях промышленности. Например, в фармацевтическом производстве при взвешивании порошков может возникнуть необходимость в их сверхточной дозировке. Высокие чувствительность и быстрдействие способа в сочетании с доступной автоматизацией при помощи авторезонансной настройки дадут возможность построить высокоэффективные и производительные автоматические линии.

Среди океана датчиков. Классики отечественной сатиры утверждали, что «статистика знает все», кроме общего числа стульев. Насчет стульев они, вероятно, не ошиблись, но верно также и то, что вряд ли кто-нибудь рискнул подсчитать общее число датчиков, работающих в различных технических объектах. Интересно все-таки, сколько всего датчиков? Миллиарды? А может быть, и того больше? Словом, цифра астрономическая.

Это обстоятельство, впрочем, вряд ли удивит читателя: здесь все более или менее ясно. Удивительно другое. Оказывается, бывает довольно трудно сказать, какой датчик хороший, а какой еще лучше: получается так, что устройства, предназначенные, вообще говоря, для одной и той же цели, довольно трудно сравнивать. Известно, конечно, что некоторые типы датчиков уже отслужили свое и вряд ли инженеры когда-либо к ним обратятся. Но все-таки вопрос сравнения — отнюдь не праздный.

Дело в том, что зачастую датчик, находящийся в неких условиях, работает из рук вон плохо. Кажется, что использованный в нем физический принцип неэффективен. Однако в других условиях именно этому датчику может не быть равных. Собственно говоря, поэтому в основу «деятельности» датчиков и кладутся столь разнообразные физические принципы: может статься, что одну и ту же величину придется измерять посредством совершенно различных методик.

Нередко требования, предъявляемые к измерительным устройствам, противоречивы, и инженеру приходится ломать голову над решением своеобразной оптимизационной задачи: как измерить исследуемую характеристику с максимально возможной эффективностью при реально действующих ограничениях. Иногда, например, сверхчувствительный датчик «не желает» работать в условиях сильной радиации или выбранный способ измерения весьма точен, но габариты или масса датчика не позволяют установить его в нужном месте контролируемой системы.

Весьма часто сверхвозможности датчиков просто ничего не дают. Пределы эффективности измерительных цепей определяются не только датчиками, но и собственными свойствами применяемой аппаратуры (тепловым шумом полупроводниковых элементов, точностью дискретизации в цифровых устройствах, качеством кабелей и т. п.). Поэтому оптимум следует искать, исходя из условий конкретной задачи и собственных возможностей. Техника измерений ушла далеко вперед. Через какие-нибудь десять—двадцать лет здесь можно ожидать разительных перемен. Удобнейшие бесконтактные методы контроля, автоматизированные компьютерные средства обработки — это не только завтрашний, но уже и сегодняшний день. И все-таки, и все-таки... Грядущее часто оказывается не таким, каким представляется. Взять, например, пьезоакселерометры. Какова их судьба? Трудно поверить, что они будут вытеснены чем-то другим. Впрочем, заниматься прогнозами в технике — дело неблагодарное.

Ну а есть ли среди датчиков абсолютные рекордсмены? То есть, отвлекаясь от конкретных условий, какие способы измерений самые-самые?

По сведениям справочника «Вибрации в технике» (т. 5) наиболее чувствительны к сверхмалым перемещениям емкостные датчики с переменными зазорами: ими измерялись перемещения до 10^{-12} мм. Наименьшие деформации (до 10^{-16}) регистрировали пьезоэлектрические преобразователи. Пьезоэлектрический датчик измерял и наименьшие механические напряжения (до 10^{-5} Па). Наиболее чувствительны к сверхмалым скоростям гамма - резонансные преобразователи, реагирующие на скорость 10^{-7} м/с. Есть сведения, что чувствительность электродинамических датчиков может быть на порядок выше. Малость указанных величин трудно вообразить! Однако наверняка приведенная информация уже устарела и чувствительность современных датчиков еще выше.

В этом нет ничего удивительного. Такая важная отрасль техники, отрасль, от которой напрямую зависят и надежность машин, и эффективность систем управления, и качество научных экспериментов, и еще очень многое может не развиваться.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Проект 05-08-00500).
