

УДК 621.31739

АНАЛОГО-ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗОЭФФЕКТА

*канд. техн. наук, доц. В.И. ЗУБЦОВ
(Полоцкий государственный университет),
канд. физ.-мат. наук, доц. А.И. БОЧКИН
(Витебский государственный университет им. П.М. Машерова)*

Рассмотрен механизм получения информации о напряженном состоянии внутри твердых деформируемых сред измерительными системами на основе пьезорезонансных датчиков механических напряжений. Приведены результаты исследований.

С позиций физики твердого тела, материаловедения, теорий упругости, пластичности и ползучести исследование статической прочности материалов и элементов различных конструкций электронной техники представляет огромный интерес. Решение подобных задач существенно упрощается, когда имеются экспериментальные данные, полученные в результате статических испытаний образцов материалов. Применение широко распространенных ультразвуковых методов и традиционного метода контроля напряженного состояния посредством тензорезисторов дает обобщенную информацию о величине и характере распределения механических напряжений по сечению объекта контроля, а это недостаточная для практических целей точность. Таким образом, встал вопрос создания метода и аппаратуры для непосредственного измерения напряжений внутри материалов. С этой целью был разработан метод и гамма пьезорезонансных датчиков непосредственного измерения механических напряжений внутри деформируемых сред с целью прогнозирования их прочности.

Зависимость между механическим напряжением и напряженностью электрического поля, используемая в технике измерений переменных, а также статических давлений, усилий с помощью пьезоэффекта, не может быть использована для измерения статических механических напряжений внутри твердых деформированных сред.

Разработанные и запатентованные параметрические пьезодатчики в совокупности с другими устройствами позволяют реализовать метод измерения механических напряжений внутри деформируемых сред, благодаря своим оригинальным конструкциям, дающим возможность исключать акустическое взаимодействие датчика с контролируемой средой, в которую он помещен, управлять избирательностью к измеряемой компоненте механического напряжения и электроупругостью с целью увеличения точности измерения [1].

Датчики, подключенные к возбуждающему пьезоэффект генератору и АЦП, представляют систему отображения информации о напряженном состоянии внутри контролируемого объекта. Конструктивно они представляют собой монолитное устройство в виде диска с высокой жесткостью и системой токовыводов, соединённых по схеме пьезотрансформатора.

На рис. 1 приведена схема, поясняющая принцип работы параметрического датчика механических напряжений (ПДМН).

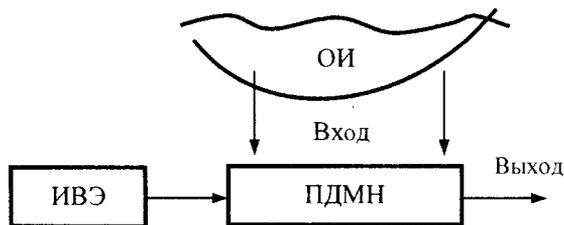


Рис. 1. Схема, поясняющая принцип работы ПДМН в системе отображения информации о напряжённом состоянии контролируемого объекта

Для преобразования измеряемой величины ПДМН питается от источника внешней энергии (ИВЭ), представляющего собой генератор колебаний. Полученный от ИВЭ поток энергии используется для транспортировки на выход датчика измерительной информации, полученной от объекта измерений (ОИ) и регистрируемой вольтметром в виде переменного электрического напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$. Поток энергии от ИВЭ значительно больше информационного потока от ОИ, и уровень измеряемого механического напряжения определяется отношением интенсивности информационного потока от ОИ к интенсивности информационного потока от ИВЭ.

На рис. 2 приведены зависимости выходных характеристик пьезодатчика механических напряжений от величины энергии, получаемой датчиком от ИВЭ, т.е. от величины возбуждающего датчик электрического напряжения $U_{\text{возб}}$ с генератора колебаний (рис. 3).

При исследованиях, в качестве чувствительных элементов датчиков использовалась пьезокерамика типа ЦТС-19.

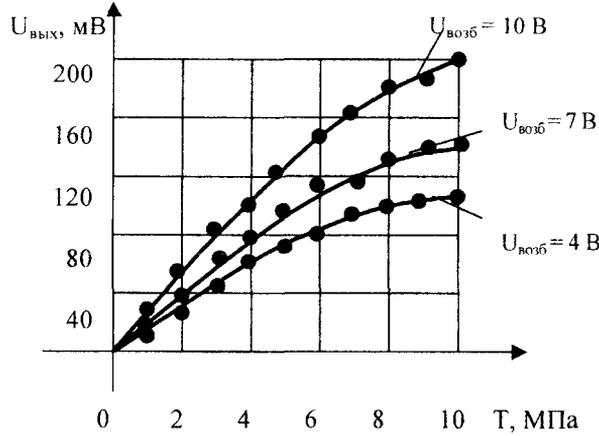


Рис. 2. Зависимость выходных характеристик пьезодатчика механических напряжений от величины $U_{\text{возб}}$

Из анализа характеристик следует, что чем больше потребляемая энергия от ИВЭ ($U_{\text{возб}}$ по сравнению с уровнем помех), тем больше может перенести она информации, т.е. тем выше уровень выходного сигнала $U_{\text{вых}}$. Однако чтобы отдать эту энергию на вход датчика механических напряжений, ОИ должен обладать, т.е. иметь достаточную негэнтропию [2]. Если же негэнтропия ОИ ниже уровня помех окружающего его фона, то измерение невозможно.

Таким образом, пьезоэлектрический датчик механических напряжений обладает избирательностью на определенную компоненту механических напряжений (например, нормальную компоненту вдоль оси Z). Избирательность пьезодатчиков достигается за счет того, что направление вектора электрического поля, возбуждающего пьезоэлемент, совпадает с направлением измеряемой компоненты механического напряжения. При этом используются два пьезоэлемента (см. рис. 3): первый (нижний) возбуждается электрическим способом и вынуждает колебаться второй (верхний), который возбуждается измеряемой компонентой механического напряжения.

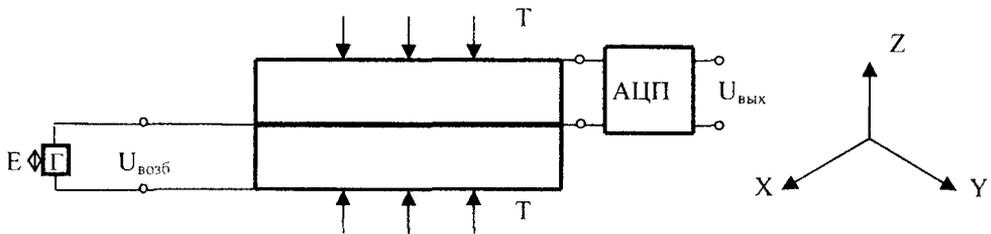


Рис. 3. Работа пьезодатчика в системе отображения информации о напряжённом состоянии контролируемого объекта

Эти процессы описываются уравнениями пьезоэффекта:

$$P^E = dT + \epsilon^T \cdot E;$$

$$S^T = d_j \cdot E + s^E \cdot T.$$

которые в данном случае будут иметь вид:

$$P_i^E = d_{ij} T_j;$$

$$S_j^T = d_{ij} E_i, \tag{1}$$

где P_i^E ; S_j^T – соответственно поляризация, измеряемая при постоянном электрическом поле E , и деформация, измеряемая при постоянном механическом напряжении T .

Первое выражение уравнений (1) характеризует работу пьезоэлемента, возбуждаемого механическим напряжением. Второе - работу пьезоэлемента, возбуждаемого электрическим полем.

С учетом известной матрицы пьезомодулей, например, для пьезокерамики типа ЦТС [3]

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Уравнение для пьезоэлемента, возбуждаемого электрическим полем, после преобразований, представляем в следующем виде:

$$\begin{aligned} S_1 &= d_{31} \cdot E_1; \\ S_2 &= d_{32} \cdot E_3; \\ S_3 &= d_{33} \cdot E_3; \\ S_4 &= d_{24} \cdot E_3; \\ S_5 &= d_{15} \cdot E_1; \\ S_6 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения для пьезоэлемента, возбуждаемого механическим напряжением, также после преобразований, представляем в виде:

$$\begin{aligned} P_1 &= d_{15} \cdot T_5; \\ P_2 &= d_{15} \cdot T_4; \\ P_3 &= d_{31} \cdot T_1 + d_{32} \cdot T_2 + d_{33} \cdot T_3. \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) следует, что для измерения интересующей нас компоненты механического напряжения, например, T_3 , действующей по оси Z , нужно возбудить деформацию одного пьезоэлемента в направлении оси Z , т.е. S_3 , которая возбуждается только вектором электрического поля E_3 (3) для S_3 . Тогда в другом пьезоэлементе, колеблющемся в этом же направлении под действием измеряемой компоненты механического напряжения T_3 , совпадающей с направлением электрического поля E_3 , возникает вектор поляризации P_3 (4) для P_3 .

В направлении компонент T_1 и T_2 не обеспечен динамический режим колебаний. Поэтому датчик к ним не чувствителен.

Таким образом, достигается превышение уровня энергии, которая отдается датчику от ОН и используется для переноса измерительной информации на выход, над уровнем помех, т.е. обеспечивается достаточность негэнтропии ОИ, что делает возможным измерение [2].

Датчики обладают высокой чувствительностью S_p , которая достигается за счет управления частотой колебаний. Управляя частотой за счет изменения условий крепления чувствительного элемента датчика, изменяют его чувствительность S_p - увеличение частоты колебаний приводит к увеличению S_p .

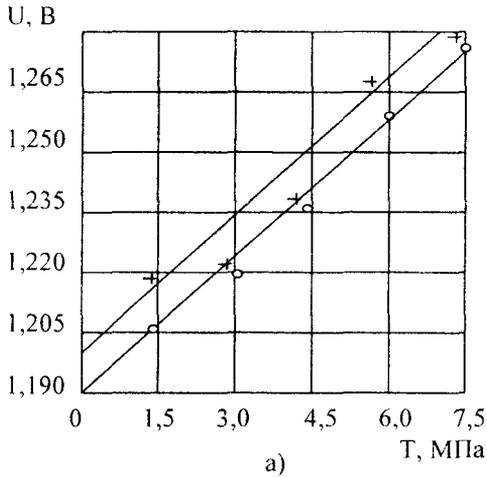
На рис. 4 приведены результаты экспериментальных исследований 2-х типов датчиков механических напряжений ПДМН-1 и ПДМН-2, возбуждаемых переменным электрическим напряжением 10 В на разных частотах.

Анализ их выходных характеристик, отражающих изменение выходного сигнала при увеличении механических напряжений от нуля (прямой ход функции преобразования) и уменьшение механических напряжений до нуля (обратный ход функции), у которых частота резонансных колебаний выше в два раза, обладают более высокой чувствительностью S_p . Установлено, что повышение частоты колебаний датчиков, работающих в резонансном режиме, именно в 2 раза, приводит к максимальному увеличению их S_p .

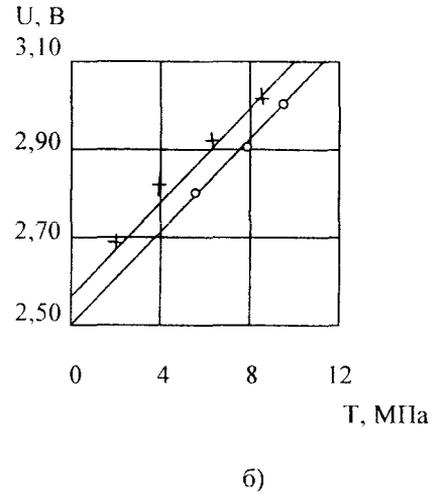
Согласно теореме Котельникова, увеличение в 2 раза частоты колебаний, резонансных в данном случае, позволяет передавать информацию без искажения, с максимальной скоростью и с минимальными потерями, что приводит к максимальному увеличению S_p датчиков механических напряжений. В пьезорезонансном датчике измеряемые статические механические напряжения внутри деформируемых сред

преобразуются за счет использования внешнего источника переменного напряжения и подключается ко входу АЦП (см. рис. 4). Полученная таким образом аналого-цифровая система получения информации о напряженном состоянии внутри деформируемых сред выдаёт последовательность дискретных значений сигнала, взятых через определенный интервал времени.

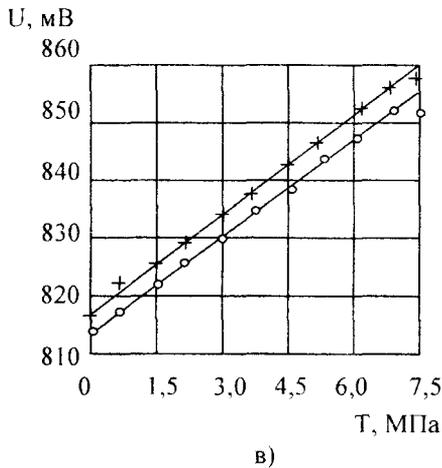
$$U_B = 10 \text{ В}; f = 800 \text{ Гц}; S_R = 12 \text{ мВ/МПа}$$



$$U_B = 10 \text{ В}; f = 400 \text{ Гц}; S_R = 5,2 \text{ мВ/МПа}$$



$$U_B = 10 \text{ В}; f = 1000 \text{ Гц}; S_R = 5,6 \text{ мВ/МПа}$$



$$U_B = 10 \text{ В}; f = 2000 \text{ Гц}; S_R = 10,6 \text{ мВ/МПа}$$

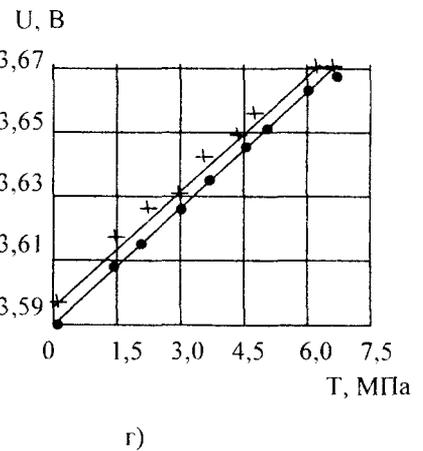


Рис. 4. Выходные характеристики датчиков:
а, б – ПДМН-1; в, г – ПДМН-2;
— ● — прямой ход функции преобразования;
— х — обратный ход функции преобразования

Важной задачей является проблема рационального выбора интервала дискретизации, поскольку при очень малом его интервале может оказаться неоправданно большое число отсчетов и, наоборот, при большом интервале могут быть большие информационные потери.

При проектировании измерительных систем получения информации о напряженном состоянии деформируемых сред с требуемой точностью первоочередной задачей является определение интервала дискретизации, при котором будет максимальная чувствительность при минимальных потерях информации. В основе решения этой задачи лежит обобщенная теорема отсчетов, связывающая величину интервала дискретизации с ошибкой воспроизведения исходного сигнала, т.е. определяющая соотношение спектральных свойств непрерывного и дискретного сигналов.

Пусть $X(t)$ – непрерывный сигнал, у которого спектр $S_x(f)$ ограничен максимальной частотой F . Тогда спектр дискретного сигнала получается суммированием смещенных спектров исходного сигнала:

$$S_D(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_x\left(f - \frac{n}{\Delta t}\right), \quad (5)$$

где Δt – интервал дискретизации; n – число точек дискретизации.

Очевидно, что максимальное значение интервала дискретизации, при котором возможно точное восстановление исходного непрерывного сигнала (или отсутствие потерь информации), равно $1/2F$, что соответствует теореме Котельникова.

Измерительные системы на основе пьезодатчиков механических напряжений обладают широким диапазоном линейности измерения за счет использования состояния антирезонанса и возможности работы в широком диапазоне температур ($-198...+200$) °С, погрешность измерения находится в пределах 1 ...2 % в зависимости от их типа и условий работы пьезодатчиков.

Выводы

Количество переносимой устройством информации зависит не от абсолютной величины, а от отношения с энергией других потоков, являющихся помехами (фоном) в процессе получения информации о напряженном состоянии контролируемой твердой деформируемой среды.

Для получения максимальной чувствительности при минимальных потерях информации необходимо увеличение именно в два раза частоты колебаний измерительного устройства, работающего в резонансном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубцов В.И. Экспериментальные методы и средства статических испытаний прочности деформируемых материалов с использованием пьезоэлектриков: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - Мн., 2001. - 38 с.
2. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. - М. - Л.: Физматгиз, 1960.
3. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. - М.: Энергия, 1978.