

МАГНИТОУПРУГАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Способность магнитоупругих материалов реагировать на прилагаемые к ним механические напряжения является основным качеством, определяющим возможность создания на их основе различных силоизмерительных устройств. Одно из основных требований, предъявляемых к таким устройствам,— обеспечение их достаточно высокой магнитоупругой чувствительности.

Чувствительность конкретных силоизмерительных устройств часто характеризуют абсолютными показателями — изменением сопротивления переменному току, приращением выходного сигнала (в вольтах, амперах, ваттах), отнесенным к единице усилия, т. е.

$$S_A = A / P, \quad (1)$$

где S_A — абсолютная чувствительность; A — уровень выходного сигнала в принятых единицах измерения; P — измеряемое усилие.

Показатели чувствительности, выраженные в абсолютных единицах, удобны для характеристики силоизмерителя, но не позволяют сопоставить преобразователи различных типов. Для этой цели в ряде случаев используют понятие относительной чувствительности преобразователя $S_{\text{отн.р}}$, представляющей собой отношение приращения сигнала под воздействием измеряемого усилия к исходному значению этого сигнала (при $P = 0$) и величине усилия или механическому напряжению S , когда речь идет об удельных нагрузках:

$$S_{\text{отн.р}} = (A_p - A_n) / A_n P; \quad S_{\text{отн}} = (A_p - A_n) / A_n S, \quad (2)$$

где A_n , A_p — начальное и конечное значения сигнала. Однако и эта характеристика не является достаточно общей, поскольку не может быть применена, например, к дифференциальному преобразователю, компенсация выходного сигнала которого обеспечена в самой конструкции.

Эффективность работы магнитоупругих преобразователей решающим образом определяется процессами, происходящими в магнитопроводе под воздействием внешнего магнитного поля и механических упругих напряжений, создаваемых измеряемым усилием, и, следовательно, может быть характеризована магнитными параметрами. При этом их относительное изменение также является более общей характеристикой, чем абсолютное. Такой метод оценки относительной магнитоупругой чувствительности материала S_M магнитопровода принят В.Ф. Майоровым:

$$S_M = \frac{\Delta \mu}{\mu_s} \cdot \frac{1}{S} = \frac{\mu_H - \mu_s}{\mu_s} \cdot \frac{1}{S}, \quad (3)$$

где $\Delta \mu$ — абсолютное приращение магнитной проницаемости под воздействием данного упругого напряжения σ при некотором неизменном значении напряженности H в магнитопроводе; $\mu = \mu_0 + \chi$; $\mu_0 = 1,256$ мкГн/м; μ_σ , μ_n — магнитная проницаемость при данном значении σ и при $\sigma = 0$.

Относительную магнитоупругую чувствительность S_M можно рассматривать в качестве основной характеристики магнитоупругого материала. Дополнительной характеристикой может служить абсолютная магнитоупругая чувствительность S_E , определяющая энергетические изменения, происходящие в материале под воздействием упругих напряжений:

$$S_E = \frac{H^2}{2} \cdot \frac{m_H - m_S}{S}, \quad (4)$$

Величина S_E характеризует мощность выходного сигнала, которая может быть получена с единицы объема материала, а величина S_M — поведение материала под воздействием упругих напряжений при условии, что эти напряжения, а также индукция (напряженность) магнитного поля имеют одну и ту же величину по всему объему материала. С приемлемой для практических расчетов точностью величина S_M может быть определена путем испытаний образца данного материала. Его толщина должна быть достаточно малой для того, чтобы при данной частоте намагничивающего тока проявление поверхностного эффекта было пренебрежимо малым.

Образец для испытаний растягивающим усилием может иметь форму пластины с продольным окном для размещения обмотки и специальными оконцевателями. При сжимающих усилиях образец должен обладать достаточно высокой устойчивостью, позволяющей избежать продольных изгибов. Он может иметь форму полного тонкостенного цилиндра с продольными окнами для обмотки или прямоугольную. Для сведения к минимуму влияния на результат измерений не нагружаемых усилием участков магнитопровода их ширина (площадь сечения) должна в 4 — 5 раз превышать ширину (площадь сечения) нагружаемых участков.

Магнитопроводы силоизмерительных преобразователей отличаются от описанных выше образцов значительно большей площадью сечения нагружаемых стержней магнитопровода и относительно меньшей шириной ненагружаемых участков. Суммарная площадь сечения стержней обычно принимается соответствующей номинальному значению измеряемого усилия с тем, чтобы напряжения составляли 20 — 100 МПа в зависимости от материала магнитопровода. Площадь поперечного сечения ненагружаемых участков обычно составляет от одной до трех площадей сечения стержней. При этом магнитное сопротивление ненагружаемых усилием участков магнитной цепи оказывается соизмеримым с сопротивлением нагружаемых стержней.

Относительная магнитоупругая чувствительность S_M для магнитопровода, изготовленного из пакета тонких пластин (в которых влияние поверхностного эффекта еще пренебрежимо мало) может быть определена из общего магнитного сопротивления R магнитопровода:

$$R = \sum \frac{l_i}{m_i q_i}, \quad (5)$$

где l_i — длина некоторого участка магнитного контура с неизменной площадью сечения q_i , в пределах которого магнитную проницаемость μ_i можно принять неизменной.

Если магнитопровод имеет, например, прямоугольную форму (два стержня, два ненагружаемых участка — ярма), то

$$R = \left(\frac{2l_{CT}}{q_{CT} m_s} + \frac{2l_{Я}}{q_{Я} m_n} \right) \cdot k_p, \quad (6)$$

где l_{CT} , $l_{Я}$ — длина стержня и ярма; q_{CT} , $q_{Я}$ — площадь поперечного сечения стержня и ярма; k_p — коэффициент, учитывающий некоторую неравномерность распределения нагрузки.

Из выражения (3) можем записать

$$\mu_\sigma = \mu_n / (1 + S_M \sigma). \quad (7)$$

Так же может быть решена и обратная задача — определение R магнитопровода по известным значениям μ_n , S_M , l_{CT} , q_{CT} , $l_{Я}$, $q_{Я}$.

Практически при оценке преобразователя обычно рассматривается изменение под воздействием усилий общего магнитного сопротивления магнитопровода, а не его отдельных участков в сочетании с ненагружаемыми участками. При этом магнитное сопротивление

$$R = \frac{l_{cp} (1 + S_k \mathcal{S})}{q_{cp} m_{n,cp}}, \quad (8)$$

где cp — индекс, соответствующий некоторому усредненному значению данного параметра по всему магнитопроводу; S_k — относительная магнитоупругая чувствительность реальной конструкции.

Обозначив значение R при отсутствии упругих напряжений через R_n , получим следующую зависимость магнитного сопротивления R_σ нагружаемого магнитопровода:

$$R_\sigma = R_n (1 + S_k \mathcal{S}). \quad (9)$$

Поскольку соотношение индуктивной и активной составляющих импеданса Z преобразователя (с отсутствующей или разомкнутой вторичной обмоткой) под воздействием механических напряжений в подавляющем большинстве случаев остается практически неизменным, импеданс Z можно рассматривать как величину, обратно пропорциональную магнитному сопротивлению магнитопровода, т. е. можем записать зависимость импеданса от механической нагрузки

$$Z_s = Z_n \frac{1}{1 + S_k \mathcal{S}}. \quad (10)$$

Соответственно зависимость проводимости

$$Y_{\sigma} = Y_{\text{н}} (1 + S_k S). \quad (11)$$

В тех случаях, когда перевод усилия в напряжение ($\sigma = Plq$) находят нецелесообразным, выражения (10) и (11) могут быть записаны в форме

$$Z_s = Z_{\text{н}} \frac{1}{1 + S_k P}; \quad Y_{\sigma} = Y_{\text{н}} (1 + S_k P),$$

причем величина S_k в этом случае принимается в q раз меньше, чем в уравнениях (10) и (11).

Относительная магнитоупругая чувствительность S_k реальной конструкции всегда несколько ниже S_m . Отношение S_k/S_m может служить показателем совершенства конструкции преобразователя и эффективности использования материала.