
КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 621.586

МАГНИТОУПРУГИЙ ЭФФЕКТ В ЭНЕРГО-ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Ю.О. Мичник

В статье рассматривается использование энерго-информационного метода (ЭИМ) научно-технического творчества для анализа магнитострикционных эффектов. Приводятся величины и параметры энерго-информационной модели для прямого магнитострикционного эффекта. Устанавливается связь между параметрами ЭИМ и свойствами магнитострикционных материалов.

Известно, что стрикция (лат. *strictio* – сжатие, натягивание) – изменение размеров и формы твердого тела при внешних воздействиях. Наиболее известными проявлениями данного эффекта являются:

- магнитострикция – изменение размеров и формы кристаллического тела при намагничивании (эффект Джоуля). Обратное по отношению к магнитострикции явление – эффект Виллари;
- механострикция – деформация тел, возникающая при наложении механических напряжений. Механострикция – следствие магнитострикции;
- электрострикция – деформация диэлектрика под действием внешнего электрического поля;
- термострикция – деформация тел под воздействием локального изменения температуры.

Вследствие стрикции в материале возникают упругие колебания, скорость которых будет определяться константами упругости и плотностью материала.

Данные эффекты широко используются при построении датчиков параметров движения. В настоящее время во многих отраслях промышленности нашли свое применение магнитострикционные преобразователи параметров движения (МСПД). Они характеризуются высокой точностью, стабильностью при внешних возмущениях и малой стоимостью.

Модели, описывающие МСПД, широко известны¹. Однако при всех их преимуществах они обладают малой наглядностью с точки зрения понимания физики процесса и большой сложностью при использовании в поисковом автоматизированном проектировании.

Магнитомеханический эффект

Рассмотрим магнитострикционный эффект подробнее.

В магнитострикционном преобразователе происходит композиционное преобразование энергии: из электромагнитной в механическую, а затем из механической в стрикционную (акустическую). Данная трактовка принимается из методических соображений².

При этом происходит преобразование входного электромагнитного сигнала в механическое напряжение звукопровода (звено 1), вследствие которого по нему распространяется упругая (ультразвуковая) волна (звено 2). Схема преобразования прямого магнитострикционного эффекта (эффекта Джоуля) представлена на рис. 1.

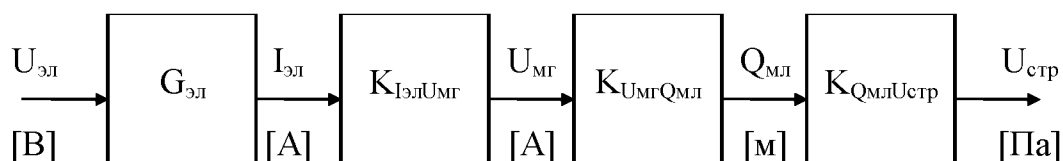


Рис. 1. Прямой магнестрикционный эффект (эффект Джоуля):

$U_{эл}$ – электрическое напряжение, приложенное к обмотке катушки, В;

$I_{эл}$ – электрический ток, наведенный в обмотке катушки, А;

$U_{мг}$ – магнитодвижущая сила, А;

$G_{эл}$ – электрическая проводимость при постоянном потоке (при $U_{мг} = const$), т.е. величина, обратная активному сопротивлению обмотки плюс сопротивление индуктивности рассеяния, 1/Ом;

$K_{ГэлUмг}$ – коэффициент электромагнитной связи (витки);

$K_{UмгQмл}$ – коэффициент магнитомеханической связи, А/м;

$Q_{мл}$ – механический линейный заряд, т. е. деформация, м;

$K_{QмлUстр}$ – коэффициент механострикционной связи, м/Па = м²*с²/кг;

$U_{стр}$ – стрикционное воздействие, т.е. механическое напряжение, Па

Энерго-информационный метод проектирования новых технических решений

При конструировании датчиков перед инженерами возникают задачи поиска не только новых физических принципов действия, но и задачи сравнения и улучшения характеристик существующих технических решений. Широкое внедрение САПР даже на начальных этапах разработки ЧЭ датчиков позволит расширить объем используемых специалистами знаний, сократить время и трудоемкость создания новых изделий за счет выбора наиболее эффективных решений при их моделировании на ЭВМ и, как следствие, уменьшить стоимость. Поэтому актуальной становится задача создания автоматизированной системы синтеза новых технических решений чувствительных элементов чувствительных элементов (ЧЭ) для систем управления различного назначения, поиска и анализа прототипов и аналогов.

Одним из способов реализации такого подхода является использование автоматизированного банка данных физико-технических эффектов (ФТЭ) и изобретений³. Увеличение объема информации в банке данных, связанное с появлением новых ФТЭ и изобретением новых промышленных образцов, значительно расширяет возможности эффективного синтеза технических решений и анализа существующих конструкций. Пополнение имеющегося банка данных хотя бы одним ФТЭ позволяет получить большее количество новых вариантов физического принципа действия (ФПД) технического устройства, и, следовательно, необходимая часть системы – это автоматизированный отбор наилучших из полученных вариантов. Энерго-информационная модель цепей (ЭИМЦ) различной физической природы и аппарат параметрических структурных схем (ПСС) являются одним из подобных методов. Использование ЭИМЦ и ПСС требует большего времени для составления паспортов ФТЭ, но в то же время позволяет сделать процесс поискового конструирования технических устройств более содержательным, раскрывает качественные и количественные связи, акцентирует внимание разработчиков на наиболее ответственных узлах объекта. И, кроме того, позволяет перейти к структурной схеме устройства в целом и по ней составить уравнение, т.е. дать количественную оценку характеристик устройства.

Основные понятия ЭИМЦ

Целью определенной физической природы называется идеализированная материальная среда, имеющая определенные геометрические размеры и характеризующаяся физическими константами, присущими только явлениям данной физической природы.

Величины цепи одной и той же физической природы изменяются в широких пределах и характеризуют внешнее воздействие на цепь данной физической природы и ее реакцию на него.

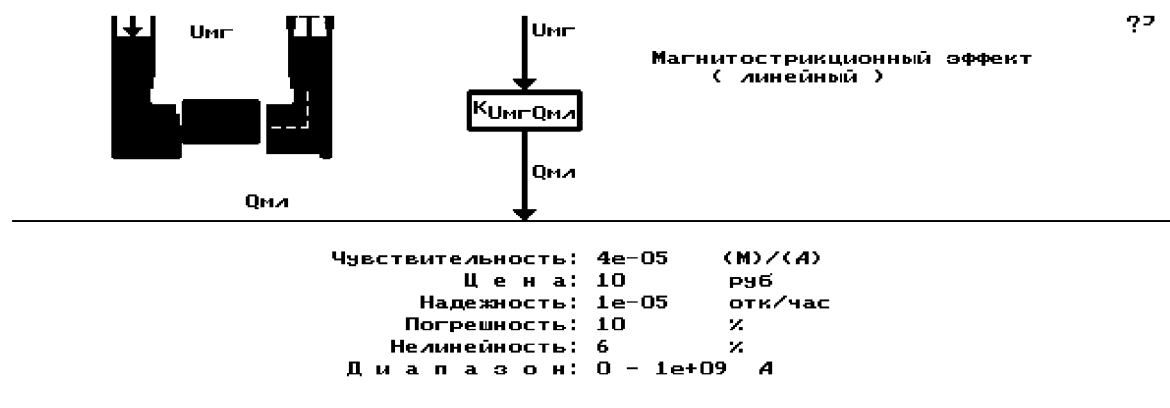
Параметры характеризуют относительную неизменность материальной среды, в которой протекают физические процессы.

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Энерго-информационная модель оперирует обобщенными величинами и параметрами: N – мощность, P – импульс, Q – заряд реакции, U – сила воздействия, I – скорость реакции, R – сопротивление, G = 1/R – проводимость, C – емкость, W = 1/C – жесткость, L – индуктивность, D = 1/L – дедуктивность.

Синтезированные параметрические структурные схемы в ЭИМЦ ранжируются с помощью 10 параметров, важнейший из которых⁴ – чувствительность.

Энерго-информационный метод реализован в системе поиска новых научно-технических решений «Интеллект». В настоящее время в системе «Интеллект» имеется информация о более чем 300 ФТЭ, в том числе о прямом магнитострикционном эффекте (рис. 2).



Эффект заключается в возникновении в некоторых антиферромагнетиках деформации при воздействии на них магнитным полем.

Рис. 2. Магнитострикционный эффект

Энерго-информационная модель магнитострикционного эффекта

Примем в качестве величины воздействия величину индукции магнитного поля B с размерностью [Тл] = $[\frac{кГ}{с^2 * А}]$, так как именно данная величина является базовой при прямом магнитострикционном эффекте. Если принять индукцию в качестве величины воздействия, то в качестве параметра реакции должна выступать величина с размерностью $\frac{M^2 * A}{с}$, которая есть отношение магнитного момента p_m к времени воздействия t или более точно $\frac{dp_m}{dt}$. Физический смысл данной величины есть скорость изменения магнитного момента, возникающего из-за деформации образца в магнитном поле.

Тогда на основе понятия полного термодинамического потенциала внешнего воздействия, а также после применения теории подобия и анализа размерностей могут быть выведены основные величины и параметры (см. табл.).

Физический смысл емкости C есть (с точностью до коэффициента) механический момент $M = p_m \times B$ образца.

Далее воспользуемся известной зависимостью:

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{H^2}{2} * \left[\beta \chi - \left(\frac{\partial \chi}{\partial p} \right)_T \right] \Rightarrow H \cong \sqrt{\frac{2 * \Delta V * 1}{V * k}} = \sqrt{\frac{2 \lambda}{k_v}}$$

где λ_v – объемная магнитострикция, H – напряженность магнитного поля,

$\beta - \frac{1}{V} * (T \frac{V}{T_p})_{H,T}$ – изотермическая сжимаемость материала, $\chi - \frac{p_m}{HV}$ – изотермическая магнитная восприимчивость (причем обычно χ не зависит от H и может считаться характеристическим свойством образца), k – коэффициент, равный $[\beta\chi - (\frac{\partial\chi}{\partial p})_T]$.

Таблица

Основные величины и параметры

Величины		
Воздействие	$U = B [Тл]$	(1)
Реакция	$I = \frac{dp_m}{dt} = [\frac{M^2 * A}{c}]$	(2)
Заряд	$Q = p_m [M^2 * A]$	(3)
Импульс	$P = \int B * dt = [\frac{кз}{A * c}] = [Тл * с] = [кг/Кл]$	(4)
Параметры		
Емкость	$C = \frac{Q}{U} = \frac{p_m}{B} = [\frac{M^2 * A^2 * c^2}{кз} = \frac{Bб * A}{M^3 * M}]$ $= \rho_m * H$	(5)
Сопротивление	$R = \frac{\int B * dt}{p_m} = [\frac{кз * с}{A^2 * M^2}]$	(6)
Проводимость	$G = \frac{p_m}{\int B * dt} = [\frac{A^2 * M^2}{кз * с}]$	(7)
	$W = \frac{1}{C} = \frac{B}{p_m} = [\frac{кз}{M^2 * A^2 * c^2}]$	(8)
Индуктивность	$L = P/I = \frac{(\int B * dt) * dt}{dp_m} = [\frac{кз}{A^2 * M^2}]$	(9)

Примечание: ρ_m – плотность магнитного заряда, H – напряженность магнитного поля, p_m – магнитный момент.

Из равенства $B = \mu_0 * (1 + \frac{C}{T - T_c}) * H$, где μ_0 – магнитная постоянная, T – температура материала, T_c – точка Кюри, C – постоянная Кюри, получаем $B = \mu_0 * (1 + \frac{C}{T - T_c}) * \sqrt{\frac{2\lambda_v}{k}}$, что позволяет связать величину воздействия с параметрами материала, где μ_0 – магнитная постоянная, T – температура материала, T_c – точка Кюри, C – постоянная Кюри, λ_v – объемная магнитострикция.

Таким образом, в рамках ЭИМ возможно построить модель магнитострикционного эффекта, которая пригодна для автоматизации научно-технического творчества с помощью системы «Интеллект» и учитывает свойства магнитострикционных материалов.

В магнитострикционных эффектах осуществляется преобразование входной величины U_{mg} магнитной цепи в величину Q_{ml} механической линейной цепи. Таким образом, схема прямого магнитострикционного эффекта есть $U_{mg} - KU_{mg}Q_{ml} - Q_{ml}$, где $KU_{mg}Q_{ml}$ есть коэффициент преобразования (или чувствительность) магнитострикционного эффекта.

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Согласно определению чувствительность – отношение изменения выходной величины $V_{\text{ВЫХ}i}$ к изменению входной величины $V_{\text{ВХ}j}$:

$$K(B_{\text{--}j}) = \frac{dB_{\text{--}i}}{dB_{\text{--}j}}$$

Причем в общем случае $V_{\text{ВЫХ}i}$ и $V_{\text{ВХ}j}$ – величины разной физической природы ($i \neq j$) 1.

Известно⁵, что для характеристики интенсивности магнитоэлектрических колебаний в переменном магнитном поле при наличии постоянного подмагничивания вводится магнитоэлектрическая постоянная a :

$$a = \frac{\Delta \sigma}{\Delta B} \quad \text{при} \quad \frac{\Delta I}{I} = 0 \quad [\text{А/М}] \quad (1)$$

Важным параметром магнитоэлектрических материалов является коэффициент магнитоэлектрической связи $K_{\text{ММ}}$:

$$K_{\text{ММ}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot \mu}{E}} = \sqrt{\frac{\mu \cdot E \cdot \lambda_s}{B}} \quad (2)$$

где λ_s – магнитоэлектричество при насыщении намагничивания; μ – действующая магнитная проницаемость материала звукопровода при наличии постоянного подмагничивающего поля, Н/А²; E – модуль упругости, Па.

В работе⁶ коэффициент магнитоэлектрической связи рассматривается как

$$K_{\text{УМГМЛ}} = k \cdot a = F/\Phi \quad (\text{при } x=0) = M/x \quad (\text{при } \Phi=0) \quad [\text{А/М}] \quad (2)$$

где x – деформация, м; a – магнитоэлектрический коэффициент (см. выше, А/М), k – безразмерный коэффициент, зависящий от устройства преобразователя; Φ' – производная магнитного потока по времени, Вб; Φ – магнитный поток, Вб; F – сила, Н.

Таким образом, коэффициент магнитоэлектрической связи $K_{\text{ММ}}$ характеризует эффективность энергетических преобразований подводимой магнитной энергии в энергию упругих волн и, наоборот, может выступать в качестве параметра чувствительности при описании магнитоэлектрического эффекта с помощью энерго-информационного метода.

Существующая модель прямого магнитоэлектрического эффекта, включенная в систему «Интеллект», не учитывает свойства магнитоэлектрических материалов. Это является существенным недостатком модели, так как свойства материалов (и, соответственно, параметры устройств) вариативны, зависят от методики получения материала и условий эксплуатации аппаратуры, других факторов.

Поскольку предложенная модель связывает параметры ЭИМЦ и параметры ФТЭ со свойствами магнитоэлектрических материалов, то она дает возможность учесть свойства материалов при проектировании датчиковой аппаратуры, что особенно важно при разработке прецизионной и высокочувствительной техники.

¹ Скучик Е. Основы акустики. Т. 1. М., 1973.

² Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. М., 1973.

³ Заринов М.Ф., Зайнуллин Н.Р., Петрова И.Ю. Энерго-информационный метод научно-технического творчества. М.: ВНИИПИ, 1988.

⁴ Там же.

⁵ Захарьящев Л.И. Конструирование линий задержки. М., 1972.

⁶ Харкевич А.А. Указ. соч. М., 1973.