

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ИНДУКТИВНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Рассмотрены вопросы возбуждения оптимальных по форме нормальных упругих ультразвуковых волн (УЗВ) в информационных магнитострикционных системах технологического оборудования (МСТО) с сигнальными распределенными индуктивными преобразователями.

Проблемы обеспечения высокого качества продукции при постоянном повышении точности и производительности являются особенностью современного этапа развития технологического оборудования. Успешное их решение в значительной степени зависит от использования средств автоматизации при должном уровне информационного обеспечения.

Высокие требования к выходным характеристикам технологического оборудования предопределяют преимущественное развитие *замкнутых* технологических систем, где исключительно важную роль играют *системы автоматического* управления с многоконтурной обратной связью (ОС). Одним из основных ее элементов по контуру ОС является *информационная система* (ИС), осуществляющая идентификацию и обработку *первичной технологической информации* через механические и теплотехнические величины (*перемещение, усилие, крутящий момент, плотность, давление, температура* и др.) в ходе выполнения технологического процесса и формирования информационных потоков, значимость которых отражается в показателях точности обрабатываемых деталей (заготовок), уровне повышения производительности обработки и динамических характеристиках процессов управления и регулирования.

Идентификация первичной технологической информации в обрабатывающем автоматизированном технологическом оборудовании сегодня осуществляется посредством технических средств ИС – измерительных преобразователей и приборов (ИП) на основе оптических, ультразвуковых и электромагнитных эффектов, которые имеют известные достоинства и недостатки и не всегда в полной мере удовлетворяют предъявляемые требования [1]. В связи с этим предпочтение отдается *волновым ИС* с малой длиной волны-носителя измерительной информации о состоянии технологического объекта управления (ТОУ).

Одним из новых направлений в этой области в нашей стране и за рубежом является применение *ультразвуковых волновых ИС*, использующих

эффекты продольной магнитострикции – *информационные магнитострикционные системы*, которые по сравнению с оптическими системами несколько уступают по точности и разрешающей способности, но обладают гораздо большими функциональными возможностями и значительно дешевле в изготовлении.

Сегодня *магнитострикционной информационной технологией* интенсивно занимаются ведущие фирмы США, Франции, Германии, Японии. Толчком этому послужили определенные успехи микроэлектроники вычислительной техники и создание промышленных магнитострикционных *интерметаллических R-сплавов* ($TbFe_2$, $DyFe_2$, $SmFe_2$ и др.) и *аморфных соединений с гигантской магнитострикцией* ($\lambda \geq 2,5 \times 10^{-3}$), что позволяет существенно улучшить выходные характеристики и упростить конструкцию первичных преобразователей *магнитострикционных приборов* (МСП) [2-3], как базовых элементов информационных систем средств автоматизации АСУТП.

Существуют магнитострикционные информационные системы [1], в которых применяются МСП с сигнальными распределенными магнитострикционными преобразователями (РМП). Они могут выполнять функцию источника и/или приемника информационных ультразвуковых волн (УЗВ), формируемыми в магнитострикционном чувствительном элементе (МЧЭ) акустического тракта прибора при подаче токового видеопульса в распределенную обмотку РМП с подвижным кольцевым или стержневым магнитом-поляризатором М. Перемещение поляризатора М по закону движения ТОУ в пределах рабочего диапазона РМП МСП позволяет выполнить идентификацию параметров движения объекта с высокой точностью ($\gamma_0 = 0.2 - 0.5\%$) [1].

При проектировании технических средств магнитострикционных ИС с сигнальными РМП под конкретную техническую задачу возникает необходимость в определении желаемых конструктивных параметров и информационных характеристик МСП системы. В этом случае целесообразно проведение математического моделирования с ис-

пользованием нижеприведенных моделей РМП, полученных по расчетной схеме рисунка 1.

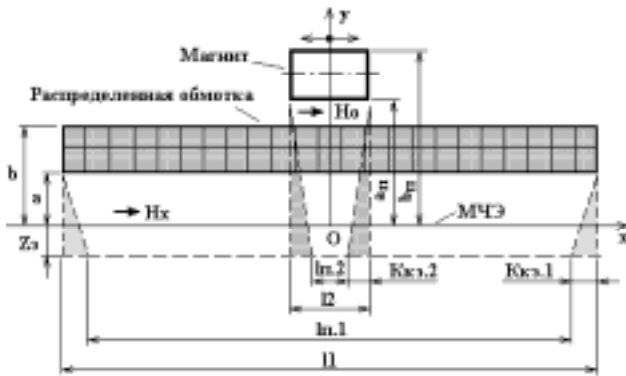


Рисунок 1. Расчетная схема РМП МСП магнитоэлектрической системы:

a, b, a_n, b_n – расстояния от поверхности МЧЭ до нижнего и верхнего слоев обмотки и поляризатора; l, l₁, l₂, l_{кэ.1}, l_{кэ.2} – собственные и эффективные длины обмотки и поляризатора; K_{кэ.1}, K_{кэ.2} – краевые эффекты; Z_э – скин-слой; X, Y – координаты

Рассмотрим случай, когда РМП выступает в качестве источника возбуждения УЗВ в среде МЧЭ акустического тракта системного МСП. Для этого на выводы его распределенной обмотки (индуктивный преобразователь) подают токовые импульсы записи требуемой формы (рисунок 2) для получения необходимой величины отношения сигнал/шум (помехоустойчивости), которые описываются следующими выражениями:

а) для одинарного прямоугольного импульса (рис. 2, а):

$$i_{x,1}(t) = i_m \cdot \left\{ \frac{\tau_n}{T} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \tau_n}{T}\right) \right\}$$

б) для парного однополярного прямоугольного видеоимпульса (рис. 2, б):

$$i_{x,2}(t) = i_m \cdot \left\{ \frac{2\tau_n}{T} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \tau_n}{T}\right) \cdot \cos[n \cdot 2\pi \cdot f(t - \tau_n)] + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \tau_n}{T}\right) \cdot \cos[n \cdot 2\pi \cdot f(t - 3\tau_n)] \right\}$$

в) для однополярного симметричного прямоугольного видеоимпульса (рис. 2, в):

$$i_{x,3}(t) = i_m \cdot \left\{ \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \tau_n}{T}\right) \cdot \cos[n \cdot 2\pi \cdot f(t - \tau_n)] - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \tau_n}{T}\right) \cdot \cos[n \cdot 2\pi \cdot f(t - 2\tau_n)] \right\}$$

г) для модулированного импульса с прямоугольной огибающей (рис. 2, г):

$$i_{x,4}(t) = \frac{i_m}{2} \cdot \left\{ \frac{\tau_n}{T_M} \sin(\omega_0 \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(n \cdot \omega_m \cdot \frac{\tau_n}{2}\right) \cdot \sin[(\omega_0 + n \cdot \omega_m) \cdot t] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(n \cdot \omega_m \cdot \frac{\tau_n}{2}\right) \cdot \sin[(\omega_0 - n \cdot \omega_m) \cdot t] \right\}$$

где τ_n – длительность импульса записи; i_m – амплитудное значение токового сигнала; $T = 1/f$ – период следования импульсов; $T_M = 1/f_M$ – период модуляционного сигнала; $\omega_0 = 2\pi \cdot f_M$ – круговая частота; n – число гармоник.

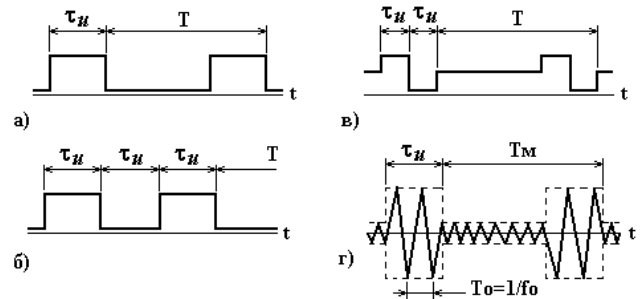


Рисунок 2. Формы сигналов возбуждения УЗВ

Прохождение токового сигнала через распределенную обмотку сигнального РМП создает в ее рабочем пространстве однородное продольное магнитное поле напряженностью при:

а) однослойной обмотке индуктивного преобразователя:

$$H_{x,пов.1}(t) = \int_{x-ll/2}^{x+ll/2} i_x(t) \cdot W \frac{a}{\pi(a^2 + x^2)} dx = i_x(t) \frac{W_1}{\pi} \left[\arctan\left(\frac{x+ll/2}{a}\right) - \arctan\left(\frac{x-ll/2}{a}\right) \right]$$

б) многослойной обмотке индуктивного преобразователя:

$$H_{x,пов.2}(t) = \int_a^b H_{x,пов.2}(t) \cdot dy = i_x(t) \frac{W_2}{\pi} \left\{ b \left[\arctan\left(\frac{x+ll/2}{b}\right) - \arctan\left(\frac{x-ll/2}{b}\right) \right] - a \left[\arctan\left(\frac{x+ll/2}{a}\right) - \arctan\left(\frac{x-ll/2}{a}\right) \right] + \frac{(x+ll/2)}{2} \ln \left[\frac{b^2 + xll + (x^2 + ll^2/4)}{a^2 + xll + (x^2 + ll^2/4)} \right] + \frac{(x+ll/2)}{2} \ln \left[\frac{a^2 - xll + (x^2 + ll^2/4)}{b^2 - xll + (x^2 + ll^2/4)} \right] \right\}$$

где W, W_1, W_2 – число ампер-витков обмоток РМП при разном исполнении, которое в зоне эффективного магнитомеханического преобразования (эф. Джоуля) $l_{n,2} \ll l_{n,1}$, определяемое величинами коэффициентов краевого эффекта обмотки и поляризатора как: $K_{кэ} = \exp[(\pi \cdot x_3 \cdot \sqrt{c/(c+1)})/l]$, где l – исходный конструктивный размер, $x_3 = V_b \cdot \tau_n$ – эквивалентная длина зоны эффективного преобразо-

вания, s – расстояние до средней линии элемента, суммируется с продольным полем напряженности H_0 поляризатора, если их векторы совпадают. В результате формируется результирующее поле (в случае многослойного РМП):

$$H_{x,нов}(t) = \text{sgn}[H_0 \cdot K_{кз,2} + H_{x,2}(t)] = \frac{1}{\pi} \left\{ \text{sgn}(i_0) W_1 \left[\arctan\left(\frac{\Delta X + l_2/2}{a_n}\right) - \arctan\left(\frac{\Delta X - l_2/2}{a_n}\right) \right] \cdot e^{\pi x_3^2 B_1} + \{i_x(t) \cdot W_2 \left[b \left(\arctan\left(\frac{x + l_1/2}{b}\right) - \arctan\left(\frac{x - l_1/2}{b}\right) \right) - a \left(\arctan\left(\frac{x + l_1/2}{a}\right) - \arctan\left(\frac{x - l_1/2}{a}\right) \right) + \left(\frac{x + l_1/2}{2}\right) \cdot \ln A_1 + \left(\frac{x - l_1/2}{2}\right) \cdot \ln A_2 \right] \times e^{\pi x_3^2 B_2} \} \right\}, \text{ здесь}$$

$$\Delta X = (\pm X + x) \leq \frac{l_{n,1}}{2},$$

$$A_1 = \frac{b^2 + x \cdot l_1 + [x^2 + (l_1/2)^2]}{a^2 + x \cdot l_1 + [x^2 + (l_1/2)^2]},$$

$$A_2 = \frac{a^2 - x \cdot l_1 + [x^2 + (l_1/2)^2]}{b^2 - x \cdot l_1 + [x^2 + (l_1/2)^2]},$$

$$B_1 = \sqrt{\frac{C_{\Pi}}{C_{\Pi} + l_2}} \cdot \frac{1}{l_1},$$

$$B_2 = \sqrt{c/(c + l_1)} / l_1,$$

$S_{\Pi} = (a_n + b_n) / 2$ – расстояние от поверхности МЧЭ до линии среднего сечения поляризатора, X – его смещение от оси продольной симметрии РМП МСП.

Величину продольного магнитного поля H_0 магнито-поляризатора сигнального РМП системного МСП можно определить по методу эквивалентного соленоида, через который проходит постоянный ток i_0 одного направления, при котором векторы полей H_x и H_0 совпадают. Используя расчетную схему, приведенную на рисунке 3, имеем:

$$H_0 = \frac{W_{0,\Pi}}{\mu_0} \cdot \exp\left[-\frac{4 \cdot \ln(K_{кз,2})}{l_m^2} \cdot x_3^2\right],$$

где созданная им индукция $B_{0,n} = B_r$ (остаточная) продольного магнитного поля H_0 в произвольной точке a, x рабочего пространства РМП составляет величину, описываемую выражением:

$$B_{0,n} = \mu_0 \cdot H_0 = \frac{\mu_0}{\pi} \sum_{i=1}^m \frac{I_{a,m[X+(i-1) \cdot h_0]}}{(a + C_m) \sqrt{[C_m(1+a)]^2 + [X + (i-1) \cdot h_0]^2}} \times \{C_1 \frac{C_m^2 + (a + C_m)^2 + [X + (i-1) \cdot h_0]^2}{[C_m(1-a)]^2 + [X + (i-1) \cdot h_0]^2} - C_2\},$$

здесь C_1, C_2 – эллиптические интегралы 1-го и 2-го порядков аргумента:

$$k_3^2 = \frac{4 \cdot C_m(a + C_m)}{[C_m(1+a)]^2 + [X + (i-1) \cdot h_0]^2},$$

которые описываются выражениями:

$$C_1 = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \sum_n \left[\frac{(2n-1)!!}{2^n \cdot n!} \right] \cdot \frac{k_3^{2n}}{2n-1} \right\} = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{2}{2} k_3^2 - 30 \cdot k_3^4 - \dots \right\},$$

$$C_2 = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^4 \left[\frac{(2n-1)!!}{2^n \cdot n!} \right]^2 \cdot k_3^{2n} \right\} = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{4} k_3^2 + 8100 \cdot k_3^4 + \dots \right\},$$

при известных: μ_0 – магнитной постоянной, C_m, h, l_m – полутолщине, ширине и длине эквивалентного соленоида, h_0 – шаг между его n витками.

Это импульсное результирующее магнитное поле под поляризатором РМП возбуждает УЗВ соответствующей полярности:

$$\sigma_x(t) = \text{sgn} \left[\sum_j \lambda \cdot E \cdot K_{\mu,i} \cdot K_{\mu,m} (1 - e^{-\tau_n/\Theta}) \cdot A_j(\tau_n) \cdot H_x(t) \cdot \exp(\tau_n/2 - \tau_n) \right],$$

где λ – коэффициент магнотрикции, E – модуль Юнга, $K_{\mu,i}$ – коэффициент магнитной проницаемости материала в сечениях МЧЭ i -той формы, $K_{\mu,m}$ – коэффициент магнитомеханического преобразования, Θ – фазовое сопротивление цепи записи, $A_j(\tau_n)$ – параметр, описывающий гармонический спектр возбуждаемого сигнала, τ_n – эффективная

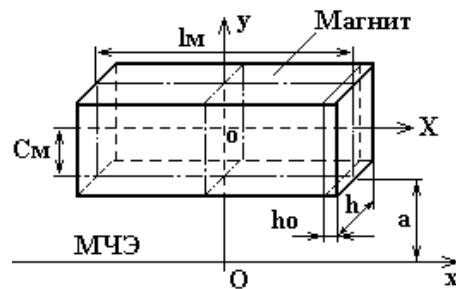


Рисунок 3. Расчетная схема поляризатора РМП

длительность сигнала записи, $j = 2, 3, 4, 8$ – число перепадов одинарного токового импульса записи, которая транслируется вдоль МЧЭ и считывается выходным сигнальным преобразователем через искомое время измерительного преобразования $T_x = L_x / V$, где L_x – положение ТОУ в координа-

тах ТС, V – фазовая скорость УЗВ в акустической среде, формируя цифровой код $N_x = T_x \cdot f_o$, где f_o – частота дискретизации [2-3].

Приведенные математические модели сигнальных РМП системных МСП имеют точность 5-7% при общепринятых ограничениях [1].

Список использованной литературы:

1. Демин С.Б. Информационно-измерительные системы металлорежущего оборудования. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во ПензГУ, 2000. – 75 с.
2. А.с. 1573343 (СССР). МКИ: G01B17/00. Преобразователь линейных перемещений / С.Б. Демин // Оpubл. 23.06.90, Бюлл. №23.
3. А.с. 1757428 (СССР). МКИ: G01B17/00. Магнитострикционный преобразователь перемещений / С.Б. Демин // Оpubл. 30.08.92, Бюлл. №32.
4. Патент 2075728 (РФ). МКИ: G01C9/06. Ультразвуковой преобразователь угла наклона / С.Б. Демин // Оpubл. 20.03.97, Бюлл. №8.