

МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены математические модели импульсных магнитных полей, формируемых сигнальными индуктивными преобразователями, для возбуждения нормальных упругих ультразвуковых волн в акустических трактах информационных магнитострикционных систем.

Одним из направлений автоматизации технологических процессов изготовления и сборки деталей является применение волновых информационных магнитострикционных систем, использующих эффекты продольной магнитострикции. Такие системы несколько уступают по точности и разрешающей способности оптическим системам, но имеют гораздо больше функциональных возможностей, значительно дешевле в изготовлении и надежнее в работе [1].

В настоящее время магнитострикционной информационной технологией занимаются ведущие фирмы США, Франции, Германии, Японии. Подобные разработки ведутся и в России. Толчком этому послужило развитие микроэлектроники и вычислительной техники, а также создание перспективных промышленных магнитострикционных интерметаллических R -сплавов и аморфных соединений с гигантской магнитострикцией [2], позволяющих существенно улучшить выходные характеристики и упростить конструкцию магнитострикционных приборов и систем. Основными сигналообразующими элементами таких систем являются сигнальные магнитострикционные преобразователи с индуктивными обмотками, через которые осуществляется возбуждение нормальных упругих ультразвуковых волн (УЗВ) в магнитострикционных чувствительных элементах (МЧЭ) акустического тракта [1].

Качество сигналообразующих процессов в МЧЭ прежде всего отражается на метрологических и эксплуатационных характеристиках волновых приборов и систем. Поэтому, разработка математических моделей сигнальных магнитострикционных преобразователей, учитывающих их конструктивные параметры, сегодня актуальна и направлена на совершенствование данных приборов и систем и на их промышленное освоение.

Возбуждение упругих УЗВ в среде магнитострикционного чувствительного элемента связано с магнитострикционным преобразованием, в основе которого лежат известные эффекты Д.П. Джоуля и Г. Видемана-

на. Эффекты выражаются в относительном изменении первоначальной длины l_H МЧЭ в направлении вектора воздействующего магнитного поля напряженности H и описываются известным уравнением:

$$\xi_M = \operatorname{sgn} \left(\frac{l_K - l_H}{l_H} \right), \quad (1)$$

где l_H, l_K — начальный и конечный размеры МЧЭ.

Выразив уравнение (1) через коэффициент пропорциональности $K_\xi = (\partial \xi_M / \partial H)_\sigma$ относительного изменения длины МЧЭ при локальном воздействии импульсного продольного или геликоидального поля $H(t)$, для которого выполняется закон Гука, можно определить величину элементарных волновых напряжений в сечениях S носителя (МЧЭ) разного профиля:

$$\delta_x(t) = E \xi_M(t) = K_\xi E H(t) = K_\xi \frac{E}{\mu_a S} \Phi(t), \quad (2)$$

где E — модуль Юнга; $\mu_a = \mu_0 \mu$ — абсолютная магнитная проницаемость, μ_0 — магнитная постоянная, μ — магнитная проницаемость материала; Φ — магнитный поток; σ — напряжение в сечении МЧЭ.

При наличии в зоне магнитострикционного преобразования ферромагнитного МЧЭ магнитный поток изменяется по законам средних значений индукции \bar{B} и проницаемости $\bar{\mu}$ [3], отражая его форму и однородность:

$$\Phi_x(t) = \bar{B}_x(t) S = \mu_0 \bar{\mu} H_x(t) S,$$

что позволяет записать выражение (2) в виде

$$\delta_x(t) = \lambda E \frac{\bar{\mu}}{\mu} H_x(t) = \lambda E K_\mu H_x(t), \quad (3)$$

где λ — коэффициент продольной магнитострикции; K_μ — коэффициент магнитной проницаемости, вносимый дополнительными потерями из-за магнитной вязкости и поверхностного эффекта; принимаем, что в пределе коэффициент пропорциональности $K_\xi = \lambda$.

Из выражения (3) следует, что характер напряжений $\delta_x(t)$ полностью определяется законами флуктуаций средней проницаемости $\bar{\mu}$ магнетика (МЧЭ), проницаемостью μ его материала, напряженностью импульсного магнитного поля $H_x(t)$ и сопряжен с процессами перемагничивания, лежащими в области технического намагничивания магнетиков на практически линейном участке характеристической кривой $J = f(H)$ намагничивания [2, 3].

В информационных магнитострикционных системах [1] для возбуждения нормальных упругих УЗВ в среде МЧЭ применяют сигнальные

сосредоточенные или распределенные магнитоstrictionные преобразователи (СМП или РМП) с круговыми или прямоугольными катушками индуктивности прямоугольного сечения с заданным числом W равномерно уложенных витков обмоточного провода.

Рассмотрим процессы формирования продольных импульсных магнитных полей в зоне магнитоstrictionного преобразования данных систем посредством сигнальных СМП и РМП.

Простейший СМП представляет собой круговой или прямоугольный соленоид с определенным числом витков. Его форма определяется профилем поперечного сечения МЧЭ при размещении в направлении продольной оси x сигнального преобразователя (рис. 1).

Предположим, что напряженность продольного импульсного магнитного поля $H_x(t)$ в рабочем пространстве СМП, РМП вдоль МЧЭ изменяется по следующему закону: $\sin \alpha = a/\pi\sqrt{a^2 + x^2}$, тогда напряженность импульсного магнитного поля одновиткового преобразователя при прохождении токового видеопульса $i_x(t)$ можно выразить как

$$H_{\text{пов1}}(t) = \frac{i_x(t)a}{\pi(a^2 + x^2)}, \quad (4)$$

где a — расстояние от поверхности МЧЭ до нижнего слоя обмотки СМП.

Однослойный и многослойный СМП с равномерной рядовой обмоткой и током $i_x(t)$ создадут в рабочем пространстве импульсные магнитные поля напряженностью

$$\begin{aligned} H_{\text{пов2}}(t) &= \int_{x-l/2}^{x+l/2} i_x(t)W \frac{a}{\pi(a^2 + x^2)} dx = \\ &= i_x(t) \frac{W_1}{\pi} \left[\text{arctg} \left(\frac{x+l/2}{a} \right) - \text{arctg} \left(\frac{x-l/2}{a} \right) \right]; \quad (5) \end{aligned}$$

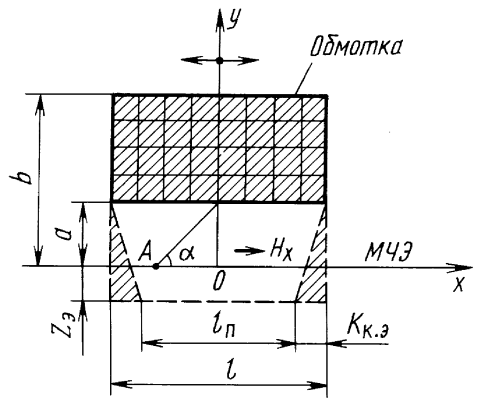


Рис. 1. Расчетная схема СМП:

A — расчетная точка на поверхности МЧЭ; Z_z — глубина проникновения электромагнитной волны в среду магнетика; x, y — координаты

$$\begin{aligned}
H_{x_{\text{пов}3}}(t) &= \int_a^b H_{x_{\text{пов}2}}(t) = \\
&= i_x(t) \frac{W_2}{\pi} \left\{ b \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{x+l/2}{b} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{x-l/2}{b} \right) \right] - \right. \\
&- a \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{x+l/2}{a} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{x-l/2}{a} \right) \right] + \\
&\quad + \frac{(x+l/2)}{2} \ln \left[\frac{b^2 + xl + (x^2 + l^2/4)}{a^2 + xl + (x^2 + l^2/4)} \right] + \\
&\quad \left. + \frac{(x+l/2)}{2} \ln \left[\frac{a^2 - xl + (x^2 + l^2/4)}{b^2 - xl + (x^2 + l^2/4)} \right] \right\}, \quad (6)
\end{aligned}$$

здесь W_1, W_2 — число витков рядовой обмотки; l — собственная длина обмотки СМП, b — расстояние от поверхности МЧЭ до верхнего слоя обмотки СМП.

Экспоненциальный закон распределения поля (4)–(6) в отсутствие экранирующих оболочек и торцевого подмагничивания постоянным магнитным полем H_0 порождает краевой эффект, выражаемый через коэффициент $K_{к.э.}$, который изменяет диаграмму направленности поля и сужает зону эффективного магнитоотрицательного преобразования:

$$l_n = K_{к.э.} l = l \exp \left[\left(\frac{V_b \tau_u}{2\pi l} \right)^2 \sqrt{\frac{a}{a+l}} \right], \quad (7)$$

где V_b — фазовая скорость УЗВ в среде МЧЭ; τ_u — длительность токового видеоимпульса.

Повысить эффективность преобразования (7) в результате уменьшения нелинейности второго порядка позволяет метод пассивного смещения рабочей точки СМП при использовании кольцевых и стержневых (прямоугольных) типовых постоянных магнитов. Такой магнит смещения, или поляризатор М (рис. 2), в СМП фиксируется над его сигнальной обмоткой в положении, при котором обеспечивается стабильная оптимальная форма однополярных или двуполярных УЗВ в МЧЭ, определяемых видом токового видеоимпульса.

В такой схеме СМП напряженность результирующего продольного магнитного поля содержит составляющие импульсного поля $H_{x_{\text{пов}}}(t)$ сигнальной обмотки (4)–(6) и постоянного поля H_0 смещения (подмагничивания) поляризатора М с коэффициентом краевого эффекта $K_{к.э.м.}$:

$$H_{x_{\text{пов}}}^{\text{СМ}}(t) = H_{x_{\text{пов}}}(t) \cdot K_{к.э.} \pm H_0 \cdot K_{к.э.м.} \quad (8)$$

Величину продольного магнитного поля H_0 смещения в пространстве кольцевого поляризатора (магнита) М можно определить по

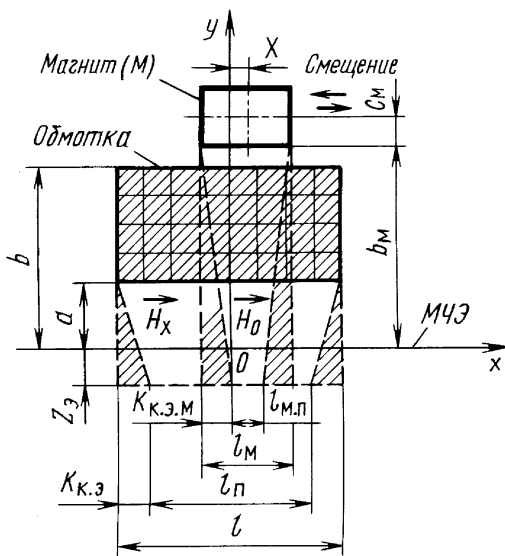


Рис. 2. Расчетная схема СМП с магнитом смещения рабочей точки

методу эквивалентного соленоида [4], через который протекает постоянный ток i_0 одного направления:

$$H_{x_{пов}}^{c.m.}(t) = H_{x_{пов\ 2,3}}(t) \exp \left[\left(\frac{x_3}{2\pi l} \right)^2 \sqrt{\frac{c}{c+l}} \right] +$$

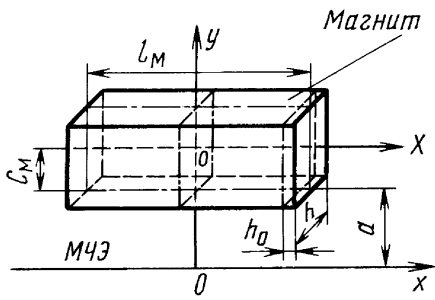
$$+ i_0 \frac{W_1}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta X + l/2}{b_M} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta X - l/2}{b_M} \right) \right] \times$$

$$\times \exp \left[\left(\frac{x_3}{2\pi l_M} \right)^2 \sqrt{\frac{C_M}{C_M + l_M}} \right], \quad (9)$$

здесь $\Delta X = (\pm X + x)$ — результирующее смещение от оси симметрии; X — величина продольного смещения магнита вправо (+) или влево (–) от центра СМП; x_3 — эквивалентная длина зоны эффективного преобразования $l_{\text{п}}$, $l_{\text{м.п}}$ сигнального преобразователя, или поляризатора М; $c = (a + b)/2$ — расстояние до средней линии обмотки СМП; b_M — расстояние между поляризатором М и МЧЭ; C_M — полутолщина эквивалентного соленоида; l_M — собственная длина магнита.

Смена направления тока ($-i_0$) в витках эквивалентного соленоида (рис. 3) приводит к изменению вектора поля H_0 смещения на противоположное значение, в результате чего суммарное поле (9) резко уменьшается.

Данный метод позволяет определить величину напряженности продольного поля H_0 в схеме СМП (РМП) со стержневым постоянным магнитом для произвольной точки с координатами (a, x) рабочего



пространства сигнального преобразователя магнитострикционной системы.

Допуская, что намагниченность J_M стержневых магнитов по оси X распределяется согласно зависимости [5]:

$$J_M(X) = J_{s.M}\{2 - ch[k_J(X - l_M/2)]\},$$

Рис. 3. Расчетная схема поля H_0 по методу эквивалентного соленоида

можно предположить, что аналогично распределяется эквивалентный ток по равноудаленным на шаг h_0 виткам $i = 1, 2, \dots, m$ соленоида:

$$I_{\Sigma.T} = -I_T \sum_{i=1}^m \{2 - ch[k_J(i - 1)h_0 - l_M/2]\}, \quad (10)$$

где I_T — эквивалентный ток соленоида, создающий намагниченность насыщения $J_{s.M}$; k_J — эмпирический коэффициент формы магнита.

Тогда, созданная им индукция $B_0 = B_r$ (остаточная B_r) продольного магнитного поля в произвольной точке с координатами (a, x) пространства СМП (РМП), составит величину:

$$B_0 = \mu_0 H_0 = \frac{\mu_0}{\pi} \sum_{i=1}^m \frac{I_{\Sigma.T}[X + (i - 1)h_0]}{a \sqrt{(C_M + a)^2 + [X + (i - 1)h_0]^2}} \times \left\{ C_1 \frac{(C_M^2 + a^2) + [X + (i - 1)h_0]^2}{(C_M - a)^2 + [X + (i - 1)h_0]^2} - C_2 \right\}, \quad (11)$$

здесь C_1, C_2 — эллиптические интегралы первого и второго порядка аргумента:

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

которые описываются выражениями [6]:

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

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

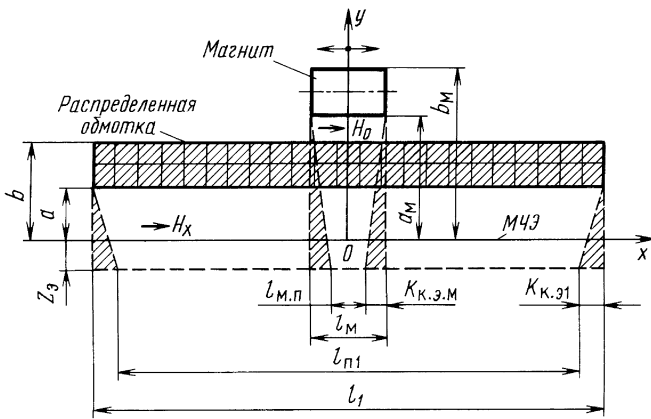


Рис. 4. Расчетная схема РМП

Учитывая выражение (11), стержневой прямоугольный магнит шириной h из материала с относительной магнитной проницаемостью μ в произвольной точке (a, x) поверхности МЧЭ с учетом краевого эффекта $k_{к.э.М} = 1,25 \dots 2,0$ создает продольное магнитное поле напряженностью

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0 \mu} \exp \left[-\frac{4 \ln(K_{к.э.М})}{l_M^2} x^2 \right]. \quad (12)$$

Типовая схема РМП (рис. 4) информационных магнитострикционных систем содержит распределенную прямоугольную или соленоидную обмотку, которая неподвижно размещается на МЧЭ без акустического контакта с ним. Вдоль РМП перемещается магнит-поляризатор М, кинематически жестко соединенный с объектом управления или контроля [1].

Прохождение токового видеоимпульса $i_x(t)$ через обмотку РМП создает в ее рабочем пространстве поле напряженности:

а) при однослойной обмотке (4)

$$H_{xпов4}(t) = H_{xпов1}(t) K_{к.э.1}; \quad (13)$$

б) при многослойной обмотке (6)

$$H_{xпов5}(t) = H_{xпов3}(t) K_{к.э.1}, \quad (14)$$

где $k_{к.э.1}$ — коэффициент краевого эффекта обмотки РМП.

В зоне эффективного магнитострикционного преобразования $l_{M.п} \leq l_{п1}$, образованной поляризатором М, где $l_{п1}$ — зона эффективного магнитострикционного преобразования сигнального РМП, продольное магнитное поле (12) накладывается на импульсное поле (13), (14), создаваемое его обмоткой, формируя результирующее поле напряженности:

$$H_{xпов6}(t) = H_{xпов4,5}(t) + H_0 K_{к.э.М} \leq H_s, \quad (15)$$

где H_s — напряженность поля насыщения материала МЧЭ.

Для возбуждения оптимальных по форме продольных нормальных УЗВ в МЧЭ магнитострикционных систем ширина поляризатора M должна выбираться из условия

$$l_M \geq \frac{V_B \tau_u}{K_{к.э.М}}.$$

Учитывая ранее полученные соотношения (6), (11), представим выражение (14) в виде, который позволяет описать форму магнитного поля в рабочем пространстве сигнальных РМП разного конструктивного исполнения и определить его значение расчетным методом для получения требуемых информационных параметров сигналов в акустических трактах магнитострикционных систем:

$$\begin{aligned} H_{\text{эпов7}}(t) &= \text{sgn} [H_0 K_{к.э.М} + H_{\text{эпов5}}(t)] = \\ &= \frac{1}{\pi} \left\{ \text{sgn}(i_0) W_1 \left[\text{arctg} \left(\frac{\Delta X + l_M/2}{a_{\Pi}} \right) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \text{arctg} \left(\frac{\Delta X - l_M/2}{a_{\Pi}} \right) \right] e^{\left(\frac{x_2}{2\pi l_M} \right)^2 B_1} + \right. \\ &\quad \left. + \left\{ i_x(t) W_2 \left[b \left(\text{arctg} \left(\frac{x + l_1/2}{b} \right) - \right. \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - \text{arctg} \left(\frac{x - l_1/2}{b} \right) \right) \right] - a \left(\text{arctg} \left(\frac{x + l_1/2}{a} \right) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \text{arctg} \left(\frac{x - l_1/2}{a} \right) \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{x + l_1/2}{2} \right) \ln A_1 + \left(\frac{x - l_1/2}{2} \right) \ln A_2 \right] e^{\left(\frac{x_2}{2\pi l_1} \right)^2 B_2} \left. \right\}; \quad (16) \end{aligned}$$

здесь

$$\Delta X = (\pm X + x) \leq \frac{l_{\text{м1}}}{2}, \quad A_1 = \frac{b^2 + x l_1 + [x^2 + (l_1/2)^2]}{a^2 + x l_1 + [x^2 + (l_1/2)^2]},$$

$$A_2 = \frac{a^2 - x l_1 + [x^2 + (l_1/2)^2]}{b^2 - x l_1 + [x^2 + (l_1/2)^2]}, \quad B_1 = \sqrt{\frac{C_{\Pi}}{C_{\Pi} + l_M}}, \quad B_2 = \sqrt{\frac{c}{c + l_1}},$$

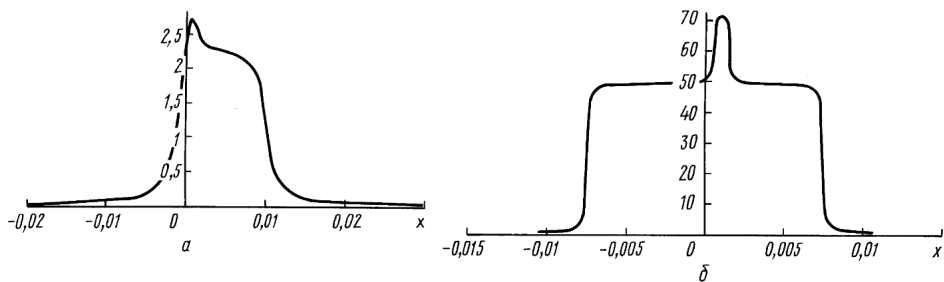


Рис. 5. Формы сигналаобразующих полей H_x СМП (а) и РМП (б):

$i_x = 0,05$; $W_1 = 50$; $W_2 = 1000$; $a_M = 0,005$; $b_M = 0,001$; $l = 0,002$; $l_M = 0,01$; $l_1 = 0,015$; $x = 0,005$

c , $C_{II} = (a_M + b_M)/2$ — расстояния от поверхности МЧЭ до среднего слоя обмотки сигнального преобразователя длиной l_1 и сечения поляризатора М соответственно.

На рис. 5 приведены результаты моделирования импульсных магнитных полей (9), (16), формируемых СМП и РМП (см. рис. 2 и 4) магнитострикционных систем, что позволяет оптимизировать их конструкцию и обеспечить получение требуемых точностных показателей с минимальными временными и материальными затратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин С. Б. Информационно-измерительные системы металлорежущего оборудования. Учеб. пособие. — Пенза, Изд-во ПГУ, 1999.
2. Белов К. П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. — М.: Наука, 1987.
3. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах: Ч.2. — М.: Госэнергоиздат, 1936.
4. Смайт В. Электростатика и электродинамика: Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1959.
5. Новогренок В. Е. Распределение магнитных характеристик постоянных магнитов / В.Е. Новогренок, Н.Е. Февралева // Проблемы технической электродинамики: Республиканский межвузовский сборник. — Киев, 1979, № 71. — С. 54–57.
6. Янке Е. Специальные функции / Е. Янке, Ф Эмде: Пер. с нем. — М.: Наука, 1977.

Статья поступила в редакцию 13.05.2002

Станислав Борисович Демин родился в 1953 г., окончил в 1979 г. Пензенский политехнический институт. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Металлообрабатывающие станки и комплексы” Пензенского государственного университета. Автор 110 научных работ в области ультразвуковой информационной техники.

S.B. Dyomin (b. 1953) graduated from the Penza Polytechnic Institute in 1979. Ph. D., ass. professor of "Metal Processing Machines and Complexes" department of the Penza State University. Author of 110 publications in the field of ultrasonic information technology.