Жадобин Н.Е., Крылов А.П.
Zadobin N.E., Krylov A.P.

СИНТЕЗ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАГНИТОУПРУГИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

SYNTHESIS OF TRANSFORMER MAGNETOELASTIC TRANSDUCER

Санкт-Петербург, Государственная морская академия имени адмирала С.О.Макарова
Admiral Makarov State Maritime Akademy, St-Peterburg

I-ts based on mode of isotropik strain got decision for MMF between two arbitrary points on surface of sensing unit of TMT. Got decision allow to obtain expression for EMF output signal of TMT with different number of couple poles of measures coil. In this report to name expression of EMF with one, two and three couple poles of measures coil.

Требованиям высокой эксплуатационной надежности в судовых условиях отвечают трансформаторные магнитоупругие преобразователи (ТМУП). Они нашли применение в судовых автоматических системах управления и контроля для измерения: крутящего момента, момента на гребных валах и валах мощных электроприводов, механических напряжений в корпусе судна, грузовых усилий в судовых кранах и тяговых усилий в буксирных лебедках.

Трансформаторный МУП состоит из двух частей: магнитопровода и чувствительного элемента..

На магнитопроводе располагаются полюса и катушки обмотки возбуждения измерительной обмотки. В качестве чувствительного элемента часто используется часть контролируемой детали рабочего механизма: участок гребного вала, корпуса судна и т.д. Между магнитопроводом и чувствительным элементоми меется воздушный зазор, равный 1…2 мм. Внешние механические силы приложены к чувствительному элементу.

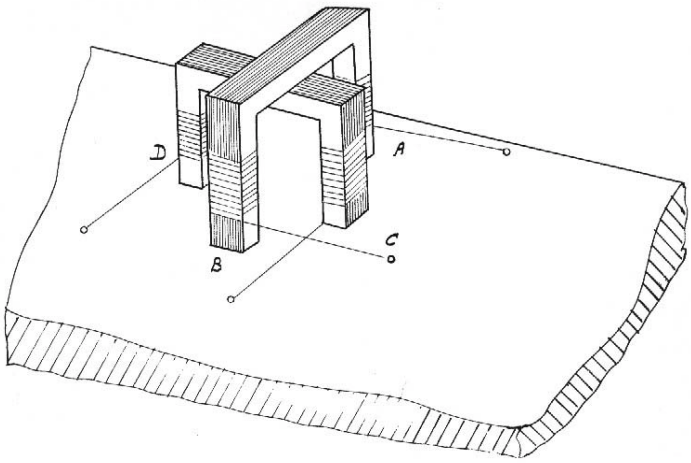
На рис.1 показаны трансформаторные МУП с одной парой полюсов измерительной обмотки СД (рис.1а) и с удвоенным числом полюсов NL, ML (рис.1б).

Общим для разнообразных конструкций ТМУП является наличие П-образного ферромагнитного сердечника с обмоткой возбуждения, служащей для создания переменного магнитного потока, проникающего в чувствительный элемент преобразователя.

Под действием механических напряжений, возникающих при приложении внешних сил к чувствительному элементу, его материал становится анизотропным.

Векторы электромагнитного поля определяют методом изотропирующей деформации, при котором исходная анизотропная среда заменяется деформированной изотропной средой.

а)



@2002, электронная версия подготовлена ЗАО АВТЭКС Санкт-Петербург, http://www.autex.spb.ru

б)

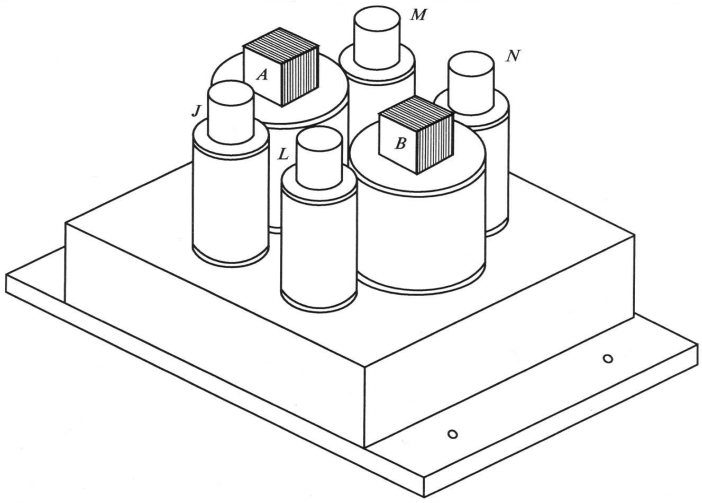


Рис.1 Трансформаторные магнитоупругие преобразователи.
Transforming magnetoelactic trandsbucer.

При использовании данного метода вначале находят решения для эквивалентной изотропной среды, а затем, проводя деформацию координат, обратную первоначальной, определяют электромагнитное поле в исходной анизотропной среде.

Электромагнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения в чувствительном элементе, подобно электростатическому полю двухпроводной линии из тонких проводов: а) магнитные силовые линии подобны линиям напряженности электростатического поля, т.е. представляют собой окружности, пересекающиеся с центром проекций полюсов магнитопровода обмотки возбуждения; б) линии равного значения МДС подобны эквипотенциальным линиям электростатического поля, т.е. представляют собой семейство эксцентричных окружностей с центрами, лежащими на прямой, проходящей через центры проекций полюсов магнитопровода обмотки возбуждения.

Для определения электромагнитного поля в исходном анизотропном пространстве необходимо перейти к новым преобразованным координатам и ввести эквивалентное значение магнитной проницаемости.

На рис.2, показаны проекции полюсов обмотки возбуждения *A* и *B* и полюсов измерительной обмотки *M—L, N—J,* расположенных на поверхности чувствительного элемента. Координатные оси x_1 и y_1, совпадающие с направлением механических напряжений, расположены под произвольным углом *a* относительно координатных осей *x, y.*

Проведем изотропирующую деформацию пространства вдоль координатных осей x_1, y_1. Новые деформированные оси координат обозначим ;$x_{1и}$, $y_{1и}$. При изотропирующей деформации направления, не совпадающие с координатными осями x_1, y_1, смещаются на поверхности. В частности, изменит свое положение отрезок *AB,* соединяющий проекции полюсов обмотки возбуждения. В деформированном пространстве отрезок *AB* займет новое положение *PK.*

Точки *P* и *K* являются проекциями полюсов обмотки возбуждения в деформированном изотропном пространстве. Направление отрезка *PK* принимается за направление координатной оси $x_и$, в соответствии
с которым выбирается направление оси $y_и$.

В системе координат $x_и$, $y_и$ можно записать выражения для электромагнитного поля в изотропной среде, после чего, перейдя к системе координат *x, y,* определить электромагнитное поле в исходной анизотропной среде.

Таким образом, для определения электромагнитного поля в исходной анизотропной среде необходимо провести три преобразования.

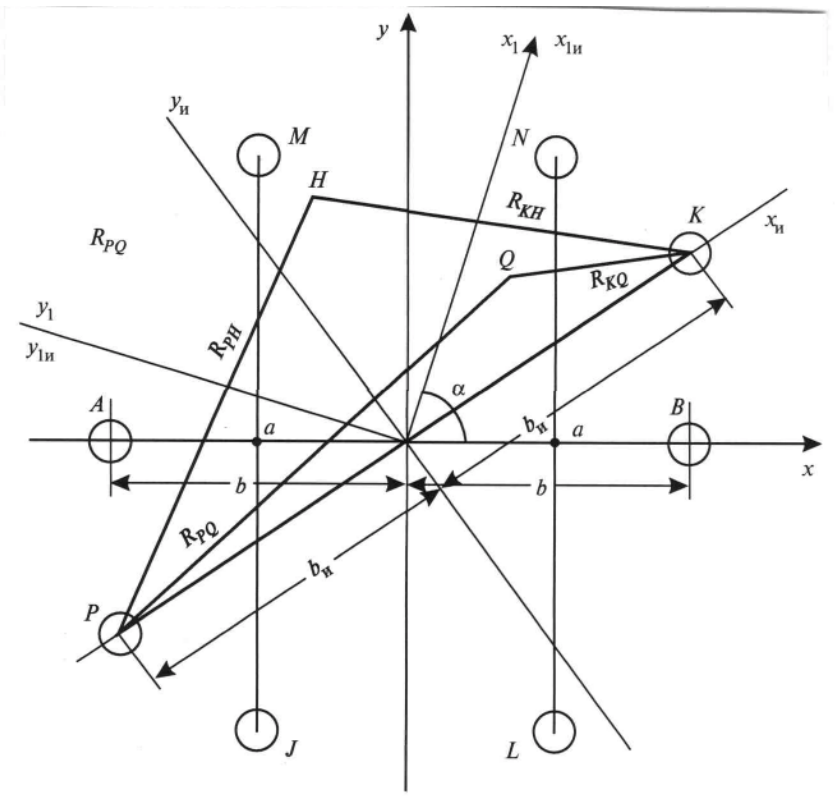


Рис.2 . Преобразование координатных осей.
Transforming of coordinate axis.

Первое преобразование связано с переходом от исходной системы координат x, y к системе x_1,y_1; второе — с изотропирующей деформацией пространства и переходом к системе координат $x_{1и}$, $y_{1и}$; третье — с переходом от системы координат $x_{1и}$, $y_{1и}$ к $x_и$, $y_и$.

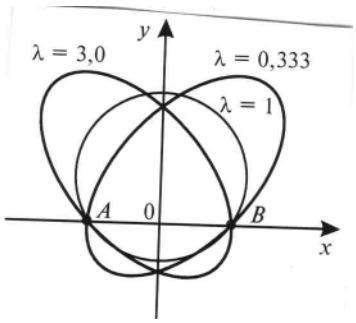


Рис.3. Магнитные силовые линии.
Magnetic force lines.

В результате преобразований получим соотношения между координатами векторов электромагнитного поля в изотропном деформированном и анизотропном исходном пространствах

$$\left.\begin{aligned} x_и &= \frac{\sqrt{\lambda\cos^2\alpha + \sin^2\alpha}}{\sqrt[4]{\lambda}}\,x + \frac{(\lambda-1)\cos\alpha\,\sin\alpha}{\sqrt[4]{\lambda}\,\sqrt{\lambda\cos^2\alpha + \sin^2\alpha}}\,y, \\ y_и &= \frac{\sqrt[4]{\lambda}}{\sqrt{\lambda\cos^2\alpha + \sin^2\alpha}}\,y, \end{aligned}\right\},$$

где $\lambda = \mu_{y1}/\mu_{x1}$.

Возникновение анизотропии материала чувствительного элемента под действием механических напряжений вызывает искажение магнитных силовых линий и линий равного значения МДС, которые из окружностей преобразуются в эллипсы.

На рис. 3 показаны магнитные силовые линии, построенные для трех значений λ: $\lambda_1 = 1$; $\lambda_2 = 3{,}0$; $\lambda_3 = 0{,}333$, а на рис.4 показаны линии равного значения МДС, построенные для тех же значений λ.

Искажение линий равного значения МДС приводит к изменению МДС между полюсами магнитопроводов измерительной обмотки, что вызывает появление ЭДС измерительной обмотки.

Выражение для МДС между двумя произвольными точками *H, Q* (см. рис.2) деформированного пространства имеет следующий вид:

$$F_{HQ} = \frac{\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}}\ln\frac{R_{PQ}R_{KH}}{R_{PH}R_{KQ}},$$

где

$$\left.\begin{aligned} R_{PQ}^2 &= (b_и + x_Q)^2 + y_Q^2;\\ R_{PH}^2 &= (b_и + x_H)^2 + y_H^2;\\ R_{KH}^2 &= (b_и - x_H)^2 + y_H^2;\\ R_{KQ}^2 &= (b_и - x_Q)^2 + y_Q^2. \end{aligned}\right\},$$

Ф — магнитный поток обмотки возбуждения; ω — угловая частота источника питания; γ — удельная электрическая проводимость материала чувствительного элемента.

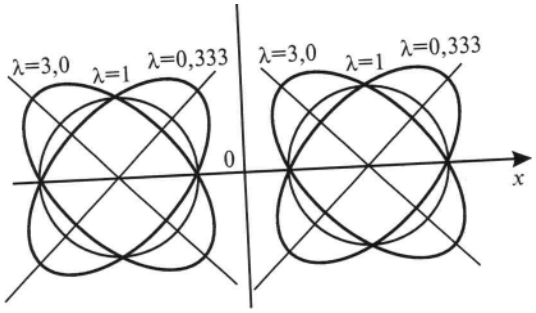


Рис.4. Линии равного значения МДС.
Lines of egual values of MMF.

Выражение (2) может быть использовано для определения выходного сигнала ТМУП с заданным значением пар полюсов измерительной обмотки. В качестве примера рассматривается ТМУП с одной, двумя и тремя парами полюсов измерительной обмотки.

На рис.5 показаны координаты проекций центров полюсов магнитопровода МУП с утроенным числом полюсов измерительной обмотки на поверхности чувствительного элемента исходного (рис.5,а) и деформированного пространств (рис.5,б).

С учетом (2) и (3) для МДС между центрами проекций полюсов $M_и$, $L_и$ и $N_и$, $J_и$ можно получить следующие выражения:

$$F_{M_и L_и} = \frac{\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}}\ \ln\frac{R_{K M_и} R_{P L_и}}{R_{K L_и} R_{P M_и}};$$

$$F_{N_и J_и} = \frac{\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}}\ \ln\frac{R_{K N_и} R_{P J_и}}{R_{K J_и} R_{P N_и}}.$$

Из рис. 5 , *б* видно, что

$$R_{K M_и} = R_{P L_и};\ R_{P M_и} = R_{K L_и};$$

$$R_{K N_и} = R_{P J_и};\ R_{K J_и} = R_{P N_и},$$

поэтому

$$F_{M_и L_и} = \frac{\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}}\ \ln\frac{R^2_{K M_и}}{R^2_{K L_и}};$$

(4)

$$F_{N_и J_и} = \frac{\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}}\ \ln\frac{R^2_{K N_и}}{R^2_{K J_и}}.$$

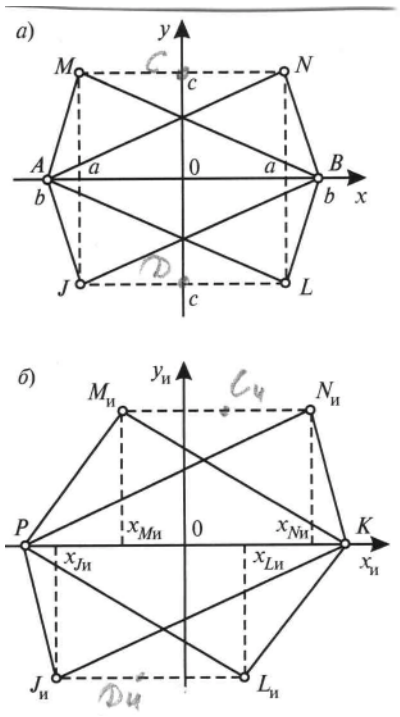


Рис.5. Координты проекций полюсов МУП с утроенным числом полюсов измерительной обмотки.
Coordinates of pole projection magnetoelastic transbucer with three pairs of poles of measuring winding.

Под действием МДС $F_{MиLи}$, $F_{NиJи}$ по магнитопроводам с полюсами *M, L* и *N, J* протекают магнитные потоки, наводящие ЭДС в каждой половине измерительной обмотки.

С учетом (4), (5) можно получить выражения для ЭДС каждой половины измерительной обмотки

$$\dot{E} = -j\omega\ \dot{F}\ /R_{Mu}$$

где F_u — МДС между соответствующими проекциями полюсов магнитопроводов измерительной обмотки; R_{Mu} — магнитное сопротивление магнитной цепи измерительной обмотки.

Практически магнитное сопротивление $R_{Mи}$ равно сопротивлению воздушных зазоров между полюсами магнитопроводов измерительной обмотки и чувствительным элементом.

Координаты центров полюсов магнитопровода МУП в исходной системе координат равны

$$x_B = -x_A = b;\ y_A = y_B = 0;$$

$$x_L = -x_M = a;\ y_M = -y_L = c;$$

$$x_N = -x_J = a;\ y_N = -y_J = c.$$

ЭДС половины измерительной обмотки, расположенной на магни-топроводе с полюсами *M, L* , обозначим через E_1, а ЭДС второй половины измерительной обмотки через E_2.

Используя выражение (1), с учетом координат проекций соответствующих полюсов, получим выражение для ЭДС измерительной обмотки МУП

$$\dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2;$$

$$\dot{E} = -j\omega \frac{\Phi}{\pi} \sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}} \times$$

$$\times \left\{ \ln \frac{\lambda c^2 + [(\lambda \cos^2\alpha + \sin^2\alpha)(b-a) - (\lambda - 1)\cos\alpha \ \sin\alpha \ c]^2}{\lambda c^2 + [(\lambda \cos^2\alpha + \sin^2\alpha)(b+a) + (\lambda - 1)\cos\alpha \ \sin\alpha \ c]^2} + \right.$$

$$\left. + \ln \frac{\lambda c^2 + [(\lambda \cos^2\alpha + \sin^2\alpha)(b+a) - (\lambda - 1)\cos\alpha \ \sin\alpha \ c]^2}{\lambda c^2 + [(\lambda \cos^2\alpha + \sin^2\alpha)(b-a) + (\lambda - 1)\cos\alpha \ \sin\alpha \ c]^2} \right\}. \quad (6)$$

Преобразуя (6), получим другое выражение для ЭДС, более удобное для анализа:

$$\dot{E} = -j\omega \frac{\Phi}{\pi} \sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}} \times$$

$$\times \left\{ \ln \frac{4\lambda c^2 + [(\lambda+1)(b-a) + (\lambda-1)\sqrt{(b-a)^2 + c^2} \ \sin(\psi_2 - 2\alpha)]^2}{4\lambda c^2 + [(\lambda+1)(b+a) + (\lambda-1)\sqrt{(b+a)^2 + c^2} \ \sin(2\alpha + \psi_1)]^2} + \right.$$

$$\left. + \ln \frac{4\lambda c^2 + [(\lambda+1)(b+a) + (\lambda-1)\sqrt{(b+a)^2 + c^2} \ \sin(\psi_1 - 2\alpha)]^2}{4\lambda c^2 + [(\lambda+1)(b-a) + (\lambda-1)\sqrt{(b-a)^2 + c^2} \ \sin(2\alpha + \psi_2)]^2} \right\}, \quad (7)$$

где ψ_1 = arctg $c/(b + a)$, ψ_2 = arctg c|(b - a).

Анализ выражения (7) показывает, что ЭДС является периодической функцией с периодом, равным π. ЭДС имеет экстремальные значения при $\alpha = \frac{\pi}{4} \pm n\frac{\pi}{2}$, где $n = 0, 1, 2, 3...$ и равна нулю при $\alpha = \pm n\frac{\pi}{2}$.

На рис. 6 показана кривая $E = \dfrac{E}{\left(\dfrac{-j\omega\Phi}{2\pi}\sqrt{\dfrac{o\omega\gamma}{\mu_э}}\right)}$ построенная для λ=2 и a=0.5b, b=c

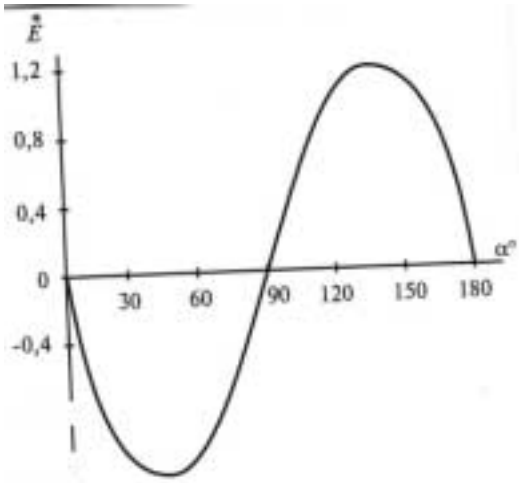


Рис.6.Кривая зависимости ЭДС от направления механических напряжений.
The curve of the dependence of EMF from the direction of the mechanical strains.

Кривая имеет периодический характер и по внешнему виду подобна гармоническим функциям. Периодический характер кривых объясняется периодическим изменением компонентов тензора магнитной проницаемости при изменении взаимного положения координатных осей. Для других значений λ, *a* и *c* кривые имеют тот же характер.

Изменение знака механических напряжений приводит к изменению соотношения между μ_{y1} и μ_{x1}. Если через $\lambda_1 = \mu_{x1}/\mu_{y1}$ обозначить соотношение, соответствующее новому знаку механических напряжений, то $\lambda_1 = 1/\lambda$.

Проанализируем выражение (7) и увидим, что при изменении знака механических напряжений происходит изменение знака ЭДС.

Таким образом, трансформаторный МУП позволяет определять как значение, так и направление механических напряжений.

Выражение для ЭДС в измерительной обмотке на полюсах С Д можно получить из выражений для E_1 или E_2 при $a = 0$.

$$\dot{E}' = -\frac{j\omega\Phi}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}} \ln \frac{4\lambda c^2 + [(\lambda+1)b + (\lambda-1)\sqrt{b^2+c^2}\,\sin(\psi_1 - 2\alpha)]^2}{4\lambda c^2 + [(\lambda+1)b + (\lambda-1)\sqrt{b^2+c^2}\,\sin(\psi_2 + 2\alpha)]^2}.$$

Если $c = b$, то выражение упростится:

$$\dot{E}' = -\frac{j\omega\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}} \ln \frac{4\lambda + [(\lambda+1) + \sqrt{2}(\lambda-1)\sin(\frac{\pi}{4} - 2\alpha)]^2}{4\lambda + [(\lambda+1) + \sqrt{2}(\lambda-1)\sin(\frac{\pi}{4} + 2\alpha)]^2}.$$

Кривая ЭДС в функции угла а имеет такой же характер, как и кривая ЭДС МУП с удвоенным числом полюсов.

Для получения максимальной чувствительности МУП магнитопровод обмотки возбуждения располагают относительно чувствительного элемента таким образом, чтобы *a* = 45°.

Выразим координаты полюсов магнитопроводов измерительной обмотки через координаты полюсов магнитопровода обмотки возбуждения

$$a = \beta b, \quad c = \eta b.$$

С учетом введенных соотношений и при а = 45° преобразуем выражение (6)

$$\dot{E} = -\frac{j\omega\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}} \left\{ \ln \frac{(\lambda+1)[(1-\beta)^2+\eta^2] - 2(\lambda-1)(1-\beta)\eta}{(\lambda+1)[(1+\beta)^2+\eta^2] + 2(\lambda-1)(1+\beta)\eta} + \right.$$
$$\left. + \ln \frac{(\lambda+1)[(1+\beta)^2+\eta^2] - 2(\lambda-1)(1-\beta)\eta}{(\lambda+1)[(1-\beta)^2+\eta^2] + 2(\lambda-1)(1+\beta)\eta} \right\}. \qquad (8)$$

При определении ЭДС из выражения (8) считаем, что под действием механических напряжений происходит рост μ_{y1} с соответствующим уменьшением μ_{x1}, тогда

$$\mu_{y1} = \mu_н + \Delta\mu = \mu_н(1+\chi); \qquad (9)$$

$$\mu_{x1} = \mu_н - \Delta\mu = \mu_н(1-\chi); \qquad (10)$$

$$\mu_э = \mu_н\sqrt{1-\chi}, \qquad (11)$$

где $\mu_н$ — начальное значение магнитной проницаемости; $\chi = \Delta\mu/\mu_н$ — относительное приращение магнитной проницаемости.

С учетом (9), (10), (11) получим новое выражение для ЭДС

$$\dot{E} = -\frac{j\omega\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}} \left[\ln \frac{(1-\beta)^2+\eta^2+2(1-\beta)\eta\chi}{(1+\beta)^2+\eta^2-2(1+\beta)\eta\chi} + \right.$$
$$\left. + \ln \frac{(1+\beta)^2+\eta^2+2(1+\beta)\eta\chi}{(1-\beta)^2+\eta^2-2(1-\beta)\eta\chi} \right].$$

Найдем выражения для ЭДС E_1 и E_2. Предварительно введем обозначение

$$\dot{A} = -\frac{j\omega\Phi}{2\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}}.$$

При небольших значениях χ $\mu_э \approx \mu_н$,

поэтому A≈const.

$$\dot{E}_1 = \dot{A}\ \ln\frac{(1-\beta)^2+\eta^2+2(1-\beta)\eta\chi}{(1+\beta)^2+\eta^2-2(1+\beta)\eta\chi} = \dot{A}\ \left[\ln\frac{(1-\beta)^2+\eta^2}{(1+\beta)^2+\eta^2} + \right.$$

$$\left. + \ln(1+\varepsilon\chi) - \ln(1-\nu\chi)\ \right],$$

где

$$\varepsilon = \frac{2(1-\beta)\eta}{(1-\beta)^2+\eta^2} \le 1,\ \nu = \frac{2(1+\beta)\eta}{(1+\beta)^2+\eta^2} \le 1.$$

Так как коэффициенты ε≤1 и ν≤1, то ln (1 + $\varepsilon\chi$) и ln (1 — $\nu\chi$) можно разложить в степенные ряды.

Сохраняя первые члены рядов, получим приближенное значение ЭДС E_1:

$$\dot{E}_1 = \dot{A}\ \left[\ln\frac{(1-\beta)^2+\eta^2}{(1+\beta)^2+\eta^2} + (\varepsilon+\nu)\chi\right]. \quad (12)$$

Первое слагаемое в выражении для ЭДС, обусловленное разностью МДС между полюсами *M, L,* представляет нулевой сигнал.

Второе слагаемое ЭДС E_1 вызвано внешними силами, приводящими к изменению магнитных проницаемостей.

Выражение для ЭДС E_2 имеет следующий вид:

$$\dot{E}_2 = \dot{A}\ \ln\frac{(1+\beta)^2+\eta^2+2(1+\beta)\eta\chi}{(1-\beta)^2+\eta^2-2(1-\beta)\eta\chi} =$$

$$= \dot{A}\ \left[\ln\frac{(1+\beta)^2+\eta^2}{(1-\beta)^2+\eta^2} + \ln(1+\nu\chi) - \ln(1-\varepsilon\chi)\right].$$

Произведя разложения ln (1 + $\nu\chi$) и ln (I - $\varepsilon\chi$) в степенные ряды, получим приближенное выражение для ЭДС E_2:

$$E_2 = \dot{A}\ \left[\ln\frac{(1+\beta)^2+\eta^2}{(1-\beta)^2+\eta^2} + (\nu+\varepsilon)\chi\right]. \quad (13)$$

Первое слагаемое ЭДС E_2 равно по абсолютному значению первому слагаемому ЭДС E_1, но имеет противоположный знак.

Таким образом, с небольшой погрешностью можно считать, что ЭДС *EI* и E_2 изменяются по линейному закону в функции относительного приращения магнитной проницаемости, т.е. по линейному закону от механических напряжений. ЭДС магнитоупругого преобразователя равна

$$\dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 = -\frac{j\omega\Phi}{\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}}\,(\varepsilon+\nu)\chi. \quad (14)$$

С учетом выражения (14) ЭДС преобразователя не имеет нулевого сигнала и изменяется по линейному закону в функции приращения магнитной проницаемости.

Крутизна статической характеристики $E(\chi)$ в два раза превосходит крутизну статических характеристик $E_1(\chi)$ и $E_2(\chi)$.

Из выражений (12), (13), (14) видно, что чувствительность преобразователя зависит от геометрических координат полюсов магни-топроводов измерительной обмотки.

Коэффициенты ε и *v,* зависящие от геометрических координат, имеют максимальные значения, равные 1,

$\varepsilon=1$ при $1-\beta=\eta$ (15)

а $\nu=1$ при $1+\beta=\eta$ (16)

Одновременное соблюдение равенств (15), (16) возможно при $\beta\to 0$ и $\eta=1$, поэтому максимальная чувствительность МУП с удвоенным числом полюсов наблюдается при *c=b* и малых значениях β. Учитывая размещение катушек измерительной обмотки, минимальное значение β = 0,25.

Для МУП с одной парой полюсов СД ЭДС определяется из (12) или (13) при $\beta=0$.

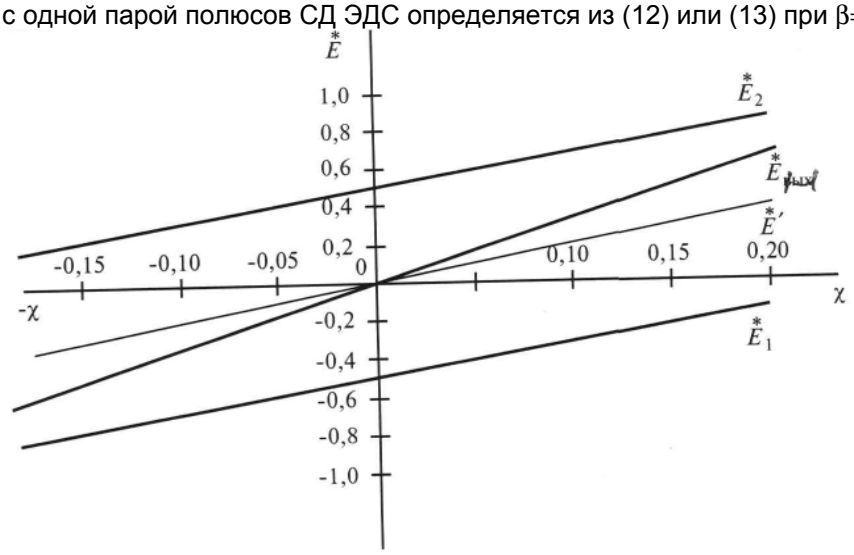


Рис.7. Изменение относительных значений ЭДС.
Changes of relative values of EMF.

В этом случае $\varepsilon=\nu=\dfrac{2\eta}{1+\eta}$, $\varepsilon=\nu=1$ при $\eta=1$. Поэтому максимальная чувствительность преобразователя с одной парой полюсов измерительной обмотки наблюдается при *c=b* .

ЭДС преобразователя при $\eta=1$ равна

$$\dot{E}_1^{\,1}=-\frac{i\omega\phi}{\pi}\sqrt{\frac{i\omega\gamma}{\mu_э}}\cdot\chi \qquad (17)$$

ЭДС магнитоупругого преобразователя с тремя парами полюсов измерительной обмотки можно найти из выражений (14), (17)

$$\dot{E}_3=\dot{E}_{12}+\dot{E}_1^{\,1}=-\frac{j\omega\gamma}{\pi}\sqrt{\frac{j\omega\gamma}{\mu_э}}(\varepsilon+\nu+1)\chi \qquad (18)$$

Как видно из выражений (14), (17) и (18) чувствительность МУП с удвоенным и утроенным парами полюсов измерительной обмотки почти в два, три раза превышает чувствительность МУП с одной парой полюсов.

На рис.7 представлены графические зависимости относительных значений ЭДС $E_1(\chi)$, $E_2(\chi)$, $E_{12}(\chi)$, $E_1^1(\chi)$, $E_3(\chi)$, построенные при $\eta=1$. Относительное значение ЭДС

$$\overset{*}{E}=\dot{E}/\dot{A}$$

Для $E_1(\chi)$, $E_2(\chi)$, $E_{12}(\chi)$ зависимости построены при $\beta=0{,}25$.

Чувствительность ТМУП при заданном числе полюсов измерительной обмотки зависит от их расположения.

На рис.8 показано семейство кривых $S=S(\eta,\beta)$, где $S=1/2(\varepsilon+\nu)$. Семейство кривых характеризует чувствительность ТМУП при заданных значениях η и изменении β от 0 до 1.

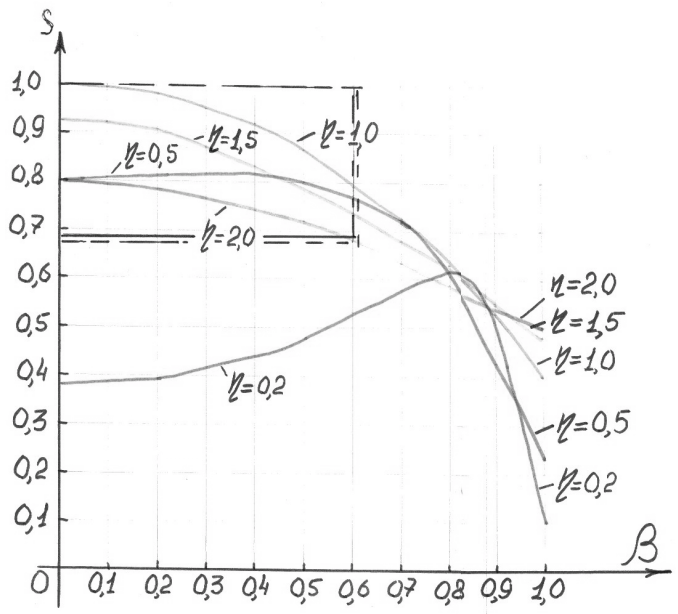


Рис.8 Зависимость чувствительности МУП от координат полюсов измерительной обмотки.
The dependence of the sensitive magnetoelastic transdocer from the coordinates of the poles measuring winging.

На рисунке пунктиром выделена рекомендуемая зона размещения полюсов измерительной обмотки, в пределах которой чувствительность ТМУП изменяется в диапазоне от 0,7 до 1,0 при $\eta=0{,}5\div2{,}0$. и $\beta=0-0{,}7$.

Таким образом, рассмотренный метод позволяет провести синтез ТМУП с произвольным числом пар полюсов измерительной обмотки.