



УДК:621.317.39

S.F.AMIROV, K.K.JURAYEVA

ANALYTIC DESCRIPTION OF THE MAGNETIC PERMEABILITY OF THE CORE OF
MAGNETOELASTIC FORCE SENSORS AGAINST MECHANICAL VOLTAGE

Магнитли эластик кучланиш датчикларини ферромагнит ўзаги нисбий магнит сингдирувчанлигини датчикларга берилаётган механик кучланишга боғлиқлигининг аналитик тавсифи олинган. Магнит занжири асосий магнитланиш эгри чизигининг чизикли соҳасида ишлаётган магнитли эластик кучланиш датчикларида ферромагнит ўзак нисбий магнит сингдирувчанлигининг датчикларга берилаётган механик кучланишга боғлиқлигини пропорционалик коэффициентини манфий бўлган чизикли функция кўринишида силлиқлантириш мумкинлиги кўрсатилган.

Таянч сўзлар: магнитли эластик кучланиш датчиги, магнит занжири, магнит сингдирувчанлик, механик кучланиш, силлиқлантириш, магнит индукцияси, магнит майдони кучланганлиги, энергия исрофи.

Получено аналитическое выражение зависимости относительной магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника магнитоупругого датчика усилий от прикладываемых механических напряжений. Показано, что для магнитоупругих датчиков усилий, магнитная цепь которых работает на линейном участке основной кривой намагничивания, зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника от прикладываемых к датчикам механических напряжений может быть аппроксимирована в виде линейной функции с отрицательным коэффициентом пропорциональности.

Ключевые слова: магнитоупругий датчик усилий, магнитная цепь, магнитная проницаемость, механическое напряжение, аппроксимация, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, потери энергии.

The article gives an analytical expression of the dependence of the relative magnetic permeability of the ferromagnetic core of the magnetoelastic force sensor on the applied mechanical stresses. It is shown that for magnetoelastic force transducers whose magnetic circuit operates on a linear portion of the main magnetization curve, the dependence of the relative magnetic permeability of the ferromagnetic core on the applied mechanical stresses applied to the sensors can be approximated as a linear function with a negative coefficient of proportionality.

Keywords: magnetoelastic force sensor, magnetic circuit, magnetic permeability, mechanical stress, approximation, magnetic induction, magnetic field strength, energy loss.

Аналитическая зависимость относительной магнитной проницаемости стальной части магнитной цепи магнитоупругих датчиков (МУД) усилий от напряженности магнитного поля, создаваемое обмоткой возбуждения с переменным током и внешних механических напряжений, имеет принципиально нелинейный характер [1, 2]. В связи с этим не существует аналитической зависимости $\mu = f(\sigma)$, общей для слабых и сильных магнитных полей, а также для любых соотношений прикладываемых (внешних) и внутренних механических напряжений.

В области сильных внешних магнитных полей и сильных механических напряжений могут быть использованы выражения, приведенные в [2]. Однако на практике применения МУД чаще всего встречаются случаи слабых магнитных полей, где процесс намагничивания происходит в основном за счет процессов смещения. В этих случаях используется следующее уравнение [1]:

$$\Delta\mu = \frac{2\lambda_s \mu_n}{B_s^2} \sigma, \quad (1)$$

где μ_n – относительная магнитная проницаемость ненагруженного ферромагнитного материала; λ_s и B_s – соответственно коэффициент магнитострикции и магнитная индукция в ферромагнитном сердечнике при насыщении.

Практическое применение (1) ограничено чрезмерной идеализацией зависимости $\mu = f(\sigma)$.

Наиболее удобным и практичным, на наш взгляд, является непосредственное использование основной кривой намагничивания ферромагнетиков, используемых в качестве магнитоупругих материалов, экспериментально полученных при различных значениях механических напряжений. Основная кривая намагничивания дает наиболее полную информацию о процессах намагничивания, а методика снятия этой зависимости отработано достаточно хорошо и не представляет особых механических трудностей. Аналитическое описание зависимости $\mu = f(\sigma)$ и $\mu = f(H)$ обеспечивает возможность довольно простого учета реального характера изменения относительной магнитной проницаемости ферромагнитного материала под действием внешних магнитного поля и механических напряжений.

В данной статье предлагается аппроксимация основной кривой намагничивания следующей дробно-рациональной зависимостью [1]:

$$B = \frac{H}{\alpha(\sigma) + \beta(\sigma)H}, \quad (2)$$

где $\alpha(\sigma) = \alpha_0 + C_\alpha \sigma$; $\beta(\sigma) = \beta_0 - C_\beta \sigma$.

Постоянные коэффициенты $\alpha_0, C_\alpha, \beta_0$ и C_β , например, для никеля принимают соответственно следующие значения: $2300 \frac{\text{М}}{\text{Гн}}$; $90 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}^3}{\text{Н} \cdot \text{Гн}}$; $1,53 \frac{\text{М}^2}{\text{Вб}}$; $3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{М}^4}{\text{Н} \cdot \text{Вб}}$

В настоящей статье исследуются монолитные ферромагнитные сердечники, изготовленные из железохромалюминиевых и железохромистых сталей с повышенным значением удельного электрического сопротивления.

Основная кривая намагничивания этих магнитоупругих материалов получены в работах [2,3] и они представляют собой семейства зависимостей максимальных значений напряженности магнитного поля по основной гармонике. Предлагается судить о магнитоупругих свойствах материала в переменном магнитном поле по величине магнитной проницаемости без потерь на перемагничивание и вихревые токи $\mu_{\delta,п.}$. В ферромагнитном материале при наложении внешнего переменного магнитного поля с амплитудой первой гармоники H_{1m} возникает размагничивающее магнитное поле вихревых токов H_{2m} (рис. 1), равное по модулю

$$H_{2m} = H_{1m} \sin \delta, \quad (3)$$

где δ – угол потерь в ферромагнитном материале.

Результирующее магнитное поле в ферромагнитном сердечнике находится как сумма комплексных величин напряженностей возбуждающего поля и поля вихревых токов, т.е.:

$$\dot{H}_m = \dot{H}_{1m} + \dot{H}_{2m} \quad (4)$$

Модуль напряженности H_m определяется из векторной диаграммы как (рис. 1):

$$H_m = H_{1m} \cos \delta. \quad (5)$$

Результирующему значению напряженности магнитного поля \dot{H}_m соответствует результирующее значение магнитной индукции \dot{B}_m , модуль которой находится как $B_m = \frac{E_m}{\omega w_2 S_\mu}$, где E_m – амплитудное значение основной гармоники ЭДС в измерительной обмотке w_2 ; ω – угловая частота напряжения источника питания; S_μ – площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника.

Величина максимального значения основной гармоники напряженности (внешнего) магнитного поля возбуждения в сердечнике определяется как:

$$H_{1m} = \frac{I_{1m} w_1}{l_\mu}, \quad (6)$$

где I_{1m} – амплитудное значение основной гармоники тока в первичной обмотке с числом витков w_1 ; l_μ – средняя длина силовых линий магнитного поля в ферромагнитном сердечнике.

Векторы индукции \dot{B}_m и напряженности \dot{H}_m совпадают по фазе и их отношение дает значение относительной магнитной проницаемости, совпадающее по величине со значением относительной магнитной проницаемости ферромагнитного материала при отсутствии потерь, т.е.:

$$\mu_{\text{б.п.}} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{B_{1m}}{\mu_0 H_{1m}} = \frac{B_{2m}}{\mu_0 H_{2m}}. \quad (7)$$

Таким образом, это универсальная величина, не зависящая от потерь в ферромагнитном материале. По своему физическому смыслу она совпадает с понятием относительной магнитной проницаемости при намагничивании постоянным магнитным полем, поскольку выражает зависимость между совпадающими во времени мгновенными значениями результирующей магнитной индукции и результирующей напряженности магнитного поля в ферромагнитном сердечнике.

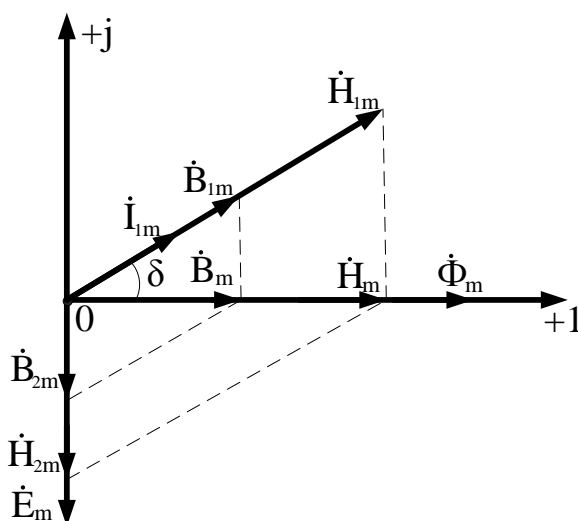


Рис. 1. Векторная диаграмма H_m, B_m, Φ_m, I_m и E_m в ферромагнитном сердечнике с потерями.

Известно [4], что учет потерь в магнитопроводе осуществляется через комплексное магнитное сопротивление ферромагнитного сердечника, которое определяется по следующей формуле:

$$\underline{Z}_\mu = \frac{\dot{I}_1 w_1}{\dot{\Phi}} = R_\mu + jX_\mu, \quad (8)$$

где R_μ, X_μ – соответственно активная и реактивная составляющие комплексного магнитного сопротивления сердечника.

Когда расчет производится по основным гармоникам, то уравнение (8) имеет следующий вид:

$$\underline{Z}_\mu = \frac{\dot{I}_1 w_1}{B_m S_\mu}. \quad (9)$$

Из векторной диаграмме (рис.1) и формулы (6) имеем следующее:

$$\underline{Z}_\mu = \frac{\dot{H}_{1m} l_\mu}{B_m S_\mu} = \frac{l_\mu}{S_\mu \dot{B}_m} (\dot{H}_m - \dot{H}_{2m}). \quad (10)$$

Если учесть, что направление векторов \dot{B}_m и \dot{H}_m совпадает с действительной осью +1 комплексной плоскости, (см. рис.1) получим следующее:

$$\dot{B}_m = B_m; \dot{H}_m = H_m; \dot{H}_{2m} = -jH_{2m}. \quad (11)$$

С учетом (11) и принимая во внимание (3), (5) и (7) формула (10) пишется как:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_\mu &= \frac{l_\mu}{S_\mu B_m} (H_m + jH_{2m}) = \frac{l_\mu H_m}{S_\mu B_m} + j \frac{l_\mu H_{2m}}{S_\mu B_m} = \\ &= \frac{l_\mu}{\mu_0 \mu_{\text{б.п.}} S_\mu} + j \frac{l_\mu}{\mu_0 \mu_{\text{б.п.}} S_\mu} \text{tg } \delta = R_\mu + jX_\mu. \end{aligned} \quad (12)$$

где $R_\mu = \frac{l_\mu}{\mu_0 \mu_{\text{б.п.}} S_\mu}; X_\mu = \frac{l_\mu}{\mu_0 \mu_{\text{б.п.}} S_\mu} \text{tg } \delta.$

На рис. 2 приведены кривые намагничивания электротехнической стали марки ЭЗ при различных значениях сжимающих усилий. По этим кривым с помощью (7) могут быть рассчитаны значения относительной магнитной проницаемости стали без потерь. Однако, приведенные кривые получены для сердечников, в которых магнитный поток пронизывает как деформируемые, так и недеформируемые участки сердечника, и поэтому является усредненными. Отношение магнитного сопротивления деформируемого участка к магнитному сопротивлению недеформируемого участка при $\sigma = 0$ равно 2, причем площади поперечных сечений этих участков равны между собой.

С целью определения $\mu_{\text{б.п.}}$ для деформируемого участка магнитной цепи рекомендуется провести следующие преобразования. Если пренебречь потерями в стали, то для упомянутых опытных образцов сердечников можно записать следующие:

$$\Phi_{1\text{тупр}} = \frac{I_{1m} w_1^2}{R_{\mu\text{д}} + R_{\mu\text{нд}}}, \quad (13)$$

где $R_{\mu\text{д}}, R_{\mu\text{нд}}$ – активные магнитные сопротивления соответственно деформируемого и недеформируемого участков магнитной цепи.

Площади поперечных сечений деформируемого и недеформируемого участков равны между собой и поэтому выражение (13) можно переписать как:

$$B_{1\text{муср}} = \frac{\Phi_{1\text{муср}}}{S_{\mu}} = \frac{I_{1\text{м}} w_1}{S_{\mu} (R_{\mu\text{д}} + R_{\mu\text{нд}})} = \frac{I_{1\text{м}} w_1}{S_{\mu} (\beta + 1) R_{\mu\text{нд}}} \quad (14)$$

где $\beta = \frac{R_{\mu\text{д}}}{R_{\mu\text{нд}}}$.

При нагружении сердечника магнитное сопротивление недеформируемого участка можно считать неизменным. С учетом этого допущения отношение усредненного значения магнитной индукции в сердечнике, находящемся под механическим усилием, к усредненному значению магнитной индукции в разгруженном состоянии может определяться как:

$$\frac{B_{1\text{муср}\sigma}}{B_{1\text{муср}0}} = \frac{I_1 w_1}{S_{\mu} (\beta_{\sigma} + 1) R_{\mu\text{нд}}} : \frac{I_1 w_1}{S_{\mu} (\beta_0 + 1) R_{\mu\text{нд}}} = \frac{\beta_0 + 1}{\beta_{\sigma} + 1} \quad (15)$$

Отсюда

$$\beta_{\sigma} = (\beta_0 + 1) \frac{B_{1\text{муср}0}}{B_{1\text{муср}\sigma}} - 1. \quad (16)$$

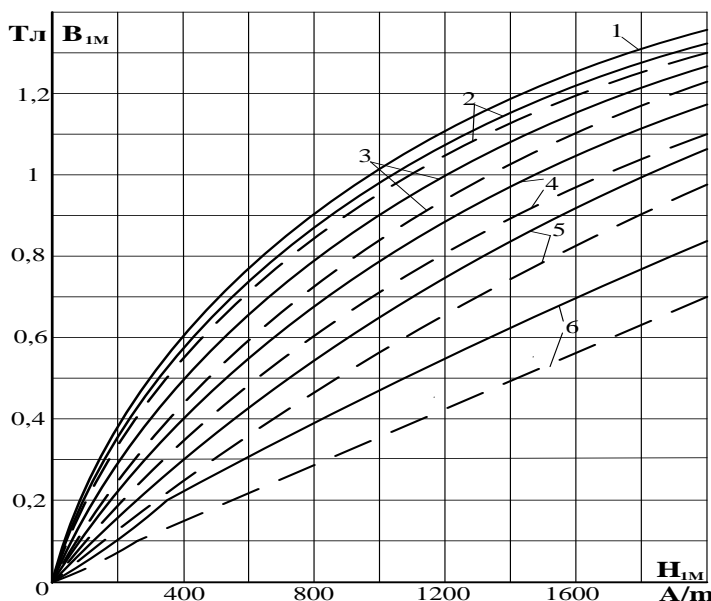


Рис. 2. Кривые намагничивания сердечника (сплошные кривые) и материала (пунктирные кривые) при различных сжимающих усилиях:

1 - при $\sigma = 0,2$; 2 - $\sigma = 16 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; 3 - $\sigma = 32 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; 4 - $\sigma = 48 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; 5 - $\sigma = 64 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; 6 - $\sigma = 96 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$.

Значение магнитной индукции деформируемого участка может быть определены через $\mu_{\text{б.п.}}$ с помощью следующей формулы:

$$B_{1\text{нд}} = \mu_0 \mu_{\text{б.п.}} H. \quad (17)$$

Отсюда:

$$\mu_{\text{б.п.}} = \frac{B_{1\text{нд}}}{\mu_0 H} = \frac{l_{\mu\text{д}}}{S_{\mu} \mu_0 R_{\mu\text{д}}}, \quad (18)$$

где $l_{\mu\text{д}}$ – средняя длина силовых линий магнитного поля деформируемого участка.

Отношение магнитных индукций деформируемого участка под нагрузкой и без неё будет равно:

$$\frac{B_{1мд.σ}}{B_{1мд.0}} = \frac{\mu_{б.п.σ}}{\mu_{б.п.0}} = \frac{R_{μд.0}}{R_{μд.σ}} = \frac{\beta_0 R_{μдд}}{\beta_σ R_{μдд}} = \frac{\beta_0}{\beta_σ}. \quad (19)$$

Из последнего уравнения имеем:

$$B_{1мд.σ} = \frac{\beta_0}{\beta_σ} B_{1мд.0}. \quad (20)$$

При отсутствии механической усадки (нагрузки) относительные магнитные проницаемости деформируемого и недеформируемого участков магнитной цепи МУД усилий равны между собой. Поэтому:

$$\begin{cases} B_{1мд.0} = B_{1мусп.0} \\ B_{1мд.σ} = \frac{\beta_0}{\beta_σ} B_{1мусп.σ} \end{cases} \quad (21)$$

Подставляя (16) во второе уравнение (21) получим следующее:

$$B_{1мд.σ} = \beta_0 \left[\frac{1}{(\beta_0 + 1) \frac{B_{1мусп.0}}{B_{1мусп.σ}} - 1} \right] B_{1мусп.0}. \quad (22)$$

Относительная магнитная проницаемость при отсутствии потерь для деформируемого участка магнитной цепи датчика может быть найдена с учетом (22), т.е.:

$$\mu_{б.п.} = \frac{B_{1мд.σ}}{\mu_0 H}. \quad (23)$$

В работе [3] приведены также кривые зависимости $tg \delta$ от напряженности магнитного поля при различных значениях σ для конкретной конфигурации магнитной системы МУД. Однако непосредственное использование этих кривых при исследовании МУД с другой конфигурацией практически недопустимо, поскольку потери на вихревые токи значительно зависят от геометрии сердечника датчика.

В данной работе реактивное составляющее комплексного магнитного сопротивления определяется с помощью следующей формулой [4]:

$$X_\mu = \frac{\omega}{R_\nu}, \quad (24)$$

где R_ν – электрическое сопротивление магнитопровода на пути вихревых токов, которое в свою очередь определяется как:

$$R_\nu = \rho \frac{l_\nu}{S_\nu}, \quad (25)$$

здесь ρ – удельное электрическое сопротивление материала магнитопровода; l_ν – средняя длина пути вихревых токов; S_ν – площадь сечения, пронизываемого вихревыми токами.

Под воздействием механических усилий в ферромагнитном материале изменяется не только его магнитная проницаемость (магнитоупругий эффект), но и его удельное электрическое сопротивление (гальваноупругий эффект). Исследования, проведенные в работах [1,2], показали,

что величина относительного изменения удельного электрического сопротивления ферромагнитного материала под воздействием упругих механических напряжений составляет всего несколько процентов от относительного изменения его относительной магнитной проницаемости. В связи с вышеизложенным можно считать, что удельное электрическое сопротивление ферромагнитного материала не зависит от прилагаемых к нему механических усилий.

Анализ основных кривых намагничивания (пунктирные кривые на рис. 2) показал, что зависимость магнитной индукции как от напряженности магнитного поля, так и от механических напряжений имеет существенный нелинейный характер.

Режим работы магнитной цепи исследуемых МУД усилий выбран таким образом [5,6], что вероятность ее работы на нелинейном участке основной кривой намагничивания мала. В этом режиме магнитную проницаемость рабочих участков магнитной цепи можно допустить независимой от величины магнитной индукции рабочего магнитного поля. Это допущение значительно упрощает анализ магнитной цепи, степени магнитоупругого преобразования и позволяет допустить, что магнитная проницаемость является функцией лишь одного параметра - механических напряжений σ . Функция $\mu = f(\sigma)$ имеет различный характер в разных диапазонах изменения напряженности магнитного поля. Для начальных участков основной кривой намагничивания электротехнической стали ЭЗ график функции $\mu = f(\sigma)$, построенный на основании (22), близок к линейному и поэтому зависимость $\mu = f(\sigma)$ может быть аппроксимирована как:

$$\mu_{\sigma.п.} = a_1 - a_2\sigma, \quad (26)$$

где a_1 и a_2 - коэффициенты аппроксимации; σ - абсолютная величина сжимающих механических напряжений.

Коэффициенты аппроксимации могут быть определены с помощью теории приближения функций [1]. Для совокупности « n » данных экспериментальных исследований μ_i, σ_i , можно отыскать наилучшие значения a_1 и a_2 , приближенно удовлетворяющие следующую систему уравнений:

$$\mu_i = \tilde{f}(\sigma_i, a_1, a_2), \quad (27)$$

где \tilde{f} - известная функция.

Наилучшими являются те значения коэффициентов a_1 и a_2 , при которых отклонения (невязка) $\varepsilon_i = \mu_i - \tilde{f}(\sigma_i, a_1, a_2)$ получается возможно малыми по абсолютной величине.

Минимизация отклонений в данной работе осуществлена по методу средних [4]. Система отклонений разбивается на число групп, равных числу искомым постоянных коэффициентов. Система уравнений, содержащая столько уравнений, сколько имеется неизвестных, получается приравнованием нулю алгебраической суммы отклонений, входящих в каждую из этих групп.

Применение метода средних с целью аппроксимации зависимости $\mu_{\sigma.п.} = f(\sigma)$ для электротехнической стали ЭЗ на начальном участке основной кривой намагничивания дает следующие значения коэффициентов аппроксимации: $a_1 = 1085, a_2 = 9,77 \text{ мм}^2/\text{Н}$.

Таким образом, в статье получено аналитическое выражение зависимости относительной магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника магнитоупругого датчика усилий от прилагаемых механических напряжений. Показано, что для магнитоупругих датчиков усилий, магнитная цепь которых работает на линейном участке основной кривой намагничивания,

вышеуказанная зависимость может быть аппроксимирована в виде линейной функции с отрицательным коэффициентом.

References:

1. Tverdin L.M., Panchenko V.M., Vsevolodov B.V., Zakoryuhin V.B. Avtomaticheskie ustroystva s magnitoprugimi preobrazovatelyami. Moskva, E`nergiya, 1974. Biblioteka po avtomatike. Vy'pusk 517.
2. Probotyuk V.V. Matematicheskaya model' magnitoprugogo preobrazovatelya i ego garmonicheskoe predstavlenie: Dis. ... kand. tehn. nauk. - Tyumen': TyumGNU, 2005. - 109 s.
3. Baharev M.S. Razrabotka metodov i sredstv izmereniya mehanicheskikh napryazheniy na osnove neobratimy'h i kvaziobratimy'h magnitoprugih yavleniy: Avtoref. diss. ... kand. tehn. nauk. Tyumen', TyumGNU, 2004. - 45 s.
4. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., CHEchurin V.L. Teoreticheskie osnovy' e`lektrotehniki: V 3-h t. Uchebnik dlya vuzov. Izd. 4-e - Sankt-Peterburg: Piter, 2006. - 576 s.
5. Patent RUz, UZ № IAP 04866, 2014g. Magnitoprugiy datchik usiliy/ Amirov S.F., Nazirova Z.G., Juraeva K.K., Boltaev O.T., SHarapov SH.A., Fayzullaev J.S.//Rasmiy ahborotnoma - 2014. - №4.
6. Patent RUz, UZ № IAP 05432, 2017g. Magnitoprugiy datchik usiliy/ Amirov S.F., Turdibekov K.H., Juraeva K.K., Boltaev O.T., Fayzullaev J.S.// Rasmiy ahborotnoma - 2017. - №3.

*Амиров Султон Файзуллаевич – доктор технических наук, профессор,
зав.кафедрой «Электроснабжение железных дорог»ТашИИТ, Тел.:299-07-84;
Жураева Камила Комиловна – докторант PhD кафедры «Электроснабжение железных дорог»
Тел.: 299-04-44. E-mail: lade00@bk.ru.*