

ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ФЕРРОМАГНИТНОГО ВАЛА

Горкунов Б.М., Тюпа И.В., Авраменко А.А.

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт», г. Харьков

Кафедра «Приборы и методы неразрушающего контроля»

E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

Abstract

Gorkunov B.M., Tyupa I.V., Avramenko A.A. Eddy-current transmitter for no contact control of twisting moment of ferromagnetic shaft. In work the method of the no contact control of the twisting moment enclosed to a ferromagnetic shaft is offered. It is shown, that use eddy-current transformer allows to take into account both magnetoelastic, and tenzometric effects, that substantially raises reliability and reliability of the control of a degree of mechanical deformation of ferromagnetic material at twisting shaft.

Общая постановка проблемы. В процессе эксплуатации энергетического оборудования часто возникает задача определения фактического напряженно-деформированного состояния отдельных узлов и агрегатов, как в статическом, так и в динамическом режимах работы [1].

В этом плане представляет интерес выявление участков конструкции, наиболее подверженных деформации вследствие аномальных механических напряжений, возникающих в местах наличия внутренних или внешних дефектов. В качестве еще одной причины, можно назвать ошибки при проектировании узлов оборудования из-за несоответствия истинного (действительного) состояния выбранного материала, так как для каждого материала существует только ему присущие уравнения состояния, связывающие напряжение, деформацию, скорость деформации, температуру, длительность нагружения во времени или циклах, которые определяются экспериментально путем проведения испытаний при соответствующих условиях нагружения. Частным случаем таких характеристик является упругость, которая является реальным свойством большинства конструкционных материалов в определенном диапазоне нагрузок и температур[2]. Таким образом, задача бесконтактного контроля фактического напряженно-деформированного состояния узлов и конструкций в процессе их эксплуатации является своевременной и актуальной.

Постановка задачи исследования. В качестве объекта исследования выбираем модель цилиндрического образца (вал) из ферромагнитного материала (сталь45), размещенного внутри электромагнитного преобразователя трансформаторного типа (см. рис. 1), который подвергается механическому воздействию под действием крутящего момента относительно нормали к осевому сечению.

При рассмотрении геометрической стороны задачи, используя гипотезу плоских сечений (кулоновское распределение), которая в нашем случае сводится к предположениям о том, что поперечные сечения стержня кругового сечения при кручении не деформируются, остаются плоскими и радиусы в поперечных сечениях остаются прямолинейными. Условие прочности при кручении можно записать в виде [2]:

$$\tau_{\max} = \frac{M}{W_p} = \frac{16M}{\pi d^3} \ll [\tau], \quad (1)$$

где τ_{\max} - касательное напряжение на поверхности вала; M - вращающий момент; W_p -

полярный момент сопротивления; d - диаметр вала; $[\tau]$ - предельно допустимое касательное напряжение для упругого состояния вала.

Решение задачи и результаты исследований. С учетом работ [3,4], в области упругих деформаций, вращающий момент можно контролировать по изменению электромагнитных свойств (магнитоупругий и тензометрический эффекты) ферромагнитного образца. С другой стороны, на основании работ [5,6], можно показать, что с помощью вихретокового преобразователя (ВТП) можно бесконтактно измерять относительную магнитную проницаемость μ_r и удельное электрическое сопротивление ρ цилиндрического ферромагнитного образца. Из источника [3] известно, что электромагнитные параметры ферромагнитного образца зависят от температурной и механической деформации. Выходными сигналами ВТП, зависящими от μ_r и ρ являются вносимое (разносное) напряжение $U_{вн}$ и его фаза $\varphi_{вн}$ при условии постоянства напряженности зондирующего магнитного поля, его частоты и геометрических размеров датчика и ферромагнитного образца.

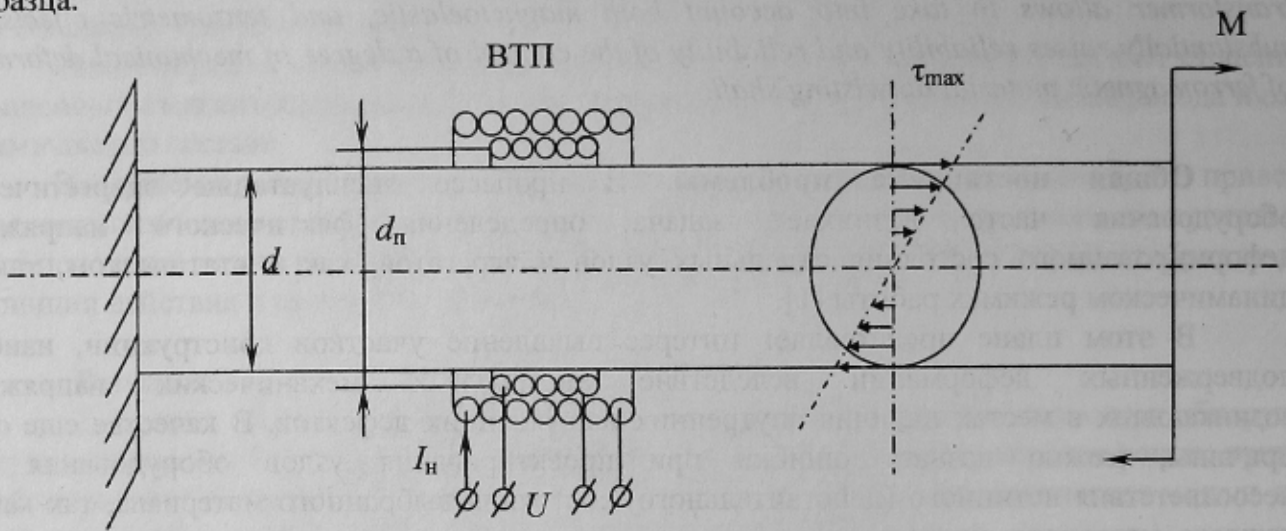


Рисунок 1 - Модель ВТП с ферромагнитным валом, на который действует вращающий (скручивающий) момент M

Выражения, связывающие выходные сигналы ВТП с электромагнитными параметрами исследуемого образца при заданных режимах работы преобразователя, исходя из работы [5], имеют вид:

$$U_{вн} = U_{\Sigma 0} \eta \sqrt{\mu_r^2 K^2 + 1 - 2\mu_r K \cos \varphi_2}; \quad (2)$$

$$\varphi_{вн} = \arctg \frac{\mu_r K \sin \varphi_2}{\mu_r K \cos \varphi_2 - 1}, \quad (3)$$

где функции K , $\sin \varphi_2$, $\cos \varphi_2$ нормированный по амплитуде параметр магнитного потока внутри изделия и его фаза, которые однозначно зависят от обобщенного параметра

$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{2\pi\mu_0\mu_r f}{\rho}}$ и могут быть рассчитаны и протабулированы с помощью функций Бесселя от

параметра x в широком диапазоне его изменения; $U_{\Sigma 0}$ - напряжение вторичной обмотки преобразователя без исследуемого образца; $\eta = d^2/d_n^2$ коэффициент заполнения; d_n - диаметр измерительной обмотки преобразователя; f - частота зондирующего магнитного поля ВТП; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

Так как при воздействии вращающего момента на ферромагнитный вал изменяются его электромагнитные параметры μ_r и ρ , а геометрические размеры вала и преобразователя остаются неизменными, то при фиксированной напряженности магнитного поля, разделив правую и левую части выражения (2) на постоянную величину $U_{\Sigma 0} \eta$ получим:

$$N = \frac{U_{\text{вн}}}{U_{\Sigma 0} \eta} = \sqrt{\mu_r^2 K^2 + 1 - 2\mu_r K \cos \varphi_2}, \quad (4)$$

где N - безразмерный нормированный коэффициент преобразования.

На рис. 2 и 3 приведены графические зависимости параметров N и $\varphi_{\text{вн}}$ от обобщенного параметра x для различных фиксированных значений относительной магнитной проницаемости.

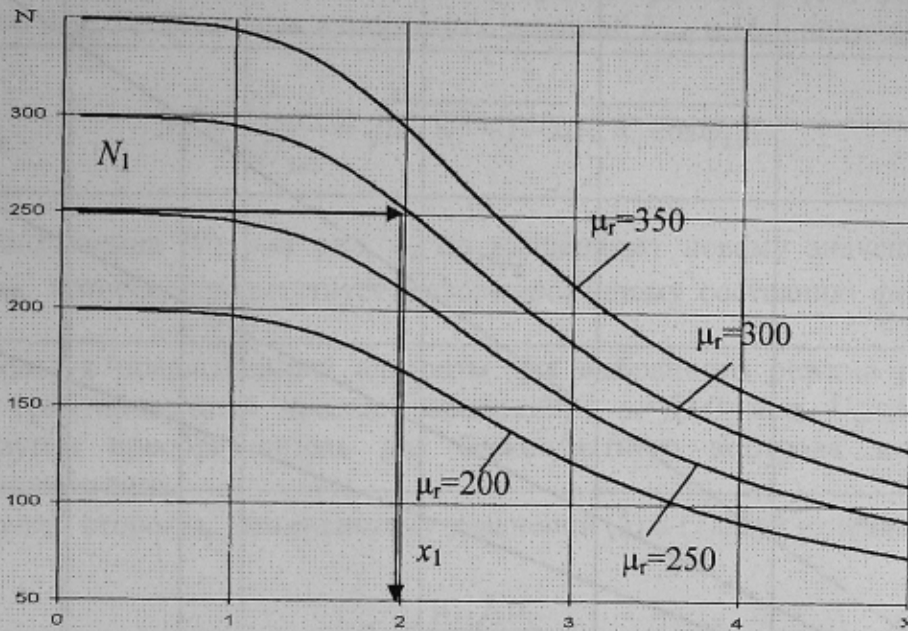


Рисунок 2 – Расчет зависимости функции для фиксированных значений x

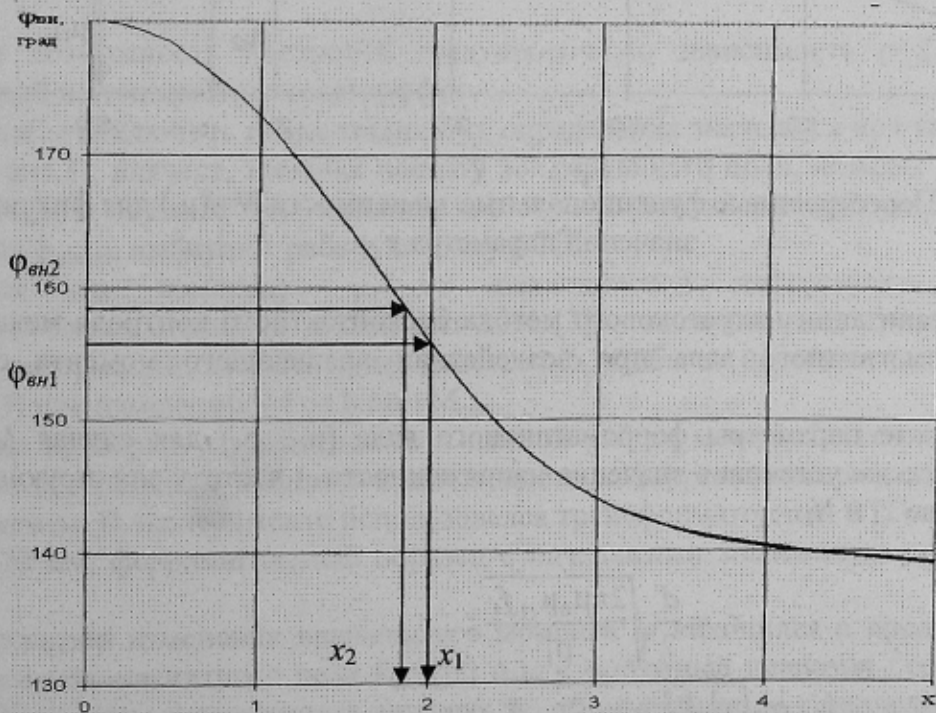


Рисунок 3 – Зависимость $\varphi_{\text{вн}}$ вихретокового преобразователя от обобщенного значения x при различных значениях μ_r

Из зависимости (см. рис. 3) видно, что, как бы не изменялись электромагнитные, геометрические параметры исследуемого ферромагнитного образца и частота зондирующего поля, $\varphi_{вн}$ связан с параметром x практически (для $x < 5$) единственной функциональной зависимостью $\varphi_{вн} = f(x)$. Таким образом, если мы зададимся значением обобщенного параметра x в диапазоне $0 < x < 5$, то семейство кривых (см. рис. 2) можно перестроить в зависимость $N = f(\mu_r)$ при $x = \text{const}$.

Графики зависимости $N = f(\mu_r)$ для различных фиксированных значений x приведены на рис. 4.

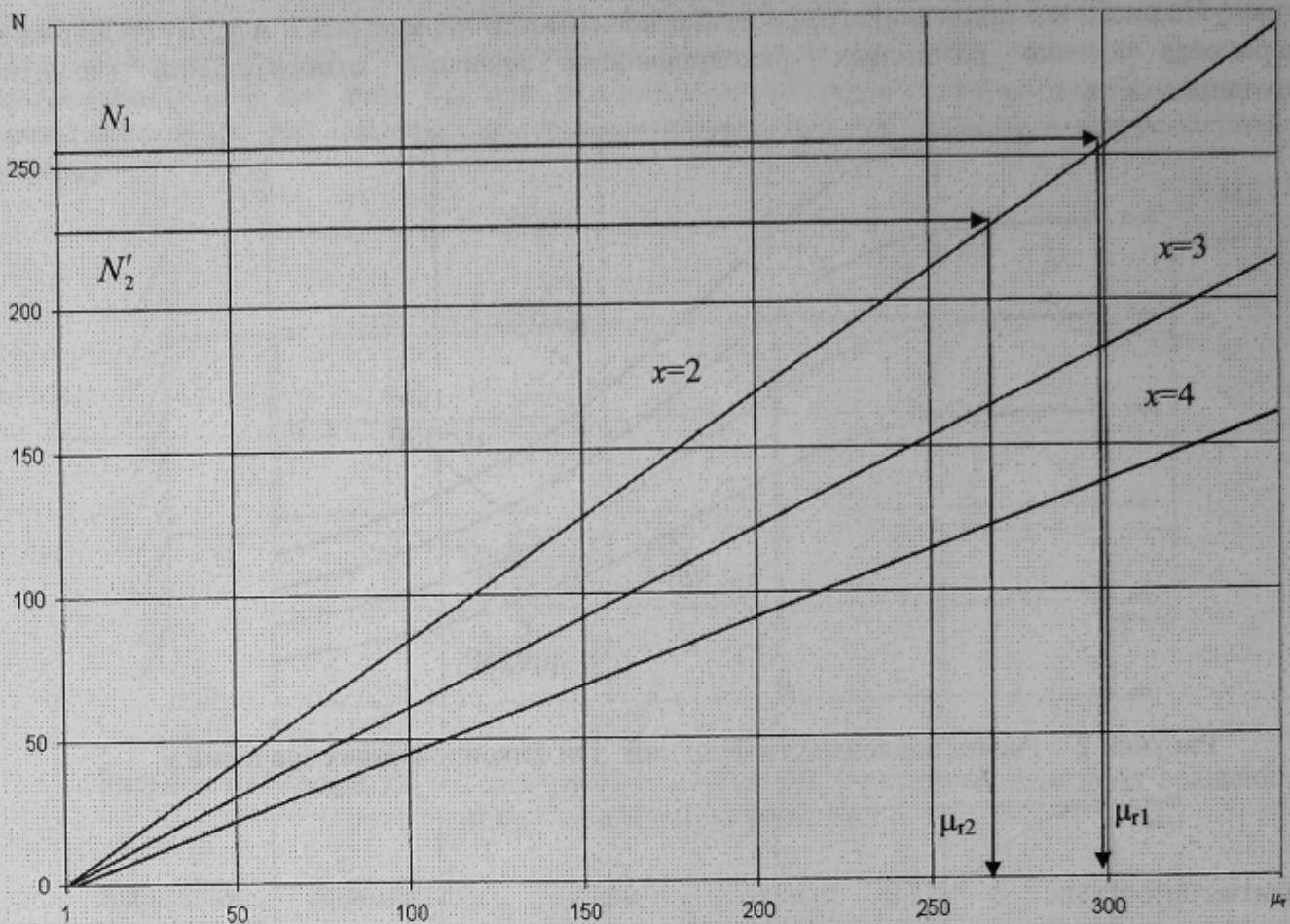


Рисунок 4 – Перестроенные функциональные зависимости $N = f(\mu_r)$ для фиксированных значений параметра x

Алгоритм реализации вихретокового метода бесконтактного контроля механической деформации ферромагнитного вала при воздействии вращающего момента состоит в следующем.

Зная начальные параметры ферромагнитного вала (μ_{r1} , ρ_1) для случая $M = M_1 = 0$ и параметры ВТП, а также установив значение напряженности и частоту зондирующего поля, определяют значение x_1 и N_1 .

$$x_1 = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{2\pi\mu_0\mu_{r1}f_1}{\rho_1}}; \tag{5}$$

$$N_1 = \sqrt{\mu_{r1}^2 K_1^2 + 1 - 2\mu_{r1} K_1 \cos \varphi_{21}}. \tag{6}$$

Этому значению x_1 соответствует значение $\varphi_{вн1}$ (см. рис. 3). Затем, к ферромагнитному валу прикладывают вращающий момент $M=M_2 \neq 0$, что приведет к изменению электромагнитных параметров вала (μ_{r2} и ρ_2) [4], т.е.

$$x_2 = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{2\pi\mu_0\mu_{r2}f_1}{\rho_2}}; \tag{7}$$

$$N_2 = \sqrt{\mu_{r2}^2 K_2^2 + 1 - 2\mu_{r2} K_2 \cos \varphi_{22}}. \tag{8}$$

Значение N_2 , полученные из выражения (8), нельзя использовать при определении μ_{r2} , т.к. зависимость $N=f(\mu_r)$ построена для значения $x=x_1=const$, которое отличается от x_2 . Поэтому, изменяя частоту f до значения f_2 , при которой $x_2=x_1$ (см. форм. (7)), а значит и $\varphi_{вн2}=\varphi_{вн1}$ (см. рис. 3), для новых измеренных значений $U_{вн2}$ и $U_{\Sigma 02}$ получим:

$$N'_2 = \frac{U_{вн2}}{\eta U_{\Sigma 02}} = \sqrt{\mu_{r2}^2 K_1^2 + 1 - 2\mu_{r2} K_1 \cos \varphi_{21}}. \tag{9}$$

Из выражения (9) или рис. 4, по найденному новому значению N'_2 определяют значение μ_{r2} , которое соответствует деформированному состоянию ферромагнитного вала при $M \neq 0$.

Используя предложенный алгоритм для выбранного режима работы ВТП можно построить градуировочные кривые зависимости $\mu_r=f(M)$ или $U_{вн}=f(M)$, т.е. построить магнитоупругий преобразователь для бесконтактного контроля момента скручивания ферромагнитного вала.

С другой стороны, решая систему уравнений (5) и (7), при условии $x_2=x_1$, получим:

$$\rho_2 = \frac{\mu_{r2} f_2 \rho_1}{\mu_{r1} f_1}, \tag{10}$$

что дает возможность построить градуировочную зависимость $\rho=f(M)$ и создать ВТП основанный на тензометрическом эффекте.

Чтобы исключить неоднозначность определения значения x при выборе рабочей точки $\varphi_{вн}$, (см. рис.3), вначале, изменяя частоту зондирующего поля, находят значение $\varphi_{внтах}$ (при котором $x \geq 5$) и после этого, уменьшая частоту в 2 раза от значения f при котором фазометр показывал $\varphi_{внтах}$, выбирают рабочую точку ВТП.

Так как изменение μ_r от механической деформации для большинства конструкционных сталей не превышает 10% [3], а значение ρ не превышает 3% в области упругих деформаций, то этого будет достаточно, чтобы не перескочить через значение $\varphi_{внтах}$ (см. рис.3) при изменении M от 0 до $\pm M_{max}$.

Для проверки разработанного в данной работе метода бесконтактного определения величины вращающего момента приложенного к ферромагнитному валу были проведены эксперименты. В эксперименте использовался трансформаторный ВТП с параметрами: $d_n=12$ мм; $l_n=170$ мм, ферромагнитный образец с начальными значениями $\mu_r=300$; $\rho=5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; $d=6$ мм.

Диапазон изменения вращающего момента M находился в пределах от 0 до 8 Н·м. Напряженность магнитного поля $H_0=500$ А/м и частотный диапазон f составлял от 50 Гц до 500 Гц. Результаты эксперимента для двух значений параметра x приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения параметров при бесконтактном контроле вращающего момента для ферромагнитного вала.

М, Н·м	τ , МПа	$U_{вн}$, мВ	$U_{\Sigma 0}$, мВ	f , Гц	N	μ_r	ρ , 10^{-7} Ом·м
для $x=2$; $\varphi_{вн}=156$ град.							
0	0	355,2	5,61	93,8	253,24	300	5,00
2	46	353,6	5,70	95,4	248,15	294	4,98
4	95	352,2	5,79	96,9	243,07	288	4,96
6	142	350,8	5,89	98,6	237,99	282	4,94
8	190	349,2	5,99	100,3	232,90	276	4,92
для $x=3$; $\varphi_{вн}=144$ град.							
0	0	580,3	12,63	211,1	183,78	300	5,00
2	46	578,1	12,84	214,5	180,08	294	4,98
4	95	575,5	13,05	218,1	176,39	288	4,96
6	142	573,4	13,28	221,9	172,70	282	4,94
8	190	570,8	13,51	225,8	169,01	276	4,92

Из таблицы видно, что чувствительность по выходному напряжению ВТП составила $S_{U_{вн}}=0,8$ мВ/Н·м для $x=2$ и $S_{U_{вн}}=1,2$ мВ/Н·м для $x=3$.

Выводы.

Результаты работы показывают, что разработанный преобразователь и алгоритм бесконтактного контроля вращающего момента может широко использоваться как датчик в автоматизированных системах управления приводами, а также при диагностике и определении предельно-допустимых механических нагрузок в энергетическом оборудовании. Предложенный преобразователь, в силу объединения в нем магнитоупругого и тензометрического эффектов, легко адаптируется при определении механических моментов скручивания, возникающих в различных по сортаменту ферромагнитных и немагнитных металлах с преобладанием одного из этих эффектов, что расширяет его функциональные возможности.

Литература

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др., Под. Ред. В.В. Клюева. –М.: Машиностроение, 1995.-488 с.
2. Носилевич Г.Б., Лебедев П.А., Стреляев В.С. Прикладная механика: Для студентов вузов.-М.: Машиностроение, 1985.-576 с.
3. Вонсовский С.В., Щур Я.С. Ферромагнетизм.-М.-Л.: ОГИЗ Гостехиздат, 1948. -816 с.
4. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Смирнов С.В. и др. Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей при одноосном растяжении //Тезисы докладов 5-ой Международной конференции "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности. Москва, 16-19 мая 2006 г.-М.:Машиностроение, 2006.-С.63.
5. Горкунов Б.М., Тюпа И.В. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий//Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць.-Харків: НТУ"ХПІ".-2004.-№5.-С.93-99.
6. Себко В.П., Горкунов Б.М., Жулидов А.О. Алгоритм и функциональная схема автоматической установки для контроля механических параметров металлических изделий // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць.-Харків: НТУ"ХПІ".-2004.-№4.-С.103-110.