

УДК 620.179.14

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Б. М. Горкунов, А. В. Кипенский, С. Г. Львов**

Национальный технический университет «ХПИ»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

Разработан электромагнитный первичный преобразователь для бесконтактного контроля механически-деформированного состояния цилиндрических валов в системах электроприводов, работающих на общий исполнительный механизм, что обеспечивает безаварийную и эффективную работу всего энергетического оборудования электропривода.

**Ключевые слова:** электромагнитный преобразователь, магнитная проницаемость, удельное электрическое сопротивление.

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВУЗЛІВ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

**Б. М. Горкунов, А. В. Кіпенський, С. Г. Львов**

Національний технічний університет «ХПІ»

вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

Розроблено електромагнітний первинний перетворювач для бесконтактного контролю механічно-деформованого стану циліндричних валів у системах електроприводів, які працюють на загальний виконавчий механізм, що забезпечує безаварійну та ефективну роботу всього енергетичного обладнання електроприводу.

**Ключові слова:** електромагнітний перетворювач, магнітна проникність, питомий електричний опір.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В процессе безаварийной эксплуатации энергетического оборудования часто возникает задача определения фактического напряженно-деформированного состояния отдельных узлов и агрегатов [1]. Особенно это актуально, когда на одну механическую нагрузку параллельно работают два агрегата (дизель или электрическая машина). В этом плане представляет интерес выявление участков конструкции, наиболее подверженных деформации в динамическом режиме работы вследствие неравенства мощностей (крутящих моментов), отдаваемых каждым агрегатом через приводные валы на общий исполнительный механизм.

Постоянный бесконтактный контроль механической деформации приводных валов наиболее предпочтительно определять с помощью электромагнитного преобразователя (ЭМП), т.к. он имеет выходной электрический сигнал, функционально связанный с механическими напряжениями в металлическом приводном валу [2]. С помощью этого сигнала по обратной связи можно непосредственно управлять режимами работы приводных двигателей.

Данная работа посвящена разработке бесконтактных электромагнитных преобразователей для контроля механических напряжений, возникающих в приводных валах с целью обеспечения безаварийной и эффективной работы механических систем с двумя электродвигателями, работающими на одну нагрузку.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Исходя из закономерности (1), полученной академиком Н.С. Акуловым, все упругие эффекты для поликристаллических тел в области прямолинейной части кривой намагничивания пропорциональны первой степени деформации и квадрату магнитной индукции для ферромагнитных материалов. На этом законе основан принцип действия любого магнитоупругого преобразователя, т.е.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \approx \frac{B^2}{B_m^2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_m$  – относительные деформации образца, помещенного в магнитное поле, соответствующие прямолинейной части кривой намагничивания и участку насыщения;  $B$  и  $B_m$  – магнитные индукции прямолинейного участка и участка насыщения кривой намагничивания соответственно.

Механическое усилие искажает кристаллическую структуру ферромагнетика, происходит изменение его абсолютной магнитной проницаемости  $\delta\mu$  (где  $\mu = \mu_0\mu_r$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость), следовательно, это приводит к изменению удельной энергии магнитного поля, выражение для которого записывается в виде:

$$\Delta W = -\frac{H^2}{2} \delta\mu, \quad (2)$$

где  $H$  – напряжённость магнитного поля внутри образца.

Любая деформация (растяжение или сжатие) приводит к появлению потенциальной (упругой) удельной энергии материала образца, выражение для которой имеет вид

$$W = -\sigma\varepsilon, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – механическое напряжение материала образца.

Исходя из закона сохранения энергии, внутри изделия приравняем (2) и (3), и тогда, с учетом (2) и связи  $B$  с  $H$ , где  $B = \mu H$ , запишем выражение для расчета относительного изменения  $\delta\mu/\mu$

$$\frac{\delta\mu}{\mu} = 2 \frac{\varepsilon_m}{B_m^2} \mu\sigma. \quad (4)$$

Для увеличения магнитоупругой чувствительности, исходя из выражения (4), необходимо выбирать материал образца с малыми величинами магнитной индукции насыщения и с большими значениями магнитной проницаемости, деформации насыщения.

Такими являются магнитомягкие материалы – это конструкционные углеродистые и электротехнические стали, химически чистое железо, железобальтовые сплавы, а также многие другие ферромагнитные материалы, сплав типа пермаллоя.

При наличии деформации (растяжение или сжатие), помимо магнитоупругого эффекта, существует и тензорезистивный эффект, заключающийся в том, что при деформации (или механических напряжениях) материала образца изменяется его электрическое сопротивление, т.е. изменяются удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , длина  $l$  и площадь поперечного сечения  $S$  деформируемого образца (т.е. имеют место приращения  $\delta\rho$ ,  $\delta l$  и  $\delta S$ ). Так, выражение для определения относительного приращения сопротивления цилиндрического образца имеет вид:

$$\delta R/R = \delta\rho/\rho + \delta l/l - 2\delta r/r, \quad (5)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление образца;  $\delta l/l$  – деформация;  $\delta r/r$  – относительное приращение радиуса образца.

Исходя из выражения (5), следует, что  $\delta\rho/\rho$  характеризует относительное изменение сопротивления, связанное с искажением кристаллических решеток материала образца, что приводит к изменению структуры электростатических полей внутри искаженных решеток, а значит и к изменению среднего значения  $\rho$ ; слагаемые  $\delta l/l$  и  $\delta r/r$  характеризуют изменение геометрических параметров изделия (в нашем случае пренебрежимо малы).

Из вышеизложенного следует, что магнитоупругий и тензорезистивный эффекты существуют одновременно в токопроводящих материалах.

Рассмотрим систему электропривода (рис. 1,а), которая содержит: два электродвигателя (ЭД1, ЭД2); два приводных вала с установленными на них преобразователями (ЭМП1, ЭМП2); общую механическую нагрузку (Н); систему обработки и управления (СОУ). Поскольку наиболее важным звеном в системе управления для получения точной и достоверной информации о механической деформации элементов электропривода является первичный преобразователь, то рассмотрим его работу.

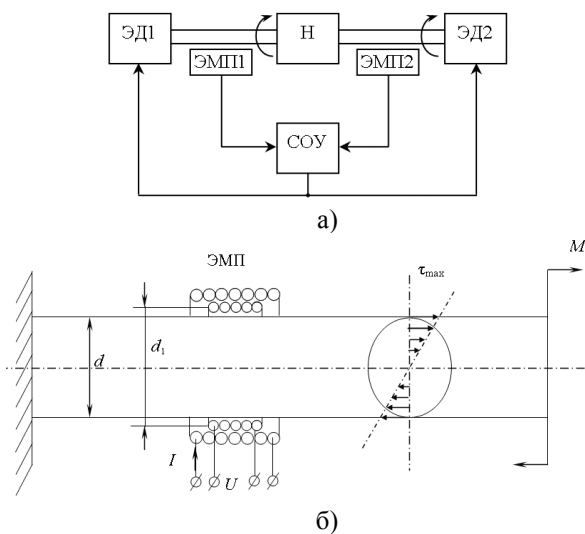


Рисунок 1 – Структурная схема: а) электропривод; б) модель ЭМП с ферромагнитным валом, на который действует вращающий (скручивающий) момент

В качестве объекта исследования выберем модель цилиндрического вала, который подвергается механической деформации под действием крутящего момента относительно нормали к осевому сечению и размещен (рис. 1,б) внутри электромагнитного преобразователя трансформаторного типа. Известно, что в области упругих деформаций вращающий момент, который приложен к приводному валу, можно контролировать по изменению электромагнитных свойств (магнитоупругий и тензорезистивный эффекты) ферромагнитного образца.

С другой стороны, на основании работ [3, 4], можно показать, что с помощью ЭМП можно бесконтактно контролировать  $\mu_r$  и  $\rho$  цилиндрического ферромагнитного образца. Выходными сигналами ЭМП, зависящими от  $\mu_r$  и  $\rho$ , являются вносимое (разносное) напряжение  $U_v$  и его фаза  $\varphi_v$  при условии постоянства напряженности зондирующего магнитного поля, его частоты и геометрических размеров датчика и ферромагнитного образца.

Выражения, связывающие выходные сигналы трансформаторного ЭМП с электромагнитными параметрами исследуемого образца при заданных режимах работы, исходя из [4], имеют вид:

$$U_v = U_{\Sigma 0} \eta \sqrt{\mu_r^2 K^2 + 1 - 2\mu_r K \cos \varphi_2}; \quad (6)$$

$$\varphi_v = \arctg \frac{\mu_r K \sin \varphi_2}{\mu_r K \cos \varphi_2 - 1}, \quad (7)$$

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  $x$ .

Так как при воздействии вращающего момента на ферромагнитный вал изменяются его электромагнитные параметры  $\mu_r$  и  $\rho$ , а геометрические размеры вала и преобразователя остаются неизменными, то при фиксированной напряженности магнитного поля, разделив правую и левую части выражения (6) на постоянную величину  $U_{\Sigma 0} \eta$ , получим:

$$N = \frac{U_v}{U_{\Sigma 0} \eta} = \sqrt{\mu_r^2 K^2 + 1 - 2\mu_r K \cos \varphi_2}, \quad (8)$$

где  $N$  – безразмерный нормированный коэффициент преобразования.

На рис. 2,а,б приведены графические зависимости параметров  $N$  и  $\varphi_v$  от обобщенного параметра  $x$  для различных фиксированных значений относительной магнитной проницаемости.

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

Для упрощения реализации метода перестроим зависимости, приведенные на рис. 2,а, в зависимости  $N = F(\mu_r)$  для различных фиксированных значений  $x$ , которые приведены на рис. 3.

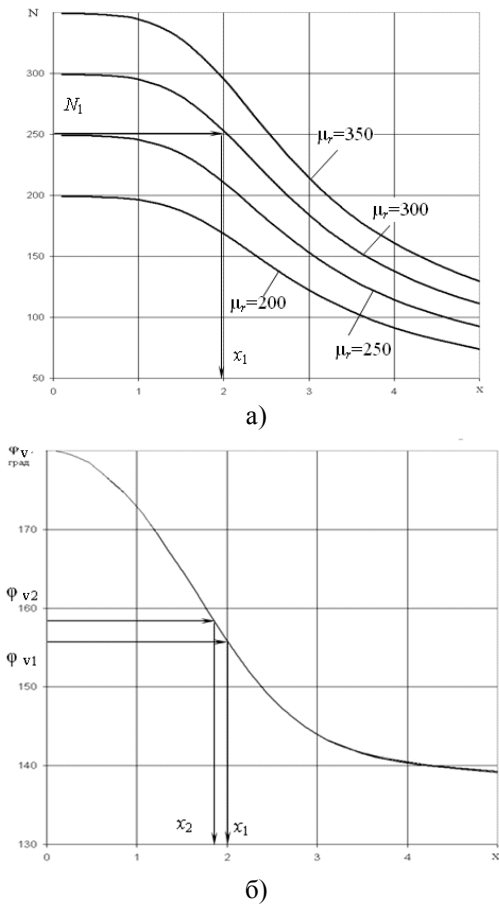


Рисунок 2 – Зависимости нормированного коэффициента (а) и  $\varphi_v$  (б) ЭМП от  $x$  при различных значениях  $\mu_r$ .

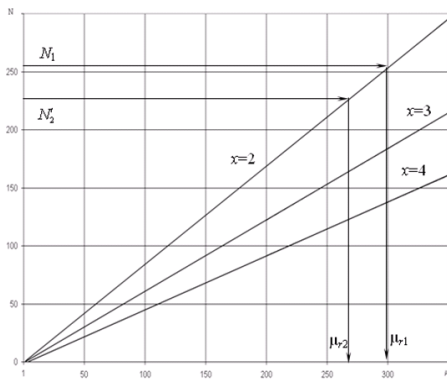


Рисунок 3 – Функциональные зависимости  $N = f(\mu_r)$  для фиксированных значений параметра  $x$

Алгоритм реализации электромагнитного метода бесконтактного контроля механической деформации ферромагнитного вала при воздействии вращающего момента состоит в следующем. Зная начальные параметры ферромагнитного вала ( $\mu_{r1}$ ,  $\rho_1$ ) для случая  $M_1 = M_2$  и геометрические параметры ЭМП и исследуемого образца (вала), а также установив значение напряженности и начальную частоту зондирующего поля, определяют значение  $x_1$  и  $N_1$ :

$$x_1 = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{2\pi\mu_0\mu_{r1}f_1}{\rho_1}} ; \quad (9)$$

$$N_1 = \sqrt{\mu_{r1}^2 K_1^2 + 1 - 2\mu_{r1} K_1 \cos \varphi_{21}} . \quad (10)$$

Этому значению  $x_1$  соответствует значение  $\varphi_{v1}$  (рис. 2,б). Затем к одному из приводных ферромагнитных валов прикладывают вращающий момент  $M_1 \neq M_2$ , что приведет к изменению электромагнитных параметров данного вала ( $\mu_{r2}$  и  $\rho_2$ ), т.е.

$$x_2 = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{2\pi\mu_0\mu_{r2}f_1}{\rho_2}} ; \quad (11)$$

$$N_2 = \sqrt{\mu_{r2}^2 K_2^2 + 1 - 2\mu_{r2} K_2 \cos \varphi_{22}} . \quad (12)$$

Значения  $N_2$ , полученные из выражения (12), нельзя использовать при определении  $\mu_{r2}$ , т.к. зависимость  $N = F(\mu_r)$  построена для значения  $x = x_1 = \text{const}$ , которое отличается от полученного значения  $x_2$ . Поэтому, изменяя частоту  $f_1$  до значения  $f_2$ , при которой  $x_2 = x_1$  (11), а значит и  $\varphi_{v2} = \varphi_{v1}$  (рис. 2,б), для новых измеренных значений  $U_{v2}$  и  $U_{\Sigma 02}$  получим:

$$N_2' = \frac{U_{v2}}{\eta U_{\Sigma 02}} = \sqrt{\mu_{r2}^2 K_1^2 + 1 - 2\mu_{r2} K_1 \cos \varphi_{21}} . \quad (13)$$

Из выражения (13) или рис. 3 по найденному новому значению  $N_2'$  определяют значение  $\mu_{r2}$ , которое соответствует деформированному состоянию ферромагнитного вала при  $M_1 \neq M_2$ .

Используя предложенный алгоритм для выбранного режима работы ЭМП, можно построить градуировочные кривые зависимости  $\mu_r = F(M)$  или  $U_v = F(M)$ , т.е. построить магнитоупругий преобразователь для бесконтактного контроля момента скручивания ферромагнитного вала.

С другой стороны, решая систему уравнений (9) и (11), при условии  $x_2 = x_1$ , получим:

$$\rho_2 = \frac{\mu_{r2} f_2 \rho_1}{\mu_{r1} f_1} , \quad (14)$$

что дает возможность построить градуировочную зависимость  $\rho = F(M)$  и создать преобразователь, работа которого основана на тензометрическом эффекте. Следует заметить, что при реализации данного алгоритма как в одном, так и во втором случае, выходным сигналом преобразователя является частота возбуждающего тока, которую достаточно легко преобразовать в цифровой код методами импульсно-цифрового преобразования [5]. Полученный цифровой код может быть использован не только для контроля напряженно-деформированного состояния вала, но и в качестве сигнала обратной связи при формировании управляющего воздействия в СОУ (рис. 1,а).

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

Так как изменение  $\mu_r$  от механической нагрузки в области упругих деформаций для большинства конструкционных сталей не превышает 5 %, а значение  $\rho$  не превышает 3 %, то этого будет достаточно, чтобы не перескочить через значение  $\varphi_{v \max}$  (рис. 2,б) при

изменении  $M$  от 0 до  $\pm M_{max}$ .

Для проверки разработанного в данной работе метода и устройства бесконтактного определения величины вращающего момента, приложенного к ферромагнитному валу, были проведены эксперименты. В эксперименте использовался трансформаторный ЭМП с параметрами:  $d_1 = 12$  мм;  $l = 170$  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 200 до 270 Гц. Результаты эксперимента для выбранного значения параметра  $x = 3$  приведены в табл. 1.

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

$M$ , Н·м	$\tau$ , МПа	$U_v$ , мВ	$U_{\Sigma 0}$ , мВ	$f$ , Гц	$N$	$\mu_r$	$\rho$ , $10^{-7}$ Ом·м
для $x=3$ ; $\varphi_v=144$ град.							
0	0	580,3	12,63	211	183,78	300	5,00
2	46	578,1	12,84	222	180,08	294	4,98
4	95	575,5	13,05	235	176,39	288	4,96
6	142	573,4	13,28	248	172,70	282	4,94
8	190	570,8	13,51	261	169,01	276	4,92

Из таблицы видно, что чувствительность по выходному напряжению ВТП составила  $S_{Uv} = 1,2$  мВ/Н·м, а по частоте –  $S_f = 6,2$  Гц/Н·м для  $x = 3$ , что вполне приемлемо для построения систем автоматического регулирования в электроприводах.

## ELECTROMAGNETIC TRANSDUCER FOR THE CONTROL OF STRESS-STRAIN STATE POWER EQUIPMENT PARTS

**B. Gorkunov, A. Kipenskyi, S. Lvov**

National Technical University "KhPI"

ul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

In this paper we developed an electromagnetic flow sensor for contactless control of a mechanically-strained state of cylindrical shafts in the electric systems serving a total strain, which ensures trouble-free and efficient operation of power equipment.

**Key words:** electromagnetic transducer, magnetic permeability, electrical conductivity.

### REFERENCES

1. An electromagnetic transducer time twisting the shaft of the electric // *The auto-mated actuator: between-drug work. scientific and engineering conference.* – Alushta, 1994. – 160 p. [in Russian]
2. Bida G.V. Non-destructive testing of mechanical properties of rolled steel (review). Control of strength and plastic properties / *Defectoscopy.* – 2005. – № 5. – PP. 39–53. [in Russian]
3. Gorkunov B.M. Electromagnetic methods for non-contact measurement of mechanical quantities // *Ukrainian Journal of Metrology.* – 2001. – № 3. – PP. 47–50. [in Russian]
4. Gorkunov B.M. Methods and means of non-contact control of mechanical stress, effort, weight, and strains in cylindrical products / *Bulletin NTU "KhPI".* – 2002. – № 12. – Iss. 1. – PP. 285–288. [in Russian]
5. Kipenskyi A. *Pulse-to-digital and digital-to-pulse converters.* – Kharkov: National Technical University "KhPI", 2000. – 132 p. [in Russian]

Стаття надійшла 17.07.2012.

Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Сінчуком О.М.