

Б. М. ГОРКУНОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
С. Г. ЛЬВОВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
А. А. ТИЩЕНКО, канд. техн. наук, ассистент НТУ «ХПИ»;
ВУ СУАН ВЬЮНГ, магистр НТУ «ХПИ»

БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Введение. На сегодняшний день безаварийная работа энергетических агрегатов зависит от постоянного бесконтактного контроля механических параметров энергетических установок. Существует достаточно большое количество первичных преобразователей информации о качестве и работоспособности металлических объектов. Наиболее предпочтительными являются электромагнитные методы и преобразователи, так как они обладают многопараметровостью информации, бесконтактным съемом информации, электрической формой выходного сигнала, слабой зависимостью от внешних мешающих факторов (влажность, температура, загрязненность поверхности и др.).

В работах [1-3] были рассмотрены различные модификации абсолютного электромагнитного метода и реализующие его трансформаторные электромагнитные преобразователи (ТЭМП) для бесконтактного контроля механических напряжений (σ_m) в цилиндрических металлических изделиях, используя корреляционные зависимости между σ_m и относительной магнитной проницаемостью (μ_r) и удельной электрической проводимостью (σ) материала.

Исследования показывают, что относительные погрешности контроля магнитных и электрических параметров цилиндрических изделий в рациональной области изменения обобщенного параметра x не превышают 1 и 2 % соответственно. Последнее обстоятельство указывает на то, что относительный разброс электромагнитных параметров, измеряемых абсолютным методом, должен превышать хотя бы на порядок, т.е. в 10 раз больше при переходе от одного изделия к другому. Это означает, что относительные разбросы μ_r и σ одного изделия от другого должны составлять 10 % по μ_r и 20 % по σ . Поэтому абсолютными двухпараметровыми методами целесообразно пользоваться преимущественно для контроля изделий различных марок, поскольку чувствительность преобразователя не позволяет контролировать достаточно близкие между собой электромагнитные параметры μ_r и σ изделий при воздействии на них механических усилий в рамках применимости закона Гука [4].

Цель статьи. Для повышения чувствительности бесконтактного контроля механических параметров металлических образцов в данной работе предложен один из вариантов дифференциального двухпараметрового электромагнитного метода, реализованного для трансформаторного преобразователя.

Материалы и результаты исследований. Суть разработанного метода заключается в следующем. Используя универсальную функцию [5] электромагнитного преобразователя для нормированного магнитного потока $K = f(x)$, получим относительное приращение $\frac{\delta K}{K}$ параметра K в виде:

$$\frac{\delta K}{K} = \frac{\partial K}{\partial x} \frac{x}{K} \frac{\delta x}{x}, \quad (1)$$

где $\frac{\partial K}{\partial x}$ – производная параметра K по x ; x – обобщенный параметр, $x = a\sqrt{\mu_0\mu_r\sigma\omega}$, a – радиус изделия, μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, ω – циклическая частота зондирующего поля.

Воспользовавшись функциональной зависимостью $x = f(\varphi_2)$, которая однозначно зависит от фазового угла магнитного потока в исследуемом изделии [5], получим формулу для относительного приращения параметра x в виде:

$$\frac{\delta x}{x} = \frac{\partial x}{\partial \varphi_2} \frac{1}{x} \delta \varphi_2, \quad (2)$$

где φ_2 – фазовый угол выходного сигнала ТЭМП; $\frac{\partial x}{\partial \varphi_2}$ – производная x по φ_2 ; $\delta \varphi_2$ – абсолютная погрешность измерения фазового угла φ_2 .

На основании соотношений (1) и (2) выражение для расчета $\frac{\delta K}{K}$ получим в виде:

$$\frac{\delta K}{K} = \frac{\partial K}{\partial \varphi_2} \frac{1}{K} \delta \varphi_2. \quad (3)$$

Таким образом, измерив электродвижущую силу (ЭДС) E_2 и E_0 трансформаторного преобразователя с изделием и без него соответственно, при заданных значениях радиуса изделия a и радиуса преобразователя a_n , определив параметр K и x , вычислим значение μ_r из выражения [6]:

$$\mu_r = \frac{E_2 a_n^2}{E_0 a^2 K}. \quad (4)$$

Величину σ определим из выражения [6]:

$$\sigma = \frac{x^2}{2\pi a^2 \mu_0 \mu_r f}, \quad (5)$$

где f – частота намагничивающего тока.

Выражения (4) и (5) позволяют найти значения μ_r и σ в последовательном цикле, т.е. сначала определяют параметр μ_r , а затем σ . При автоматизации процесса совместного контроля двух параметров удобно применить параллельный цикл расчетов по результатам эксперимента.

Для этого, после подстановки в (5) выражение (4), получим:

$$\sigma = \frac{x^2 E_0 K}{2\pi \mu_0 E_2 a_n^2 f}. \quad (6)$$

Величину μ_r находят по-прежнему из соотношения (4).

Если использовать формулу (4) для расчета величины μ_r и считать что параметры a , a_n и E_0 являются постоянными в случае выбранного изделия, тогда соотношение для определения относительного приращения магнитной проницаемости $\frac{\delta \mu_r}{\mu_{rc}}$ можно записать как:

$$\frac{\delta \mu_r}{\mu_{rc}} = \frac{\delta E_2}{E_{2c}} - \frac{\partial K}{\partial \varphi_2} \frac{1}{K_c} \delta \varphi_2. \quad (7)$$

где μ_{rc} , K_c , E_{2c} и μ_r , E_2 – величины, имеющие отношение к выбранной рабочей точке, определяемой параметрами стандартного образца (СО) и исследуемого образца (ИО) соответственно; $\frac{\delta E_2}{E_{2c}}$ – относительное приращение ЭДС E_2 , вызванное изменением μ_r образца под действием механической силы.

С учетом формулы (6) выражение для расчета относительного приращения удельной электрической проводимости $\frac{\delta \sigma}{\sigma_c}$ определяют, исходя из соотношения:

$$\frac{\delta \sigma}{\sigma_c} = 2 \frac{\delta x}{x_c} + \frac{\delta K}{K_c} - \frac{\delta E_2}{E_{2c}}, \quad (8)$$

где индекс «с» имеет отношение к рабочей точке преобразователя, определенной для стандартного образца.

Подставив в (8) формулы (2) и (3), найдем выражения для определения относительного приращения $\frac{\delta \sigma}{\sigma_c}$ величины электропроводности σ . При этом:

$$\frac{\delta \sigma}{\sigma_c} = \left(2 \frac{\partial x}{\partial \varphi_2} \frac{1}{x} + \frac{\partial K}{\partial \varphi_2} \frac{1}{K} \right) \delta \varphi_2 - \frac{\delta E_2}{E_{2c}}. \quad (9)$$

Обозначим коэффициент в круглых скобках перед $\delta \varphi_2$ за B_1 . В этом случае

$$B_1 = 2 \frac{\partial x}{\partial \varphi_2} \frac{1}{x} + \frac{\partial K}{\partial \varphi_2} \frac{1}{K}. \quad (10)$$

Таким образом, формулы (7) и (9) преобразуются к виду:

$$\frac{\delta \mu_r}{\mu_{rc}} = \frac{\delta E_2}{E_{2c}} - A_1 \delta \varphi_2. \quad (11)$$

где A_1 – коэффициент, который с учетом выражения (3) имеет вид $A_1 = \frac{\partial K}{\partial \varphi_2} \frac{1}{K}$.

$$\frac{\delta \sigma}{\sigma_c} = -\frac{\delta E_2}{E_{2c}} + B_1 \delta \varphi_2. \quad (12)$$

Для одновременного определения одним и тем же ТЭМП относительных значений $\frac{\delta \mu_r}{\mu_{rc}}$ и $\frac{\delta \sigma}{\sigma_c}$ необходимо измерить с учетом знака два разностных сигнала δE_2 и $\delta \varphi_2$ трансформаторного преобразователя, вызван-

ные отличиям электромагнитных параметров исследуемого изделия, подверженного механической нагрузке, от параметров стандартного образца.

Полученные выше уравнения позволяют определить значения $\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}}$ и $\frac{\delta\sigma}{\sigma_c}$ по измеренным электрическим величинам и известным для выбранной рабочей точки коэффициентам A_1 и B_1 при них. В таком случае, использование дифференциального двухпараметрового метода существенно упрощает процесс измерения по сравнению с абсолютным.

На рис. 1 приведена дифференциальная электрическая схема лабораторной установки для одновременного контроля приращений магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости. В данной схеме используют два идентичных проходных трансформаторных преобразователя (рабочий РП и компенсационный КП).

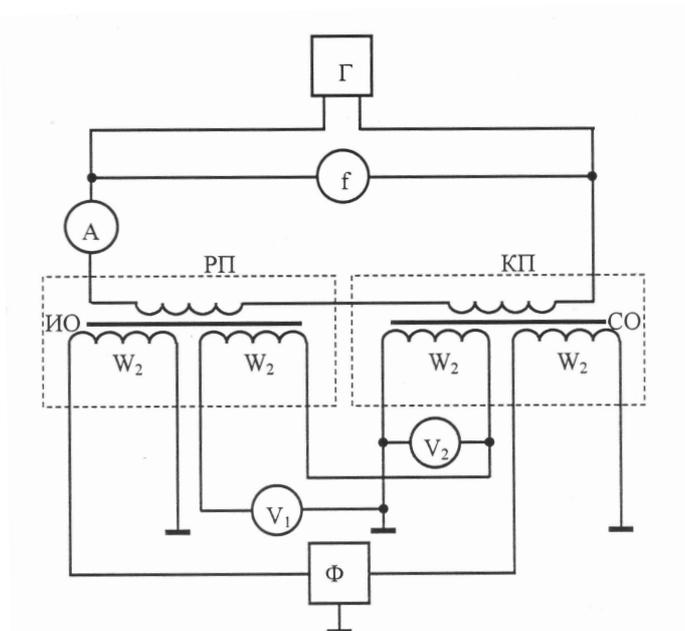


Рис. 1 Дифференциальная электрическая схема контроля приращений магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости цилиндрических изделий.

Намагничивающие обмотки этих преобразователей включаются последовательно согласно и запитываются от генератора синусоидального тока Г. Намагничивающий ток регистрируется амперметром А. Частота тока контролируется частотомером f. Измерительные катушки каждого из преобразователей имеют по две идентичные обмотки с числами витков W_2 . В эти катушки помещают непосредственно ИО и СО, которые размещаются внутри РП и КП, соответственно. Одна пара измерительных обмоток РП и КП включается последовательно встречно.

Разностный сигнал δE_2 измеряется вольтметром V_1 . Вольтметр V_2 подключается к измерительной обмотке КП и фиксирует сигнал E_{2c} , связанный с наличием в преобразователе стандартного образца. Сигналы со второй пары измерительных обмоток РП и КП подаются на входы измерителя фазовых углов Φ . Вольтметр V_1 и измеритель фазы фиксируют приращения δE_2 и $\delta\varphi_2$ с учётом их знаков.

Схему настраивают следующим образом. Сначала экспериментально находят рабочую точку компенсационного преобразователя со стандартным образцом. Для этого в отсутствие испытуемого изделия в РП изменяют с помощью генератора частоту намагничивающего тока до тех пор, пока измеритель фазы не зарегистрирует заданный фазовый угол φ_{2c} , соответствующий определённому значению x_c . Измеряют величину E_{2c} . Затем в РП помещают образец, характеристики которого одинаковы с характеристиками стандартного образца (как правило, в этом случае в КП и РП помещают два образца, изготовленные из одного и того же прутка). На данных двух образцах проводят балансировку схемы, т.е. добиваются значений $\delta E_2 \rightarrow 0$ и $\delta\varphi_2 \rightarrow 0$. Для более точного выполнения балансировки схемы на практике можно применять различные виды коррекции, например, использование тонких магнитных стержней регулируемой длины внутри преобразователя (магнитные шунты), фазовращателей в измерительных цепях преобразователей, регуляторов E_{2c} вблизи заданного значения и других устройств. После проведения балансировки схема готова к работе.

В табл. 1 приведены результаты измерения μ_r и σ для образцов из стали, полученные с помощью дифференциальной схемы. Здесь же для сравнения приведены данные измерений дифференциально-баллистическим и мостовым на постоянном токе μ_r и σ этих же образцов. Выбор рабочей точки $x_c = 2$ обусловлен тем, что этот

режим является оптимальным с точки зрения достижения максимальной чувствительности преобразователя, которая определяется наибольшей крутизной кривых зависимостей $K = f(x)$; $\varphi_2 = f(x)$ [5].

Таблица 1 – Результаты измерений μ_r и σ , полученные с помощью дифференциальной схемы (рис. 1); $x_c = 2$, $A_1 \approx -0,907$, $B_1 \approx 2,507$

| Материал, a ; μ_{rc} и σ_c | f , Гц | $\delta\varphi_2$, радиан | δE_2 , мВ | $1/E_{2c}$, 1/В | $\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}}$ | $\frac{\delta\sigma}{\sigma_c}$ | μ_r | σ , МСМ/м | μ_r' | σ' , МСМ/м | δx | β_{\max} , % |
|--|-------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------|---------------------|----------|----------------------|------------|-----------------------|
| Сталь: $a=1,5$ мм; $\mu_{rc} = 105$; $\sigma_c = 0,5$ МСМ/м | 429 | -0,105 | -27 | 2,66 | -0,167 | -0,191 | 87,5 | 0,405 | 90 | 0,40 | 0,344 | 1,3 |
| Сталь: $a=1,5$ мм; $\mu_{rc} = 200$; $\sigma_c = 0,6$ МСМ/м | 188 | -0,080 | -13 | 3,18 | -0,114 | -0,160 | 177 | 0,504 | 180 | 0,5 | 0,268 | 0,8 |

Знак «-» характеризует то, что величины, соответствующие исследуемым изделиям, меньше, чем величины, связанные со стандартными образцами.

Вывод. Результаты табл. 1. показывают, что величины μ_r и σ , измеренные описанным и известными способами, достаточно близки друг к другу в том случае, когда электрофизические параметры исследуемых и стандартных образцов не сильно отличаются между собой, т.е. при небольших приращениях δx . С ростом величины δx численные значения ошибок измерения μ_r и σ увеличиваются. Это связано прежде всего с тем, что в данных случаях проявляется более резкое различие между линейными участками зависимостей $K = f(x)$ и $\varphi_2 = f(x)$, заложенными в принцип работы схемы, и реальными участками этих кривых в окрестностях заданных рабочих точек.

Поскольку приложение механических усилий изменяет значения μ_r и σ незначительно, то применение дифференциального метода, при котором измеряются не значения μ_r и σ , а их приращения, позволяет повысить чувствительность преобразователей и расширить их функциональные возможности.

Список литературы: 1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика / В.В. Клюев, Ф.П. Соснин. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с. 2. Электромагнитный преобразователь момента, скручивающего вал электропривода / Себко В.П., Горкунов Б.М., Христов Х.И. и др. // Проблемы автоматизированного электропривода: труды междунар. науч.-техн. конф.: тезисы докл. – Алушта, 1994. – С.160. 3. Горкунов Б.М. Электромагнитный преобразователь для контроля напряженно-деформированного состояния узлов оборудования электропривода / Б.М. Горкунов, А.В. Кипенский, С.Г. Львов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/19. – С.182–185. 4. Бидя Г.В. Неразрушающий контроль механических свойств стального проката (обзор). Контроль прочностных и пластических свойств / Г.В. Бидя // Дефектоскопия. – 2005. – №5. – С.39–53. 5. Горкунов Б.М. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – №5. – С. 93-99. 6. Себко В.П. Дифференциальный двухпараметровый электромагнитный преобразователь / В.П. Себко, Ду Хуан Янг // Вестник НТУ «ХПИ». – 1999. – №24. – С. 78-84.

Bibliography (transliterated): 1. Kljuev, V.V. *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika*. Moscow: Mashinostroenie, 1995. Print. 2. Sebko, V.P., B.M. Gorkunov and H.I. Hristov. « Elektromagnitnyiy preobrazovatel momenta, skrudivayushego val elektroprivoda.» *Problemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda*. 1994. pp. 160. Print. 3. Gorkunov, B.M., A.V. Kipenskiy and S.G. Lvov. « Elektromagnitnyiy preobrazovatel dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzlov oborudovaniya elektroprivoda.» *Elektromehanichni I energozberigayuchi sistemi. Ser.: Problemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda*. No. 3.19. 2012. 182–185. Print. 4. Bida, G.V. « Nerazrushayushchiy kontrol mehanicheskikh svoystv stalnogo prokata (obzor). Kontrol prochnostnyih i plasticheskikh svoystv.» *Defektoskopiya*. No. 5. 2005. 39–53. Print. 5. Gorkunov, B.M. and I.V. Tyupa. «Vihretokovyyi dvuhparametrovyy kontrol ferromagnitnyih tsilindricheskikh izdeliy.» *Vestnik NTU «HPI»*. No. 5. 2004. 93–99. Print. 6. Sebko, V.P. and Du Hian Yang. «Differentsialnyiy dvuhparametrovyyiy elektromagnitnyiy preobrazovatel.» *Vestnik NTU «HPI»*. No. 24. 1999. 78–84. Print.

Поступила (received) 03.07.2015