

## О РАЗДЕЛЬНОМ КОНТРОЛЕ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НЕМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

В. К. ЖУКОВ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры информационно-измерительной техники)

Одной из причин, ограничивающей широкое распространение метода вихревых токов для контроля производственных параметров, является трудность разделения влияний, оказываемых на характеристики токовихревого датчика разными параметрами изделия. Цилиндрическое немагнитное изделие имеет два параметра, которые непосредственно влияют на датчик-диаметр цилиндра и электропроводность материала, из которого он изготовлен. Тем не менее даже в таком простом случае иногда бывает трудно отделить влияние диаметра от влияния электропроводности. Для подавления чувствительности датчика к мешающему параметру контроль рекомендуется вести по реактивному сопротивлению или мнимой составляющей э. д. с. измерительной обмотки и на определенной частоте. Эта частота должна быть достаточно высокой, если контролируется размер, и относительно низкой, если контролируется электропроводность. Наиболее эффективной получается отстройка от влияния электропроводности. Однако при контроле размера изделий малого диаметра трудно обеспечить питание датчика током, частота которого соответствовала бы получению достаточно малой чувствительности к электропроводности, так как частота получается очень высокой. По этой причине представляется интересным исследовать другие возможные выходные параметры датчика с позиции использования их для раздельного контроля.

Указанная задача ставится не впервые, она рассматривалась в ряде работ, из которых следует отметить в первую очередь работы Н. М. Родигина и Н. Е. Коробейниковой [1, 2, 3] и Б. В. Гончарова [4]. В указанных работах авторы анализируют чувствительность активного  $R$  и реактивного  $X$  сопротивлений однообмоточного датчика, а также действительной и мнимой составляющей э. д. с. двухобмоточного датчика к параметрам изделия. При этом они оперируют с нормированными приращениями выходной величины. Однако технические устройства, работающие с токовихревыми датчиками, реагируют обычно на относительное изменение его выходного параметра. Поэтому желательно исследовать чувствительность относительных приращений выходной величины датчика к вызвавшим их относительным изменением параметров цилиндрического изделия.

Кроме перечисленных выше, в качестве выходных величин могут использоваться: добротность  $Q = X/R$  и полное сопротивление  $z = \sqrt{X^2 + R^2}$  у однообмоточного датчика; амплитуда  $E_m = \sqrt{E_a^2 + E_p^2}$

и фаза  $\varphi = \text{arctg } E_p/E_a$  э. д. с. измерительной обмотки у двухобмоточного датчика.

В данной работе выводятся выражения для относительных чувствительностей  $X$ ,  $R$ ,  $z$ ,  $Q$  и  $\varphi$  к диаметру и электропроводности цилиндрического немагнитного изделия и проводится их анализ с позиции использования для раздельного контроля.

Изменения составляющих сопротивления и э. д. с. измерительной обмотки, вызванные введением изделия в датчик, в нормированной форме могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \Delta R/X_0 = \Delta E_a/E_0 = \text{Re}j\eta(\mu_{\text{эфф}} - 1) &= \text{Re}j\eta\tau_k, \\ \Delta X/X_0 = \Delta E_p/E_0 = \text{Im}j\eta(\mu_{\text{эфф}} - 1) &= \text{Im}j\eta\tau_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\eta$  есть коэффициент заполнения, равный отношению площадей поперечного сечения изделия и датчика, а

$$\mu_{\text{эфф}} = \frac{2 I_1(\sqrt{j}ka)}{\sqrt{j}ka I_0(\sqrt{j}ka)}$$

— введенная Ферстером Ф. эффективная магнитная проницаемость, которая выражается через модифицированные функции Бесселя  $(I_0 \sqrt{j}ka)$  и  $I_1(\sqrt{j}ka)$  от комплексного аргумента  $ka$ . Величина  $ka = \sqrt{a\omega\gamma\mu}$ , определяемая радиусом изделия  $a$ , частотой  $\omega$  тока, питающего датчик, электропроводностью  $\gamma$  и магнитной проницаемостью  $\mu$  изделия, носит название обобщенного параметра.

В целях сокращения будем в дальнейшем обозначать

$$\mu_{\text{эфф}} - 1 = \tau_k. \quad (2)$$

Представим реактивное сопротивление датчика в виде суммы  $X = X_0 + \Delta X$ , в которой  $X_0$  — его сопротивление без изделия, а  $\Delta X$  — сопротивление, привнесенное изделием. На основании выражений (1) эта сумма будет равна

$$X = X_0(1 + \text{Im}j\eta\tau_k). \quad (3)$$

Относительную чувствительность  $X$  к измерению радиуса изделия обозначим  $S_a^x$  и определим ее как

$$S_a^x = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta X/X}{\Delta a/a} = \frac{\partial X}{\partial a} \cdot \frac{a}{X}, \quad (4)$$

где  $\Delta X/X$  — относительное изменение реактивного сопротивления, вызванное малым относительным изменением радиуса изделия  $\Delta a/a$ . Определив производную  $\partial X/\partial a$  после преобразования найдем

$$S_a^x = \frac{\eta}{1 + \text{Im}j\eta\tau_k} \alpha_x, \quad (5)$$

где

$$\alpha_x = 2\text{Im} \frac{I_1^2(\sqrt{j}ka)}{I_0^2(\sqrt{j}ka)}. \quad (6)$$

Как видно из полученного выражения, чувствительность реактивного сопротивления к радиусу изделия зависит от коэффициента заполнения  $\eta$  и от обобщенного параметра  $ka$ . Путем рассуждений и преобразования, аналогичных тем, которые были сделаны при отыс-

кании  $S_a^x$ , для относительной чувствительности реактивного сопротивления и электропроводности изделия получим:

$$S_\gamma^x = \frac{\eta}{1 + \text{Im } j\eta \tau_k} \cdot \beta_x, \quad (7)$$

где

$$\beta_x = \text{Im} \left[ 1 - \frac{2I_1(\sqrt{j}ka)}{\sqrt{j}ka I_0(\sqrt{j}ka)} - \frac{I_1^2(\sqrt{j}ka)}{I_0^2(\sqrt{j}ka)} \right]. \quad (8)$$

Чувствительность  $S_\gamma^x$  так же, как  $S_a^x$ , зависит от  $\eta$  и  $ka$ .

Из формул (5) и (7) видим, что отношение чувствительностей

$$\chi = S_\gamma^x / S_a^x = \beta_x / \alpha_x \quad (9)$$

является функцией только  $ka$  и не зависит от  $\eta$ . Зависимость  $S_a^x$  и  $\chi_x$  от  $ka$  изображена графически на рис. 1 и 2. Чувствительность реактивного сопротивления к электропроводности изделия, как это видно из

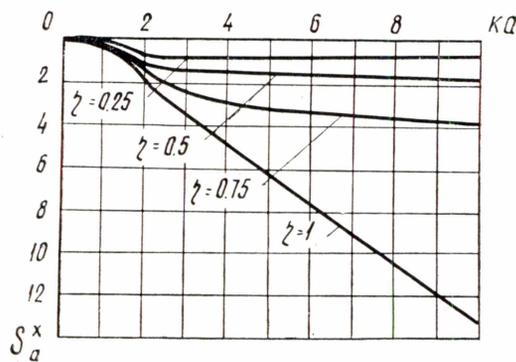


Рис. 1. Чувствительность реактивного сопротивления датчика к радиусу изделия.

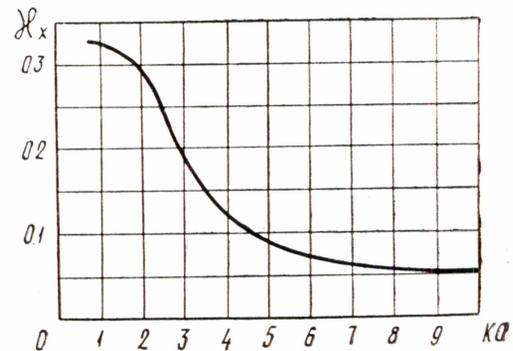


Рис. 2. Зависимость отношения чувствительностей реактивного сопротивления от обобщенного параметра.

графика (рис. 2), падает с ростом  $ka$ . Уже при  $ka = 10$  она составляет менее 0,05 от величины чувствительности к радиусу. Отсюда следует, что для контроля размера изделия по изменению реактивного сопротивления величина  $ka$  должна выбираться большой. Из этого же графика видно, что чувствительность к электропроводности остается всегда ниже чувствительности к радиусу, поэтому при контроле электропроводности по изменению  $X$  избавиться от влияния изменений радиуса не удастся ни при каком  $ka$ .

Представим активное сопротивление обмотки датчика, подобно (3), в виде:

$$R = R_0(1 + Q_0 \text{Re } j\eta \tau_k), \quad (10)$$

где  $R_0$  и  $Q_0$  — активное сопротивление и добротность обмотки датчика без изделия, а  $\text{Re } j\eta \tau_k$  — приращение активного сопротивления, обусловленное вставлением изделия. Чувствительность активного сопротивления к радиусу изделия

$$S_a^R = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta R/R}{\Delta a/a} = \frac{\partial R}{\partial a} \cdot \frac{a}{R}, \quad (11)$$

и к электропроводности изделия

$$S_\gamma^R = \lim_{\Delta \gamma \rightarrow 0} \frac{\Delta R/R}{\Delta \gamma/\gamma} = \frac{\partial R}{\partial \gamma} \cdot \frac{\gamma}{R} \quad (12)$$

найдем после определения производных  $\partial R/\partial a$  и  $\partial R/\partial \gamma$ :

$$S_a^R = \frac{\eta \cdot Q_0}{1 + Q_0 \operatorname{Re} j \eta \cdot \dot{\tau}_k} \alpha_R,$$

$$S_\gamma^R = \frac{\eta Q_0}{1 + Q_0 \operatorname{Re} j \eta \cdot \dot{\tau}_k} \beta_R.$$

Здесь

$$\alpha_R = 2 \operatorname{Re} \frac{I_1^2(\sqrt{jka})}{I_0^2(\sqrt{jka})}, \quad (13)$$

$$\beta_R = \operatorname{Re} \left[ 1 - \frac{2I_1(\sqrt{jka})}{\sqrt{jka} I_0(\sqrt{jka})} - \frac{I_1^2(\sqrt{j \cdot ka})}{I_0^2(\sqrt{j \cdot ka})} \right]. \quad (14)$$

Отношение чувствительностей рассматриваемого параметра

$$\kappa_R = \beta_R / \alpha_R \quad (15)$$

является функцией только обобщенного параметра  $ka$ . О характере этой функции можно судить по графику рис. 4. Из анализа графика следует вывод о том, что параметр  $R$  может быть использован для допускового контроля размера, если обеспечить  $ka = 2,5$ . Величина чувствительности  $S_a^R$  при этом может быть найдена из графиков, изображенных на рис. 3.

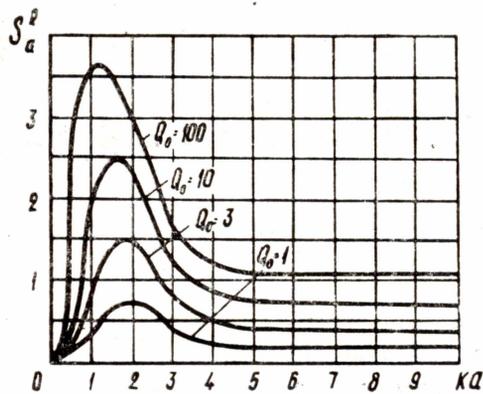


Рис. 3. Чувствительность активного сопротивления измерительной обмотки датчика к радиусу изделия.

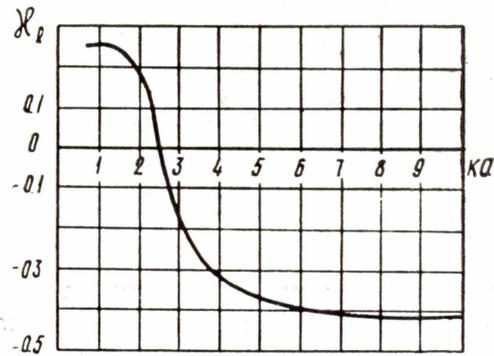


Рис. 4. Зависимость отношения чувствительностей активного сопротивления от обобщенного параметра.

У двухобмоточного датчика основными выходными параметрами являются действительная и мнимая составляющие э. д. с. Как следует из (1) и как показывает теоретический анализ, отношение чувствительностей действительной составляющей э. д. с. описывается выражением (15); а отношение чувствительностей мнимой составляющей э. д. с. выражением (9) и, следовательно, основные параметры датчика и в этом случае могут использоваться только для контроля размеров.

Одним из производных параметров датчика с четким физическим смыслом является его добротность

$$Q = \frac{X}{R} = Q_0 \frac{1 + \operatorname{Im} j \eta \dot{\tau}_k}{1 + Q_0 \operatorname{Re} j \eta \dot{\tau}_k}. \quad (16)$$

Способом, аналогичным примененным выше, можно найти чувствительность добротности к радиусу  $S_a^Q$  и к электропроводности  $S_T^Q$  изделия, а также, интересующее нас, их отношение:

$$S_a^Q = \eta \frac{(1/Q_0 + Rej\eta\dot{\tau}_k) \alpha_x + (1 + Imj\eta\dot{\tau}_k) \alpha_R}{(1/Q_0 + Rej\eta\dot{\tau}_k) (1 + Imj\eta\dot{\tau}_k)}, \quad (17)$$

$$S_T^Q = \frac{(1/Q_0 + Rej\eta\dot{\tau}_k) \beta_x - (1 + Imj\eta\dot{\tau}_k) \beta_R}{(1/Q_0 + Rej\eta\dot{\tau}_k) (1 + Imj\eta\dot{\tau}_k)},$$

$$\kappa_Q = \frac{(1/Q_0 + Rej\eta\dot{\tau}_k) \beta_x - (1 + Imj\eta\dot{\tau}_k) \beta_R}{(1/Q_0 + Rej\eta\dot{\tau}_k) \alpha_x - (1 + Imj\eta\dot{\tau}_k) \alpha_R}.$$

Отношение чувствительностей у добротности, в отличие от  $X$  и  $R$ , зависит уже от трех параметров:  $\eta$ ,  $Q_0$  и  $\kappa a$ . На рис. 5 и 6 показаны зависимости  $S_a^Q$  и  $\kappa_Q$  от  $\kappa a$  для нескольких комбинаций  $\eta$  и  $Q_0$ . Из

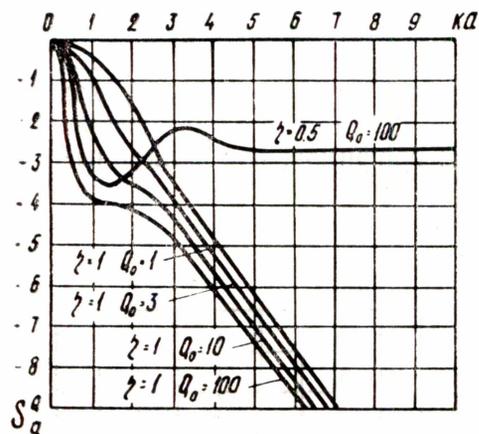


Рис. 5. Чувствительность добротности обмотки датчика к радиусу изделия.

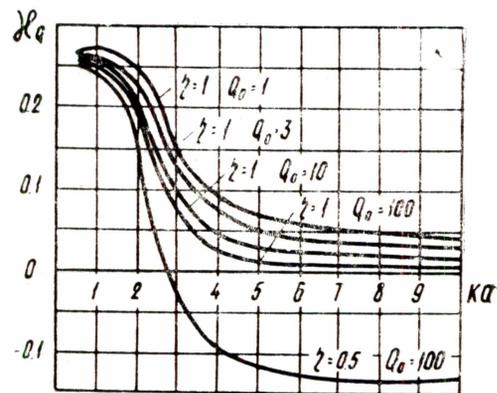


Рис. 6. Зависимость отношения чувствительностей добротности от обобщенного параметра.

графика, а также из формулы (17), можно заметить, что при определенных сочетаниях  $\eta$ ,  $Q_0$  и  $\kappa a$  отношение  $\kappa_Q$  равно нулю, т. е. датчик оказывается нечувствителен к изменениям электропроводности. Как следует из формулы, эти сочетания должны удовлетворять условию

$$(1 + Q_0 Rej\eta\dot{\tau}_k) \beta_x - Q_0 (1 + Imj\eta\dot{\tau}_k) \beta_R = 0,$$

откуда следует, что для получения  $\kappa_Q = 0$  необходимо иметь:

$$\eta = \frac{1/Q_0 \beta_x - \beta_R}{\beta_R \cdot Imj\eta\dot{\tau}_k - \beta_x \cdot Re \cdot j\eta\dot{\tau}_k}, \quad (18)$$

$$Q = \frac{\beta_x}{(1 + Imj\eta\dot{\tau}_k) \beta_R - \beta_x \cdot Rej\eta\dot{\tau}_k}. \quad (19)$$

С помощью последних выражений можно, задавшись двумя величинами  $\kappa a$  и  $\eta$  или  $\kappa a$  и  $Q_0$ , найти третью, соответствующую нулевой чувствительности к электропроводности изделия.

Чувствительность добротности к радиусу изделия при любых сочетаниях  $\kappa a$ ,  $\eta$  и  $Q_0$  остается выше чувствительности к электропроводности, поэтому этот производный параметр датчика может быть рекомендован только для использования при допусковом контроле размеров.

Можно показать, что отношение чувствительностей у другого производного параметра датчика—фазового угла  $\varphi = \text{arctg } E_p/E_a$  равно отношению чувствительностей у добротности и определяется выражением (17).

Полное сопротивление измерительной обмотки в соответствии с выражением (3) и (10) будет равно

$$z = \sqrt{(1/Q_0 + \text{Re}j\eta\dot{\tau}_k)^2 + (1 + \text{Im}j\eta\dot{\tau}_k)^2} \quad (20)$$

Чувствительность  $z$  к радиусу

$$S_a^z = \lim \frac{\Delta z/z}{\Delta a/a} = \frac{\partial z}{\partial a} \cdot \frac{a}{z}$$

и к электропроводности изделия

$$S_\gamma^z = \lim \frac{\Delta z/z}{\Delta \gamma/\gamma} = \frac{\partial z}{\partial \gamma} \cdot \frac{\gamma}{z}$$

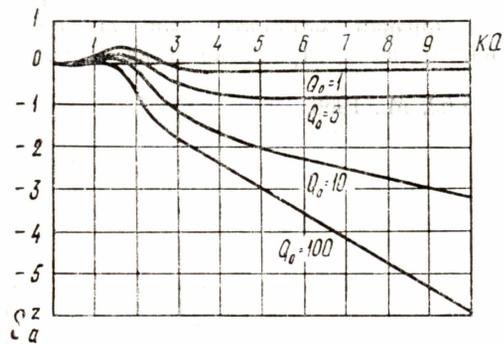
получим, определив производные от соответствующих функций:

$$S_a^z = \eta \frac{(1/Q_0 + \text{Re}j\eta\dot{\tau}_k) \alpha_R + (1 + \text{Im}j\eta\dot{\tau}_k) \alpha_x}{(1/Q_0 + \text{Re}j\eta\dot{\tau}_k)^2 + (1 + \text{Im}j\eta\dot{\tau}_k)^2}, \quad (21)$$

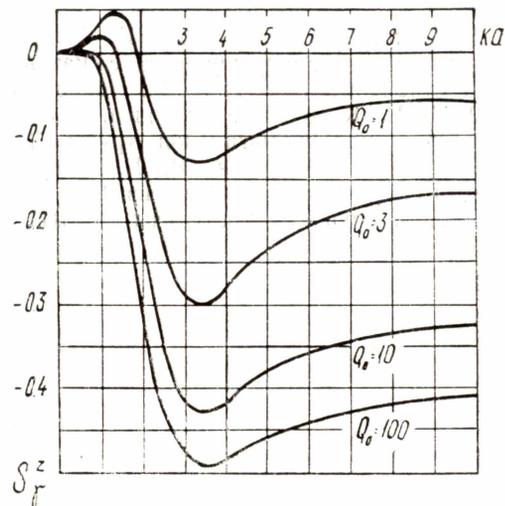
$$S_\gamma^z = \eta \frac{(1/Q_0 + \text{Re}j\eta\dot{\tau}_k) \beta_R + (1 + \text{Im}j\eta\dot{\tau}_k) \beta_x}{(1/Q_0 + \text{Re}j\eta\dot{\tau}_k)^2 + (1 + \text{Im}j\eta\dot{\tau}_k)^2}. \quad (22)$$

Зависимость  $S_a^z$  и  $S_\gamma^z$  от  $ka$  для четырех значений  $Q_0$  и  $\eta = 1$  показана на рис. 7. Из графиков этого рисунка можно заметить, что при любом  $Q_0$  есть такие значения  $ka$ , при которых  $S_a^z = 0$  или  $S_\gamma^z = 0$ .

Чувствительность полного сопротивления обмотки к радиусу изделия будет равна нулю



а)



б)

Рис. 7. Зависимость от обобщенного параметра чувствительности полного сопротивления обмотки датчика:

а) к радиусу изделия, б) к электропроводности изделия.

тогда, когда числитель выражения (21) обращается в нуль:

$$(1 + Q_0 \text{Re}j\eta\dot{\tau}_k) \alpha_R + (1 + \text{Im}j\eta\dot{\tau}_k) Q_0 \cdot \alpha_x = 0. \quad (23)$$

Отсюда следует, что для получения  $S_a^z = 0$  при заданных  $ka$  и  $\eta$  необходимо обеспечить

$$Q_0 = - \frac{\alpha_R}{\alpha_R \text{Re}j\eta\dot{\tau}_k + \alpha_x (1 + \text{Im}j\eta\dot{\tau}_k)}. \quad (24)$$

Поскольку  $\alpha_x$  отрицательно, то  $Q_0 > 0$ .

Полное сопротивление измерительной обмотки будет нечувствительно к электропроводности при условии равенства нулю числителя выражения (22).

$$(1/Q_0 + \operatorname{Re}j\eta\dot{\tau}_k)\beta_R + (1 + \operatorname{Im}j\eta\dot{\tau}_k)\beta_x = 0. \quad (25)$$

Из этого условия определяем значения  $ka$ ,  $\eta$  и  $Q_0$ , соответствующие  $S_{\eta}^z = 0$ . При этом двумя величинами задаемся, а третью находим.

У двухобмоточного датчика производным параметром, аналогичным параметру  $z$  однообмоточного, является амплитуда э. д. с. измерительной обмотки  $E_m$ . Чувствительность  $E_m$  к параметрам изделия равна чувствительности  $z$  при  $Q_0 \rightarrow \infty$ , т. е. тогда, когда сопротивление измерительной обмотки постоянному току равно нулю.

Полученные в работе выражения и их анализ показали, что большинство возможных выходных параметров датчика при соответствующем выборе частоты тока, коэффициента заполнения и добротности обеспечивает нулевую или близкую к нулю чувствительность к электропроводности изделия, поэтому эти параметры могут быть использованы при допусковом контроле размеров.

Измерение электропроводности с подавлением чувствительности к небольшим колебаниям диаметра может обеспечить только полное сопротивление измерительной обмотки датчика, вследствие чего оно может быть рекомендовано для использования в качестве выходного параметра датчика при допусковом контроле электропроводности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Родигин, И. Е. Коробейникова. Использование «нулевых» составляющих приращения э. д. с. катушки для отстройки от мешающих параметров при контроле методом вихревых токов, Тр. ин-та физики металлов, вып. 24, 1965.
2. И. Е. Коробейникова, Н. М. Родигин. К разделному измерению параметров неферромагнитной трубы. Тр. ин-та Физики металлов, вып. 24, 1965.
3. Н. М. Родигин, И. Е. Коробейникова. Контроль качества изделий методом вихревых токов, Машгиз, 1958.
4. Б. В. Гончаров. Труды ЦНИИТМАШ № 62, М., 1966.