

**АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА
С ВИХРЕТОКОВЫМ ДАТЧИКОМ К ИЗМЕНЕНИЯМ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ**

В. К. ЖУКОВ, А. В. ЕМЕЛЬЯНЕНКО

(Представлена объединенным научно-техническим семинаром кафедры информационно-измерительной техники и сектора электромагнитной дефектоскопии научно-исследовательского института электронной микроскопии)

Экспериментальными исследованиями [1] было установлено, что действие продольной поверхности трещины в цилиндрическом изделии на выходные параметры вихретокового датчика при слабом скин-эффекте эквивалентно действию изменений электропроводности цилиндрического изделия, помещенного в датчик. Указанный вывод позволяет при определенных допущениях свести анализ чувствительности вихретокового датчика к трещинам, к анализу его чувствительности, к изменениям электропроводности контролируемого прутка.

Опытным же путем замечено повышение чувствительности вихретокового проходного датчика при включении его в колебательный контур. В связи с необходимостью дальнейшего повышения чувствительности электромагнитных дефектоскопов указанная выше возможность представляет определенный интерес и требует более детального исследования. С этой целью определим аналитически чувствительность составляющих сопротивления колебательного контура к изменениям электропроводности цилиндра, помещенного в датчик, который является элементом колебательного контура.

Сопротивление колебательного контура определяется активной

$$R = X_0 \left(\frac{1}{Q_0} + R_e j \eta \tau_k \right) \quad (1)$$

и реактивной

$$X = X_0 (1 + I_m j \eta \tau_k) \quad (2)$$

составляющими сопротивления датчика, а также сопротивлением конденсатора, включенного в колебательный контур

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (3)$$

Модуль и аргумент полного сопротивления контура можно выразить через его эквивалентные активное

$$R_k = \frac{R X_c^2}{R^2 + (X - X_c)^2} = R \frac{(1 - \delta)^2}{d^2 + \delta^2} \quad (4)$$

и реактивное

$$X_{\kappa} = \frac{X_c [(X_c - X) X - R^2]}{R^2 + (X - X_c)^2} = X \frac{(\delta - 1)(\delta + d^2)}{d^2 + \delta^2} \quad (5)$$

сопротивления.

$$Z_{\kappa} = \sqrt{R_{\kappa}^2 + X_{\kappa}^2}, \quad \varphi_{\kappa} = \arctg \frac{X_{\kappa}}{R_{\kappa}}. \quad (6)$$

Определим чувствительность составляющих сопротивления контура R_{κ} и X_{κ} к изменению электропроводности при разных расстройках контура, определяемых отношением:

$$\delta = \frac{X - X_c}{X} = \frac{\Delta C}{C}, \quad (7)$$

в котором X_c — сопротивление конденсатора на рабочей частоте, X — реактивное сопротивление датчика, равное сопротивлению конденсатора $X_{\text{срез}}$ на резонансной частоте контура. Полагаем, что расстройка контура осуществляется изменением емкости конденсатора.

Чувствительность эквивалентного активного сопротивления контура к изменению электропроводности цилиндра определим как относительное изменение этого сопротивления, приходящееся на малое относительное изменение электропроводности.

$$S_{\gamma}(R_{\kappa}) = \lim \frac{\Delta R_{\kappa}}{R_{\kappa}} / \frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \frac{\partial R_{\kappa}}{\partial \gamma} \cdot \frac{\gamma}{R_{\kappa}}. \quad (8)$$

Производную определим, используя выражение (4)

$$\frac{\partial R_{\kappa}}{\partial \gamma} = R' \frac{(\delta^2 - d^2)(1 - \delta)^2}{(d^2 + \delta^2)^2} + \frac{2\delta d(1 - \delta)^2}{(d^2 + \delta^2)} X'. \quad (9)$$

Приведенное здесь обозначение имеет физический смысл d — это затухание контура

$$d = \frac{d_0 + R_e j \eta \tau_{\kappa}}{1 + I_m j \eta \tau_{\kappa}}. \quad (10)$$

Через d_0 обозначена величина, обратная добротности ненагруженного датчика.

Производные R' и X' могут быть выражены через чувствительность активного сопротивления датчика к изменению электропроводности $S_{\gamma}(R)$ и чувствительность реактивного сопротивления $S_{\gamma}(X)$

$$R' = \frac{\partial R}{\partial \gamma} = S_{\gamma}(R) \frac{R}{\gamma}, \quad (11)$$

$$X' = \frac{\partial X}{\partial \gamma} = S_{\gamma}(X) \frac{X}{\gamma}. \quad (12)$$

Подставив (11) и (12) в (9), получим окончательное выражение для чувствительности эквивалентного активного сопротивления контура к изменениям электропроводности.

$$S_{\gamma}(R_{\kappa}) = S_{\gamma}(R) \frac{\delta^2 - d^2}{d^2 + \delta^2} - S_{\gamma}(X_{\kappa}) \frac{2\delta}{d^2 + \delta^2}. \quad (13)$$

Рассуждая подобным образом, определим чувствительность реактивного сопротивления контура к изменениям электропроводности

$$S_{\gamma}(X_{\kappa}) = S_{\gamma}(X) \frac{(d^2 - \delta^2)(1 - \delta)}{(d^2 + \delta^2)(\delta + d^2)} - S_{\gamma}(R) \frac{2\delta d^2(1 - \delta)}{(d^2 + \delta^2)(\delta + d^2)}. \quad (14)$$

При $\delta = 0$

$$S_{\gamma}(X_{\kappa}) = S_{\gamma}(X) Q^2. \quad (15)$$

Чувствительность модуля и аргумента полного сопротивления контура определяется по той же методике

$$S_{\gamma}(Z_{\kappa}) = \frac{\partial Z_{\kappa}}{\partial \gamma} \cdot \frac{\gamma}{Z_{\kappa}} = \frac{R_{\kappa}^2}{Z_{\kappa}^2} \cdot S_{\gamma}(R_{\kappa}) + \frac{X_{\kappa}^2}{Z_{\kappa}^2} \cdot S_{\gamma}(X_{\kappa}), \quad (16)$$

$$S_{\gamma}(\varphi_{\kappa}) = \frac{\partial \varphi_{\kappa}}{\partial \gamma} \cdot \gamma = \frac{R_{\kappa} \cdot X_{\kappa}}{Z_{\kappa}^2} [S_{\gamma}(X_{\kappa}) - S_{\gamma}(R_{\kappa})]. \quad (17)$$

Подставляя в (16) и (17) вместо R_{κ} , X_{κ} , Z_{κ} , $S_{\gamma}(X_{\kappa})$, $S_{\gamma}(R_{\kappa})$ их значения согласно (4), (5), (6), (13), (14) и полагая, что $d^2 \ll 1$ и $\delta^2 \ll 1$, для искомых чувствительностей найдем

$$S_{\gamma}(Z_{\kappa}) = S_{\gamma}(X) \frac{(d^2 - \delta)(1 - \delta)}{d^2 + \delta^2} - S_{\gamma}(R) \frac{d^2}{d^2 + \delta^2}, \quad (18)$$

$$S_{\gamma}(\varphi_{\kappa}) = S_{\gamma}(R) \frac{d(\delta - d^2)(1 - \delta)}{d^2 + \delta^2} - S_{\gamma}(X) \frac{d}{d^2 + \delta^2}. \quad (19)$$

Из полученных выражений можно сделать вывод о том, что чувствительность вихретокового датчика, включенного в параллельный колебательный контур, значительно выше чувствительности самого датчика и в основном определяется добротностью нагруженного датчика, т. е. для получения высокой чувствительности необходимо увеличить добротность Q датчика с контролируемым изделием.

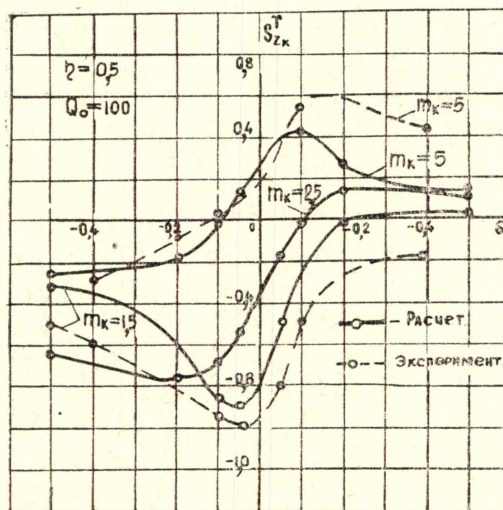


Рис. 1. Зависимость чувствительности модуля полного сопротивления резонансного контура с вихретоковым датчиком к изменениям электропроводности от величины расстройки.

Кроме того, чувствительность в значительной мере зависит от величины расстройки контура δ . Так, максимальной чувствительности модуля полного сопротивления контура $S_{\gamma}(Z_{\kappa})$ соответствует величина расстройки

$$\delta_{1,2} = -d^2 \left\{ \frac{S_{\gamma}(R)}{S_{\gamma}(X)} \pm \sqrt{\left[\frac{S_{\gamma}(R)}{S_{\gamma}(X)} \right]^2 + Q^2} \right\}, \quad (20)$$

которая зависит от положения рабочей точки на комплексной плоскости полного сопротивления обмотки датчика.

С целью уточнения характера этой зависимости по формулам (17) и (18) были произведены расчеты соответствующих чувствительностей для различных значений обобщенного параметра m_k и расстройек δ . Результаты этих вычислений отражены графически на рис. 1—2. Для 2 значений обобщенного параметра 1,5 и 2, соответствующим двум характерным участкам комплексной плоскости полного сопротивления датчика, была снята экспериментальная зависимость $S_\gamma(Z_k)$, подтвердившая результаты расчета.

Анализ графиков позволяет заключить, что целесообразнее контролировать электропроводности цилиндрических немагнитных изделий проводить по изменению модуля полного сопротивления контура, а не по изменению фазы, поскольку приращение фазы $\Delta\Phi_k = S_\gamma(\Phi_k) \frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ составляет доли градуса на 1% изменения электропроводности $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$. Ход кривых показывает также, что максимумы чувствительностей для раз-

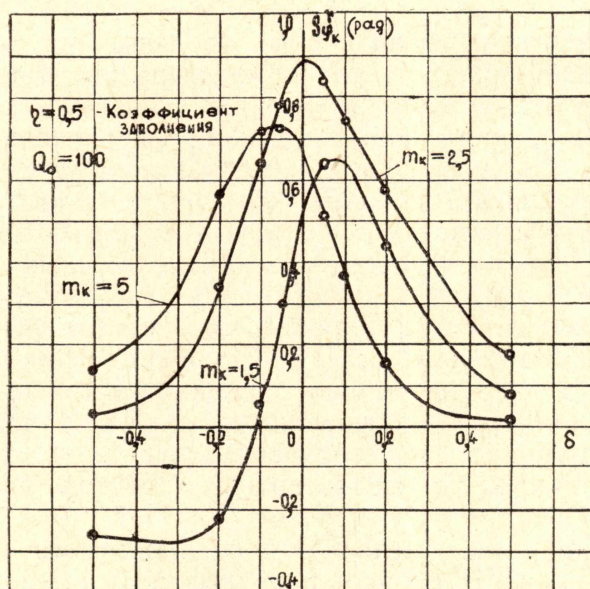


Рис. 2. Зависимость чувствительности аргумента эквивалентного сопротивления контура к изменению электропроводности от величины расстройки

личных значений обобщенного параметра m_k соответствуют различным расстройкам колебательного контура. В частности, при m_k , не превышающих 2,5, чувствительность модуля эквивалентного сопротивления контура при отрицательных расстройках получается наибольшей. Эти выводы нужно иметь в виду при проектировании дефектоскопов и при наличии возможности использовать положительные стороны, получаемые при включении датчика в соответствующим образом расстроенный колебательный контур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мак-Мастер. Неразрушающие испытания М., ИЛ., 1965.
2. В. Г. Герасимов. Анализ чувствительности и разрешающей способности вихретокового датчика, включенного в колебательный контур. — Труды института физики металлов. АН СССР, вып. 26, 1967.