

## АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА С ВИХРЕТОКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ К ПАРАМЕТРАМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

А. В. ЕМЕЛЬЯНЕНКО, В. К. ЖУКОВ, И. Г. ЛЕЩЕНКО

(Представлена объединенным научно-техническим семинаром кафедры  
информационно-измерительной техники и сектора ЭМК НИИ ЭИ)

Повышенные требования, предъявляемые к чувствительности приборов электромагнитного контроля качества материалов и изделий, заставляют изыскивать новые возможности, обеспечивающие повышение чувствительности как измерительной схемы, так и цепи первичного преобразователя. С этой точки зрения следует рассмотреть включение проходного вихретокового преобразователя в колебательный контур, а именно: провести анализ чувствительности составляющих сопротивления параллельного колебательного контура к изменениям параметров цилиндра (электропроводности, магнитной проницаемости, радиуса).

Сопротивление колебательного контура определяется сопротивлением конденсатора, включенного в колебательный контур  $X_c$ , а также активной [2].

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

и реактивной

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

составляющими сопротивления преобразователя.

Эквивалентное активное  $R_k$  и реактивное  $X_k$  сопротивления контура соответственно будут равны:

$$R_k = X_c \frac{2RX - RX_c}{R^2 + (X - X_c)^2}, \quad (3)$$

$$X_k = X_c \frac{XX_c - X^2 - R^2}{R^2 + (X - X_c)^2}. \quad (4)$$

Определим чувствительность составляющих сопротивления контура  $R_k$  и  $X_k$  к изменению одного из параметров изделия при разных расстройках контура, определяемых отношением

$$\delta = \frac{X - X_c}{X}, \quad (5)$$

в котором  $X_c$  — сопротивление конденсатора на рабочей частоте,  $X$  — реактивное сопротивление датчика, равное сопротивлению конденсатора  $X_{c \text{ рез.}}$  на резонансной частоте контура.

Чувствительность эквивалентного активного сопротивления контура к изменению какого-то  $i^{\text{го}}$  параметра изделия определим как относительное изменение этого сопротивления, приходящееся на малое относительное изменение этого параметра

$$S_i(R_{\kappa}) = \lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{\Delta R_{\kappa}}{R_{\kappa}} \bigg/ \frac{\Delta i}{i} = \frac{\partial R_{\kappa}}{\partial i} \cdot \frac{i}{R_{\kappa}}. \quad (6)$$

Производную  $\frac{\partial R_{\kappa}}{\partial i}$  определим, используя выражение (3)

$$\frac{\partial R_{\kappa}}{\partial i} = R' \frac{(\delta^2 - d^2)(1 - \delta)^2}{(d^2 + \delta^2)} + X' \frac{2d\delta(1 - \delta)^2}{d^2 + \delta^2}. \quad (7)$$

Приведенное здесь обозначение  $d$  имеет физический смысл — это затухание контура

$$d = \frac{d_0 + \operatorname{Re} j\eta\tau_{\kappa}}{1 + \operatorname{Im} j\eta\tau_{\kappa}}. \quad (8)$$

Через  $\eta$  обозначен коэффициент заполнения датчика,  $d_0$  — величина обратная добротности ненагруженного датчика.

Производные  $R'$  и  $X'$  выразим через чувствительность активного сопротивления вихретокового преобразователя к изменению контролируемого параметра

$$R' = \frac{\partial R}{\partial i} = S_i(R) \cdot \frac{R}{i}, \quad (9)$$

$$X' = \frac{\partial X}{\partial i} = S_i(X) \cdot \frac{X}{i}. \quad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в (7) и (6), получим окончательное выражение для чувствительности эквивалентного активного сопротивления контура к изменению  $i^{\text{го}}$  параметра изделия

$$S_i(R_{\kappa}) = S_i(R) \frac{\delta^2 - d^2}{d^2 + \delta^2} - S_i(X) \frac{2\delta}{d^2 + \delta^2}. \quad (11)$$

Рассуждая подобным образом, определим чувствительность реактивного сопротивления контура

$$S_i(X_{\kappa}) = S_i(X) \frac{(d^2 - \delta^2)(1 - \delta)}{(d^2 + \delta^2)(d^2 + \delta)} - S_i(R) \frac{2d^2\delta(1 - \delta)}{(d^2 + \delta^2)(\delta + d^2)}. \quad (12)$$

Если в качестве выходных параметров датчика считать модуль

$$Z_{\kappa} = \sqrt{R_{\kappa}^2 + X_{\kappa}^2} = \frac{X_c}{\sqrt{d^2 + \delta^2}} \quad (13)$$

и аргумент

$$\varphi_{\kappa} = \operatorname{arctg} \frac{X(X - X_c) + R^2}{RX_c} \quad (14)$$

полного сопротивления контура, то выражения для соответствующих чувствительностей, найденные по той же методике, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} S_i(Z_{\kappa}) &= \frac{\partial Z_{\kappa}}{\partial i} \cdot \frac{i}{Z_{\kappa}} = \\ &= \frac{(1 - \delta)(d^2 - \delta)}{d^2 + \delta^2} S_i(X) - S_i(R) \frac{d^2}{d^2 + \delta^2}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$S_i(\varphi_k) = \frac{\partial \varphi_k}{\partial i} \cdot i = \frac{d(1-\delta)(\delta-d^2)}{d^2+\delta^2} \cdot S_i(R) - \frac{d}{d^2+\delta^2} S_i(X). \quad (16)$$

Для конкретизации рассуждений ограничимся двумя контролируемые параметрами изделия: электропроводностью  $a$  и радиусом  $r$ , что имеет место при контроле неферромагнитных цилиндров.

В соответствии с этим произведем оценку чувствительности составляющих сопротивления контура к изменению электропроводности и радиуса изделия, для чего в выражения (11), (12), (15) и (16) вместо  $S_i(R)$  и  $S_i(X)$  из [2] нужно подставить соответственно  $S_\gamma(R)$ ,  $S_r(R)$  и  $S_\gamma(X)$ ,  $S_r(X)$  — чувствительности составляющих сопротивления датчика к изменению электропроводности и радиуса цилиндра.

Из полученных выражений видно, что чувствительность вихретокового преобразователя, включенного в параллельный колебательный контур может быть выше чувствительности самого преобразователя и в основном будет определяться добротностью датчика и расстройкой контура. Для примера проанализируем выражение для чувствительности модуля полного сопротивления контура к изменению электропроводности

$$S_\gamma(Z_k) = \frac{(d^2-\delta)(1-\delta)}{d^2+\delta^2} S_\gamma(X) - \frac{d^2}{d^2+\delta^2} S_\gamma(R) \quad (17)$$

на максимум. Величина оптимальной расстройки при этом определится из выражения

$$\delta_{1,2} = -d^2 \left\{ \frac{S_\gamma(R)}{S_\gamma(X)} \pm \sqrt{\left[ \frac{S_\gamma(R)}{S_\gamma(X)} \right]^2 + Q^2} \right\}. \quad (18)$$

Можно показать также и возможность улучшения разрешающей способности преобразователя, включенного в колебательный контур при раздельном контроле параметров изделия, для чего возьмем отношение чувствительностей реактивного сопротивления контура к изменению электропроводности и радиуса

$$\frac{S_\gamma(X_k)}{S_r(X_k)} = \frac{S_\gamma(X)}{S_r(X)} \cdot K, \quad (19)$$

где

$$K = \frac{1 - \frac{S_\gamma(R)}{S_\gamma(X)} \cdot \frac{2a^2\delta}{d^2-\delta^2}}{1 - \frac{S_\gamma(R)}{S_r(X)} \cdot \frac{2a^2\delta}{d^2-\delta^2}}.$$

Множитель  $K$  характеризует отличие разрешающей способности колебательного контура с датчиком от разрешающей способности одного датчика.

Таким образом, выражения (18) и (19) показывают, что максимум чувствительности и разрешающей способности вихретокового преобразователя соответствует определенным расстройкам контура, которые, в свою очередь, зависят от добротности нагруженного датчика и положения рабочей точки на комплексной плоскости полного сопротивления обмотки датчика. С целью уточнения характера этой зависимости по формуле (15) были произведены расчеты соответствующих чувствительностей  $S_\gamma(Z_k)$ ,  $S_r(Z_k)$  для различных значений обобщенного параметра  $m_k$  и расстроек  $\delta$  при коэффициенте заполнения 0,5. Результаты этих вычислений отражены графически на рис. 1.

Полученные кривые позволяют сделать правильный выбор как величины оптимальной расстройки, так и обобщенного параметра, обеспечивающих наилучшие условия контроля того или другого параметра изделия. В частности, при контроле электропроводности цилиндров по изменению модуля эквивалентного сопротивления контура зна-

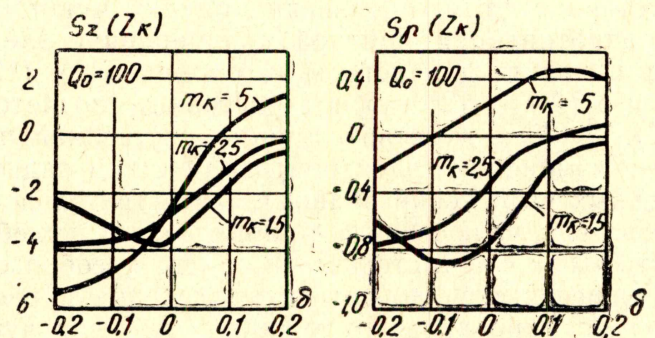


Рис. 1. Зависимость чувствительности модуля полного сопротивления колебательного контура к изменениям радиуса  $r$  и электропроводности  $\gamma$  цилиндра от величины расстройки контура  $\delta$  при различных значениях обобщенного параметра  $m_k$

чения обобщенного параметра целесообразнее выбирать не выше 2,5. Чувствительность при этом получается наибольшей при отрицательных расстройках.

Анализ полученных выражений и графиков показывает, что включением вихретокового преобразователя в обычный параллельный колебательный контур невозможно получить значительного увеличения чувствительности из-за низкой добротности реального нагруженного вихретокового преобразователя. Это обстоятельство в значительной мере снижает эффективность использования колебательного контура с вихретоковым преобразователем для электромагнитного контроля качества изделий и материалов. В связи с этим представляется целесообразным использование для этой цели регенерированного колебательного контура, когда к его зажимам подключается отрицательное сопротивление, компенсирующее активные потери датчика.

Для оценки чувствительности такого контура ограничимся рассмотрением чувствительности модуля эквивалентного сопротивления регенерированного колебательного контура к изменению электропроводности и радиуса, для чего возьмем производную из выражения

$$Z_{k \text{ экв}} = \frac{X X_c \eta_p}{\sqrt{R^2 + (X - X_c)^2 \eta_p^2}}, \quad (20)$$

где  $\eta_p = \frac{1}{1 - \frac{X^2}{RR_-}}$  — коэффициент регенерации,  
 $R_-$  — отрицательное сопротивление.

Поскольку все вышеизложенные рассуждения для обычного контура остаются справедливыми и для регенерированного контура, промежуточные вычисления можно опустить и записать окончательное выражение для чувствительности модуля эквивалентного сопротивления регенерированного контура к изменениям электропроводности и радиуса цилиндра

$$S_{\gamma r}(Z_{к экв}) = S_{\gamma r}(X) \frac{(2\eta_p - 1) - Q^2 \eta_p^2 \delta (1 + \delta)}{Q^2 \eta_p^2 \delta^2 + 1} - S_{\gamma r}(R) \frac{\eta_p}{1 + Q^2 \eta_p^2 \delta} \quad (21)$$

При  $\delta = 0$

$$S_{\gamma r}(Z_{к экв}) = S_{\gamma r}(Z_{к экв}) = S_{\gamma r}(X) (2\eta_p^{-1}) - S_{\gamma r}(R) \cdot \eta_p \quad (22)$$

На рис. 2 представлены графики зависимости чувствительности модуля эквивалентного сопротивления контура к изменению электропроводности и радиуса для различных  $\delta$ ,  $m_k$  и  $\eta_p$ . Анализ графиков

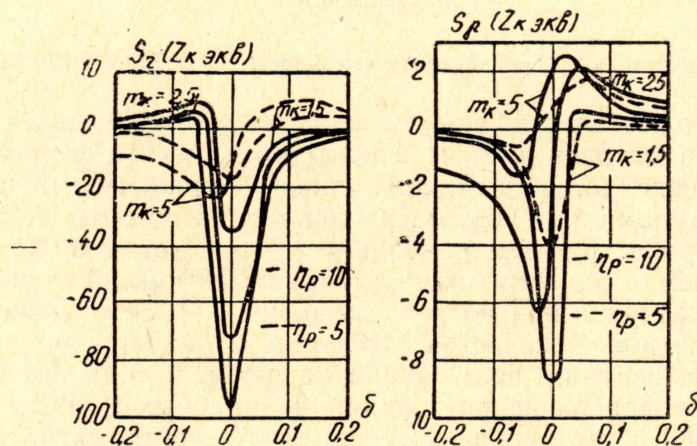


Рис. 2. Зависимость чувствительности модуля эквивалентного сопротивления регенерированного колебательного контура к изменениям радиуса  $r$  и электропроводности  $\gamma$  от величины расстройки контура при различных значениях обобщенного параметра  $m_k$  и коэффициента регенерации  $\eta_p$

подтверждает выводы о том, что с увеличением эквивалентной добротности происходит значительный рост чувствительности схемы. Величина оптимальной расстройки при этом приближается к нулю, что имеет свои положительные стороны с точки зрения практической реализации данной схемы включения преобразователя. Применение метода регенерации для повышения чувствительности вихретокового преобразователя несомненно дает большие возможности, особенно для целей электромагнитной дефектоскопии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мак-Мастер. Неразрушающие испытания. ИЛ., 1965.
2. В. К. Жуков. Кандидатская диссертация. Томский политехнический институт. 1964.
3. В. Г. Герасимов. Анализ чувствительности и разрешающей способности вихретокового датчика, включенного в колебательный контур. Труды института физики металлов АН СССР, вып. 26, 1967.