

### КВАЗИОБРАЗЦОВАЯ МЕРА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ВИХРЕТОКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Одним из важных способов повышения точности измерения является градуировка непосредственно в условиях измерения [1]. Возможность градуировки накладного вихретокового преобразователя в условиях измерения рассмотрена в работе [2]. Введение в процессе измерения образцовой меры электропроводности во взаимодействие с преобразователем является задачей сложной и пока еще удовлетворительно не решенной. Введение образцовой меры перемещения  $\Delta z$  проще и уже реализовано, например в [3], где  $\Delta z$  в процессе контроля создается периодическими перемещениями на эту величину преобразователя.

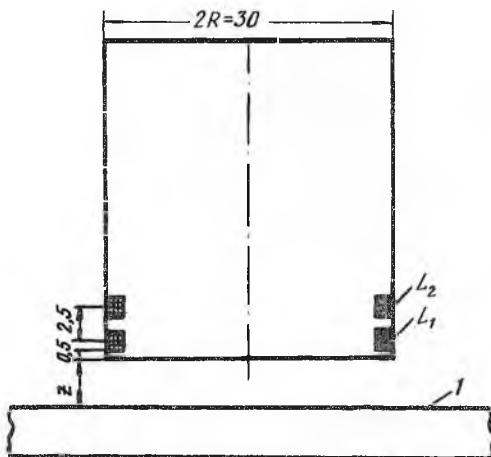
Существующие способы градуировки, связанные с периодическими механическими перемещениями преобразователя [3], [4] имеют существенные недостатки, главными из которых являются нестабильность и инерционность механизма перемещения, что значительно снижает точность задания  $\Delta z$  и недостаточно надежно при длительных испытаниях.

В настоящей работе рассматривается новый способ введения образцовой меры перемещения и оценивается его погрешность. Сигнал о  $\Delta z$  возникает при переключении двух идентичных, жестко закрепленных на одном каркасе обмоток,  $L_1$  и  $L_2$ , радиусом  $R$  (рис. 1), расположенных друг от друга на фиксированном расстоянии. Таким образом, зазор на  $\Delta z$  изменяется не механическим перемещением контролируемого объекта или преобразователя, а путем коммутации двух смещенных обмоток. Очевидными преимуществами такого способа получения сигнала о  $\Delta z$  является стабильность величины  $\Delta z$  и значительно более широкий частотный диапазон переключений по сравнению с частотой механических перемещений. Параметры обмоток вихретокового преобразователя, индуктивность  $L$  и активное сопротивление зависят от зазора  $z$  до проводящего объекта, от его электрофизических свойств, электропроводности объекта  $\sigma$ , и магнитной проницаемости  $\mu$ , конфигурации  $\gamma$ , окружающей температуры  $t^\circ$  и т.п. В случае двухобмоточного преобразователя параметры каждой обмотки зависят еще от их взаимного влияния. Поэтому для индуктивности можно записать:

$$L_1 = L_{10} + L_{21} \quad (1)$$

$$L_2 = L_{20} + L_{12} \quad (2)$$

- Здесь
- $L_1$  - индуктивность ближней к металлу обмотки при разомкнутой  $L_2$  ;
  - $L_2$  - индуктивность дальней обмотки при разомкнутой  $L_1$  ;
  - $L_{10}$  и  $L_{20}$  - индуктивности катушек при отсутствии взаимного влияния;
  - $L_{21}$  - индуктивность, обусловленная влиянием дальней от металла (разомкнутой) обмотки;
  - $L_{12}$  - индуктивность, обусловленная влиянием ближней к металлу (разомкнутой) обмотки.



Р и с. I. Квазиперемещающийся вихретоковый преобразователь:

- $L_1, L_2$  - ближняя и дальняя от металла обмотки;
- 1 - металлический образец

В течение времени градуировки преобразователя индуктивности  $L_{10}$  и  $L_{20}$  являются одинаковыми функциями от всех параметров, которые являются неизменными для обеих обмоток.

Величины зазоров разнятся на  $\Delta z$  :

$$L_{10} = F_1(z, \sigma_1, \mu_1, \gamma_1, t^{\circ}, \dots); \quad (3)$$

$$L_{20} = F_1(z + \Delta z, \sigma_1, \mu_1, \gamma_1, t^{\circ}, \dots). \quad (4)$$

Чувствительность вихретокового преобразователя к перемещению по индуктивности  $S_{L_0}$  определяется по формуле

$$S_{L_0} = \frac{\Delta L_0}{\Delta z} = \frac{L_{10} - L_{20}}{\Delta z}. \quad (5)$$

В результате взаимного влияния обмоток чувствительность можно определить по формуле

$$S_L = \frac{L_1 - L_2}{\Delta z} = \frac{\Delta L_0}{\Delta z} + \frac{L_{21} - L_{12}}{\Delta z} = S_{L_0} + \varepsilon_L. \quad (6)$$

Первое слагаемое (6) является чувствительностью  $S_{L_0}$ , второе представляет собой абсолютную погрешность определения чувствительности

$$\varepsilon_L = \frac{L_{21} - L_{12}}{\Delta z}. \quad (7)$$

Относительную погрешность чувствительности в процентах можно выразить в виде

$$\gamma_L = \frac{\varepsilon_L}{S_{L_0}} 100\%. \quad (8)$$

Зависимости  $L_{21}(z)$  и  $L_{12}(z)$  характеризуют погрешность, возникающую при замене градуировки перемещением градуировкой с помощью смещенных обмоток.

Погрешность  $\varepsilon_L$  можно считать состоящей из двух составляющих: систематической и случайной. Систематическая погрешность  $\varepsilon_{L_{сист}}$  в случае одинаковых обмоток  $L_1$  и  $L_2$  зависит от величины отношения сечения обмотки  $S_K$  к поперечному сечению преобразователя

$S_0$ , т.е. от  $S_K/S_0$ , сечения намоточных проводов, их электропроводности  $\sigma_2$  и магнитной проницаемости  $\mu_2$ . Минимальная погрешность будет при выполнении условия

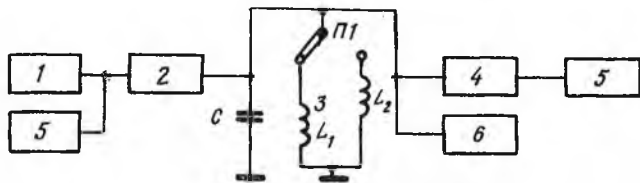
$$S_K/S_0 \rightarrow 0, \sigma_2 \rightarrow 0, \mu_2 \rightarrow \mu_{\text{воздуха}} \quad (9)$$

В случае невыполнения условия (9) минимальное значение погрешности можно обеспечить при условии  $L_{21}(z) = L_{12}(z)$ . Случайная погрешность  $\varepsilon_{L_{случ}}$  определяется погрешностью измерения выходных параметров вихретокового преобразователя. При использовании современных приборов значение случайной погрешности обычно не превышает 0,1%.

Экспериментально погрешность ввода  $\Delta z$  была оценена с помощью смещенных обмоток для двух одинаковых преобразователей, изготовленных по единой технологии с параметрами:

$$L_{1,x} = L_{2,x} = 65 \text{ мкГн (при } z \gg R); S_{K1} = S_{K2} = 1 \text{ мм}^2; \\ S_0 = \pi R^2 = 710 \text{ мм}^2; \sigma_2 = 58 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2; \mu_2 = 1.$$

Роль проводящего объекта выполняли образцы из немагнитных материалов с  $\sigma_r = 0,52; 0,6; 18,0; 58,0$  м/Ом мм<sup>2</sup> и из магнитной стали с  $\sigma_r = 2,38$  м/Ом·мм<sup>2</sup> и начальной магнитной проницаемостью  $\mu_0 = 40$ . Преобразователь, установленный в спецстойку, перемещался над образцом с помощью микрометрического винта. Измерение зазора осуществлялось индикаторными часами с ценой деления 0,002 мм. Изменялась резонансная частота параллельного контура  $f$ , образованного обмоткой преобразователя и постоянной емкостью "С" (рис.2). Контур питается от генератора стандартных сигналов I.



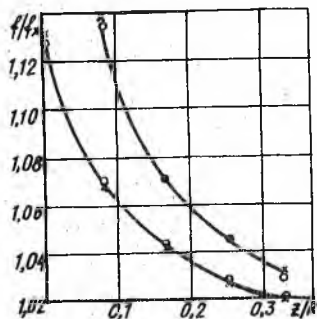
Р и с. 2. Функциональная схема установки:

I - генератор; 2 - усилитель; 3 - вихретоковый преобразователь; 4 - детекторная приставка; 5 - вольтметр; 6 - частотомер

Для уменьшения влияния внутреннего сопротивления генератора на добротность контура в цепь питания по высокой частоте на пентоде 2 включался усилитель, имеющий большое внутреннее сопротивление. Резонансная частота определялась по максимуму отклонения вольтметра 5 типа ВК7-10А/1 цифровым частотомером 6 типа Ф-599. Вольтметр использовался в режиме измерения постоянного напряжения, поэтому сигнал, снимаемый с переключателя П1, предварительно выпрямлялся детекторной приставкой 4, собранной на высокочастотном диоде 4Д5С. С целью уменьшения влияния паразитной емкости диод устанавливался в непосредственной близости к измеряемым точкам. Питание схемы осуществлялось от источника стабилизированного напряжения, накал диода - от сухого гальванического элемента.

Измерения резонансной частоты каждого преобразователя выполнялись дважды: при наличии и после снятия соседней обмотки. Для уменьшения случайной погрешности в расчетах и построениях принималось среднее значение результатов трех экспериментов. Величина случайной ошибки не превышала 0,1%.

По результатам измерений построены графики (рис.3) Здесь  $\frac{f_1}{f_x}(\frac{z}{R})$  и  $\frac{f_{10}}{f_{ox}}(\frac{z}{R})$  - нормированные, пропорциональные  $L_1$  и  $L_{10}$  функции преобразования ближней к металлу обмотки при наличии и отсутствии дальней;  $\frac{f_2}{f_x}(\frac{z}{R})$  и  $\frac{f_{20}}{f_{ox}}(\frac{z}{R})$  - то же, но для обмотки  $L_2$ ;  $f_x$  и  $f_{ox}$  - резонансные частоты контура ( $z \gg R$ ) при наличии и отсутствии соседней обмотки.



Р и с.3. Нормированные зависимости функций преобразования обмоток  $L_1$  и  $L_2$  при наличии  $\frac{f_1}{f_x}(\frac{z}{R})$ ,  $\frac{f_2}{f_x}(\frac{z}{R})$  и отсутствии  $\frac{f_{10}}{f_{ox}}(\frac{z}{R})$ ,  $\frac{f_{20}}{f_{ox}}(\frac{z}{R})$  взаимного влияния от нормированного зазора:

$$\begin{aligned} \text{---} \frac{f_1}{f_x}(\frac{z}{R}); & \text{---} \times \frac{f_{10}}{f_{ox}}(\frac{z}{R}) \\ \text{---} \frac{f_2}{f_x}(\frac{z}{R}); & \text{---} \times \frac{f_{20}}{f_{ox}}(\frac{z}{R}) \end{aligned}$$

Взаимное влияние обмоток друг на друга, приводящее к деформации функций преобразования, оказалось различным. Функция преобразования  $\frac{f_1}{f_x}(\frac{z}{R})$  ближней к металлу обмотки несколько смещается в сторону меньших значений  $\frac{z}{R}$  и практически не изменяется при относительных зазорах  $\frac{z}{R} = 0 \div 0,3$ . Некоторая деформация начинается только при больших зазорах.

Иное происходит с дальней от металла обмоткой. Под влиянием  $L_1$  функция преобразования ее  $\frac{f_2}{f_x}(\frac{z}{R})$  искажается значительно, с увеличением зазора она постепенно прогибается. На рис. 4 эти искажения  $\frac{f_{21}}{f_x}(\frac{z}{R})$  и  $\frac{f_{12}}{f_x}(\frac{z}{R})$ , обусловленные взаимным влиянием обмоток, построены отдельно:

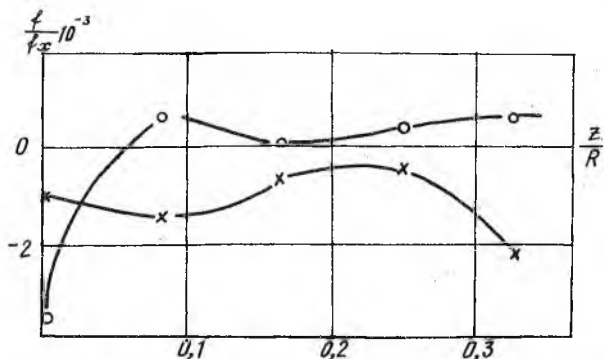
$$\frac{f_{21}}{f_x}(\frac{z}{R}) = \frac{f_1}{f_x}(\frac{z}{R}) - \frac{f_{10}}{f_{ox}}(\frac{z}{R}); \quad (10)$$

$$\frac{f_{12}}{f_x}(\frac{z}{R}) = \frac{f_2}{f_x}(\frac{z}{R}) - \frac{f_{20}}{f_{ox}}(\frac{z}{R}), \quad (11)$$

где  $\frac{f_{21}}{f_x}(\frac{z}{R})$  и  $\frac{f_{12}}{f_x}(\frac{z}{R})$  пропорциональны соответственно  $L_{21}$  и  $L_{12}$ .

Разность  $\frac{f_{21}}{f_x}(\frac{z}{R})$  и  $\frac{f_{12}}{f_x}(\frac{z}{R})$  (рис. 5) является источником погрешности ввода  $\Delta z$ , а взятая по нормированному зазору

$$\epsilon_f = \frac{\frac{f_{21}}{f_x}(\frac{z}{R}) - \frac{f_{12}}{f_x}(\frac{z}{R})}{\frac{\Delta z}{z_{max}}} \quad (12)$$



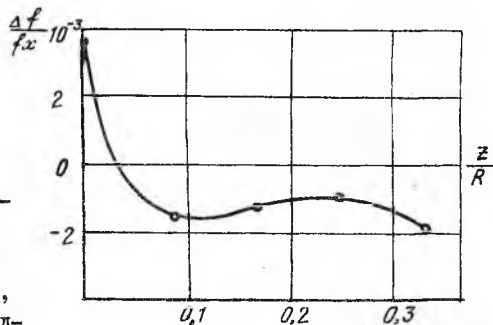
Р и с. 4. Приращения функций преобразования, обусловленные взаимным влиянием обмоток:

— x —  $\frac{f_{21}}{f_x} \left( \frac{z}{R} \right) = \frac{f_1}{f_x} \left( \frac{z}{R} \right) - \frac{f_{10}}{f_{ox}} \left( \frac{z}{R} \right)$  — приращение функции преобразования ближней к металлу обмотки за счет влияния разомкнутой дальней;

— o —  $\frac{f_{12}}{f_x} \left( \frac{z}{R} \right) = \frac{f_2}{f_x} \left( \frac{z}{R} \right) - \frac{f_{20}}{f_{ox}} \left( \frac{z}{R} \right)$  — то же, но для дальней от металла обмотки

определяет абсолютную погрешность определения чувствительности преобразователя ( $z_{max} = 10$  мм). В диапазоне  $\frac{z}{R} = 0,1 \div 0,3$  (рис.5) абсолютная погрешность  $\varepsilon_f$  почти постоянна, поэтому ее легко учесть, вводя поправку.

Если целью измерения является определение зазора между преобразователем и проводящим объектом, то величина и знак погрешности известны, погрешность следует считать в этом случае систематической, и она может быть учтена. Если же зазор неизвестен, например, при измерении электропроводности, то  $\varepsilon_f$  определяет случайную погрешность градуировки чувствительности индуктивного преобразова-



Р и с. 5. Разность приращений функций преобразования  $\frac{f_{21}}{f_x} \left( \frac{z}{R} \right) - \frac{f_{12}}{f_x} \left( \frac{z}{R} \right)$ , обусловленных взаимным влиянием, в функции нормированного зазора

теля по зазору. В этом случае относительная погрешность по частоте, обусловленная взаимным влиянием обмоток, определяется выражением

$$\delta f = \frac{\delta f}{S_f} 100\% , \quad ( 13 )$$

где  $S_f$  - чувствительность преобразователя по частоте.

В исследованном диапазоне перемещений значение  $\delta f$  не превышает 3%. Зависимости (см. рис. 3,4,5) соответствуют металлу с  $\sigma_f = 18 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$ , однако характер их и порядок величин сохраняется для всех использованных в работе образцов.

Невысокая погрешность измерения, обусловленная взаимным влиянием обмоток, отсутствие ограничений при выборе частоты проверок, позволяют использовать квазиперемещение вихретокового преобразователя в устройствах с автоматической градуировкой преобразователя в процессе измерения.

Градуировка чувствительности преобразователя по зазору в условиях измерения позволяет увеличить точность измерения при контроле электропроводности объекта и параметров, связанных с ней, а также во всех случаях, когда существует однозначная связь чувствительности с контролируемым параметром и чувствительности с зазором, так как нестабильность зазора приводит к небольшим погрешностям.

## Л и т е р а т у р а

1. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М., Издательство стандартов, 1972.
2. Быховский Ю.С. Автоматический контроль и методы электрических измерений. Труды УН Всесоюзной конференции, 1965. Новосибирск, Изд. СО АН СССР, 1971.
3. Быховский Ю.С. Автоматическое определение чувствительности бесконтактного преобразователя. М., "Приборостроение", 1968, № 8.
4. "Бесконтактная виброизмерительная система". Патент США, № 3488583, 1967.