

**Б.М. ГОРКУНОВ**, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",  
**И.В. ТЮПА**, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ",  
**А.А. ТИЩЕНКО**, аспирант, НТУ "ХПИ"

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ С ВИХРЕТОКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

У роботі запропоновано модель вихорострумowego перетворювача для контролю поверхневих шарів металевих циліндричних виробів, яка досліджена за допомогою пакету MATLAB. Отримані основні співвідношення, що описують взаємодію поверхневих шарів циліндричного виробу з вихорострумowym перетворювачем.

In the work the model of eddy current converter for the control superficial layers of hard wares investigational by a package MATLAB is offered. Basic correlations which describe co-operating of superficial layers of cylindrical good with an eddy current converter are got.

**Введение.** В настоящее время расширение промышленного производства невозможно без решения проблем повышения качества и конкурентоспособности выпускаемых машин. Одной из важных задач при обеспечении качества машины является повышение эксплуатационных показателей их деталей. Эти показатели определяются параметрами качества поверхностного слоя. Известно, что до 70% причин выхода из строя машин и механизмов связано с износом узлов трения. Следовательно, одним из направлений обеспечения качества машин является повышение износостойкости этих деталей, которая зависит от многих параметров качества поверхностного слоя, поэтому важно знать возможности управления комплексом этих параметров. Для эффективного контроля поверхностного состояния металлических изделий целесообразно применять вихретоковый бесконтактный метод неразрушающего контроля [1].

**Постановка задачи.** Для того, чтобы получить основные выражения, описывающие взаимодействие вихретокового преобразователя (ВТП) и цилиндрического образца, поверхность которого представлена в виде двухслойной катушки, рассмотрим рис. 1. Для нашего случая, плотность тока во внутренней части цилиндрического образца принимается равной нулю, тогда рассматриваемый сплошной стержень можно заменить полым цилиндром [2, 3].

Вносимые параметры  $R_{внк_1}$ ,  $L_{внк_1}$ ,  $R_{внк_2}$ ,  $L_{внк_2}$  вихретокового преобразователя от двухслойной среды можно определить из выражений [4]:

$$R_{внк_1} = \frac{\omega^2 M_{uk_1} M_{k_1u} R_{k_1}}{R_{k_1}^2 + (\omega L_{k_1})^2} \quad (1)$$

$$L_{внк_1} = \frac{\omega^2 M_{uk_1} M_{k_1u} \omega L_{k_1}}{R_{k_1}^2 + (\omega L_{k_1})^2} \quad (2)$$

$$R_{внк_2} = \frac{\omega^2 M_{uk_2} M_{k_2u} R_{k_2}}{R_{k_2}^2 + (\omega L_{k_2})^2} \quad (3)$$

$$L_{внк_2} = \frac{\omega^2 M_{uk_2} M_{k_2u} \omega L_{k_2}}{R_{k_2}^2 + (\omega L_{k_2})^2} \quad (4)$$

где  $R_{k_1}$ ,  $L_{k_1}$  и  $R_{k_2}$ ,  $L_{k_2}$  – активное сопротивление и индуктивность первого и второго слоя соответственно;  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота;  $f$  – частота тока возбуждения.

Для получения выражений  $M_{uk_1}$ ,  $M_{k_1u}$ ,  $M_{uk_2}$  и  $M_{k_2u}$  рассмотрим модель проникновения магнитного поля в систему ВТП-образец, представленную на рис. 1.

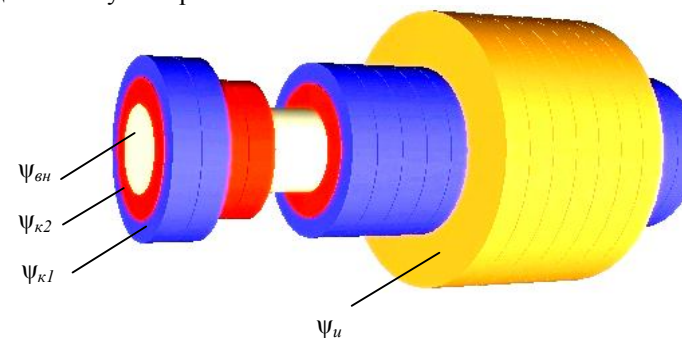


Рис.1. Магнитные потоки в сечении параметрического преобразователя с изделием

На рис. 1 показаны магнитные потоки в сечении параметрического преобразователя, где  $\Psi_u$  – поток через измерительную обмотку преобразователя;  $\Psi_{k1}$  – поток через 1-ый слой образца;  $\Psi_{k2}$  – поток через 2-й слой образца;  $\Psi_{вн}$  – поток через внутреннее пространство образца.

В общем случае магнитный поток представляется в виде

$$\Psi = \int_r B dr, \quad (5)$$

где  $B$  – индукция магнитного поля;  $r$  – текущий радиус кольца.

Величины магнитного потока, которые будут создавать токи в измерительной обмотке  $\Psi_{изм}$ , в 1-ом  $\Psi_1$  и во 2-ом  $\Psi_2$  слоях объекта можно представить соотношениями

$$\Psi_{изм} = \Psi_u + \Psi_{\theta оз} + \Psi_{\kappa_1} + \Psi_{\kappa_2} + \Psi_{вн} \quad (6)$$

$$\Psi_1 = \Psi_{\kappa_1} + \Psi_{\kappa_2} + \Psi_{вн} \quad (7)$$

$$\Psi_2 = \Psi_{\kappa_2} + \Psi_{вн} \quad (8)$$

Магнитный поток сквозь тело кольцевого токопровода в общем виде определяется соотношением [4]

$$\Psi_m = 2\pi \left( \frac{a_{внеш} \mu_0 \mu_r I}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{a_{внеш}}} f(\lambda_{внеш}) - \frac{a_{вн} \mu_0 \mu_r I}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{a_{вн}}} f(\lambda_{вн}) \right), \quad (9)$$

где  $a_{внеш}$  и  $a_{вн}$  – внешний и внутренний радиусы кольца;  $f(\lambda_{внеш})$  и  $f(\lambda_{вн})$  – значения функции соответствующих форм-факторов модели [4];  $a$  – радиус какого-либо витка, который образует магнитное поле;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость образца;  $I$  – намагничивающий ток.

Исходя из выше изложенного, взаимную индуктивность 1-го слоя образца и измерительной катушки можно представить в виде:

$$M_{k_1u} = \mu_0 \sqrt{a_{\kappa_1} a_u} f(\lambda_u) + a_{\kappa_1} \mu_0 f(\lambda_{\kappa_1}) (\mu_{r_1} - 1) + \mu_0 \sqrt{a_{\kappa_1} a_{k_2}} f(\lambda_{k_2}) (\mu_{r_2} - \mu_{r_1}) - \mu_0 \sqrt{a_{\kappa_1} a_3} f(\lambda_3) (\mu_{r_2} - 1) \quad (10)$$

Взаимная индуктивность измерительной катушки и 1-ого слоя образца, записывается в виде:

$$M_{uk_1} = \mu_0 \mu_{r_1} \sqrt{a_u a_{\kappa_1}} f(\lambda_{\kappa_1}) + \mu_0 \sqrt{a_u a_{\kappa_2}} f(\lambda_{k_2}) (\mu_{r_2} - \mu_{r_1}) - \mu_0 \sqrt{a_u a_3} f(\lambda_3) (\mu_{r_2} - 1) \quad (11)$$

Аналогично получаем

$$M_{k_2u} = \mu_0 \sqrt{a_{\kappa_2} a_u} f(\lambda_u) + \mu_0 \sqrt{a_{\kappa_2} a_{\kappa_1}} f(\lambda_{\kappa_1}) (\mu_{r_1} - 1) + \mu_0 a_{\kappa_2} f(\lambda_{k_2}) (\mu_{r_2} - \mu_{r_1}) + \mu_0 \sqrt{a_{\kappa_2} a_3} f(\lambda_3) (1 - \mu_{r_2}) \quad (12)$$

где  $M_{k_2u}$  – взаимная индуктивность 2-го слоя образца и измерительной катушки.

$$M_{uk_2} = \mu_0 \mu_{r_2} \sqrt{a_u a_{\kappa_2}} f(\lambda_{k_2}) + \mu_0 \sqrt{a_u a_3} f(\lambda_3) (1 - \mu_{r_2}) \quad (13)$$

где  $M_{uk_2}$  – взаимная индуктивность измерительной катушки и 2-го слоя образца.

Для определения полного вносимого сопротивления  $Z_{вн1}$  и  $Z_{вн2}$  в отдельных витках воспользуемся формулами:

$$Z_{вн1} = R_{вн\kappa_1} + j\omega L_{вн1} \quad (14)$$

$$Z_{вн2} = R_{вн\kappa_2} + j\omega L_{вн2} \quad (15)$$

На рис. 2 показано распределение полного вносимого сопротивления измерительной обмотки для упрочненного образца, выполненного из стали Ст. 3.

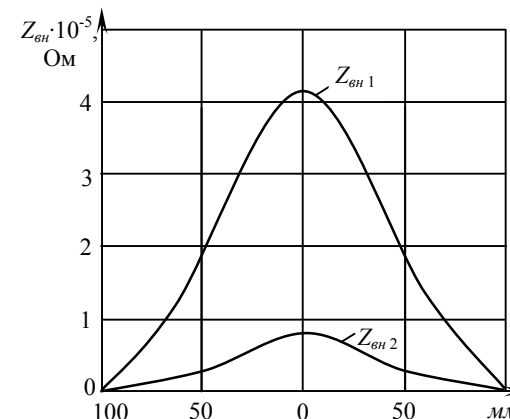


Рис.2. Распределение сигнала измерительной обмотки от слоев.

**Заключение.** Анализ полученных данных показывает, что вносимый сигнал в измерительную обмотку преобразователя от упрочненного слоя существенно отличается по амплитуде от сигнала основного металла. В дальнейшем необходимо направить исследования на выделение этой составляющей из общего вносимого сигнала в измерительную обмотку путем частотного сканирования упрочненного объекта.

**Список литературы:** 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. Ред.

В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн.-М.: Машиностроение, 2003.-688 с. 2.Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества. Метод вихревых токов. Под общей редакцией академика АН Киргизской ССР Н.Н. Шумиловского. М.-Л., изд-во «Энергия» 1966, 176 с. 3. Горкунов Б.М., Тюпа И.В., Тищенко А.А. Модель вихретокового преобразователя проходного типа с токопроводящим цилиндрическим образцом. // Технічна електродинаміка, тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність", ч.5, 2007, Київ, С. 45-48. 4. Б.М Горкунов, І.В Тюпа, О.А. Авраменко, В.В. Скопенко. Модель параметричного вихорострумового перетворювача. // Науково-технічний журнал «Методи та прилади контролю якості», № 21, 2008, Івано-Франківськ, С. 9-13.