

*Г.М. СУЧКОВ*, проф. доктор техн. наук, НТУ «ХПИ»  
*Ю.В. ХОМЯК*, аспирант, НТУ «ХПИ»

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С МИНИМАЛЬНОЙ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Проведено теоретичний аналіз роботи накладного трансформаторного вихорострумowego перетворювача. Знайдено залежність вихідного сигналу вихорострумowego перетворювача від електромагнітних параметрів таких як струм, взаємна індуктивність, імпеданс, частота. Показано, що взаємна індуктивність між обмотками повинна бути мінімальна, котушки перетворювача повинні бути перпендикулярні одна одній. Запропоновано конструкцію модифікованого вихорострумowego перетворювача.

The theoretical analysis of work of the surface eddy-current probe is carried out. Dependence of a target signal of the eddy-current probe on electromagnetic parameters, such as a current, mutual inductance, impedance, frequency is found. It is shown, that mutual inductance between windings should be minimum, converter coils should be perpendicular each other. The design of the modified eddy-current probe is offered.

**Введение.** В настоящее время в области неразрушающего контроля все большее распространение получает вихретоковый метод [1]. Это обусловлено быстрым ростом электронных технологий. В современных вихретоковых дефектоскопах применяются микропроцессоры, позволяющие более эффективно обрабатывать и систематизировать дефектоскопическую информацию. Существуют специальные методики обработки сигналов для уменьшения влияния мешающих факторов (температуры, зазора, неоднородности электромагнитных свойств исследуемого образца, шероховатости его поверхности, электромагнитных помех и т.д.). Но не смотря на это основой любого дефектоскопа является первичный преобразователь. Именно от сигнала вихретокового преобразователя (ВТП) изначально зависит достоверность контроля и эффективность последующей обработки сигнала [2,3].

Из всего ассортимента существующих преобразователей можно выделить две основные группы – параметрические и трансформаторные. Первые отличаются тем, что информативным сигналом является изменение индуктивности и активного сопротивления. Такие преобразователи, как правило, включаются в цепи автогенераторов или измерительных мостов. Недостатком параметрических преобразователей является зависимость сигнала от температуры, зазора, электромагнитных свойств объекта контроля (ОК). Избавиться от этих недостатков можно с использованием трансформаторных ВТП. Такие преобразователи имеют несколько обмоток (более двух) [4]. За счет их конфигурации, взаимного расположения могут

быть устранены влияния зазора. Используя оптимальные соотношения количества витков первичной и вторичных обмоток, может быть достигнута высокая чувствительность.

Таким образом, следует отметить актуальность разработки вихретоковых преобразователей и принципиальный анализ их работы.

**Основная часть.** Цель настоящей работы – это анализ работы накладного трансформаторного ВТП.

Рассмотрим работу преобразователя как систему контуров с трансформаторной связью. Первый контур образован генератором и возбуждающей обмоткой. Контролируемый образец, содержащий дефект представим как индуктивность и омическое сопротивление образующие второй контур. Третий контур – это измерительная обмотка. На рис.1 представлена эквивалентная схема вихретокового преобразователя.

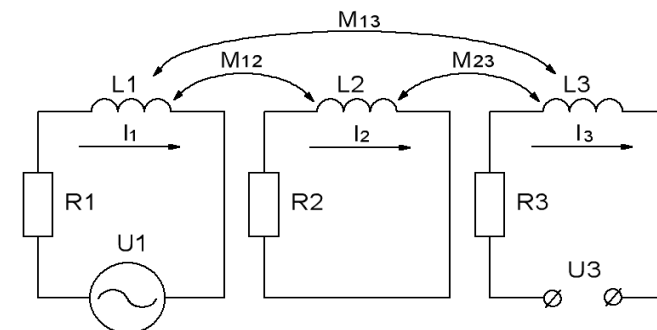


Рис.1 – Эквивалентная схема работы вихретокового преобразователя

На схеме:  $R_1, L_1, I_1$  – сопротивление, индуктивность и ток возбуждающей обмотки соответственно;  $U_1$  – напряжение, приложенное к первичной обмотке;  $R_2, L_2, I_2$  – эквивалентные электрические параметры исследуемого образца с трещиной;  $R_3, L_3, I_3$  – параметры приемной катушки;  $U_3$  – сигнал преобразователя;  $M_{12}, M_{23}, M_{13}$  – взаимные индуктивности между 1-м и 2-м, 2-м и 3-м, 1-м и 3-м контурами соответственно. Используя законы Кирхгофа [5] для цепей переменного тока, получим систему уравнений в комплексной форме:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 j\omega L_1 + \dot{I}_2 j\omega M_{12} + \dot{I}_3 j\omega M_{13} = \dot{U}_1, \\ \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 j\omega L_2 + \dot{I}_1 j\omega M_{12} + \dot{I}_3 j\omega M_{23} = 0, \\ \dot{I}_3 R_3 + \dot{I}_3 j\omega L_3 + \dot{I}_2 j\omega M_{23} + \dot{I}_1 j\omega M_{13} = \dot{U}_3. \end{cases} \quad (1)$$

Анализируя данную систему, найдем выходной сигнал ВТП, считая входным параметром возбуждающий ток  $I_1$ . Учитывая то, что нагрузкой измерительного контура является высокоомный вход предварительного усилителя, то есть,  $\dot{I}_3 \rightarrow 0$  следовательно, система упростится:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 j\omega L_1 + \dot{I}_2 j\omega M_{12} = \dot{U}_1, \\ \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 j\omega L_2 + \dot{I}_1 j\omega M_{12} = 0, \\ \dot{I}_2 j\omega M_{23} + \dot{I}_1 j\omega M_{13} = \dot{U}_3. \end{cases} \quad (2)$$

Решая данную систему, получим:

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \frac{j\omega M_{12}}{R_2 + j\omega L_2}, \quad (3)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \left( j\omega M_{13} + \omega^2 \frac{M_{12} M_{23}}{R_2 + j\omega L_2} \right). \quad (4)$$

Проанализируем полученное выражение (4). Член  $j\omega M_{13}$  не зависит от свойств ОК, а является лишь характеристикой преобразователя. Он зависит от частоты и не является величиной связанной с параметрами контролируемого образца. Следует отметить, что для существующих конструкций  $M_{13}$  намного больше, чем  $M_{12}$  и  $M_{23}$ , а это обуславливает ограничения чувствительности. Поэтому возникает необходимость свести к минимуму влияние  $j\omega M_{13}$ . Один из способов – это использование в измерительной схеме компенсирующего реактивного элемента. Это приведет к усложнению конструкции прибора, вызовет необходимость в дополнительной настройке, так как практически сложно полностью скомпенсировать зависимость от частоты. Другой способ уменьшить взаимную индуктивность между возбуждающей и измерительной катушками – это выполнить конструкцию ВТП в виде катушек плоскости которых перпендикулярны. Учитывая данные суждения, смоделируем конструкцию преобразователя, изображенную на рис. 2. Известно [6] что для такой конструкции в случае отсутствия ОК взаимная индуктивность  $M_{13} = 0$ , тогда выражение (4) примет вид:

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \omega^2 \frac{M_{12} M_{23}}{R_2 + j\omega L_2}. \quad (5)$$

Из анализа выражения (5) следует, что выходное напряжение вихретокового преобразователя пропорционально квадрату частоты,

произведению взаимных индуктивностей между катушками и объектом контроля и обратно пропорционально эффективному импедансу исследуемого образца. Следует отметить, что в выражение (5) не входят собственные индуктивности катушек преобразователя, что характерно для данного включения и подтверждает целесообразность использования данного преобразователя.

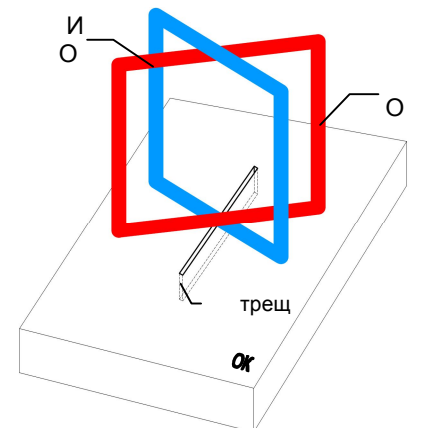


Рис.2 – Конструкция вихретокового преобразователя с ортогональными обмотками (ОК – объект контроля; ВО – возбуждающая обмотка; ИО – измерительная обмотка)

### Вывод.

Установлена зависимость выходного сигнала трансформаторного накладного ВТП от тока возбуждающей обмотки, взаимной индуктивности, эффективного импеданса дефекта, частоты. Из полученных соотношений следует что, собственные индуктивности обмоток не влияют на полезный сигнал, а взаимная индуктивность между обмотками должна быть минимальна. Полезный сигнал пропорционален произведению взаимных индуктивностей каждой из обмоток ВТП и контролируемого образца с дефектом. Катушки преобразователя должны быть перпендикулярны друг другу.

**Список литературы:** 1. В.В. Клюев, Ю.К. Федосенко, В.Ф. Мужичкий. Вихретоковый контроль: современное состояние и перспективы развития // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – №2. – с.4-9. 2. Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк. Развитие возможностей вихретоковой дефектоскопии // Методы та прилади контролю якості. – 2006. – № 17. – с.3-7. 3. В.Н. Учанин, В.В. Черленевский. Вихретоковый дефектоскоп для обнаружения поверхностных трещин // Сб. «Физические методы и средства контроля сред, материалов и изделий», 1999, с. 108–110. 4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с: ил. Вихретоковый контроль. Книга 2 / Ю.К.Федосенко, В.Г.Герасимов, А.Д.Покровский, Ю.Я.Останин. 5. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. СПб.: Питер, 2004. 483 с. 6. Колесников В. В. Основы теории цепей. Установившиеся режимы: текст лекций / В. В. Колесников; ГУАП.– СПб., 2006 – 101 с.: ил.