

УДК 620.179.14

**Б. М. ГОРКУНОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",  
**С. Г. ЛЬВОВ**, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ",  
**Н. Н. СИРЕНКО**, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",  
**Н. В. КОСТЮЧЕНКО**, магистр НТУ "ХПИ"

## **ОДНОПАРАМЕТРОВЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ НЕМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

В работе рассмотрена теория работы вихретокового преобразователя с исследуемым немагнитным цилиндрическим образцом. Получены функции преобразования, связывающие электрические и геометрические параметры исследуемого изделия с выходными сигналами преобразователя, что позволило существенно расширить пределы применения вихретокового преобразователя. Предложен метод однопараметрового контроля удельного электрического сопротивления при известных геометрических размерах образца и метод определения диаметра образца при известном удельном электрическом сопротивлении.

**Ключевые слова:** вихретоковый преобразователь, удельное электрическое сопротивление, функция преобразования, амплитуда, фаза, магнитный поток.

**Постановка проблемы.** Одной из основных характеристик любого первичного преобразователя является функция преобразования, т.е. функция, связывающая входные воздействующие величины (физические, химические и др.) с выходными характеристиками датчика. Она может быть представлена

© Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, Н. Н. Сиренко, Н. Н. Костюченко, 2015

аналитически в виде математической зависимости, графически (таблично) в виде градуировочной кривой или другими способами.

Для вихретоковых преобразователей (ВТП) с исследуемым немагнитным металлическим образцом входными параметрами являются удельное электрическое сопротивление  $\rho$  и геометрические размеры образца, которые в свою очередь зависят от физико-химического состава, воздействия температуры, механических напряжений и других воздействующих факторов. Выходными сигналами ВТП являются индуктивность, сопротивление, напряжение, ток, фаза, частота сигнала и их производные.

**Цель статьи.** Цель данной работы заключается в получении функции преобразования ВТП, связывающих электрические и геометрические параметры немагнитных металлических изделий с выходными электрическими сигналами ВТП для различных схем включения и режимов его работы.

**Основная часть.** В существующей литературе [1] описаны бесконтактные многопараметровые методы и ВТП для совместного измерения  $\rho$  и  $d$ . Недостатком таких устройств является то, что их практически невозможно использовать при контроле изменения  $\rho$  и  $d$ , когда эти изменения незначительны (менее 10 % от исходного значения), а именно такие изменения контролируемых параметров изделий и возникают в процессе их эксплуатации при воздействии на них механических нагрузок, что приводит к изменению  $\rho$ , либо работа узлов в агрессивных средах, что приводит к изменению как  $\rho$ , так и геометрических размеров ( $d$ ).

Функцию преобразования можно получить, когда определены информативные параметры объекта контроля, выбран метод преобразования этих параметров в выходные сигналы датчика, известна схема включения преобразователя, конструктивные особенности датчика и объекта контроля, а иногда и режимы работы датчика.

Принципиальная схема включения ВТП, с помощью которой можно реализовать метод бесконтактного контроля  $\rho$  и  $d$ , приведена на рис. 1, а векторная диаграмма напряжений ВТП, поясняющая его работу, приведена на рис. 2.

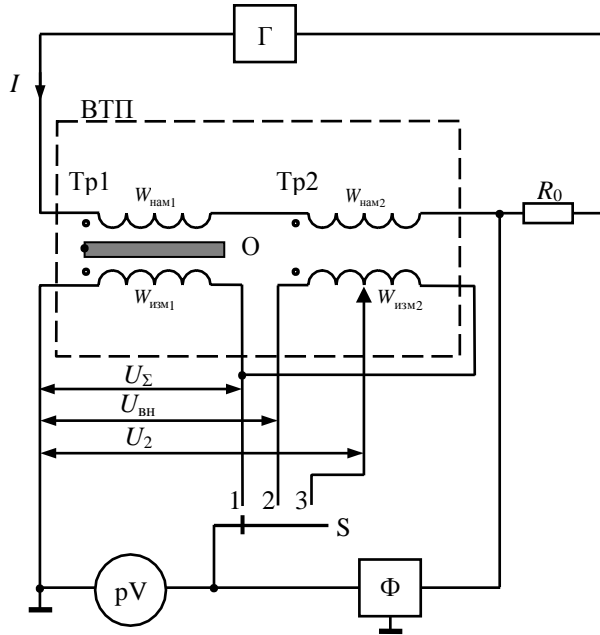


Рис. 1 – Схема включения ВТП при измерении выходного сигнала и его фазы

Преобразователь состоит из двух идентичных трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$ , в первом находится исследуемый образец  $O$ , а во втором имеется возможность изменять количество витков вторичной обмотки. Так как вторичные обмотки  $Tr1$  и  $Tr2$  включены последовательно-встречно, то на выходе ВТП можем получать в зависимости от положения выключателя  $S$  значения напряжений  $U_{\Sigma}$ ,  $U_{ВН}$  и  $U_2$ . При этом фазометр  $\Phi$  будет измерять соответствующие фазовые углы.

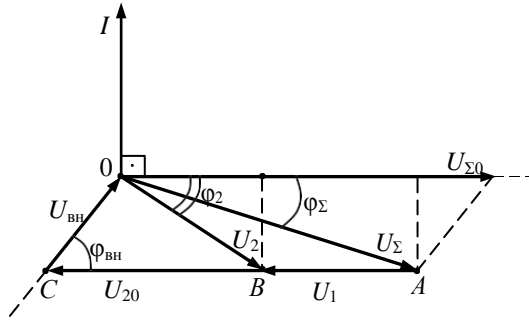


Рис. 2 – Векторная диаграмма напряжений, поясняющие работу ВТП для немагнитного образца

Воспользовавшись векторной диаграммой напряжений (см. рис. 2), получим основные функции преобразования ВТП при совместном бесконтактном определении  $\rho$  и  $d$  исследуемого немагнитного металлического образца для заданных значений напряженности (тока) и частоты зондирующего электромагнитного поля.

Из треугольника напряжений  $\Delta OBC$ , согласно рис. 2, получим выражения

$$U_2^2 = U_{ВН}^2 + U_{20}^2 - 2U_{ВН}U_{20} \cos \varphi_{ВН}; \quad (1)$$

$$U_{ВН} = U_2 + U_{20} - 2U_2U_{20} \cos \varphi_2. \quad (2)$$

где  $U_{20}$  – напряжение, пропорциональное магнитному потоку воздушного зазора трансформатора на размере образца;  $\varphi_2$  – фазовый угол магнитного потока в образце, который совпадает с углом сдвига фазы между  $U_2$  и  $U_{\Sigma 0}$ , где  $\varphi_{ВН}$  – угол сдвига фазы между напряжениями  $U_{ВН}$  и  $U_{\Sigma 0}$ .

Значение напряжения  $U_{20}$  связанос  $U_{\Sigma 0}$  через коэффициент заполнения  $\eta$  выражением [2]:

$$U_{20} = \eta U_{\Sigma 0}, \quad (3)$$

где  $\eta = d^2 / d_{п}^2$ ;  $d$  – диаметр исследуемого образца;  $d_{п}$  – диаметр измерительной обмотки ВТП.

Для немагнитных изделий ( $\mu_r = 1$ ) выражения для  $U_2$  имеет вид [2]:

$$U_2 = \eta K U_{\Sigma 0}, \quad (4)$$

Иногда возникает задача разработки ВТП для контроля физико-механического состояния немагнитного металлического объекта при условии, когда геометрия (диаметр  $d$ ) исследуемого объекта известна и в процессе контроля не изменяется.

Получим основные функции преобразования ВТП для данного случая. Подставив выражение (3) и (4) в формулу (2), после несложных преобразований, получим:

$$Q_2 = \sqrt{K^2 - 2K \cos \varphi_2 + 1} = \frac{U_{\text{вн}}}{\eta U_{\Sigma 0}}. \quad (5)$$

Левая часть выражения (5) представляет собой универсальную функциональную зависимость, которую можно однозначно рассчитать с помощью функций Бесселя в широком диапазоне изменения  $x$  и представить в виде таблиц или графика  $x = f_1(Q_2)$  (см. рис. 3).

Используя известное выражение для  $x$

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r 2\pi f}{\rho}}, \quad (6)$$

и с учетом того, что  $\mu_r = 1$  получим функцию преобразования ВТП для случая, когда известен диаметр образца

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi f d}{2x^2}. \quad (7)$$

С другой стороны, вычитая уравнение (1) из уравнения (2), после преобразований, получим:

$$Q_3 = \frac{U_{\text{вн}}^2 - U_{\Sigma}^2 + U_{\Sigma 0}^2}{2\eta U_{\Sigma 0}^2}, \quad (8)$$

где  $Q_3 = 1 - K \cos \varphi_2$  – универсальная функция преобразования, которая связана с обобщенным параметром  $x$ , график  $x = f_2(Q_3)$  приведен на рис. 3.

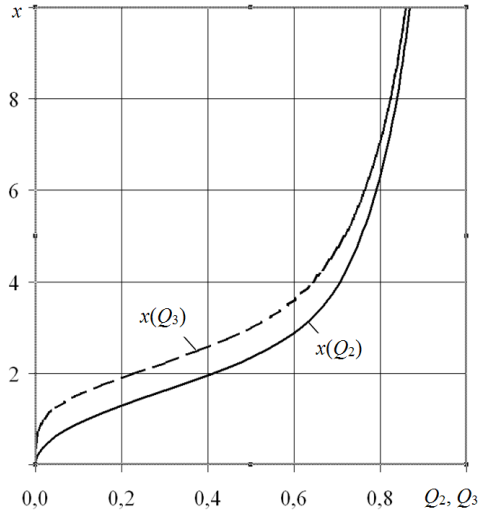


Рис. 3 – Зависимости  $x = f_1(Q_2)$  и  $x = f_2(Q_3)$

В нашем случае, когда  $d = \text{const}$ , соотношение для модуля удельного нормированного магнитного потока  $K$  можно получить, подставив известное [3] выражение

$$U_2 = \sqrt{\eta U_{\Sigma}^2 + (1 - \eta)(U_{\text{вн}}^2 - \eta U_{\Sigma 0}^2)}. \quad (9)$$

в формулу (4), т.е.:

$$K = \frac{\sqrt{\eta U_{\Sigma}^2 + (1 - \eta)(U_{\text{вн}}^2 - \eta U_{\Sigma 0}^2)}}{\eta U_{\Sigma 0}}, \quad (10)$$

а фазу магнитного потока в изделии определяют из выражения [3]:

$$\cos \varphi_2 = \frac{U^2 - U_2^2 + (2\eta - 1)U^2}{2U_{\Sigma 0} \sqrt{\eta U_{\Sigma}^2 + (1 - \eta)(U_{\text{вн}}^2 - \eta U_{\Sigma 0}^2)}}. \quad (11)$$

Графики зависимостей  $x = f(K)$  и  $x = f(\cos \varphi_2)$  приведены в работе [2].

Получим функции преобразования ВТП при определении электрических и геометрических параметров образцов по измеренным значениям амплитуды и фазы выходного сигнала ВТП.

Используя результаты работы [4], запишем:

$$tg\varphi_2 = \frac{U_{\Sigma} \sin\varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_1}; \quad (12)$$

где  $tg\varphi_2$  – фаза магнитного потока внутри исследуемого изделия.

На основании векторной диаграммы из  $\Delta OAB$  (см. рис. 2) запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} U_2^2 = U_{\Sigma}^2 + U_1^2 - 2U_{\Sigma}U_1 \cos \varphi_{\Sigma} \\ U_{\Sigma}^2 = U_2^2 + U_1^2 + 2U_2U_1 \cos \varphi_2 \end{cases} \quad (13)$$

Просуммировав эти два уравнения, получим:

$$U_1 = U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_2 \cos \varphi_2. \quad (14)$$

Подставив (14) в (12) с учетом (4), найдем:

$$\eta = \frac{U_{\Sigma} \sin\varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma 0} K \sin\varphi_2}. \quad (15)$$

С другой стороны, из выражений (14), (15), (12) и (4), после некоторых преобразований, можно получить уравнение, которое исключает влияние коэффициента заполнения, т.е.:

$$\frac{U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_{\Sigma 0}}{U_{\Sigma} \sin\varphi_{\Sigma}} = \frac{K \cos \varphi_2 - 1}{K \sin\varphi_2}, \quad (16)$$

где правая часть уравнения  $Q_4 = \frac{K \cos \varphi - 1}{K \sin \varphi_2}$  – универсальная

функция, которая зависит от обобщенного параметра  $x$ ; а левая часть уравнения зависит только от измеренных значений выходных сигналов ВТП ( $U_{\Sigma}$ ;  $\varphi_{\Sigma}$ ).

Следует отметить, что из выражения (15) можно получить обратную функцию преобразования ВТП для независимого контроля  $d$  образца [5]:

$$d = d_{\Pi} \sqrt{\frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma 0} K_{\mu}}}, \quad (17)$$

где  $K_{\mu} = K \sin \varphi_2 = f_4(Q_4)$  – мнимая часть удельного нормированного магнитного потока в образце, которая через параметр  $x$  зависит от функции  $Q_4$ , приведенной на рис. 4.

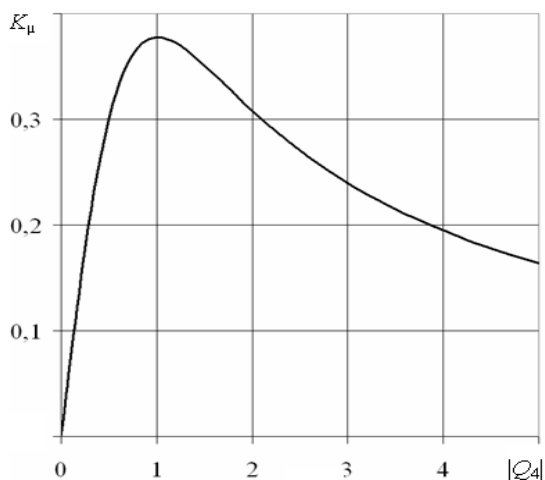


Рис. 4 – График функциональной зависимости  $K_{\mu} = f_4(Q_4)$

Используя выражение (6) для случая  $\mu_r = 1$ , получим обратную функцию преобразования ВТП при независимом контроле  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi d_{\Pi}^2 f U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{2 U_{\Sigma 0} K_{\rho}}. \quad (18)$$

где  $K_{\rho} = x^2 K \sin \varphi_2 = f_5(Q_4)$  – универсальная функция, которая однозначно связана с параметром  $Q_4$ , которая приведена на рис. 5.



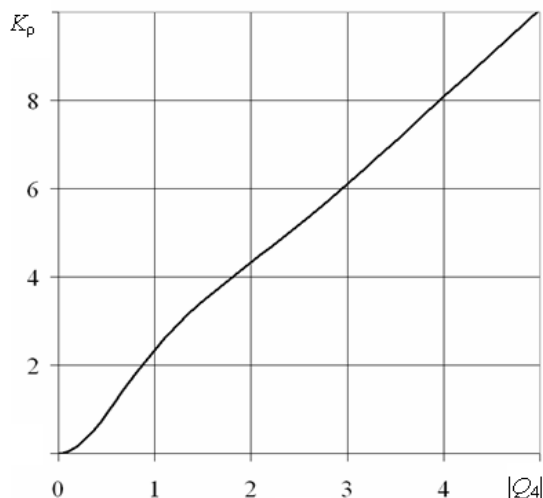


Рис. 5 – График функциональной зависимости  $K_p = f_5(Q_4)$

**Вывод.** Получены основные функции преобразования ВТП при контроле электрического ( $\rho$ ) и геометрического ( $d$ ) параметров немагнитных металлических изделий для частных случаев неразрушающего контроля одного из параметров изделия при известном значении второго, что расширило функциональные возможности ВТП.

**Список литературы:**1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля / В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с. 2. Бесконтактное измерение магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости цилиндрических изделий / В.П. Себко, В.И. Бондаренко, Б.М. Горкунов, В.И. Тюпа // Измерительная техника. –1984. –№6. –С.57–58. 3. Горкунов Б.М. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа // Вестник НТУ "ХПИ". – 2004. – №5. – С. 93-99. 4. Москаленко И.И. Трансформаторный электромагнитный преобразователь физико-механических величин / И.И. Москаленко, В.П. Себко, Б.М. Горкунов // Нетрадиционные электромеханические и электрические системы: междунар. науч.-техн. конф., 1997 г: матер. конф. – Алушта, 1997.– С.1173-1176. 5. Горкунов Б.М. Выбор рационального метода вихретокового контроля немагнитных металлических изделий / Б.М. Горкунов // Технічна електродинаміка, тематичний випуск "Силовa електроніка та енергоефективність". –2006. – Ч.4.–С.57–60.

**Bibliography (transliterated):**1. Klyuev, V. V. et al. "Nerazrushayushiy kontrol: Magnitnyie metody kontrolya". Vol. 6:– Moscow: Mashinostroenie, 2004. 8 vol. Print. 2. Sebko, V. P. et al. "Beskontaknoe izmerenie magnitnoy pronitsaemosti i udelnoy elektricheskoy provodimosti tsilindricheskikh izdeliy". *Izmeritelnaya tehnika*. No. 6. 1984. 57–58. Print. 3. Gorkunov, B. M.

and I.V. Тура. "Vihretokovyyi dvuhparametrovyyi kontrol ferromagnitnykh tsilindricheskikh izdeliy". *Vestnik NTU "KhPI"*. No. 5. 2004. 93-99. Print. **4.** Moskalenko I. I., V. P. Sebko and B. M. Gorkunov. "Transformatornyy elektromagnitnyy preobrazovatel fiziko-mekhanicheskikh velichin". *Netraditsionnyye elektromekhanicheskie i elektricheskie sistemy: konf. Alushta*. 1997. 1173-1176. Print. **5.** Gorkunov B. M. "Vyibor ratsionalnogo metoda vihretokovogo kontrolya nemagnitnykh metallicheskh izdeliy". *Tehnichna elektrodinamika, tematichniy vipusk "Silova elektronika ta energoefektivnIst.* Vol. 4. 2006. 57-60. Print.

*Поступила (received) 27.04.2015*