

# I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621-317.7; 621-319

Я. Р. Абдуллаев<sup>1</sup>, Г. В. Мамедова<sup>2</sup>, Г. С. Керимзаде<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук профессор Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии  
<sup>2,3</sup>Канд. техн. наук Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ЛЕВИТАТОРА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

На основе аналитических выражений ампервитков обмотки управления, магнитной индукции в стали магнитопровода и температуры перегрева обмотки получены выражения для геометрических размеров левитационного экрана и обмотки управления. Приведены примеры оптимальных геометрических соотношений.

**Ключевые слова:** магнитопровод, левитационный экран, преобразователь, обмотка возбуждения, ампервитки.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Основным узлом индукционного левитатора электро-механических преобразователей перемещений, усилителей и других видов преобразователей неэлектрических величин в электрические является Ш-образный магнитопровод с обмоткой управления 1, левитационным экраном из алюминия 2 и магнитопроводом 3 (рис. 1). Основы теории и практики перемещений этих левитаторов изложены в работах [1, 2]. В данной работе рассмотрен простой метод, позволяющий определить оптимальные геометрические размеры индукционного левитатора.

Для определения оптимальных размеров обмотки возбуждения ОВ (или обмотки управления ОУ) исполь-

зуются формулы тока обмотки  $I_1$  и индукции  $B_c$  стального сердечника:

$$I_1 = \frac{k_u U_1}{\omega W_1^2 \lambda X_0}; \quad B_c = \frac{k_u U_1 \sqrt{2}}{\omega W_1 S_c k_c}, \quad (1)$$

из которых соответственно следует:

$$I_1 W_1 = \left( \frac{k_u U_1}{\omega W_1} \right) \left( \frac{1}{\lambda X_0} \right); \quad (2)$$

$$\frac{k_u U_1}{\omega W_1} = \frac{B_c k_c S_c}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

где  $X_0 = X_{\max} + \frac{h_2}{3n\lambda}$ .

Подставив (3) в (2), получим выражение для МДС  $F_1$  в следующем виде:

$$F_1 = \frac{B_c k_c S_c}{\lambda X_0 \sqrt{2}}, \quad (4)$$

которое как видно, учитывает значение максимальной индукции  $B_c$  и максимальный ход  $X_{\max}$  ЛЭ. Но, оно не учитывает условие левитации, т. е. равновесие сил  $F_y = F_y + P_e$ . Учитывая последнее используются известные выражения [2] ампервитков обмотки:

$$F_1^2 = \frac{2}{\lambda} n_p g \gamma k_{32} S_{02} l_{cp2} \quad (5)$$

после подстановки (4) в (5) и ряда преобразований, получим:

$$c_2 = N_1 N_2 N_3 X_0^2, \quad (6)$$

где

$$S_c = 2ab = 2c_2^2 n_0^2 \frac{m_c^2}{m_a}; \quad S_{02} = c_2 h_2 = n_{e2} \cdot c_2^2. \quad (7)$$

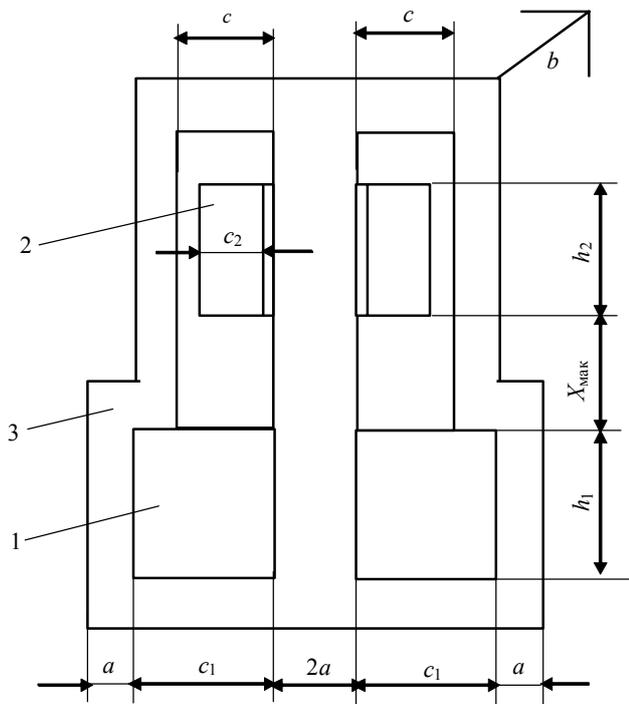


Рис. 1. Принципиальная схема индукционного левитатора

$$N_1 = \frac{4g\gamma_a\mu_0k_{32}}{k_c^2 B_c^2 n_{02}^3} \left[ \frac{1}{\sqrt{M}} \right]; \quad (8)$$

$$N_3 = n_1 \sigma_e \frac{m_a}{m_c}; \quad (9)$$

$$N_2 = n_p n_{e2}, \quad \gamma_a = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (10)$$

Численное значение коэффициента  $N_1$  для ЛЭ из алюминия определяется как:

$$N_1 = \frac{4 \cdot 9,81 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{0,92^2 \cdot 1,5^2 \cdot 1,1^3} = 52,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\sqrt{M}}. \quad (11)$$

Коэффициенты  $N_2$  и  $N_3$  сравнительны и значительно больше коэффициента  $N_1$ . На рис. 2 приведены графики функциональных зависимостей  $N_2(m_c)$ ,  $N_3(m_c)$  и  $N(m_c)$ . Каждому значению  $m_c$  на графиках соответствует своя пара коэффициентов  $n_{e2min} = h_2/c_2$  и  $m_a$ , которые могут быть определены по графикам оптимальных значений этих коэффициентов.

Максимальное значение  $X_0$  соответствует при  $c_2 = 14 \cdot 10^{-3}$  м и  $N = N_{min}$ , а минимальное значение  $N$  имеет место при малых значениях  $n_p$ , но при большой температуре перегрева  $\tau_2$ . Например при  $n_p = 2$ ,  $\tau_2 = 90^\circ$  имеем  $n_{e2min} = 1,15$ ; если  $m_c = 3,5$ ,  $m_a = 3,8$ ,  $N = 0,67$ . А при  $n_p = 3$  и  $\tau_2 = 50^\circ$  получается:  $n_{e2min} = 4,09$ ,  $m_c = 3,5$ ,  $m_a = 3,8$ ,  $N = 1,55$ .

При заданном значении  $c_2$  согласно (6) определяем:

$$X_0 = \frac{\sqrt{c_2}}{N}, \quad (12)$$

где

$$N = \sqrt{N_1 N_2 N_3}. \quad (13)$$

Согласно (5–13) при известных значениях коэффициентов  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  и размера  $X_0$  несложно определить тол-

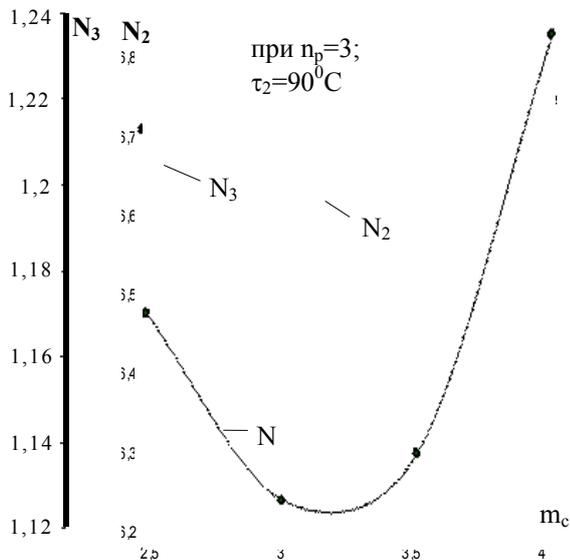


Рис. 2. Функциональные зависимости  $N_2(m_c)$ ,  $N_3(m_c)$  и  $N(m_c)$

щину  $c_2$ , если известно  $h_{12}$ . Можно решать обратную задачу, т. е. определить размер  $h_1$  задаваясь значением  $c_2$ :

$$h_1 = 3n_\lambda \left( \frac{\sqrt{c_2}}{N} - X_{max} \right), \quad (14)$$

где  $c_2 \leq 14 \cdot 10^{-3}$  м.

Важную роль коэффициента  $n_{e2min}$  в расчетах можно проиллюстрировать на следующем примере.

**Пример 1.** Заданы  $X_{max} = 40 \cdot 10^{-3}$  м;  $P_y = 3,046$  Н;  $\tau_2 = 50^\circ$ С;  $n_p = 3$ ;  $B_c = 1,5$  Тл. Требуется найти параметры и основные размеры магнитопровода, ОВ и ЛЭ. Из рис. 3 выбираем  $n_{e2min} = 3,85$  (для случая  $\tau_2 = 50^\circ$ С;  $n_p = 3$ ). В соответствии с этим находим:  $m_a = 2,182$ ;  $m_c = 2,5$ ;  $\sigma_b = 2,041$ ;  $\lambda = 12,8 \cdot 10^6$  Гн/м. Согласно (8), (11) и (13) определяем:  $N = 1,6$ ;  $N_1 = 52,5 \cdot 10^{-3}$  1/м;  $N_2 = 11,55$ ;  $N_3 = 4,223$ . Из [1] определяем  $c_2 = 10 \cdot 10^{-3}$  м, где  $n_1 = 14,8$ ;  $k' = 17,16 \cdot 10^{-6}$ . Условие  $c_2 \leq 14 \cdot 10^{-3}$  выполняется и тогда можно определить:  $h_2 = n_{e2min} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 38,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $c = n_{02} \cdot c_2 = 1,1 \cdot 10^{-3} = 11 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = m_c \cdot c = 2,5 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 27,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $a = b/m_a = 27,5/2,182 = 12,6 \cdot 10^{-3}$  м;  $S_{02} = c_2 \cdot h_2 = 10 \cdot 38,5 \cdot 10^{-6} = 385 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $S_c = 2ab = 2 \cdot 12,6 \cdot 2,75 \cdot 10^{-6} = 693 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. Далее определяем  $F_2 = 828$  А,  $F_1 = 845$  А,  $j_2 = 2,15 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>;  $X_0 = 62,7 \cdot 10^{-3}$  м. Для прямого магнитопровода  $n_\lambda = 1$ . Согласно (14) находим  $h_1 \approx 30 \cdot 10^{-3}$  м, а для ступенчатого магнитопровода  $n_\lambda = 1,15$  и  $h_1 \approx 33 \cdot 10^{-3}$  м. Далее определяем  $c = n_{02} \cdot c_2 = 1,1 \cdot 10^{-3} = 11 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = m_c \cdot c = 2,5 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 27,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $a = b/m_a = 27,5/2,182 = 12,6 \cdot 10^{-3}$  м;  $S_2 = c_2 \cdot h_2 = 10 \cdot 38,5 \cdot 10^{-6} = 385 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $S_n = 2ab = 2 \cdot 12,6 \cdot 2,75 \cdot 10^{-6} = 693 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ОВ И БЕЗРАЗМЕРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ $N_{E1}$

Согласно выражению для температуры перегрева:

$$\tau_1 = \frac{P_1}{k_i S_{ox1}} + \tau_2 S_{ox}^*. \quad (15)$$

Отсюда, при увеличении температуры перегрева ЛЭ  $\tau_2$  и отношения  $S_{ox}^* = S_{ox2} / S_{ox1}$  увеличивается температура перегрева  $\tau_1$ . Для уменьшения температуры  $\tau_1$  в первую очередь необходимо увеличить поверхность охлаждения  $S_{ox1}$  или коэффициент  $n_{e1}$ . Но увеличение коэффициента  $n_{e1}$  ограничено, поэтому для обеспечения температуры перегрева  $\tau_1$  ОВ имеет место метод комплексного подхода.

Согласно (2) с помощью величин  $S_{ox}^*$ ,  $n_{e1}$  и  $n_{e2}$  представляется:

$$S_{ox}^* = \frac{S_{ox2}}{S_{ox1}} = \frac{2l_2(c_2 + h_2)}{h_1(l_1 + 4c_1)} = 2B_0 \left( \frac{c_2}{c_1} \right) \left( \frac{1 + n_{e2}}{n_{e1}} \right),$$

здесь

$$l_{cp1} = l_{k1} + 4c_1; \quad l_{k1} = 2(2a + b + 4\Delta_k);$$

$$l_{cp2} = l_{k2} + 4c_2; \quad l_{k2} = 2(2a + b + 4\Delta_2) \approx l_{k1};$$

$$B_0 = \frac{l_{k2} + 4c_2}{l_{k1} + 8c_1}.$$

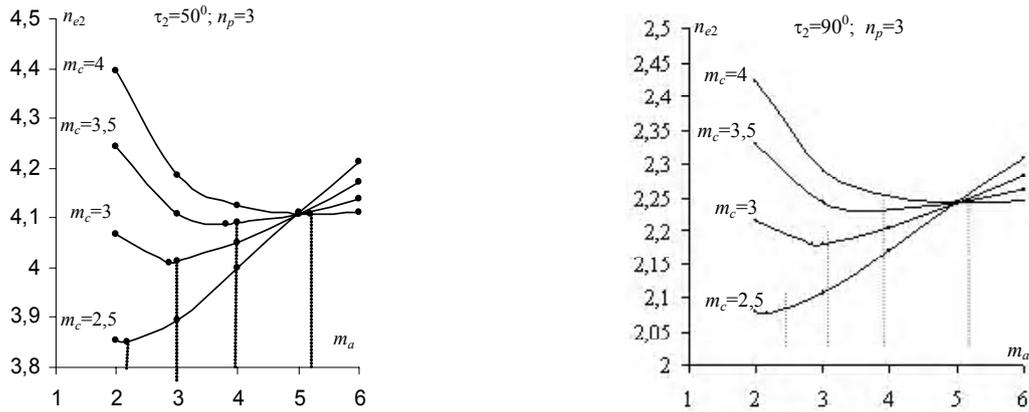


Рис. 3. Функциональные зависимости  $n_{e2}(m_a, m_c)$

Согласно выражениям (4) и (5) МДС ОВ выражается с помощью  $B_c, P_6$  и  $X_{\max}$ :

$$\frac{F_1^2}{F_1} = F_1 = m_1 n_0 n_p \left( l_{cp2} \frac{S_{02}}{S_c} \right) \left( X_{\max} + \frac{n_{e1} c_1}{3n_\lambda} \right), \quad (16)$$

здесь

$$m_1 = \frac{2\sqrt{2} g \gamma_a k_{32}}{k_c B_c n_{02}}$$

Определяется связь:

$$l_2 \frac{S_{02}}{S_c} = \frac{c_2 n_{e2} n_1}{n_{02} m_c^2},$$

если записать его вместо выражения (16), то получим:

$$F_1 = m_1 n_p n_{e2} \frac{c_2 n_1}{m_c^2} \left( X_{\max} + \frac{c_1 n_{e1}}{3n_\lambda} \right).$$

Здесь, кроме размера  $c_1$  и коэффициента  $n_{e1}$  все параметры известны из расчета ЛЭ. Определяется мощность  $P_1$ :

$$P_1 = M_0 \left( \frac{l_{k1} + 4c_1}{n_{e1} c_1^2} \right) \left( X_{\max} + \frac{c_1 n_{e1}}{3n_\lambda} \right)^2 \cdot n_p,$$

здесь  $\Delta'_1 = \Delta_0 + \alpha_{\text{медь}} \cdot \tau_1 = 1,0645 + 0,0043 \cdot \tau_1$

$$M_0 = \left( m_1 n_p n_{e2} \frac{c_2 n_1}{m_c^2} \right)^2 \left( \frac{\rho_{10} \Delta'_1}{k_{31}} \right).$$

Тогда

$$\frac{P_1}{k_u S_{ox1}} = \tau'_{TO} \Delta'_1 \left( \frac{n_p^2 M_{12}}{n_{e1}^2 c_1^3} \right) \left( \frac{n_p^2}{c_1^3 n_{e1}^3} \right) \left( \frac{l_{k1} + 4c_1}{l_{k1} + 8c_1} \right) \cdot \left( X_{\max} + \frac{n_{e1} c_1}{3n_\lambda} \right)^2; \quad (17)$$

$$\tau_2 \cdot S_{ox}^* = 2\tau_2 \left( \frac{c_2}{c_1} \right) \left( \frac{1+n_{e2}}{n_{e1}} \right) \cdot B_0. \quad (18)$$

Записав выражения (17) и (18) вместо (15), получим:

$$\tau_1 = \Delta'_1 \tau'_{TO} \left( \frac{n_p n_{e2}}{n_{e1}} \right)^2 \left( \frac{M_{12}}{c_1^3} \right) \left( \frac{l_{k1} + 4c_1}{l_{k1} + 8c_1} \right) \cdot \left( X_{\max} + \frac{n_{e1} c_1}{3n_\lambda} \right)^2 + 2\tau_2 \left( \frac{c_2}{c_1} \right) \left( \frac{1+n_{e2}}{n_{e1}} \right) \left( \frac{l_{k2} + 4c_2}{l_{k1} + 8c_1} \right), \quad (19)$$

здесь

$$M_{12} = \left( 8\mu_0 g \gamma_a \frac{k_{32}^2}{k_{31}} \right) \left( \frac{c_2 n_1}{n_{02} k_c B_c m_c^2} \right)^2 = 0,45 \left( \frac{c_2 n_1}{n_{02} k_c B_c m_c^2} \right)^2;$$

$$\tau'_{TM} = \frac{g \gamma_a \rho_{10}}{k_T \mu_0} = \frac{9,81 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 1,72 \cdot 10^{-8}}{13 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}} = 2,79^\circ \text{C}.$$

Здесь  $\kappa_{31} = 0,6$ ;  $\kappa_{32} = 1$ .

Анализ выражения (19) показывает, что первая часть правой стороны неравенства по отношению ко второй меньше. Поэтому в предварительных расчетах вместо выражения (19) можно использовать упрощенные формулы:

$$\tau_1 = 2\tau_2 \left( \frac{c_2}{c_1} \right) \left( \frac{1+n_{e2}}{n_{e1}} \right) \cdot \left( \frac{l_{k2} + 4c_2}{l_{k1} + 8c_1} \right); \quad (20)$$

$$n_{e1} = 2 \frac{\tau_2}{\tau_1} (1+n_{e2}) \left( \frac{c_2}{c_1} \right) \cdot \left( \frac{l_{k2} + 4c_2}{l_{k1} + 8c_1} \right). \quad (21)$$

**Пример 2.** Размеры ЛЭ и стержней магнитопровода известны. При температуре перегрева  $\tau_2 = 78^\circ \text{C}$  требуется определение размеров и параметров ОВ. Согласно выражению (19) определяем  $n_{e1} = 3,069$  и  $c_1 = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , здесь  $l_{k1} = 117,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $l_{k2} = 109,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $M_{12} = 109,5 \cdot 10^{-6}$ ,  $n_\lambda = 1,15$ ;  $X_{\max} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $n_{e2} = 3,857$ ;  $\Delta'_1 = 1,392$ ;  $\tau_2 = 50^\circ \text{C}$ . Затем определяем  $h_1 = n_{e1} \cdot c_1 = 3,069 \cdot 14 \cdot 10^{-3} \approx 43 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $S_1 = c_1 h_1 = 601,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Используя упрощенную формулу (21), тогда при  $c_1 = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , получаем  $n_{e1} = 3,2$ .

### ВЫВОДЫ

1. На основе аналитических исследований получены функциональные зависимости  $N_2(m_c)$ ,  $N_3(m_c)$  и  $N(m_c)$  и

$N_1(B_c; n_{02})$  которые позволили определить оптимальные геометрические размеры левитационного экрана и обмотки управления.

2. Функциональная зависимость безразмерного коэффициента  $n_{c2} = h_2/c_2$  от безразмерных коэффициентов  $m_a$  и  $m_c$  для различных значений температуры перегрева  $\tau_2$  имеют минимумы.

3. Получены функциональные зависимости температуры перегрева обмотки управления  $\tau_1$  от температуры перегрева левитационного экрана  $\tau_2$ .

4. Согласно разработанному методу определения оптимальных геометрических размеров выполнены примеры расчета.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Абдуллаев, Я. Р.* Теория и применение многофункциональных линейных индукционных подвесов / Я. Р. Абдуллаев. – Баку: Военное издательство, 1996. – 297 с.

2. *Абдуллаев, Я. Р.* Расчет электромеханических силовых исполнительных преобразователей с левитационными экранами / Я. Р. Абдуллаев, Г. В. Мамедова, Г. С. Керимзаде // *Электричество*. – 2007. – № 3. – С. 27–37.

3. *Abdullayev, Ya. R.* Features of the operated executive mechanism for the light-beam soldering and calculation of its main characteristics / Ya. R. Abdullayev, G. V. Mamedova // *Conference Procelding second International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering (september, 2–6)*. – Tabriz, Iran, 2004. – С. 111–113.

4. *Абдуллаев, Я. Р.* Электромагнитный расчет магнитных систем с подвижными экранами / Я. Р. Абдуллаев // *Электричество*. – 2008. – № 12. – С. 31–40.

*Стаття надійшла до редакції 04.02.2011.  
Після доробки 31.05.2011.*

**Я. Р. Абдуллаев, Г. В. Мамедова, Г. С. Керимзаде**

#### **Оптимальні геометричні відношення для індукційного левітатора електромеханічних перетворювачів**

*На основі аналітичних виразів ампервитків обмотки керування магнітної індукції у сталі магнітопровода і температури перегріву обмотки отримані вирази для геометричних розмірів левітаційного екрана і обмотки керування. Наведені приклади оптимальних геометричних відношень.*

**Ключові слова:** магнітопровід, левітаційні екран, перетворювач, обмотка збудження, ампервитки.

**Ya. R. Abdullayev, G. V. Mamedova, G. S. Kerimzade**

#### **Optimum geometrical parities for the induction levitator of the electromechanical converters**

*On the basis of analytical expressions of ampere-hour management windings, of magnetic induction in a steel magnetic conductor and temperatures of winding overheat, the expressions for the geometrical sizes of the levitation screen and management winding are obtained. Examples of optimum geometrical parities are given.*

**Key words:** magnetic conductor; levitation screen, converter; excitation winding, ampere-hour.

УДК 620.179.14

В. Ф. Безотосный<sup>1</sup>, Э. В. Власенко<sup>1</sup>, В. В. Козлов<sup>1</sup>, О. В. Набокова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

<sup>2</sup>Старший преподаватель Запорожского национального технического университета

## **НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ЧАСТОТНО-БАЛАНСНЫМ МЕТОДОМ НАКЛАДНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

*В работе приведены результаты исследований предложенного частотно-балансного способа неразрушающего контроля свойств материалов, получены аналитические зависимости для расчета частоты баланса. Показано, что применение частотного метода позволяет значительно уменьшить влияние девиации значения намагничивающего тока на точность измерений, способ позволяет применять стандартную цифровую измерительную аппаратуру, а результаты измерений незначительно зависят от значения воздушного зазора между поверхностью детали и полюсами датчика, что дополнительно повышает чувствительность, разрешающую способность и точность контроля электромагнитных свойств материалов.*

**Ключевые слова:** контроль неразрушающий, датчик, метод частотно-балансный.

Среди электромагнитных методов, позволяющих осуществлять неразрушающий контроль многих видов материалов и изделий, наиболее распространенным и перспективным является метод вихревых токов. Он основан на регистрации изменений электромагнитного поля вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Интенсивность и рас-

пределение вихревых токов в объекте зависят от его геометрических, электромагнитных параметров и от взаимного расположения измерительного преобразователя и объекта. По измерениям изменения магнитного потока, вызванного вихревыми токами, можно судить о контролируемых параметрах изделия.