

## МАССО-СТОИМОСТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С АКСИАЛЬНЫМ ШТАМПО- ПРЕССОВАННЫМ И ВИТЫМ МАГНИТОПРОВОДАМИ

*Алексей Садовой*

*Николаевский национальный аграрный университет*

*Ул. Парижской коммуны, 9, г. Николаев, Украина. E-mail: [sadovoy@yandex.ru](mailto:sadovoy@yandex.ru)*

*Aleksey Sadovoy*

*Nikolaev National Agrarian University*

*St. Paris Commune, 9, Nikolaev, Ukraine. E-mail: [sadovoy@yandex.ru](mailto:sadovoy@yandex.ru)*

**Аннотация.** В данной статье получены основные аналитические зависимости в виде целевых функций, необходимых для оптимизации главных размеров и геометрических соотношений активной части трехфазных трансформаторов с аксиальным малоотходным штампо-прессованным или витым «безотходным» разрезным стыковым пространственным магнитопроводом.

Проведено исследование процесса формирования измерительной информации. Для этого: дана характеристика активной зоны, формируемой рабочими (активными) проводниками, на основе решения поля плоского проводника и его анализа определены области формирования измерительной информации, проведены анализ поля полюса по слоям вдоль рабочего проводника и послойный гармонический анализ поля с определением коэффициентов гармоник при различных зазорах и коэффициентах полюсного перекрытия, разработана модель для определения поля, сцепленного с витком сигнальной обмотки по всем гармоникам, проанализирован процесс формирования и определена модель для расчета выходной ЭДС, проведен гармонический анализ выходного сигнала, сформулированы требования к форме сигнальной обмотки, обеспечивающей фильтрацию высших гармоник выходной ЭДС.

**Ключевые слова:** пространственные электромагнитные системы, материалоемкость, обмоточные окна.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Согласно классификации пространственных электромагнитных систем (ПЭМС) современных трехфазных трансформаторов (ТТ) [1-4] они бывают с аксиальным и радиальным направлением магнитных линий. В данной работе рассматривается одна из вариаций аксиальных пространственных магнитных систем. Принципиальная конструкция ПЭМС с аксиальным малоотходным штампо-прессованным или витым «безотходным» разрезным стыковым пространственным магнитопроводом (СПМ) изображена на рис. 1.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Высокие точности можно получить лишь при достаточно больших диаметрах (более 20-30 см), однако объём, занимаемый преобразователем, остается весьма малым из-за сравнительно малого аксиального размера. Это является большим достоинством ПИП, так как позволяет создавать встроенные конструкции преобразователей, когда стабильность рабочих плоскостей обмоток обеспечивается жесткостью конструкции основного изделия. Кроме этого могут быть выполнены совмещенные конструкции, когда обмотки ПИП выполняются непосредственно на взаимно перемещающихся деталях основного изделия.

Несмотря на явные достоинства ПИП с плоскими обмотками, их производство сдерживается недостаточным опытом проектирования, вызванным не только недостатками применяемой технологии, хотя здесь намечается определенный прогресс, но, что особенно важно, неразработанностью целого ряда вопросов теории. Общеизвестно, что доминирующими в основной погрешности индукционного преобразователя являются технологические погрешности, доля которых при неразвитой технологии может составлять до 90% от их общей величины [5]. Но не менее важным является всемерное снижение и методических погрешностей. В этих условиях возникает задача повышения достоверности расчетных соотношений, которые на стадии проектирования, позволяют определять требования и к конструкции и к технологии производства преобразователей.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является сравнительный анализ материалоемкости от геометрических соотношений вариантов ПЭМС с пространственных индукционных преобразователей с аксиальным штампо-прессованным и витым магнитопроводами. При этом указанные системы отличаются как геометрией стержней и катушек.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В СПМ системы (рис. 1) в качестве расчетных принимаются диаметры окружностей, полуразность которых соответствует радиальной высоте стержня. При этом ширина стержня связана с  $D_B$  соотношением:

$$b_c = D_B k_{\alpha 1}, \quad (1)$$

где:  $k_{\alpha 1}$  – коэффициент центрального угла стержня,

$$k_{\alpha 1} = \operatorname{tg}(\alpha_c/2).$$

Радиальная высота стержня определяется согласно [1] соотношением:

$$h_c = (D_H - D_B)/2 = D_B(a_m - 1)/2. \quad (2)$$

Гипотенуза  $oc$  треугольника  $odc$  (1, в) определяется через  $D_B$  посредством соотношения:

$$oc = D_B/[2\cos(\alpha_c/2)]. \quad (3)$$

Ширина обмоточного окна СПМ (рис. 1, а и в) определяется посредством (3):

$$\begin{aligned} b_o &= 2oc \sin(\alpha_o/2) = \\ &= 2oc \sin[(\pi/3) - (\alpha_c/2)] = D_B k_{\alpha 2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где:  $k_{\alpha 2}$  – коэффициент центральных углов стержня и обмоточного окна:

$$k_{\alpha 2} = \sin[(\pi/3) - (\alpha_c/2)]/\cos(\alpha_c/2).$$

Площадь сечения стали стержня СПМ системы (рис. 1) определяется, с учетом (1) и (2):

$$\begin{aligned} \Pi_c &= k_{zc} b_c h_c = k_{zc} k_{\alpha 1} D_B D_B (a_m - 1)/2 = \\ &= k_{zc} k_{\alpha 1} D_B^2 (a_m - 1)/2. \end{aligned} \quad (5)$$

Сторона  $ac$  прямоугольника  $aa'cc'$  (рис. 1, б) может быть определена, с учетом (4):

$$\begin{aligned} b_o/2 &= ac \sin(\pi/3) = ac \sqrt{3}/2; \\ ac &= b_o/\sqrt{3} = k_{\alpha 2} D_B/\sqrt{3}. \end{aligned} \quad (6)$$

Площадь прямоугольника  $aa'c'c$  определяется исходя из (1) и (6):

$$\begin{aligned} \Pi_{aa'c'c} &= b_c ac = D_B k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} D_B/\sqrt{3} = \\ &= k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} D_B^2/\sqrt{3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Площадь треугольной поверхности  $aa'f$  ярма определяется, с учетом (1):

$$\Pi_{aa'f} = b_c^2 \sqrt{3}/4 = \sqrt{3} k_{\alpha 1}^2 D_B^2/4. \quad (8)$$

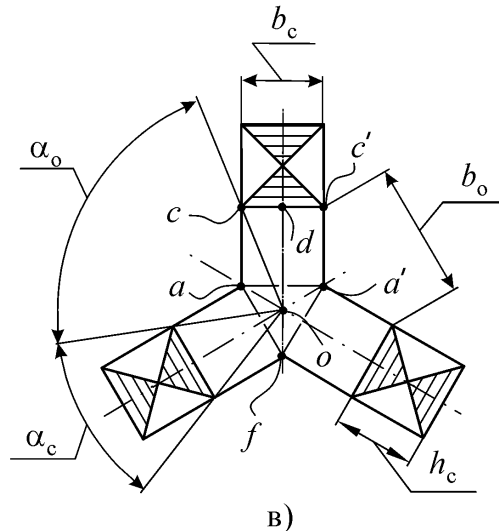
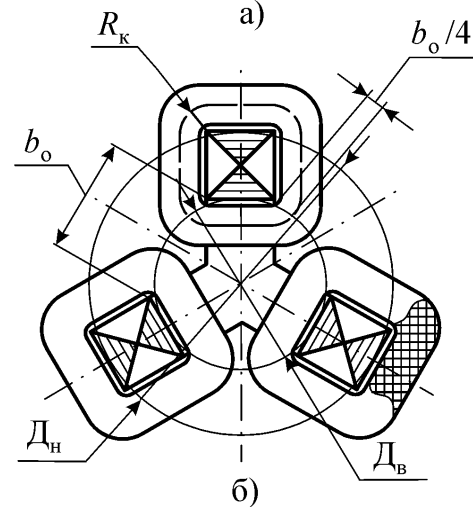
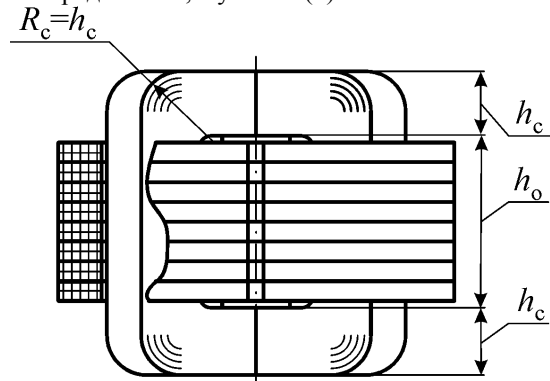
Сторона  $ac$  прямоугольника  $aa'c'c'$  (рис. 1, б) может быть определена, с учетом (4):

$$\begin{aligned} b_o/2 &= ac \sin(\pi/3) = ac \sqrt{3}/2, \\ ac &= b_o/\sqrt{3} = k_{\alpha 2} D_B/\sqrt{3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Площадь прямоугольника  $aa'c'c$  определяется исходя из (1) и (6):

$$\begin{aligned} \ddot{\Pi}_{aa'c'c} &= b_c ac = \ddot{A}_a k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} \ddot{A}_a/\sqrt{3} = \\ &= k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} \ddot{A}_a^2/\sqrt{3}. \end{aligned} \quad (10)$$

Площадь треугольной поверхности  $aa'f$  ярма определяется, с учетом (1):



**Рис. 1.** Схема аксиальной ПЭМС с плоскими пересекающимися образующими плоскостями и соединением стержней по схеме «звезда»:

а – вид сбоку; б – вид сверху в разрезе; в – элементы геометрии магнитопровода  
**Fig. 1.** Schematic axial PEMS flat intersecting planes forming and connection rods on a "Star":  
 а – side view; б – a sectional top view; в – the geometry of the magnetic elements

$$\Pi_{aa'f} = b_c^2 \sqrt{3}/4 = \sqrt{3} k_{\alpha 1}^2 D_B^2/4. \quad (11)$$

Масса СПМ системы (рис. 1) определяется на основе (1), (2), (4), (5), (7) и (8)

$$m_{\text{М}Y_{\text{ап}}} = \gamma_c \left[ \begin{aligned} &3h_o \Pi_c + 3\pi k_{3c} b_c h_c^2 / 2 + \\ &+ 6k_{3c} h_c \Pi_{aa'c'c} + 2k_{3c} h_c \Pi_{aa'f} \end{aligned} \right] =$$

$$= \gamma_c \left[ \begin{aligned} &3\lambda_o D_B k_{\alpha 2} k_{3c} k_{\alpha 1} D_B^2 (a_M - 1) / 2 + \\ &+ 3\pi k_{3c} D_B k_{\alpha 1} D_B^2 (a_M - 1)^2 / 8 + \\ &+ 6k_{3c} D_B (a_M - 1) k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} D_B^2 / (2\sqrt{3}) + \\ &+ 2k_{3c} D_B (a_M - 1) \sqrt{3} k_{\alpha 1}^2 D_B^2 / 8 \end{aligned} \right] =$$

$$= 1,5k_{3c} \gamma_c k_{\alpha 1} D_B^3 (a_M - 1) \times$$

$$\times \left[ \begin{aligned} &k_{\alpha 2} (1,155 + \lambda_o) + \\ &+ 0,7854(a_M - 1) + 0,289k_{\alpha 1} \end{aligned} \right]. \quad (12)$$

Согласно [2-6] для СПМ (рис. 1, в) при подстановке (4) преобразуется:

$$\Pi_c = k_{\text{ид}} / (k_{3o} \lambda_o D_B^2 k_{\alpha 2}^2). \quad (13)$$

Из равенства левых частей (5) и (10) следует

$$k_{3c} k_{\alpha 1} D_B^2 (a_M - 1) / 2 = k_{\text{ид}} / (k_{3o} \lambda_o D_B^2 k_{\alpha 2}^2);$$

$$D_B = \sqrt[4]{2k_{\text{ид}} / [k_{3c} k_{3o} k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 \lambda_o (a_M - 1)]}. \quad (14)$$

На основе (11) выражение массы (9) представляется в виде:

$$m_{\text{М}Y_{\text{ап}}} = 1,5k_{3c} \gamma_c k_{\alpha 1} \times$$

$$\times \left( \sqrt[4]{2k_{\text{ид}} / [k_{3c} k_{3o} k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 \lambda_o (a_M - 1)]} \right)^3 \times$$

$$\times (a_M - 1) \times$$

$$\times \left[ \begin{aligned} &k_{\alpha 2} (1,155 + \lambda_o) + 0,7854(a_M - 1) + \\ &+ 0,289k_{\alpha 1} \end{aligned} \right] = \quad (15)$$

$$= \gamma_{\text{н}} \left( \sqrt[4]{k_{\text{св}} / (k_{\text{сн}} k_{\text{сг}})} \right)^3 k_{\text{н}Y_{\text{ап}}},$$

где:  $k_{\text{М}Y_{\text{ап}}}$  – коэффициент изменения массы СПМ системы (рис. 1):

$$k_{\text{М}Y_{\text{ап}}} = 1,5k_{3c} k_{\alpha 1} \left( \sqrt[4]{2 / [k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 \lambda_o (a_M - 1)]} \right)^3 \times$$

$$\times (a_M - 1) \left[ \begin{aligned} &k_{\alpha 2} (\lambda_o + 1,155) + 0,7854 \times \\ &\times (a_M - 1) + 0,289k_{\alpha 1} \end{aligned} \right]. \quad (16)$$

Функциональные зависимости (13) при  $\alpha_{\text{н}} = 60^\circ$  представлены на рис. 2.

Средняя длина витка катушки ПЭМС (рис. 1, а и б) определяется с учетом (1), (2) и (4):

$$l_{wY_{\text{ап}}} = 2k_w (b_c + h_c + \pi b_o / 4) =$$

$$= 2 \left[ \begin{aligned} &D_B k_{\alpha 1} + D_B (a_M - 1) / 2 + \\ &+ \pi D_B k_{\alpha 2} / 4 \end{aligned} \right] = \quad (17)$$

$$= k_w D_B (2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1)$$

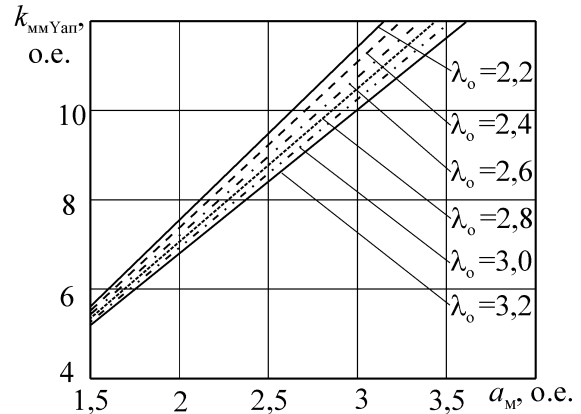
На основе (4) и (14), а также общего выражения из [3-8,10], масса АМО обмотки ПЭМС (рис. 1) определяется:

$$m_{oY_{\text{ап}}} = 1,5k_w \gamma_o k_{3o} \lambda_o D_B \times$$

$$\times \left( \begin{aligned} &2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + \\ &+ a_M - 1 \end{aligned} \right) k_{\alpha 2}^2 D_B^2 =$$

$$= 1,5k_w \gamma_o k_{3o} \lambda_o k_{\alpha 2}^2 D_B^3 \times$$

$$\times \left( 2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1 \right). \quad (18)$$



**Рис. 2.** Зависимости коэффициента массы аксиального СПМ с прямоугольным сечением и соединением стержней по схеме «звезда» от геометрических управляемых переменных  $\lambda_i$  и  $\dot{a}_i$

**Fig. 2.** Dependence of the mass ratio of the axial SMP with a rectangular cross section and connecting rods according to the "star" of the geometric variables  $\lambda_i$  and  $\dot{a}_i$  controlled

На основе (11) выражение (19) преобразуется к виду:

$$m_{oY_{\text{ап}}} = 1,5k_w \gamma_o k_{3o} \lambda_o k_{\alpha 2}^2 \times$$

$$\times \left( \sqrt[4]{2k_{\text{ид}} / [k_{3c} k_{3o} k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 \lambda_o (a_M - 1)]} \right)^3 \times$$

$$\times (2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1) =$$

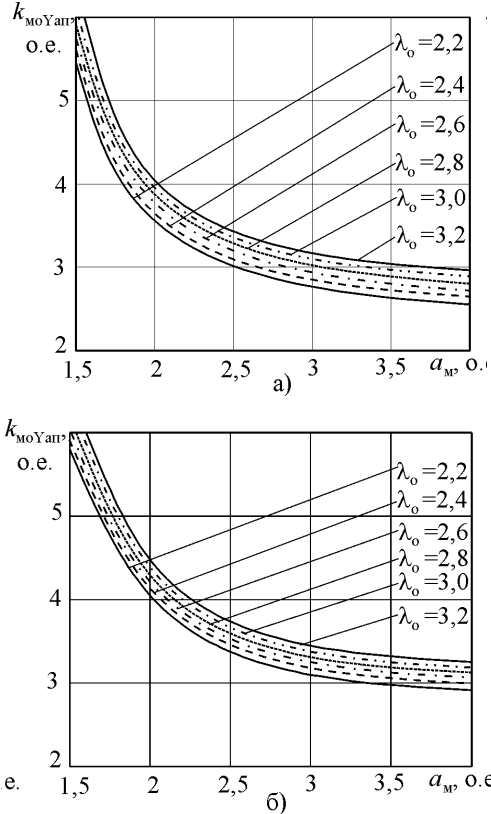
$$= \gamma_o \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}} / (k_{3c} k_{3o})} \right)^3 k_{\text{М}oY_{\text{ап}}}, \quad (20)$$

где:  $k_{\text{М}oY_{\text{ап}}}$  – коэффициент изменения массы обмотки ПЭМС (рис. 1):

$$k_{\text{моYап}} = 1,5k_w k_{30} \lambda_o k_{\alpha 2}^2 \times \left( \sqrt[4]{2 / [k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 \lambda_o (a_M - 1)]} \right)^3 \times (2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1) \quad (21)$$

Функциональные зависимости (20) при  $k_{30} = 0,34$ ,  $\alpha_c = 60^\circ$  и двух значениях  $k_w$  представлены на рис. 3.

Масса активных материалов ТТ с ПЭМС (рис. 1) определяется на основе (12), (13) и (16), (17) функциональной зависимостью :



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента массы обмотки от геометрических управляемых переменных  $\lambda_o$  и  $a_M$  при значениях коэффициента средней длины витка  $k_w = 1,0$  (а) и  $k_w = 1,1$  (б)

**Fig. 3.** The dependence of the coefficients of the weight of the winding geometry controlled variables and values of the coefficient of the mean coil  $k_w = 1,0$  (a) and  $k_w = 1,1$  (b)

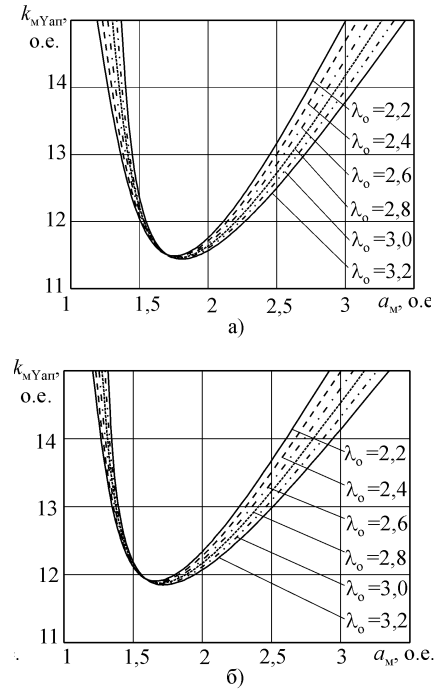
$$m_{\text{Yап}} = m_{\text{мYап}} + m_{\text{оYап}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}} / (k_{3c} k_{30})} \right)^3 k_{\text{ммYап}} + \gamma_o \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}} / (k_{3c} k_{30})} \right)^3 k_{\text{моYап}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}} / (k_{3c} k_{30})} \right)^3 k_{\text{мYап}} \quad (22)$$

где :  $k_{\text{мYап}}$  – коэффициент изменения массы активных материалов ПЭМС (рис. 1) :

$$k_{\text{мYап}} = k_{\text{ммYап}} + \gamma_o k_{\text{моYап}} / \gamma_c = 1,5 \left( \sqrt[4]{2 / [k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 \lambda_o (a_M - 1)]} \right)^3 \times$$

$$\times \left\{ k_{3c} k_{\alpha 1} (a_M - 1) \left[ k_{\alpha 2} (\lambda_o + 1,155) + 0,7854(a_M - 1) + 0,289k_{\alpha 1} \right] + k_{30} k_w k_{\alpha 2}^2 \lambda_o \left( \frac{2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1}{\gamma_o / \gamma_c} \right) \right\} \quad (23)$$

Функциональные зависимости (23) представлены на рис. 4 при двух значениях  $k_w$  и  $k_{30} = 0,34$ , а также значении  $\alpha_c = 60^\circ$ , соответствующем минимуму ЦФ  $m_{\text{Yап}}$  (получено на основе расчета значений функций  $k_{\text{мYап}} = f(\lambda_o, a_M)$  при фиксированных  $\alpha_c$  в диапазоне изменения  $\alpha_c = 30 \dots 90^\circ$ ).



**Рис. 4.** Зависимости коэффициента массы активной части от геометрических управляемых переменных  $\lambda_o$  и  $a_M$  при значениях коэффициента средней длины витка  $k_w = 1,0$  (а) и  $k_w = 1,1$  (б)

**Fig. 4.** Dependence of the mass ratio of the active part of the geometric controlled variables and values of the coefficient of the mean coil  $k_w = 1,0$  (a) and  $k_w = 1,1$  (b)

Стоимость активных материалов ТТ с ПЭМС определяется на основе (18) и (23) :

$$C_{\text{Yап}} = C_c m_{\text{мYап}} + C_o m_{\text{оYап}} = C_c \gamma_c \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}} / (k_{3c} k_{30})} \right)^3 k_{\text{сYап}} \quad (24)$$

$k_{\text{сYап}}$  – коэффициент изменения стоимости активных материалов :

$$k_{cY_{ап}} = k_{MMY_{ап}} + C_o \gamma_o k_{MoY_{ап}} / (C_c \gamma_c). \quad (25)$$

С учетом (17), (4), функциональная зависимость (21) преобразуется к виду :

$$k_{cY_{ап}} = 1,5 \left( \sqrt[4]{2 / [k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 \lambda_o (a_M - 1)]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ k_{3c} k_{\alpha 1} (a_M - 1) \left[ k_{\alpha 2} (\lambda_o + 1,155) + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,7854(a_M - 1) + 0,289 k_{\alpha 1} \right] + \right. \\ \left. + 3 k_{3o} k_w k_{\alpha 2}^2 \lambda_o \left( \frac{2 k_{\alpha 1} + 1,571 k_{\alpha 2}}{a_M - 1} \right) \right\}. \quad (26)$$

Функциональные зависимости (24) для медной обмотки представлены на рис. 5, а также при  $k_{3o} = 0,34$ , двух значениях  $k_w$  и значении  $\alpha_n = 60^\circ$ , которое соответствует минимуму ЦФ  $\tilde{N}_{Y_{ап}}$  (получено на основе расчета значений функций  $k_{cY_{ап}} = f(\lambda_o, a_M)$  при фиксированных  $\alpha_n$  в диапазоне изменения  $\alpha_c = 30 \dots 90^\circ$ ).

Объем стержней СПМ (рис. 1) определяется согласно [11-14] и учетом (4) и (5) :

$$V_{cY_{ап}} = 3 h_o \Pi_c / k_{3c} = \\ = 3 \lambda_o b_o \Pi_c = \\ = 3 \lambda_o D_B k_{\alpha 2} k_{\alpha 1} D_B^2 (a_M - 1) / 2 = \\ = 1,5 \lambda_o k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} D_B^3 (a_M - 1). \quad (27)$$

Объем «прямых» участков ярем СПМ (рис. 1, б) определяется посредством (2), (7) и (8) на основании (рис. 1, в) :

$$V_{яY_{ап}} = h_c (6 \Pi_{aa'c'c} + 2 \Pi_{aa'f}) = \\ = D_B (a_M - 1) \left( \frac{6 k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} D_B^2 / \sqrt{3} +}{+ 2 \sqrt{3} k_{\alpha 1}^2 D_B^2 / 4} \right) / 2 = \\ = \sqrt{3} k_{\alpha 1} D_B^3 (a_M - 1) (0,25 k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2}). \quad (28)$$

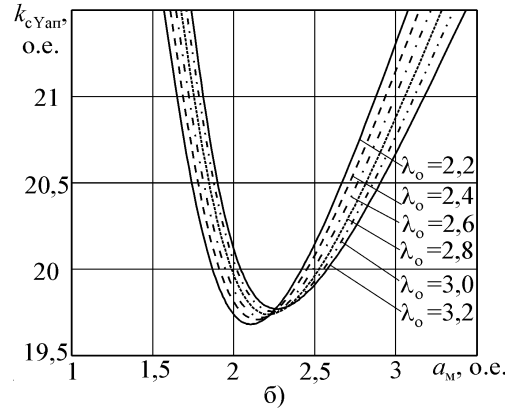
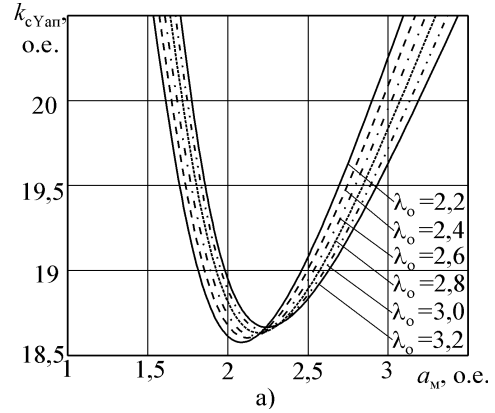
Объем «угловых» участков СПМ (рис. 1, б) определяется с использованием (1) и (2) :

$$V_{yY_{ап}} = 6 b_c \pi h_c^2 / 4 = \\ = 6 k_{\alpha 1} D_B \pi D_B^2 (a_M - 1)^2 / 16 = \\ = 1,178 k_{\alpha 1} (a_M - 1)^2 D_B^3. \quad (29)$$

При подстановке (27), (28) и (29), выражение ПХХ [1] принимает вид :

$$P_{XXY_{ап}} = k_{дх} k_{3c} \gamma_c P_{ум} B_c^2 \times \\ \times \left[ 1,5 \lambda_o k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} D_B^3 (a_M - 1) + \right. \\ \left. + \sqrt{3} k_{\alpha 1} D_B^3 (a_M - 1) (0,25 k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2}) + \right. \\ \left. + 1,178 k_{\alpha 1} (a_M - 1)^2 D_B^3 \right] =$$

$$= 1,5 k_{дх} k_{3c} \gamma_c P_{ум} B_c^2 k_{\alpha 1} D_B^3 (a_M - 1) \times \\ \times \left[ k_{\alpha 2} \lambda_o + 1,155 (0,25 k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2}) + \right. \\ \left. + 0,785 (a_M - 1) \right]. \quad (30)$$



**Рис. 5.** Зависимости коэффициента стоимости активной части от геометрических управляемых переменных  $\lambda_o$  и  $a_M$  при значениях коэффициента средней длины витка  $k_w = 1,0$  (а) и  $k_w = 1,1$  (б)

**Fig. 5.** The dependence of the coefficient value of the active part of the geometrical variables controlled  $\lambda_o$  and  $a_M$  at the mean values of the coefficient turns  $k_w = 1,0$  (a) and  $k_w = 1,1$  (b)

На основе (11) выражение ПХХ преобразуется :

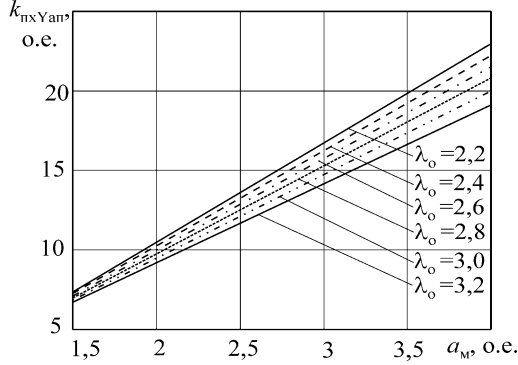
$$P_{XXY_{ап}} = 1,5 k_{дх} k_{3c} \gamma_c P_{ум} B_c^2 k_{\alpha 1} \times \\ \times \left( \sqrt[4]{2 k_{ид} / [k_{3c} k_{3o} k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 \lambda_o (a_M - 1)]} \right)^3 \times \\ \times (a_M - 1) \left[ k_{\alpha 2} \lambda_o + 1,155 (0,25 k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2}) + \right. \\ \left. + 0,785 (a_M - 1) \right], \quad (31) \\ = \left( \sqrt[4]{k_{ид} / k_{3c} k_{3o}} \right)^3 k_{дх} \gamma_c P_{ум} B_c^2 k_{XXY_{ап}}$$

где :  $k_{XXY_{ап}}$  – коэффициент изменения ПХХ ПЭМС (рис. 1),

$$k_{\text{пкYап}} = 1,5k_{\text{зс}}k_{\alpha 1} \left( \sqrt[4]{2/[k_{\alpha 1}k_{\alpha 2}^2\lambda_o(a_M - 1)]} \right)^3 \times$$

$$\times (a_M - 1) \left[ \begin{array}{l} k_{\alpha 2}\lambda_o + \\ + 1,155(0,25k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2}) + \\ + 0,785(a_M - 1) \end{array} \right]. \quad (32)$$

Функциональные зависимости (28) при  $\alpha_{\text{н}} = 80^\circ$  представлены на рис. 6.



**Рис. 6.** Зависимости коэффициента потерь холостого хода от геометрических управляемых переменных  $\lambda_o$  и  $a_M$

**Fig. 6.** Dependence of loss factor of idling on the geometry of controlled variables and  $\lambda_o$  and  $a_M$

При подстановке (4) и (14) общее выражение ПКЗ принимает вид:

$$P_{\text{кзYап}} = 1,5k_{\text{дк}}\gamma_o P_{\text{yo}}k_{\text{зо}}J_o^2\lambda_o D_{\text{в}} \times$$

$$\times (2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1) D_{\text{в}}^2 k_{\alpha 2}^2 =$$

$$= 1,5k_{\text{дк}}\gamma_o P_{\text{yo}}J_o^2k_{\text{зо}}\lambda_o D_{\text{в}}^3 k_{\alpha 2}^2 \times$$

$$\times (2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1). \quad (33)$$

На основе (11) выражение ПКЗ (29) преобразуется:

$$P_{\text{кзYап}} = 1,5k_{\text{дк}}\gamma_o P_{\text{yo}}J_o^2k_wk_{\text{зо}} \times$$

$$\times \left( \sqrt[4]{2k_{\text{ид}}/[k_{\text{зс}}k_{\text{зо}}k_{\alpha 1}k_{\alpha 2}^2\lambda_o(a_M - 1)]} \right)^3 \times$$

$$\times k_{\alpha 2}^2(2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1) =$$

$$= \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}}/(k_{\text{зс}}k_{\text{зо}})} \right)^3 k_{\text{дк}}\gamma_o P_{\text{yo}}J_o^2k_{\text{пкYап}} \quad (34)$$

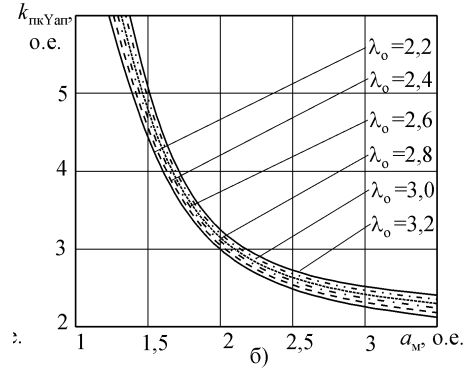
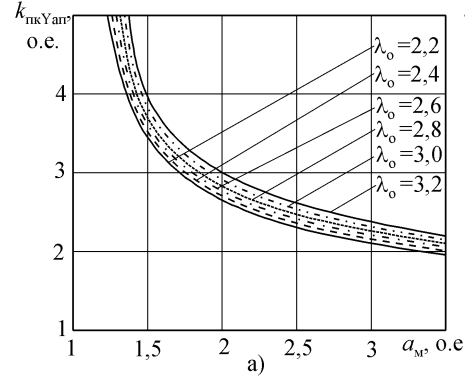
где:  $k_{\text{пкYап}}$  – коэффициент изменения ПКЗ ПЭМС (рис. 1):

$$k_{\text{пкYап}} = 1,5k_{\text{зо}}k_wk_{\alpha 2}^2 \times$$

$$\times \left( \sqrt[4]{2/[k_{\alpha 1}k_{\alpha 2}^2\lambda_o(a_M - 1)]} \right)^3 \times$$

$$\times \lambda_o(2k_{\alpha 1} + 1,571k_{\alpha 2} + a_M - 1) \quad (35)$$

Функциональные зависимости (31) при  $k_{\text{зо}} = 0,34$ ,  $\alpha_c = 80^\circ$  и двух значениях  $k_w$  представлены на рис. 7.



**Рис. 7.** Зависимости коэффициента потерь короткого замыкания от геометрических управляемых переменных  $\lambda_o$  и  $a_M$  при значениях коэффициента средней длины витка  $k_w = 1,0$  (а) и  $k_w = 1,1$  (б)

**Fig. 7.** Dependence of loss factor of short circuit on the geometry of controlled variables  $\lambda_o$  and  $a_M$  values of the coefficient of the mean coil  $k_w = 1,0$  (а) and  $k_w = 1,1$  (б)

Суммарные основные потери ТТ с ПЭМС (рис. 1) определяются на основе (27), (28) и (30), (31) выражением:

$$P_{\Sigma Yап} = P_{\text{ххYап}} + P_{\text{кзYап}} =$$

$$= \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}}/(k_{\text{зс}}k_{\text{зо}})} \right)^3 k_{\text{дк}}\gamma_c P_{\text{ум}} B_c^2 k_{\text{пкYап}} +$$

$$+ \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}}/(k_{\text{зс}}k_{\text{зо}})} \right)^3 k_{\text{дк}}\gamma_o P_{\text{yo}}J_o^2 k_{\text{пкYап}} =$$

$$= k_{\text{дк}}\gamma_c P_{\text{ум}} B_c^2 \left( \sqrt[4]{k_{\text{ид}}/(k_{\text{зс}}k_{\text{зо}})} \right)^3 k_{\text{пкYап}} \quad (36)$$

где:  $k_{\text{пкYап}}$  – коэффициент изменения основных потерь ТТ с ПЭМС (рис. 1), определяется согласно [3]

$$k_{\text{пкYап}} = k_{\text{пкYап}} +$$

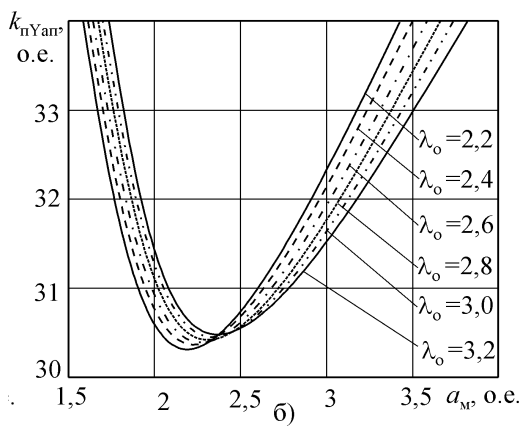
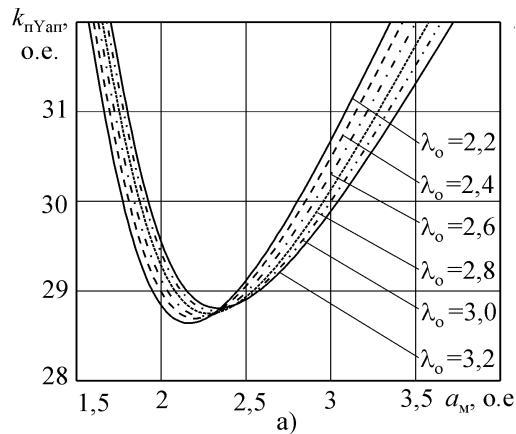
$$+ k_{\text{дк}}\gamma_o P_{\text{yo}}J_o^2 k_{\text{пкYап}} / (k_{\text{дк}}\gamma_c P_{\text{ум}} B_c^2) =$$

$$= 1,5k_{\text{зо}}k_{\alpha 1} \left( \sqrt[4]{2/[k_{\alpha 1}k_{\alpha 2}^2\lambda_o(a_M - 1)]} \right)^3 \times$$

$$\times (a_M - 1) [k_{\alpha 2}\lambda_o + 1,155(0,25k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2}) +$$

$$\begin{aligned}
 & + 0,785(\dot{a}_1 - 1)] + 1,5k_{\text{сг}} k_w k_{\alpha_2}^2 \times \\
 & \times \left( \sqrt[4]{2/[k_{\alpha_1} k_{\alpha_2}^2 \lambda_o (a_1 - 1)]} \right)^3 \times \\
 & \times \lambda_o (2k_{\alpha_1} + 1,571k_{\alpha_2} + \dot{a}_1 - 1) k_{\text{сг}} k_{\text{yii}}^2 = \\
 & = 1,5 \left( \sqrt[4]{2/[k_{\alpha_1} k_{\alpha_2}^2 \lambda_o (a_1 - 1)]} \right)^3 \times \\
 & \left\{ k_{\text{сг}} k_{\alpha_1} (\dot{a}_1 - 1) \left[ k_{\alpha_2} \lambda_i + \right. \right. \\
 & \left. \left. + 1,155(0,25k_{\alpha_1} + k_{\alpha_2}) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + 0,785(\dot{a}_1 - 1) \right] + k_{\text{сг}} k_w k_{\alpha_2}^2 \lambda_o \times \right. \\
 & \left. \times (2k_{\alpha_1} + 1,571k_{\alpha_2} + \dot{a}_1 - 1) k_{\text{сг}} k_{\text{yii}}^2 \right\}. \quad (37)
 \end{aligned}$$

Функциональные зависимости (33), представленные для двух значений  $k_w$  медной обмотки на рис. 8. Они рассчитаны при  $k_{\text{зо}} = 0,34$  и значениях  $k_{\text{км}}$  и  $k_{\text{эмн}}$  [4-10], а также при значении  $\alpha_c = 80^\circ$ , соответствующем минимуму ЦФ  $P_{\Sigma \text{Yan}}$  (получено в диапазоне изменения  $\alpha_c = 30 \dots 90^\circ$ ).



**Рис. 8.** Зависимости коэффициента основных потерь от геометрических управляемых переменных  $\lambda_o$  и  $a_m$  при значениях коэффициента средней длины витка  $k_w = 1,0$  (а) и  $k_w = 1,1$  (б)

**Fig. 8.** The dependence of the coefficient of basic losses on the geometric variables controlled  $\lambda_o$  and  $a_m$  and at the mean values of the coefficient turns  $k_w = 1,0$  (a) and  $k_w = 1,1$  (b)

Из зависимостей (13), (17), (19), а также (22), (28), (31) и (4.8) следует, что закономерности

изменения функций материалоемкости, потерь и ЦФ позволяют выполнять оптимизацию трансформатора с ПЭМС (рис. 1) по критериям минимума массы и минимуму стоимости активной части.

### ВЫВОДЫ

1. Из полученных аналитических зависимостей (45)–(47) следует, что с увеличением контурного угла  $\alpha_c = 20 \dots 60^\circ$  массы ПЭМС (рис. 1, а и б) снижаются, а масса ПЭМС (рис. 1, в) с увеличением угла  $\alpha_c = 20 \dots 60^\circ$  возрастает.

2. Наилучшие технико-экономические показатели обеспечивает ПЭМС (рис. 1, в) с минимальной массой, технологической материалоемкостью и габаритными размерами.

3. Полученные аналитические зависимости являются исходными для разработки методик расчетов и могут быть использованы для оптимизации симметричных ПЭМС по частным и обобщенным критериям.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Иванов-Смоленский А.В. 2001.** Перспективы развития электромеханики в XXI веке. / А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина и др. // Электропанорама. № 1. 14 – 15.
2. **Орлов Е.Г. 1990.** Главная задача отраслевой науки – эффективность производства и энергосбережение // Электротехника. №1. 4 – 6.
3. **Тихомиров П.М. 1986.** Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 528.
4. **Плахтырь О.О. 2002.** Варианты конструкций и классификация пространственных магнитопроводов трехфазных трансформаторов и реакторов // Электротехника і Електромеханіка. № 3. 64-65. (Украина).
5. **Пентегов И.В. 2002.** Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами. / Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. и др. - Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. Харьков: НТУ "ХПИ". № 14. 86- 97. (Украина).
6. **Плахтырь О.О. 2004.** Совершенствование трехфазных трансформаторов с пространственными магнитопроводами: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01/ Одесский нац. политехн. ун-т. Одесса. 24. (Украина).
7. **Ставинский А.А., Плахтырь О.О. 2003.** Сравнительный анализ материалоемкости вариантов трехфазных пространственных электромагнитных систем // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета: Научные труды КГПУ. Кременчуг: КДПУ. 2003. Вып. 2 (19), том 1. 53–56. (Украина).
8. **Плахтырь О.О. 2011.** Усовершенствование регулируемых статических индукционных устройств для электрических систем и

- преобразовательной техники // MOTROL. Lublin. Volume 13A. 81–86.
9. **Плахтырь О.О. 2011.** Определение тока холостого хода измерительных трансформаторов с витыми магнитопроводами // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Перспективная техника и технологии – 2011». 206–209. (Украина).
  10. **Плахтырь О.О. 2010.** Математическая модель аксиальной пространственной электромагнитной системы трехфазного трансформатора с цилиндрическими образующими поверхностями стержней магнитопровода // MOTROL. Lublin. Volume 12A. 15–24.
  11. **Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Плахтырь О.О. 2002.** Геометрические соотношения и массо-стоимостные показатели трехфазных пространственных трансформаторов малой мощности // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета: Научные труды КГПУ. Кременчуг: КДПУ. 2002. Вып. 1 (12). С. 181–183. (Украина).
  12. **Плахтырь О.О. 2009.** Усовершенствование трехфазных статических индукционных устройств на основе нетрадиционных конструкторско-технологических решений производства пространственных магнитопроводов // MOTROL. Nikolaev: MDAU. Vol. 10B. 58–63.
  13. **Садовой О.С. 2014.** Варианты структур и конструктивные особенности однофазных статических индукционных устройств // MOTROL. Nikolaev: MNAU. Vol. 16B. 231–235.
  14. **Plakhtyr O.O. 2014.** Increase of limited power and structural optimization of static induction devices with spatial magnetic cores MOTROL. Lublin. Volume 16A. 285–289.
  15. **Бычатын Д.А., Вильнер Г.А. 1981.** Индукционные преобразователи информации. Л.: Энергоиздат. 188.
  16. **Вольдек А.И. 1974.** Электрические машины. Л.: Энергия. 199.
  17. **Гитис Э.И., Пискулов Е.А. 1981.** Аналого-цифровые преобразователи. М.: Энергоиздат. 231.
  18. **Говорков В.А. 1960.** Электрические и магнитные поля. М.-Л.: Госэнергоиздат. 187.
  19. **Демирчян К.С., Чечулин В.Л. 1986.** Машинные расчеты электромагнитных полей. М.: Высшая школа. 102.
  20. **Домбровский В.В. 1983.** Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. М.: Энергоатомиздат. 111.
  21. **Домрачев В.Г., Матвеевский В.Р., Смирнов Ю.С. 1987.** Схемотехника цифровых преобразователей перемещений. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат. 145.

#### MASS VALUE ON THE SPATIAL INDUCTION CONVERTER WITH AXIALLY STAMP-PRESSED AND TWISTED MAGNETIC CIRCUITS

**Summary.** In this article, the basic analytical relationships obtained in the form of target functions

needed to optimize the main dimensions and geometric relationships of the active part of the three-phase transformers with axial low-waste stamp-pressed or twisted "waste-free" split butt spatial magnetic circuit.

A study of the formation of the measurement information. To do this: given the characteristics of the core formed by the workers (active) conductors, based on the solution of the field of the flat conductor and analysis identified the area of formation of the measuring data, the analysis of field pole in layers along the working conductor and layered harmonic analysis of the field to determine the coefficients of harmonics with different gaps and ratios pole overlap, developed a model to determine the field, coupled with the revolution of signal wiring of all harmonics to analyze the process of formation and determined the model to calculate the output EMF held a harmonic analysis of the output signal, the requirements to the form of signal wiring, which provides filtering of higher harmonics output EMF.

**Key words:** spatial electromagnetic systems, material consumption, winding windows.