

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ВІСНИК**  
**АГРАРНОЇ НАУКИ ПРИЧОРНОМОР'Я**  
Науковий журнал

*Виходить 4 рази на рік  
Видається з березня 1997 р.*

**Випуск 4 (92) 2016**

**Економічні науки**  
**Сільськогосподарські науки**  
**Технічні науки**

Миколаїв  
2016

**Засновник і видавець:** Миколаївський національний аграрний університет.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №19669-9469ПР від 11.01.2013 р.

Збірник включено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказами Міністерства освіти і науки України від 13.07.2015 р. №747 та від 16.05.2016 р. №515.

**Головний редактор:** В.С. Шебанін, д.т.н., проф., чл.-кор. НААН

**Заступники головного редактора:**

І.І. Червен, д.е.н, проф.

І.П. Атаманюк, д.т.н., доц.

В.П. Клочан, к.е.н., доц.

М.І. Гиль, д.с.-г.н., проф.

В.В. Гамаюнова, д.с.-г.н., проф.

**Відповідальний секретар:** Н.В. Потриваєва, д.е.н., проф.

**Члени редакційної колегії:**

**Економічні науки:** О.В. Шебаніна, д.е.н., проф.; Н.М. Сіренко, д.е.н., проф.; О.І. Котикова, д.е.н., проф.; Джулія Олбрайт, PhD, проф. (США); І.В. Гончаренко, д.е.н., проф.; О.М. Вишнеvsька, д.е.н., проф.; А.В. Ключник, д.е.н., проф.; О.Є. Новіков, д.е.н., доц.; О.Д. Гудзинський, д.е.н., проф.; О.Ю. Єрмаков, д.е.н., проф.; В.М. Яценко, д.е.н., проф.; М.П. Сахацький, д.е.н., проф.; Р. Шаундерер, Dr.sc.Agr. (Німеччина)

**Технічні науки:** Б.І. Бутаков, д.т.н., проф.; В.І. Гавриш, д.е.н., проф.; В.Д. Будаков, д.т.н., проф.; С.І. Пастушенко, д.т.н., проф.; А.А. Ставинський, д.т.н., проф.; А.С. Добишев, д.т.н., проф. (Республіка Білорусь).

**Сільськогосподарські науки:** В.С. Топіха, д.с.-г.н., проф.; Т.В. Підпала, д.с.-г.н., проф.; А.С. Патрєва, д.с.-г.н., проф.; В.П. Рибалко, д.с.-г.н., проф., академік НААН; І.Ю. Горбатенко, д.б.н., проф.; І.М. Рожков, д.б.н., проф.; І.П. Шейко, д.с.-г.н., професор, академік НАН Республіки Білорусь (Республіка Білорусь); С.Г. Чорний, д.с.-г.н., проф.; М.О. Самойленко, д.с.-г.н., проф.; Л.К. Антипова, д.с.-г.н., проф.; В.І. Січкарь, д.б.н., проф.; А.О. Лимар, д.с.-г.н., проф.; В.Я. Щербаков, д.с.-г.н., проф.; Г.П. Морару, д.с.-г.н. (Молдова)

Рекомендовано до друку вченою радою Миколаївського національного аграрного університету. Протокол № 11 від 29.11.2016 р.

Посилання на видання обов'язкові.

Точка зору редколегії не завжди збігається з позицією авторів.

**Адреса редакції, видавця та виготовлювача:**

**54020, Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9,**

**Миколаївський національний аграрний університет,**

**тел. 0 (512) 58-05-95, <http://visnyk.mnau.edu.ua>, e-mail: [visnyk@mnau.edu.ua](mailto:visnyk@mnau.edu.ua)**

© Миколаївський національний аграрний університет, 2016

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАССОСТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ И ШЕСТИГРАННЫМИ СЕЧЕНИЯМИ СТЕРЖНЕЙ СТЕРЖНЕВОГО ВИТОГО МАГНИТОПРОВОДА**

**О. С. Садовой**, соискатель

*Николаевский национальный аграрный университет*

*Составлены математические модели сравнительного анализа массостоймых показателей однофазных трансформаторов с четырёх и шестиугольными образующими контурами на основании принципа электромагнитной эквивалентности.*

**Ключевые слова:** *магнитопровод, однофазный трансформатор, массостоймый показатель, управляемые геометрические переменные.*

**Введение.** В настоящее время однофазные трансформаторы и реакторы широко применяются в различных областях электротехники и являются одними из основных металлоёмких элементов электротехнических комплексов. Поэтому к ним выдвигаются требования снижения материалоёмкости и потерь. При этом усовершенствование таких индукционных статических устройств (ИСУ) приводит к повышению технического уровня комплексов в целом.

**Анализ предыдущих исследований.** Одной из распространённых конструкций электромагнитных систем (ЭМС) однофазных ИСУ является стержневая планарная с витыми или шихтованными магнитопроводами [1-3]. Особенностью магнитопроводов ИСУ малой мощности (рис. 1) является прямоугольное сечение стержней, что снижает прочность изоляции, в связи с изгибом витков катушек на  $90^\circ$  в угловых зонах, а также увеличивает материалоёмкость обмоток.

Из [4] известна конструкция (рис. 2), которая выполняется навивкой из ленты электротехнической стали (ЭТС) изменяющейся ширины элементов трапециевидного сечения совмещением указанных элементов с формированием шестиугольного сечения стержней. При этом создаётся возможность

повышения надёжности за счет увеличения угла изгиба витков с  $90^\circ$  до  $120^\circ$ , а также снижения материалоёмкости обмоток уменьшением средней длины витков при изменении прямоугольного сечения стержня на шестигранное с эквивалентной площадью.

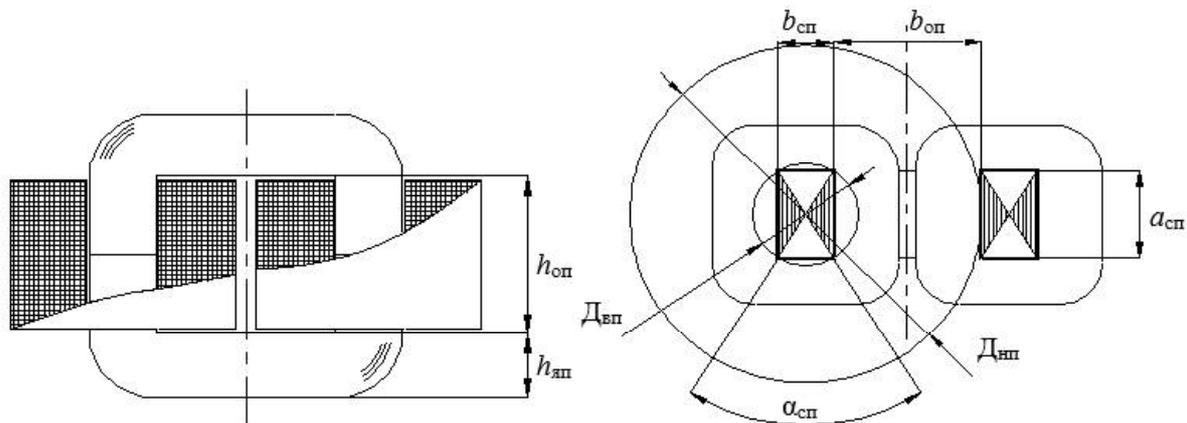


Рис.1. Конструкция планарной витой электромагнитной системы индукционного статического устройства с четырехгранным образующим контуром

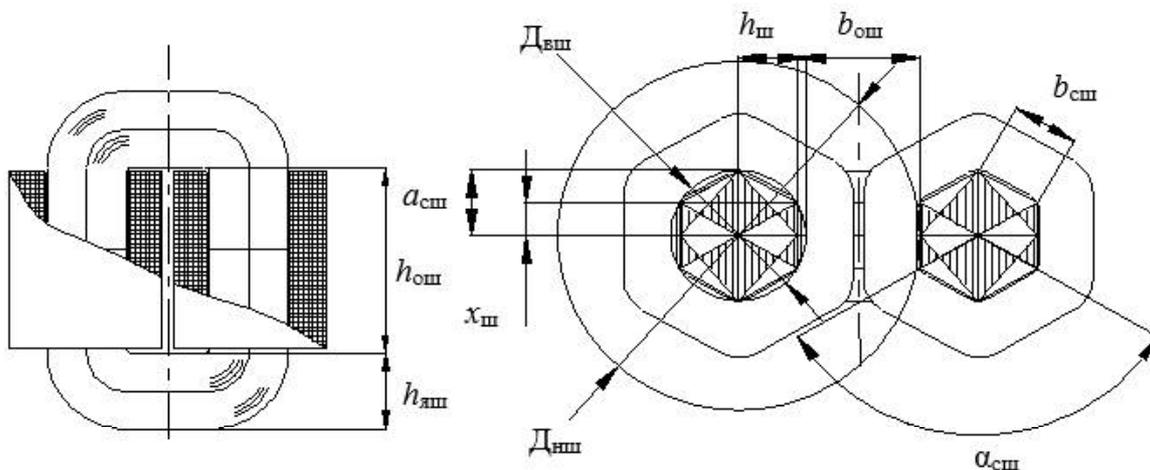


Рис. 2. Конструкция планарной витой электромагнитной системы индукционного статического устройства с шестигранным образующим контуром

**Цель работы.** Определение и сравнительный анализ массостоймых показателей вариантов планарной однофазной ЭМС с прямоугольными и шестигранными сечениями стержней витого стержневого магнитопровода.

**Метод сравнительного анализа электромагнитных систем.** Для сопоставления двух конструкций однофазных ИСУ необходимо выполнить их оптимизационный

сравнительный анализ на основе принципа электромагнитной эквивалентности. Для решения задачи используется метод оптимизации [5, 6] с использованием целевых функций, содержащих безразмерные показатели технического уровня (ПТУ) и относительные геометрические управляемые переменные.

$$F_{цфi} = K_{цi} \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_i^*, \quad (1)$$

где  $\Pi_{ид}$  – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок;

$K_{цi}$  – составляющая удельных характеристик используемых материалов;

$\Pi_i^*$  – оптимизационная относительная составляющая целевой функции в виде коэффициентов массы  $\Pi_{ма}$ , стоимости  $\Pi_{са}$ , а также потерь  $\Pi_{па}$  активной мощности.

Экстремумы  $\Pi_i^*$  относительных составляющих целевой функции (1) является ПТУ ИСУ. Каждая из составляющих  $\Pi_i^*$  является функцией коэффициента заполнения обмоточного окна токопроводящим материалом обмотки (класса напряжения)  $K_{зо}$  и трех универсальных идентичных и приемлемых для любых из существующих и возможных вариантов ЭМС [7] геометрических управляемых переменных: отношения  $a_m$  диаметров расчетных окружностей магнитопровода, отношения  $\lambda_o$  высоты и ширины обмоточного окна и расчетного контурного угла стержня  $a_c$  [5]

$$\Pi_i = f(K_{зо}, a_m, \lambda_o, a_c), \quad (2)$$

где  $a_m$  – отношение наружного  $D_n$  и внутреннего  $D_b$  диаметров расчетных окружностей магнитопровода;

$\lambda_o$  – отношение высоты  $h_o$  и ширины  $b_o$  обмоточного окна;

$a_c$  – центральный угол стержня:

$$a_m = D_{ni} / D_{bi}; \quad (3)$$

$$\lambda_o = h_{oi} / b_{oi}. \quad (4)$$

Составляющая  $K_{цц}$  целевой функции (1) включает, в зависимости от критерия оптимизации соотношение показателей удельных плотностей материалов (ЭТС и обмоточной меди)  $\gamma_c/\gamma_o$ , коэффициентов укладки  $K_y$  и выпучивания  $K_B$  проводов в обмоточной катушке [1], соотношение удельных стоимостей  $C_c/C_o$  и удельных потерь материалов.

При сравнительном анализе рассматриваемых вариантов в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности [6] принимаются соответственно одинаковыми используемые материалы, средние значения амплитуд индукции магнитного поля в стержнях и ярмах, коэффициент заполнения магнитопровода сталью  $K_{зс}$ , а также исполнения и способы охлаждения ИСУ.

**Математические модели массостоймостного анализа вариантов ЭМС с прямоугольными и шестигранными образующими контурами.** Анализ ЭМС выполняется с учётом выражений (1) – (4), а также базисных уравнений связи параметров магнитопровода и обмотки [5-7].

Такие уравнения связывают площадь сечения стержня магнитопровода  $S_{ci}$ , массу системы обмоток  $m_{oi}$ , среднюю длину витка  $l_{wi}$  и площадь обмоточного окна  $S_{oi}$ :

$$S_{ci} = \Pi_{ид} / (S_{oi} K_{зо}); \quad (5)$$

$$m_{oi} = S_{oi} \gamma_o K_{зо} l_{wi}. \quad (6)$$

Разработка ММ ЭМС с прямоугольными сечениями стержней магнитопровода выполняется с использованием геометрических составляющих (рис. 1). Величины сторон  $a_{cn}$  и  $b_{cn}$  сечения стержня (рис. 1) определяются через  $D_{вп}$  и  $\alpha_c$  выражениями:

$$a_{cn} = D_{вп} \sin(\alpha_c/2); \quad (7)$$

$$b_{cn} = D_{вп} \cos(\alpha_c/2). \quad (8)$$

Площадь ЭТС стержня магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется с учётом (7) и (8):

$$S_{cn} = D_{вп}^2 \sin(\alpha_c)/2. \quad (9)$$

Ширина обмоточного окна  $b_{оп}$  (рис. 1) зависит от  $D_{вп}$ ,  $a_m$  и (3)

$$b_{оп} = D_{вп} / 2 - b_{сп} / 2 = D_{вп} / 2 (a_m - \sin(\alpha_c / 2)). \quad (10)$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется с использованием (4), (9) и (10):

$$m_{мп} = 0,5 K_{зс} \gamma_c D_{вп}^3 \sin \alpha_c ((a_m - \sin(\alpha_c / 2))(\lambda_0 + 1) + \pi \sin(\alpha_c / 2)). \quad (11)$$

На основе (3), (5) и (10) можно получить зависимость между  $S_{сп}$  и  $b_{оп}$

$$S_{сп} = \Pi_{ид} / b_{оп}^2 \lambda_o K_{зо} = 4 \Pi_{ид} / D_{вп}^2 \lambda_{оп} (\sin(\alpha_c / 2))^2 K_{зо}. \quad (12)$$

Из равенства уравнений (9) и (12) следует:

$$D_{вп} = \sqrt[4]{8 \Pi_{ид} / K_{зо} K_{зс} \lambda_o \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c / 2))^2}. \quad (13)$$

После подстановки уравнения (13) в (11), выражение для массы ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 1) преобразуется:

$$m_m = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мп}^*, \quad (14)$$

где  $\Pi_{мп}^*$  - относительный показатель массы магнитопровода,

$$m_m = K_{зс} \left( \sqrt[4]{8 \Pi_{ид} / K_{зо} K_{зс} \lambda_o \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c / 2))^2} \right)^3 \times \\ \times ((a_m - \sin(\alpha_c / 2)) 0,5 \sin \alpha (\lambda_o + 1) + \pi \sin(\alpha_c / 2)). \quad (15)$$

Средняя длина катушек ЭМС (рис. 1) определяется на основе (3), (7), (8) и (10):

$$l_{вп} = 2(a_{сп} + b_{сп}) + \pi b_{оп} / 2 = D_{вп} (\sin(\alpha_c / 2) + \cos(\alpha_c / 2) + \pi / 8 (a_m - \sin(\alpha_c / 2))). \quad (16)$$

На основе (10) и (16) уравнение массы меди (алюминия) обмотки (6) преобразует к виду:

$$m_{оп} = \gamma_o K_{в} K_{y} K_{зо} D_{вп}^3 0,5 (a_m - \sin(\alpha_c / 2))^2 ((\sin(\alpha_c / 2) + \cos(\alpha_c / 2))) + \pi (a_m - \sin(\alpha_c / 2)) / 8. \quad (17)$$

Подстановка (13) в выражение (17) принимает вид:

$$m_{оп} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{оп}^*, \quad (18)$$

где  $\Pi_{оп}^*$  - относительный показатель массы активных материалов обмотки ЭМС (рис. 1):

$$m_{оп} = K_B K_Y K_{зо} \left( \sqrt[4]{8\Pi_{ид} / K_{зо} K_{зс} \lambda_0 \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2} \right)^3 \times \quad (19)$$

$$\times 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/8.$$

Масса  $m_{ап}$  и стоимость  $C_{ап}$  активных материалов ЭМС (рис. 1) определяются на основе (14), (15) и (18), (19) выражениями:

$$m_{ап} = m_M + m_{мо} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мп}^* ; \quad (20)$$

$$C_{ап} = C_M + C_{мо} = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{сп}^* , \quad (21)$$

где  $\Pi_{мп}^*$  и  $\Pi_{сп}^*$  относительные показатели массы и стоимости планарной ЭМС с прямоугольными стержнями витого магнитопровода, которые определяются уравнениями:

$$\Pi_{мп}^* = \left( \sqrt[4]{8/K_{зо} K_{зс} \lambda_0 \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2} \right)^3 \times \quad (22)$$

$$\times \left[ K_{зс} 0,5 \sin \alpha (a_m - \sin(\alpha_c/2)) (\lambda_0 + 1) + \pi \sin(\alpha_c/2) + \frac{\gamma_o}{\gamma_c} K_B K_Y K_{зо} \right];$$

$$\times \left[ 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/8 \right]$$

$$\Pi_{сп}^* = \left( \sqrt[4]{8/K_{зо} K_{зс} \lambda_0 \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2} \right)^3 \times \quad (23)$$

$$\times \left[ K_{зс} 0,5 \sin \alpha (a_m - \sin(\alpha_c/2)) (\lambda_0 + 1) + \pi \sin(\alpha_c/2) + \frac{C_o \gamma_o}{C_c \gamma_c} K_B K_Y K_{зо} \right].$$

$$\times \left[ 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/8 \right]$$

Экстремальные значения зависимостей (22) и (23) ЭМС (рис.1) с медными обмотками, определенных при соотношениях плотностей (кг/м<sup>3</sup>)  $\gamma_o/\gamma_c=8,9/7,65$  и стоимостей  $C_o/C_c=3$ , а также значениях коэффициентов укладки  $K_Y=1,13$  и выпучивания  $K_B=1,15$  витков катушек, при  $K_{зс}=0,91$  и различных  $K_{зо}$ , приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

**Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы планарной электромагнитной системы с прямоугольными сечениями стержней**

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			P* <sub>ан</sub> , о.е.
	a <sub>м</sub> , о.е.	λ <sub>0</sub> , о.е.	α <sub>с</sub> , град.	
0,3	1,879	2,1	50,474	19,748
0,25	2,013	2,095	50,362	20,778
0,2	2,196	2,089	50,229	22,172

Таблица 2

**Экстремальные значения управляемых переменных и показателя стоимости планарной электромагнитной системы с прямоугольными сечениями стержней**

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			P* <sub>сн</sub> , о.е.
	a <sub>м</sub> , о.е.	λ <sub>0</sub> , о.е.	α <sub>с</sub> , град.	
0,3	1,280	2,132	51,14	34,621
0,25	1,358	2,127	51,032	35,977
0,2	1,464	2,12	50,813	37,813

Площадь сечения стержня магнитопровода однофазной планарной ЭМС (рис. 2):

$$S_c = \frac{\sqrt{3}}{4} D_b^2 ((1 - K/2) + 1)K, \quad (24)$$

где  $K = \sin(90^\circ - (\alpha_c/2)) / \sin(30^\circ + (\alpha_c/2))$

Ширина обмоточного окна ЭМС (рис. 2) с использованием (3) представляется выражением:

$$b_{\text{ош}} = \frac{D_{\text{нш}}}{2} - h_{\text{ш}} = \frac{D_{\text{вш}}}{2} (a_m - \sqrt{3}K/2), \quad (25)$$

где вспомогательный размер  $h_{\text{ш}}$  определяется:

$$h_{\text{ш}} = b_{\text{сш}} \sin 60^\circ = \sqrt{3} D_{\text{вш}} K/2;$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 2) определяется с использованием (4), (24) и (25):

$$m_{\text{мш}} = \gamma_c K_{\text{зс}} \frac{\sqrt{3}}{4} D_{\text{вш}}^3 ((1 - K/2) + 1) K (a_m - \sqrt{3}K/2) (\lambda_0 + 1) + \pi \sqrt{3}K/4. \quad (26)$$

Выражения диаметра внутренней расчетной окружности и массы ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 2) на основе (3), (5) и (24) имеют вид:

$$D_{\text{вш}} = \sqrt[4]{16\Pi_{\text{ид}} / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_0 (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 ((1 - K/2) + 1) \cdot K}; \quad (27)$$

$$m_{\text{мш}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мш}}^*, \quad (28)$$

где  $\Pi_{\text{мш}}^*$  - относительный показатель массы магнитопровода,

$$m_{\text{мш}} = K_{\text{зс}} \frac{\sqrt{3}}{4} \left( \sqrt[4]{16\Pi_{\text{ид}} / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_0 (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 ((1 - K/2) + 1) K} \right)^3 \times \\ \times \left( ((1 - K/2) + 1) K (a_m - \sqrt{3}K/4) (\lambda_0 + 1) + \pi K \sqrt{3}/4 \right) \quad (29)$$

Средняя длина витка катушек ЭМС определяется на основе (3) и (25):

$$l_{\text{вш}} = 4(x_{\text{сш}} + b_{\text{сш}}) + \frac{\pi}{2} b_{\text{ош}} = D_{\text{вш}} \left( 2((1 - K/2) + K) + \frac{\pi}{4} (a_m - \sqrt{3}K/2) \right), \quad (30)$$

где геометрические параметры  $x_{\text{сш}}$  и  $b_{\text{сш}}$ :

$$x_{\text{сш}} = a_{\text{сш}} - b_{\text{сш}} \sin 60^\circ = 0,5 D_{\text{вш}} (1 - K/2); \quad b_{\text{сш}} = a_{\text{сш}} \sin 60^\circ = D_{\text{вш}} K/2.$$

На основе (25) и (30) уравнение (6) для ЭМС (рис. 2) преобразует к виду:

$$m_{\text{ош}} = 0,25 \gamma_o K_{\text{зо}} D_{\text{вш}}^3 \lambda_0 \left( 2((1 - K/2) + K) + \frac{\pi}{4} (a_m - \sqrt{3}K/2) \right) (a_m - \sqrt{3}K/2)^2. \quad (31)$$

Подстановка (27) в выражение (31) принимает вид:

$$m_{\text{ош}} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{ош}}^*, \quad (32)$$

где  $\Pi_{\text{ош}}^*$  - относительный показатель массы активных материалов магнитопровода с шестигранными образующими,

$$m_{\text{ош}} = \left( \sqrt[4]{16\Pi_{\text{ид}} / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_0 (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 ((1 - K/2) + 1) K} \right)^3 \times \\ \times 0,25 K_{\text{зо}} \lambda_0 K_{\text{в}} K_{\text{у}} \left( 2 \cdot (1 - K/2) + K \right) + \frac{\pi}{4} (a_m - \sqrt{3}K/2) (a_m - \sqrt{3}K/2)^2. \quad (33)$$

Масса  $m_{аш}$  и стоимость  $C_{аш}$  активных материалов ЭМС витой конструкции с шестигранным сечением стержней (рис. 2) определяются на основе (27), (29) и (33) и приводятся к виду:

$$m_{аш} = m_{мш} + m_{ош} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мш}^* ; \quad (34)$$

$$C_{аш} = C_{мш} + C_{ош} = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{ош}^* , \quad (35)$$

где  $\Pi_{мш}^*$  и  $\Pi_{ош}^*$  относительные показатели массы и стоимости, планарной ЭМС с прямоугольными стержнями витого магнитопровода, которые определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} \Pi_{мш}^* = & \left( \sqrt[4]{16/\sqrt{3}K_{zc}K_{zo}\lambda_o(a_m - \sqrt{3}K/2)^2((1-K/2)+1)K} \right)^3 \times \quad (36) \\ & \times \left( \frac{\sqrt{3}}{4} K_{zc} \left( ((1-K/2)+1)K(a_m - \sqrt{3}K/2)(\lambda_o + 1) + \pi K \sqrt{3}/4 \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\gamma_o}{\gamma_c} 0,25K_{zo}\lambda_oK_bK_y(2(1-K/2)+K) + \frac{\pi}{4}(a_m - \sqrt{3}K/2) \right) \times (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{ош}^* = & \left( \sqrt[4]{16/\sqrt{3}K_{zc}K_{zo}\lambda_o(a_m - \sqrt{3}K/2)^2((1-K/2)+1)K} \right)^3 \times \quad (37) \\ & \times \left( \frac{\sqrt{3}}{4} (K_{zc} \left( ((1-K/2)+1)K(a_m - \sqrt{3}K/2)(\lambda_o + 1) + \pi K \sqrt{3}/4 \right) + \right. \\ & \left. + \frac{C_o}{C_c} \frac{\gamma_o}{\gamma_c} 0,25K_{zo}\lambda_oK_bK_y(2(1-K/2)+K) + \frac{\pi}{4}(a_m - \sqrt{3}K/2) \right) \times (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 . \end{aligned}$$

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы ЭМС (рис. 2) с материалами и расчетными коэффициентами, аналогичными (рис.1), приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы однофазной планарной электромагнитной системы с шестигранными сечениями стержней**

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{мш}^*$ , о.е.
	$a_m$ , о.е.	$\lambda_o$ , о.е.	$a_c$ , град.	
0,3	2,012	1,857	104,963	18,075
0,25	2,177	1,863	103,864	19,106
0,2	2,376	1,893	103,120	20,501

Таблица 4

**Экстремальные значения управляемых переменных  
и показателя стоимости планарной электромагнитной  
системы с шестигранными сечениями стержней**

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$P_{\text{ош}}^*$ , о.е.
	$a_m$ , о.е.	$\lambda_{0l}$ , о.е.	$a_{cl}$ , град.	
0,3	1,369	1,823	105,778	30,8
0,25	1,476	1,802	104,247	32,158
0,2	1,570	1,843	105,118	33,995

**Вывод.** Замена в витом стержневом магнитопроводе прямоугольных сечений стержней на шестигранные обеспечивает в среднем снижение массы и стоимости однофазной ЭМС соответственно на 7,5 – 8,5% и 10,1 – 11,04%.

Список використаних джерел:

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектрики / Р.Х. Бальян // – М.: Сов. Радио, 1971. – 720с.
2. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов : Учебное пособие для вузов / П.М. Тихомиров – 5-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 528с.
3. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) / А.М. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк и др. : – М. : Энергия, 1973 –272 с.
4. Патент на корисну модель №65005. Україна. Магнітопровід індукційного статичного пристрою. [Текст] / Ставинський А. А., Ставинський Р. А., Ставинська О. А., Садовий О. С., Циганов О. М. - №u201104986; заяв. 20.04.11 ; опуб. 25.11.11, Бюл. №22. - 3 с. : ил.
5. Ставинский Р.А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств / Р.А. Ставинский // Вісник КДУ. – Кременчук : КДУ, 2010. – Вип 4 / 2010(63), ч.2. – С.91-94.
6. Ставинський А. А. Метод сравнительного анализа статических электромагнитных систем, отличающихся структурой и конфигурацией элементов / А. А. Ставинський Р. А. Ставинський, Е. А. Авдеева // Електротехнічні та комп'ютерні системи. : Научно-технічний журнал. – Одеса, 2014. – №14 (90) – С.53-60.
7. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования / В. С. Блинцов, Р. А. Ставинский, Е. А. Авдеева, А. С. Садовой // Електротехніка і електромеханіка : науково-практичний журнал. – Харків, 2012. – № 2 – С. 16–21.

**О. Садовий. Порівняльний аналіз масовартісних показників однофазних трансформаторів і реакторів з прямокутними і шестигранними перерізами стрижнів стрижневого крученого магнітопровода.**

*Складено математичні моделі порівняльного аналізу масовартісних показників однофазних трансформаторів з чотирьох та шестигранними твірними поверхнями на підставі принципу електромагнітної еквівалентності.*

**Ключові слова:** магнітопровід, однофазний трансформатор, масовартісний показник, керовані геометричні змінні.

**A. Sadovoy. Comparative analysis weight-and-cost indicators single-phase transformers and reactors with rectangular and hexagonal cross-sections of rods of twisted magnetic core.**

*There are mathematical models of the comparative analysis of weight-and-cost indicators of single-phase transformers with four or six sided shaping planes on the basis of the electromagnetic equivalence principle.*

**Key words:** magnetic core, single-phase transformer, weight-and-cost indicator, controllable geometric variables.

## ЗМІСТ

### ЕКОНОМІЧНІ НАУКИ

- Н. В. Потриваєва, І. В. Агеєнко.** Забезпечення матеріально-технічними ресурсами в системі управління підприємством. 3
- О. М. Вишневська, О. О. Христенко.** Індикатори формування економічної безпеки держави ..... 12
- І. В. Гончаренко, А. Ю. Козаченко.** Експорт аграрної продукції регіону в контексті глобальних тенденцій..... 23
- О. Д. Витецька, А. В. Виборна.** М'які батарейки із відходів деревини як інноваційне джерело енергії..... 33
- Ю. А. Кормишкін.** Систематизація та класифікація елементів бізнес-інфраструктури аграрного підприємництва ..... 41
- С. О. Горбач.** Особливості інституціонального забезпечення регіонального ринку праці ..... 51
- О. А. Боднар.** Інституційне забезпечення сільського розвитку. .... 61
- О. С. Альбеценко.** Нормативно-правове забезпечення екологічної політики держави. .... 70

### СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ НАУКИ

- В. В. Базалій, Є. О. Домарацький, А. В. Добровольський.** Агротехнічний спосіб пролонгації фотосинтетичної діяльності рослин соняшнику ..... 77
- М. М. Корхова, О. А. Коваленко, А. В. Шепель.** Оцінка енергетичної ефективності вирощування пшениці м'якої озимої залежно від строків сівби та норм висіву насіння. .... 85
- Т. В. Сахно, В. П. Петренкова.** Вміст фенольних сполук та морфометричні показники у зразків-диференціаторів соняшнику за умов ураження вовчком..... 92
- В. Г. Кушнеренко, М. В. Шугаєва.** Ріст молодняку свиней як один з основних показників продуктивності..... 101
- Є. М. Алхімов, В. Ю. Шевченко, С. І. Пентилюк.** Гематологічні особливості ремонтних цьоголіток осетроподібних риб (*ACIPENSERIFORMES*) ..... 106

**Є. М. Зайцев.** Співвідносна мінливість селекційних ознак  
молочної худоби голштинської породи ..... 114

## **ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

**V. Havrysh, M. Shatohin.** Alternative fuels and effect on  
agricultural machines' efficiency ..... 121

**V. Hruban'.** Development of compositional scheme of  
technological module for corn-harvesting ..... 128

**Д. В. Бабенко, О. А. Горбенко, Н. А. Доценко, Н. І. Кім.**  
Дослідження засобів механізації отримання насіння овоче-  
баштанних культур..... 137

**О. С. Садовой.** Сравнительный анализ массостоймых  
показателей однофазных трансформаторов и реакторов с  
прямоугольными и шестигранными сечениями стержней  
стержневого витого магнитопровода..... 143

**Д. Ю. Шарейко, І. С. Білюк, А. М. Фоменко,  
О. В. Савченко, О. С. Кириченко.** Синтез слідкувальної  
системи на основі п'єзоелектричного двигуна ..... 154