

УДК 621.314

**АНАЛИЗ МАССОСТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И  
РЕАКТОРОВ С ШЕСТИГРАННЫМИ СЕЧЕНИЯМИ  
СТЕРЖНЕЙ БРОНЕВОГО ВИТОГО МАГНИТОПРОВОДА**

*А.С. Садовой, ассистент*

*Николаевский национальный аграрный университет*

*Представленные оптимизационные математические модели однофазного трансформатора и реактора с шестигранным сечением стержней бронированного витого магнитопровода.*

**Ключевые слова:** однофазные трансформатор и реактор, витой магнитопровод, массостоймостные показатели, управляемые переменные.

Введение. Одним из элементов современных систем преобразовательной техники является индукционные статические преобразователи (ИСУ). От их энергетических и массо-стоимостных показателей зависит надёжность работы, а также стоимость энергетических узлов в целом. При удорожании электротехнического сырья, электроэнергии актуальной задачей является снижение массогабаритных показателей, а также потерь в трансформаторах и реакторах.

Анализ предыдущих исследований. На сегодняшний день существует большое количество электромагнитных систем (ЭМС) ИСУ, основные из которых были описаны в [1-3].

Из [4] известна конструкция (рис. 1) с использованием резной ленты электротехнической стали (ЭТС) которая при навивке и соединении трапецевидных элементов может иметь вид симметрического шестиугольника. Таким образом, возможно увеличение угла изгиба с  $90^\circ$  на  $120^\circ$  что приведет к уменьшению средней длины витка, а также снижение концентрации напряжений в угловых зонах обмоточного провода.

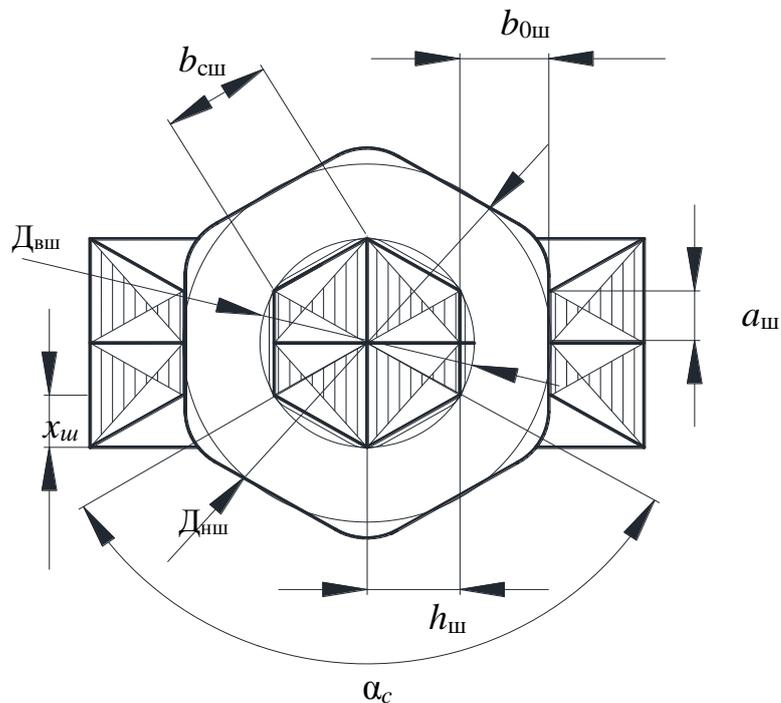


Рис. 1. Конструкция броневой витой электромагнитной системы индукционного статического устройства с шестигранным образующим контуром

Метод сравнительного анализа электромагнитных систем. Для разработки математических моделей (ММ) однофазных ИСУ необходимо выполнить их оптимизационный анализ на основе принципа

электромагнитной эквивалентности. Для решения задачи используется метод оптимизации [7, 8] с использованием целевых функций, содержащих безразмерные показатели технического уровня (ПТУ) и относительные геометрические управляемые переменные.

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

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

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

$\Pi_i^*$  – оптимизационная относительная составляющая целевой функции в виде коэффициентов массы  $\Pi_{\text{ма}}$ , стоимости  $\Pi_{\text{са}}$ , а также потерь  $\Pi_{\text{па}}$  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)  $K_{30}$  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  $\lambda_0$  высоты и ширины обмоточного окна и расчетного контурного угла стержня  $\alpha_c$  [5]

$$\Pi_i = f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c) \quad (2)$$

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

$\lambda_0$  – отношение высоты  $h_0$  и ширины  $b_0$  обмоточного окна;

$\alpha_c$  – центральный угол стержня:

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

$$\lambda_0 = h_{oi} / b_{oi} \quad (4)$$

Составляющая  $K_{\text{цi}}$  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 [7] принимаются соответственно одинаковыми используемые материалы, средние значения амплитуд индукции магнитного поля в стержнях и ярмах, коэффициент заполнения магнитопровода сталью  $K_{zc}$ , а также исполнения и способы охлаждения ИСУ.

Математические модели массостоймостного анализа вариантов ЭМС с прямоугольными и шестигранными образующими контурами. Разработка математических моделей ЭМС выполняется с учётом выражений (1) – (4), а также базисных уравнений связи параметров магнитопровода и обмотки [7,8].

Площадь сечения стержня магнитопровода однофазной броневой ЭМС (рис. 1)

$$S_c = \frac{\sqrt{3}}{4} D_{вн}^2 ((1 - K/2) + 1)K, \quad (5)$$

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

Ширина обмоточного окна ЭМС (рис. 1) с использованием (3) представляется выражением

$$b_{ош} = \frac{D_{вн}}{2} - h_{ш} = \frac{D_{вн}}{2} (a_m - \sqrt{3}K/2), \quad (6)$$

где вспомогательный размер  $h_{ш}$  определяется:  $h_{ш} = b_{сш} \sin 60^\circ = \sqrt{3}D_{вн}K/2$ ;

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется с использованием (4)

$$m_{мш} = \gamma_c K_{zc} \frac{\sqrt{3}}{4} D_{вн}^3 ((1 - K/2) + 1)K \left( (a_m - \sqrt{3}K/2)(\lambda_o + 1) + \pi\sqrt{3}K/8 \right). \quad (7)$$

Выражения диаметра внутренней расчетной окружности и массы ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 2) на основе (3), (5) и (7) имеют вид

$$D_{вн} = \sqrt[4]{16\Pi_{ид} / \sqrt{3}K_{zc} K_{zo} \lambda_o (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 ((1 - K/2) + 1) \cdot K}; \quad (8)$$

$$m_{\text{мш}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мш}}^* , \quad (9)$$

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

$$m_{\text{мш}} = K_{\text{зс}} \frac{\sqrt{3}}{4} \left( \sqrt[4]{16\Pi_{\text{ид}} / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_o \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 \left( (1 - K/2) + 1 \right) K} \right)^3 \times \left( \left( (1 - K/2) + 1 \right) K \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/4 \right) \left( \lambda_o + 1 \right) + \pi K \sqrt{3}/8 \right) . \quad (10)$$

Средняя длина витка катушек ЭМС определяется на основе (3)

$$l_{\text{вш}} = 4(x_{\text{сш}} + b_{\text{сш}}) + \pi b_{\text{ош}} = D_{\text{вш}} \left( 2\left( (1 - K/2) + K \right) + \frac{\pi}{2} \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right) \right) , \quad (11)$$

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

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

На основе (9) и (10) уравнение (6) для ЭМС (рис. 2) преобразует к виду

$$m_{\text{ош}} = 0,25\gamma_o K_{\text{зо}} D_{\text{вш}}^3 \lambda_o \left( 2\left( (1 - K/2) + K \right) + \frac{\pi}{2} \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right) \right) \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 . \quad (12)$$

Подстановка (9) в выражение (13) принимает вид

$$m_{\text{ош}} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{ош}}^* , \quad (13)$$

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

$$m_{\text{ош}} = \left( \sqrt[4]{16\Pi_{\text{ид}} / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_o \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 \left( (1 - K/2) + 1 \right) K} \right)^3 \times \left( 0,25K_{\text{зо}}\lambda_o K_{\text{в}}K_{\text{у}} \left( 2 \cdot \left( (1 - K/2) + K \right) + \frac{\pi}{2} \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right) \right) \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 \right) . \quad (14)$$

Масса  $m_{\text{аш}}$  и стоимость  $C_{\text{аш}}$  активных материалов ЭМС витой конструкции с шестигранным сечением стержней (рис. 1) определяются на основе (9), (10) и (14) и приводятся к виду:

$$m_{\text{аш}} = m_{\text{мш}} + m_{\text{ош}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мш}}^* ; \quad (15)$$

$$C_{\text{аш}} = C_{\text{мш}} + C_{\text{ош}} = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{ош}}^* , \quad (16)$$

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

$$\Pi_{\text{мш}}^* = \left( \sqrt[4]{16 / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_o \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 \left( (1 - K/2) + 1 \right) K} \right)^3 \times \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left( \frac{\sqrt{3}}{4} K_{3c} \left( ((1 - K/2) + 1) K (a_m - \sqrt{3}K/2) (\lambda_0 + 1) + \pi K \sqrt{3}/8 \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{\gamma_0}{\gamma_c} 0,25 K_{3o} \lambda_o K_B K_y (2(1 - K/2) + K) + \frac{\pi}{2} (a_m - \sqrt{3}K/2) \right) \times (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 \Big); \\
 \Pi_{\text{ош}}^* & = \left( \sqrt[4]{16/\sqrt{3} K_{3c} K_{3o} \lambda_o (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 ((1 - K/2) + 1) K} \right)^3 \times \quad (18) \\
 & \times \left( \frac{\sqrt{3}}{4} (K_{3c} \left( ((1 - K/2) + 1) K (a_m - \sqrt{3}K/2) (\lambda_o + 1) + \pi K \sqrt{3}/8 \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{C_o}{C_c} \frac{\gamma_0}{\gamma_c} 0,25 K_{3o} \lambda_o K_B K_y (2(1 - K/2) + K) + \frac{\pi}{2} (a_m - \sqrt{3}K/2) \right) \times (a_m - \sqrt{3}K/2)^2.
 \end{aligned}$$

Таблица 1

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

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{\text{мш}}^*$ , о.е.
	$a_m$ , о.е.	$\lambda_0$ , о.е.	$\alpha_c$ , град.	
0,3	1,605	1,897	103,371	18,958
0,25	1,714	1,904	103,001	20,183
0,2	1,858	1,905	102,816	21,841

Таблица 2

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

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{\text{ош}}^*$ , о.е.
	$a_m$ , о.е.	$\lambda_0$ , о.е.	$\alpha_c$ , град.	
0,3	1,136	1,856	104,738	30,850
0,25	1,198	1,824	104,529	32,463
0,2	1,282	1,861	104,135	34,647

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы ЭМС с материалами и расчетными коэффициентами, приведены в табл. 1 и 2.

Вывод. На основе принципа электромагнитной эквивалентности с использованием целевых функций, содержащих безразмерные показатели технического уровня и относительные геометрические управляемые переменные, были разработаны математические модели для однофазной броневой электромагнитной системы с шестигранными сечениями стержней.

### Литература

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектрики. – М.: Сов. Радио, 1971.-720с.
2. Белопольский И.И. Расчет трансформаторов и реакторов малой мощности. / И.И. Белопольский, Е.И. Каретникова, Л. Г. Пикалова – М. : Энергия,1973. – 399с.
3. Садовой А.С. Варианты и преобразование структур однофазных трансформаторов и реакторов с витыми магнитопроводами / А.С. Садовой – Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла остроградського. – Кременчук:КрНУ, 2017. – Вип. 2/2017(103). – С.15- 20.
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. Flanagan W.M. Handbook of transformers desing and application / W.M. Flanagan. – Boston : Mc Graw Hill, 1993. – 232 p.
6. James H. Harlow /Electric power transformer engineering – United States of America – 2004 – 234p.
7. Ставинський А.А. Метод сравнительного анализа статических электромагнитных систем, отличающихся структурой и конфигурацией

элементов / А.А. Ставинський Р.А. Ставинський, Е.А. Авдеева // Электротехнические и компьютерные системы. : Научно-технический журнал. – №14 (90) – Одесса, 2014.– С.53-60

Аналіз масовартісних показників однофазних трансформаторів і реакторів з шестигранним перерізом стрижнів броньовий витого магнітопроводу. О.С. Садовий.

*Представлені оптимізаційні математичні моделі однофазного трансформатора і реактора з шестигранним перерізом стрижнів броньового витого магнітопроводу.*

Development of mathematical models analysis of mass-indicative indicators of single-phase transformers and reactors with six-way cross-sections of rods of brontie vito magnetic wire. A.S. Sadovoy.

*Presented optimization mathematical models of single-phase transformer and reactor with hexagonal cross-section of cores of armored twisted magnetic core.*