

УДК 621.314

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА МАССОСТОИМОСТНЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ
СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С
ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СЕЧЕНИЕМ СТЕРЖНЯ
БРОНЕВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ**

А.С. Череповская, соискатель высшего образования группы Е4/1

А.С. Садовой, ассистент

Николаевский национальный аграрный университет

Представлен оптимизационный сравнительный анализ массостоймостных показателей однофазных трансформаторов и реакторов с четырехгранным витым магнитопроводом.

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

Введение. На сегодняшний день трансформаторы и реакторы (дроссели) являются неотъемлемой частью большинства электротехнических оборудования и систем. Указанные индукционные статические устройства (ИСУ) существенно влияют на параметры названных объектов в целом: массу, габариты, экономичность, а также температурный режим. Тенденция снижения массогабаритных показателей большинства изделий электротехнической и радиоэлектронной техники практически не коснулась силовых и измерительных трансформаторов,

которые остаются одним из наиболее габаритных и массивных элементов таких устройств.

Широкое применение в различных системах нашли броневые ЭМС однофазных трансформаторов с витым четырехгранным магнитопроводом (рис. 1) [7].

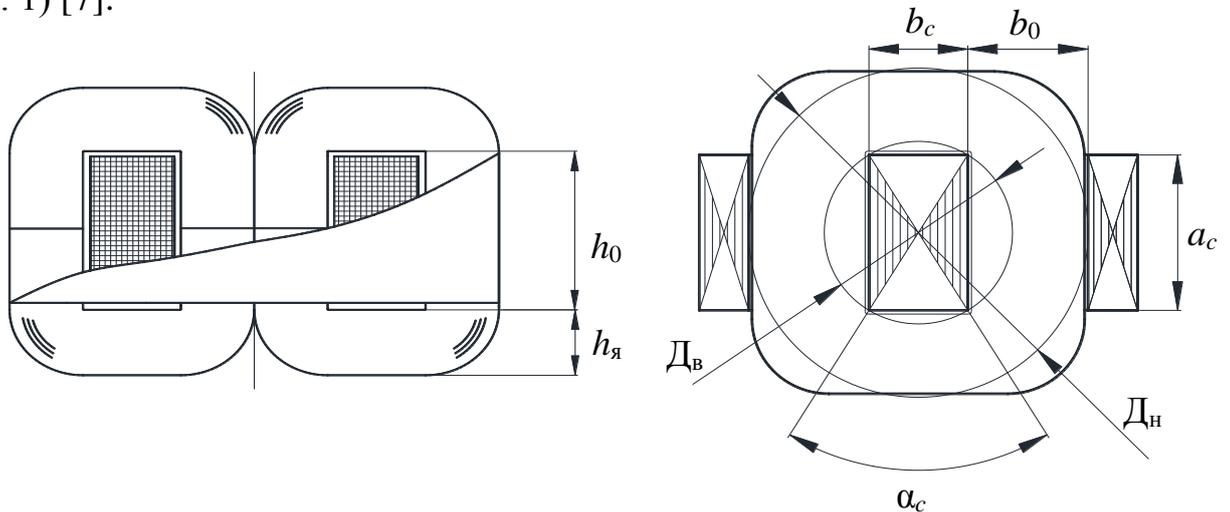


Рис. 1. Конструкция броневой витой электромагнитной системы индукционного статического устройства с четырехгранным образующим контуром

Цель работы. Разработка математических моделей для анализа и усовершенствования массостоймых показателей вариантов планарной однофазной ЭМС с прямоугольными сечениями стержней броневых магнитопроводов.

Метод сравнительного анализа электромагнитных систем. Оптимизация ИСУ выполняется на основе математических моделей с частными критериями оптимизации и совокупностью независимых и зависимых управляемых переменных (УП). Оптимизационные УП включают электромагнитные нагрузки (ЭМН) и элементы геометрии, соответствующие конкретным конфигурациям катушек обмоток и стержней магнитопроводов [1,2]. Одними из взаимонеприемлемых геометрических УП оптимизации традиционных ЭМС [1,2,4] являются соотношение сторон прямоугольного сечения и диаметр образующего контура секционированного «ступенчатого»

сечения стержня. Указанное несоответствие затрудняет объективный сравнительный анализ различных структурных вариантов ЭМС. В связи с этим для аналитической оценки влияния преобразования конфигураций и структур ЭМС на массостоймостные показатели активной части однофазных ИСУ используется метод с помощью целевой функции (ЦФ) показателей технического уровня (ПТУ) с относительными геометрическими и электромагнитными УП [5]

$$F_{kii} = K_{cii} (\sqrt[4]{\Pi_{ид}})^3 \Pi_{kii}^* \quad (1)$$

где $\Pi_{ид}$ - показатель исходных данных и ЭМН;

K_{cii} - составляющая удельных характеристик используемых материалов $K \geq 3$ оптимизационных ЦФ;

Π_{kii}^* - безразмерная оптимизационная составляющая, характеризующая ЦФ, основными из которых являются функции массы F_{1ii} , стоимости F_{2ii} и потерь активной мощности F_{3ii} ii -го варианта ЭМС.

Экстремумы Π_{kii}^* безразмерных составляющих ЦФ (1) являются ПТУ ИСУ. Каждая из Π_{kii}^* зависит от коэффициента заполнения обмоточного окна проводящим материалом катушек обмоток (класса напряжения) K_{30} и двух универсальных идентичных и приемлемых для любых из существующих и возможных вариантов ЭМС геометрических УП – отношения a_m наружного диаметра D_{nii} и внутреннего диаметра D_{vii} расчётных окружностей магнитопровода каждого ii -го варианта ЭМС (табл. 1), отношения λ_0 высоты h_{0ii} и ширины b_{0ii} обмоточного окна и центрального угла стержня α_c [5]:

$$\Pi_{1(2)ii} = f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c); \quad (2)$$

$$a_m = D_{nii} / D_{vii}; \quad (3)$$

$$\lambda_0 = h_{0ii} / b_{0ii}. \quad (4)$$

Составляющая K_{cii} целевой функции (1) включает, в зависимости от критерия оптимизации, соотношения показателей удельных плотностей материалов (обмоточной меди и ЭТС) (кг/м^3) $\gamma_o / \gamma_c = 8,9 / 7,65$ и их стоимостей $C_o / C_c = 3,0 \dots 5,5$, коэффициенты укладки $K_y = 1,13$ и выпучивания

$K_b = 1,15$ витков катушек при пропитке [1], а также коэффициент заполнения магнитопровода ЭТС, $K_{zc} = 0,91$.

Расчеты выполнены при различных $K_{z0} = 0,3 \dots 0,2$ и соотношениях удельных стоимостей активных материалов в диапазоне $C_c / C_o = 3,0 \dots 5,5$.

При разработке математических моделей указанного варианта в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности [5] принимаются соответственно одинаковыми используемые материалы, плотности токов обмоток, средние значения амплитуд индукции магнитного поля в стержнях и ярмах, а также исполнения и способы охлаждения ИСУ.

При расчётах система обмоток трансформатора заменяется расчетной обмоткой структурно и электромагнитно эквивалентного реактора [6].

Математические модели массостоймостного анализа ЭМС с прямоугольными образующими контурами. Анализ ЭМС выполняется с учётом выражений (1) – (4), а также базисных уравнений связи параметров магнитопровода и обмотки [5,6].

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} :

$$S_{ci} = \Pi_{ид} / (S_{oi} K_{z0}); \quad (5)$$

$$m_{oi} = S_{oi} \gamma_0 K_{z0} l_{wi}. \quad (6)$$

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

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

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

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

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

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)

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

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), выражения 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,

$$m_m = K_{зс} \left(\sqrt[4]{8\Pi_{ид} / K_{зо} K_{зс} \lambda_o \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2} \right)^3 \times \\ \times 0,5\gamma_c \sin \alpha_c \left((a_m - \sin(\alpha_c/2))(\lambda_0 + 1) + \frac{\pi}{2} \sin(\alpha_c/2) \right). \quad (15)$$

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

$$l_{вп} = 2(a_{сп} + b_{сп}) + \pi b_{оп} = D_{вп} (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi/4(a_m - \sin(\alpha_c/2))). \quad (16)$$

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

$$m_{оп} = \gamma_o K_{в} K_{у} K_{зо} D_{вп}^3 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 ((\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2))) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/4. \quad (17)$$

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)

$$m_{оп} = K_B K_Y K_{30} \left(\sqrt[4]{8\Pi_{ид} / K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)} (a_M - \sin(\alpha_c/2)) \right)^3 \times \quad (19)$$

$$\times 0,5(a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c/2))/4.$$

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

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

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

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

$$\Pi_{мп}^* = \left(\sqrt[4]{8/K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)} (a_M - \sin(\alpha_c/2)) \right)^3 \times$$

$$\times \left[K_{3c} 0.5 \sin \alpha (a_M - \sin(\alpha_c/2)) (\lambda_0 + 1) + \frac{\pi}{2} \sin(\alpha_c/2) + \frac{\gamma_0}{\gamma_c} K_B K_Y K_{30} \right]; \quad (22)$$

$$\times \left[\times 0,5(a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c/2))/4 \right]$$

$$\Pi_{сп}^* = \left(\sqrt[4]{8/K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)} (a_M - \sin(\alpha_c/2)) \right)^3 \times$$

$$\times \left[K_{3c} 0.5 \sin \alpha (a_M - \sin(\alpha_c/2)) (\lambda_0 + 1) + \frac{\pi}{2} \sin(\alpha_c/2) + \frac{C_o \gamma_0}{C_c \gamma_c} K_B K_Y K_{30} \right]. \quad (23)$$

$$\times \left[\times 0,5(a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c/2))/4 \right]$$

Таблица 1

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

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{ап}^*$, о.е.
	a_M , о.е.	λ_0 , о.е.	α_c , град.	
0,3	1,443	2,081	50,062	20,363
0,25	1,537	2,076	49,959	21,587
0,2	1,665	2,07	49,836	23,245

Экстремальные значения зависимостей (22) и (23) ЭМС (рис.1) с медными обмотками, определенных при соотношениях плотностей (кг/м^3) $\gamma_o/\gamma_c = 8,9/7,65$ 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 $K_{zc}=0,91$ и различных K_{zo} , приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 2

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

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$P_{\text{сп}}^*$, о.е.
	a_m , о.е.	λ_0 , о.е.	α_c , град.	
0,3	1,024	2,112	50,721	34,059
0,25	1,079	2,106	50,610	35,671
0,2	1,153	2,1	50,473	37,854

Вывод. Разработанные математические модели для анализа массостоймых показателей витого броневое магнитопровода с прямоугольным сечением стержня. Получены оптимальные геометрические соотношения сторон магнитопровода, центрального угла стержня, а также высоты и ширины обмоточных окон.

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. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. / Ю.Н. Стародубцев. – М. : ИП РадиоСофт. – 321с.
5. 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
6. Ставинський А.А. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський Е.А. Авдеева // Електротехнічні та комп'ютерні системи.–2013.– №11(87).с.74–818.

Розробка математичних моделей порівняльного аналізу масовартісних показників однофазних індукційних статичних перетворювачів з прямокутним перерізом стрижня броньовий електромагнітної системи. О.С. Садовий, А.С. Череповська.

Представлений оптимізаційний порівняльний аналіз масостоймостних показників однофазних трансформаторів і реакторів з чотиригранний ши крученим магнитопроводом.

Development of mathematical models of comparative analysis of mass-indicative indicators of single-phase induction static converters with rectangular section of the rod of the brown electromagnetic system. A.S. Sadovoy, A.S. Cherepovskaya.

An optimization comparative analysis of the mass characteristics of single-phase transformers and reactors with a four-core twisted magnetic core is presented.