

УДК 621.313

ВАРИАНТЫ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ С ВИТЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

О. С. Садовой

Николаевский национальный аграрный университет
ул. Георгия Гонгадзе, 9, г. Николаев, 54020, Украина. E-mail:

Обоснованы технические решения изменения конструкций электромагнитных систем с целью уменьшения материалоемкости и повышения надежности однофазных трансформаторов и реакторов с витыми магнитопроводами. Указанные изменения заключаются в использовании совмещенных витых элементов трапециевидного сечения, формирующих шестигранные сечения стержней. Достигается повышение прочности изоляции при увеличении изгиба витков катушек в угловых зонах с 90° до 120° , а также создается возможность снижения масс стоимостных показателей и потерь активной мощности названных индукционных статических устройств уменьшением средней длины витков обмоток. Определены задача и метод оптимизационного сравнительного анализа вариантов однофазных электромагнитных систем указанных устройств.

Ключевые слова: однофазный трансформатор, витой магнитопровод, надёжность, управляемые геометрические переменные.

ВАРІАНТИ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ СТРУКТУР ОДНОФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА РЕАКТОРІВ З ВИТИМИ МАГНІТОПРОВОДАМИ

О. С. Садовий

Миколаївський національний аграрний університет
вул. Георгія Гонгадзе, 9, м. Миколаїв, 54020, Україна. E-mail: Aleksey-sadovoy@yandex.ua

Обґрунтовано технічні рішення зміни конструкцій електромагнітних систем з метою зменшення матеріалоемності та підвищення надійності однофазних трансформаторів та реакторів з витими магнітопроводами. Вказані зміни полягають у використанні суміщених витих елементів трапецієподібного перерізу, які формують шестигранні перерізи стержнів. Досягнуто підвищення міцності ізоляції при збільшенні вигину витків катушок у кутових зонах з 90° до 120° , а також утворюється можливість зниження мас вартісних показників і втрат активної потужності названих статичних індукційних пристроїв зниженням середньої довжини витків обмоток. Визначено завдання та метод оптимізаційного порівняльного аналізу варіантів однофазних електромагнітних систем вказаних пристроїв.

Ключові слова: однофазний трансформатор, витий магнітопровід, надійність, керовані геометричні змінні.

АКТУАЛЬНОСТЬ РОБОТЫ. Распространенными элементами современного электротехнического оборудования являются однофазные трансформаторы и реакторы (дроссели). Такие индукционные статические устройства (ИСУ) существенно влияют на характеристики объектов электрооборудования в целом: массу, габариты, энергетические показатели, а также температурный режим работы и стоимость. Тенденция снижения массогабаритных показателей большинства изделий электротехнической и радиоэлектронной техники практически не коснулась силовых и измерительных трансформаторов, которые остаются одними из наиболее габаритных и массивных элементов таких устройств. Это связано с применением материалов с достаточно высокими удельными массой и стоимостью и практически неизменными на протяжении столетия вариантами «традиционных» конструкций статических электромагнитных систем (ЭМС) [1–5]. Одним из направлений усовершенствования систем и блоков электро- и радиооборудования является усовершенствование ИСУ структурным преобразованием магнитопроводов и обмоток [6, 7].

Требования снижения материалоемкости и повышения надежности, предъявляемые к электрооборудованию, а также известные конструктивно-структурные особенности и недостатки ЭМС с «традиционными» образующими контурами (ОК) [7] указывают на необходимость совершенствова-

ния распределительных и специальных трансформаторов и реакторов различной мощности [3, 8].

Прямоугольные ОК планарных ЭМС массового выпуска обеспечивают низкую трудоемкость производства шихтованных и витых магнитопроводов на основе фактора идентичности ширины слоев электротехнической стали (ЭТС) в сечениях стержней, но образуют прямоугольную форму витков катушек обмоток. Криволинейная форма катушечных витков с цилиндрическими ОК уменьшает материалоемкость обмоток за счет кольцевой формы витков, но значительно усложняет и удорожает технологию производства магнитопроводов. Это объясняется прежде всего необходимостью навивки из нескольких лент или одной ленты изменяющейся ширины секций магнитопровода с сечениями, которые вписываются в окружность контура стержня.

На основании изложенного, задача повышения показателей технического уровня (ПТУ) ЭМС однофазных ИСУ с витыми магнитопроводами является важной и актуальной.

Целью данной работы является обоснование, на основе анализа состоящих в производстве технических решений, путей снижения массо-стоимостных показателей и потерь активной мощности однофазных ИСУ с витым магнитопроводом.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ. Одними из распространенных конструкций активной части однофазных ИСУ являются стержневая и броневая планарные ЭМС с витыми магнитопроводами

[1–5]. Особенностью магнитопроводов ИСУ малой мощности (рис. 1) является прямоугольное сечение стержней, которое увеличивает материалоемкость обмоток и снижает прочность изоляции, в связи с изгибом витков катушек на 90° в угловых зонах.

Из [Патент на полезную модель №65005. Украина. Магнітопровід індукційного статичного пристрою / Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Авдеева О.А., Садовий О.С., Циганов О.М. - №u201104986; заяв. 20.04.11; опуб. 25.11.11, Бюл. №22. - 3 с.: ил.] известны варианты конструкции (рис. 2), которые выполняются навивкой из ленты ЭТС изменяющейся ширины элементов трапецевидного сечения и

совмещением указанных элементов с формированием шестиугольных сечений стержней. При этом увеличивается прочность изоляции в связи с увеличением изгиба витков катушек в угловых зонах с 90° до 120° , а также уменьшается материалоемкость обмоток.

Также одной из распространенных конструкций однофазных трансформаторов является тороидальная ЭМС [1–5] с конфигурацией внешнего контура, которая соответствует окружности (рис. 3). Её особенностью является неплотная укладка витковых проводников над торцевыми поверхностями кольцевого магнитопровода.

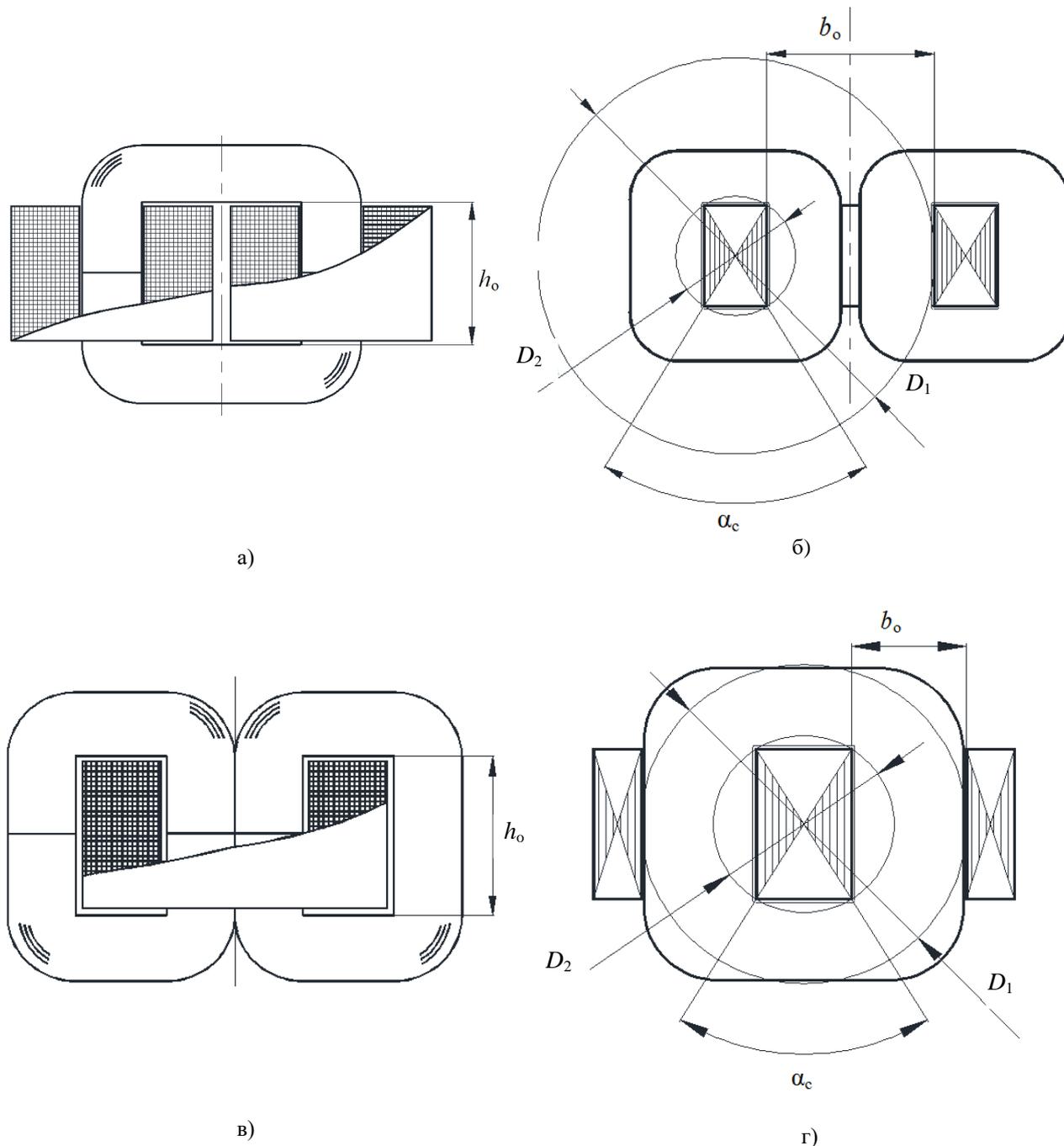


Рисунок 1 – Стержневая (а, б) и броневая (в, г) конструкции планарной электромагнитной системы с четырехгранными сечениями стержней и обмоточных катушек витого магнитопровода

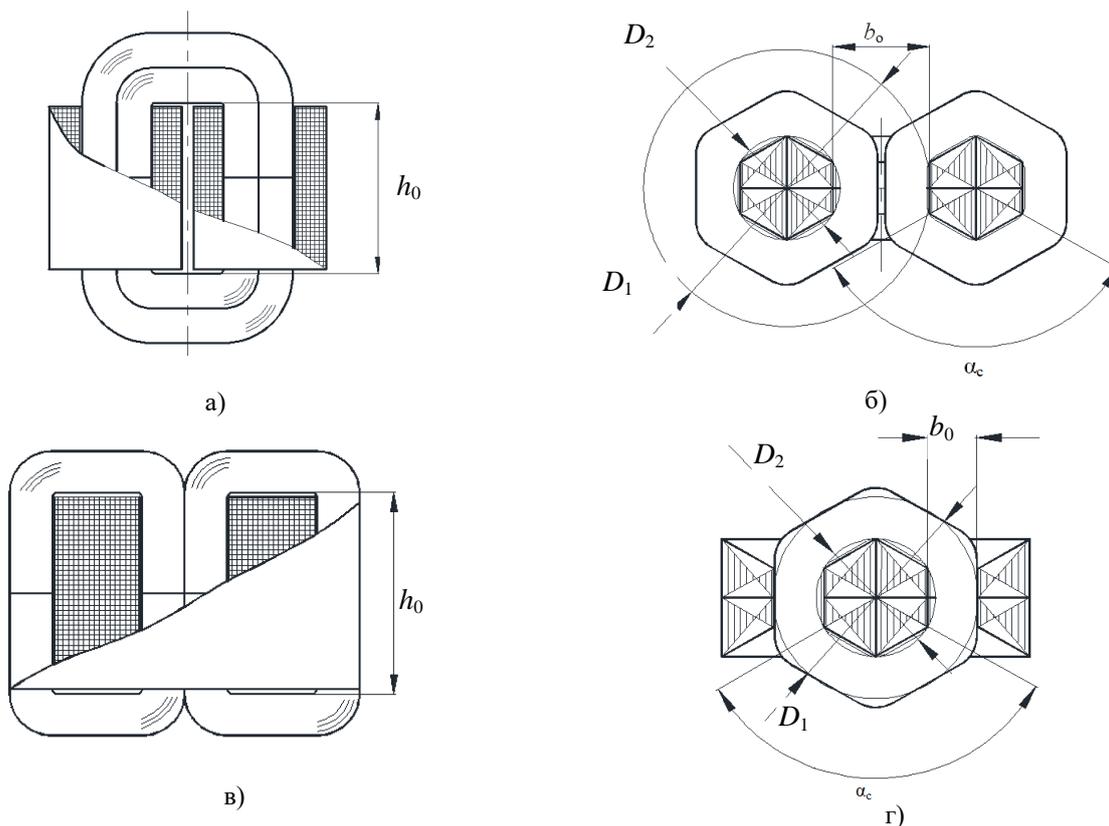


Рисунок 2 – Стержневая (а, б) и броневая (в, г) конструкции планарной электромагнитной системы с шестигранными сечениями стержней и обмоточных катушек витого магнитопровода

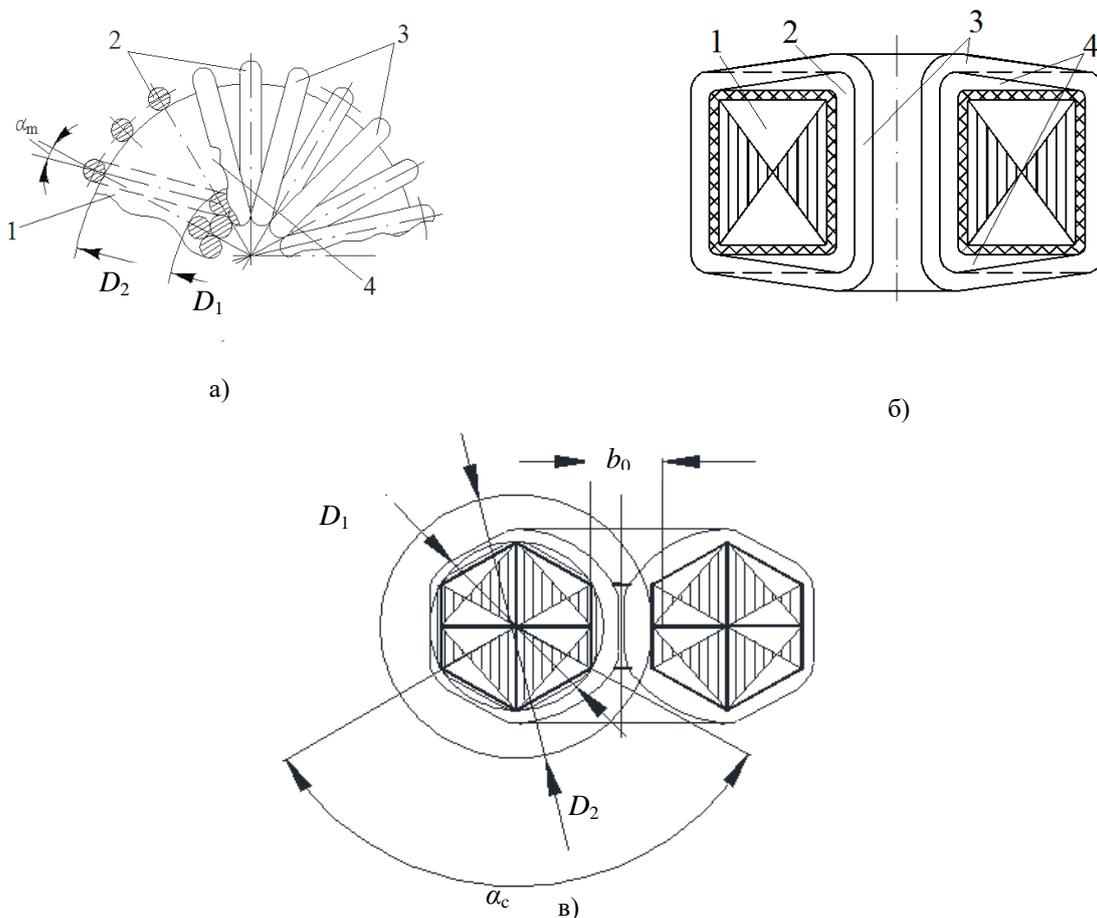


Рисунок 3 – Конструктивно – технологические особенности на фрагменте вида сверху (а) и поперечные разрезы тороидальной электромагнитной системы с четырёхгранным (б) и шестигранным (в) сечениями стержней: 1 – магнитопровод; 2 – витки первого (внутреннего) слоя; 3 – витки второго слоя; 4 – пустое пространство

Наличие полых пространств между витками (рис. 3, б) обусловлено различием величин диаметров D_n и D_b кольцевого магнитопровода и учитывается при расчетах трансформаторов увеличенными на 8...15 % значениями коэффициента укладки обмотки [1]. Указанная неплотность, а также смещения на угол α_m противоположных торцевых участков витков (рис. 3, а), повышают среднюю длину витка, потери и материалоемкость обмоток, а также ухудшают теплоотвод [1, 2].

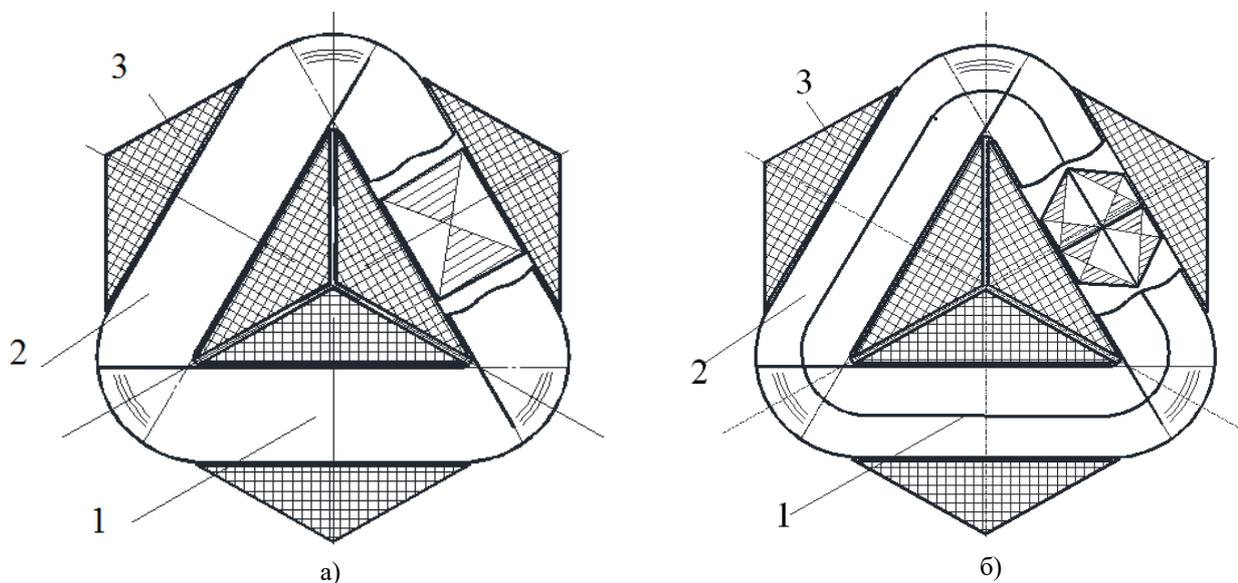


Рисунок 4 – Варианты конструктивных схем (в поперечном сечении) однофазной пространственной радиальной электромагнитной системы с витками трёхсекционными магнитопроводами с четырёхгранными (а) и шестигранными (б) поперечными сечениями: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

Варианты однофазной ЭМС с трехстержневым витым разрезным магнитопроводом отличаются четырёхгранными (рис. 4, а) и шестигранными (рис. 4, б) сечениями стержней и трехсекционной первичной (вторичной) обмоткой. Катушки обмоток ЭМС (рис. 4) выполняются на каркасах отдельно от магнитопроводов аналогично ЭМС (рис. 1, рис. 2) и лишены известных недостатков неплотности укладки и повышения длины витка тороидальной намотки [1, 2]. Все варианты представленных конструкций ЭМС (рис. 1–4) характеризуются «безотходной» технологией изготовления витков магнитопроводов. Шестигранные сечения магнитопроводов вариантов ЭМС (на рис. 2, рис. 3 в, рис. 4, б) обеспечиваются разделением прямоугольной полосы электротехнической стали на две одинаковые клиновидные части. При организации их серийного выпуска не требуется коренной перестройки существующего производства ИСУ.

Для решения задач практического использования представленных на рис. 2–4 новых технических решений активной части однофазных ИСУ необходимо обосновать их преимущества на основе разработки соответствующих математических моделей оптимизационного сравнительного анализа ЭМС при соблюдении принципа электромагнитной эквивалентности. Этому принципу со-

Исходя из возможности усовершенствования ИСУ изменением конфигурации ОК и положений в пространстве активных элементов [5, 6] тороидальная ЭМС (рис. 3) к виду (рис. 4) [Патент на винахід №100077. Україна. Магнітопровід індукційного статичного пристрою / Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Авдеева О.А., Садовий О.С., Циганов О.М. - № u201104987; заяв. 20.04.11; опуб. 25.11.11, Бюл. № 22. - 10 с. : ил.]

ответствуют идентичности мощности, электромагнитных нагрузок и напряжений обмоток, а также назначения и исполнения сравниваемых ИСУ. Указанный анализ может быть выполнен методом, заключающимся в представлении оптимизационной целевой функции $F_{цфi}$ в виде произведения двух сомножителей [7]

$$F_{цфi} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{нд}} \right)^3 F_{mi}^* . \quad (1)$$

Первый сомножитель в (1) содержит показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок $\Pi_{нд}$, определяющийся номинальной мощностью, средним значением амплитуды индукции в стержне, частотой сети, плотностями токов обмоток, энергетическим коэффициентом трансформатора и коэффициентами изменения напряжения под нагрузкой, а также предварительно заданным коэффициентом полезного действия трансформации энергии. Второй сомножитель в (1) является функцией коэффициента заполнения обмоточного окна проводящим материалом обмотки (класса напряжения) $K_{зо}$ и двух универсальных (идентичных и приемлемых для любой из существующих и возможных вариантов ЭМС) геометрических относительных управляемых переменных: отношения a_m диаметров D_1 и

D_2 расчетных окружностей магнитопровода и отношения λ_0 высоты h_0 и ширины b_0 обмоточного окна. При оптимизации некоторых ЭМС, например представленных на (рис.1), используется третья дополнительная геометрическая управляемая переменная центрального угла стержня α_c [7].

$$F_{\text{ш}} = f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c); \quad (2)$$

$$a_m = D_1 / D_2; \quad (3)$$

$$\lambda_0 = h_0 / b_0. \quad (4)$$

При анализе энергетической эффективности и оптимизации ИСУ по обобщенному критерию вводится электромагнитная относительная управляемая переменная соотношения удельных потерь и коэффициентов добавочных потерь обмотки и магнитопровода при заданных электромагнитных нагрузках [10].

Сравнительный анализ выполняется сопоставлением ПТУ в виде частных критериев оптимизации. Основными ПТУ являются экстремумы безразмерных составляющих полных целевых функций массы F_{mmmin}^* , стоимости F_{cmmin}^* и потерь активной мощности F_{pmmin}^* . Первый сомножитель (1) при сопоставлении ЭМС не используется и принимается, в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности, идентичным для сравниваемых ЭМС. Этот сомножитель может быть использован в поэтапной параметрической оптимизации ИСУ конкретного исполнения и назначения по частному или обобщенному критерию при заданных проектных ограничениях [7].

ВЫВОДЫ: 1. Существующие технические решения ЭМС однофазных трансформаторов не удовлетворяют в достаточной степени требованиям компактности и надежности электротехнических и радиоэлектронных устройств.

2. Усовершенствование и повышение ПТУ ИСУ при использовании традиционных способов и вариантов «безотходной» технологии производства магнитопроводов может быть достигнуто на основе структурной оптимизации ЭМС с нетиповыми конфигурациями и положением в пространстве стержней, ярем и катушек обмоток.

VARIANTS AND TRANSFORMATION OF STRUCTURES OF SINGLE PHASE TRANSFORMERS AND REACTORS WITH A WINDING MAGNETIC CORE

A. Sadovoy

Mykolaiv National Agrarian University

vul. Georgiy Gongadze, 9, Nikolaev, 54020, Ukraine. E-mail: Alekseysadovoy22@gmail.ua

Purpose. To substantiate the technical solutions included in the production and based on the analysis of the ways of reducing the mass indexes and the loss of active power of single-phase induction static devices with a twisted magnetic core. **Methodology.** For solving the tasks of the practical use of new technical decisions of active part of transformers, the ground of their advantages is needed. The method of optimizing comparative analysis at the observance of electromagnetic equivalence principle is chosen electromagnetic system (EMS). The identity of power, electromagnetic load and voltages of windings, and also installation and execution of compared EMS are corresponding to this principle. **Results.** The basic technical decisions of the electromagnetic systems of single-phased transformers are analysed. It is indicated that the existent twisted single-phased induction static devices do not satisfy in a sufficient degree to the requirements of compactness and reliability of electrical engineering and radio electronic devices. The improvement and increase of indexes of compactness of inductive static devices (ISDs) at the use of traditional methods and variants of "non-waste" technology of production of magnetic cores can be obtained on the basis of structural optimization of EMS with unconventional configurations and spatial position of rods, yokes and windings'

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальян Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектрики. – М.: Сов. Радио, 1981. – 720 с.
2. Расчет трансформаторов и реакторов малой мощности. / И. И. Белопольский, Е. И. Каретникова, Л. Г. Пикалова – М.: Энергия, 1983. – 399 с.
3. Flanagan W. M. Handbook of transformers desing and application. – Boston: Mc Graw Hill, 1993. – 232 p.
4. James H. Harlow / Electric power transformer engineering – United States of America – 2004 – 234 p.
5. Стародубцев Ю. Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. – М.: ИП Радио Софт, 2005. – 321 с.
6. Ставинский А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) // Электротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 6 – С. 33–38.
7. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, Е. А. Авдеева // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2013. – №11(87). – С. 74–818.
8. 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 // Электротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. – № 2 – Харків, 2012. – С. 16–21.
9. A. Stavinsky, O. Plakhtyr, R. Stavinsky. Increase of limited power and structural optimization of static induction divices with spatial magnetic cores // Proceedings of the 6th international conference on in devotional electromechanically and electrical systems, UEES – 2004. – Vol. 2. – p.411 – 414.
10. Метод сравнительного анализа статических электромагнитных систем, отличающихся структурой и конфигурацией элементов / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – №14 (90). – С. 53 – 60.

coils. **Originality.** Structural transformation of single-phased induction static devices with twisted magnetic core is considered for the first time with the purpose to reduce the resource-demanding and increase of reliability. Transformation of structures is based on using the combined twisted elements of trapezium-shaped section of hexahedral-formed sections of rods. Thus the durability of isolation increases depending on the change of bend of coils' turns in angular zones from 90° to 120° , and also the material capacity of windings decreases. **Practical value.** The offered decisions and method of structural optimization will give an opportunity to reduce the mass-dimension indexes and active-power losses of ISDs with twisted magnetic core for the systems of electrical equipment of different technique. References - 9, figures - 4.

Key words: single-phased transformer, twisted magnetic core, mass-costing and energy indexes, controlled geometric variables.

REFERENCES

1. Bal'yan, R.H., (1981), "Transformatory dlya radioelektriki", Moskva, Sov. Radio, 720 p.
2. Belopol'skij, I.I., Karetnikova, E.I., Pikalova, L.G., (1983), "Raschet transformatorov i reaktorov maloj moshchnosti", Moskva, Energiya, 399 p.
3. Flanagan, W.M., (1993), "Handbook of transformers desing and application", Boston, Mc Graw Hill, 232 p.
4. James H. Harlow, (2004), "Electric power transformer engineering", United States of America, 234 p.
5. Starodubcev, Y.N., (2005), "Teoriya i raschet transformatorov maloj moshchnosti", Moskva, IP Radio Soft, 321 p.
6. Stavinskij, A.A., (2011), "Genezis struktur i predposylki usovershenstvovaniya transformatorov i reaktorov preobrazovaniem konturov ehlektromagnitnyh sistem (sistemy s shihtovannymi i vitymi magnitoprovodami)", Elektrotehnika i elektromekhanika, №6, pp. 33–38.
7. Stavinskij, A.A., Stavinskij, R.A., Avdeeva, E.A., (2013), "Formirovanie struktur staticheskikh ehlektromagnitnyh sistem na osnove netradicionnyh obrazuyushchih konturov" Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi", №11(87), pp. 74–818.
8. Blincov, V. S. Stavinskij, R. A., Avdeeva, E. A., Sadovoj, A. S., (2012) "Transformatory dlya vstraivaniya v obolochki ogranichennoho diametra ob'ektov special'noj tekhniki i postanovka zadachi ih usovershenstvovaniya, Elektrotehnika i elektro-mekhanika, naukovopraktichnij zhurnal, № 2, Harkiv, pp. 16–21.
9. Stavinsky, A., Plakhtyr, O., Stavinsky, R., (2004), "Increase of limited power and structural optimization of static induction divices with spatial magnetic cores", Proceedings of the 6th international conference on indovenationalelectromechanical and electrical systems, UEES, Vol. 2., pp.411 – 414.
10. Stavinskij, A.A., Stavinskij, R.A., Avdeeva, E.A., (2014), "Metod sravnitel'nogo analiza stati-cheskikh ehlektromagnitnyh sistem, otlichayushchihysya strukturoj i konfiguracij ehlementov", Elektro-tekhnichni ta komp'yuterni sistemi, №14 (90), pp. 53 – 60.

Стаття надійшла 10.03.2017.