

УДК 621.3.013

**О.А. ГЕЛЯРОВСКАЯ**, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков  
**В.С. ЛУПИКОВ**, д-р техн. наук., проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков  
**И.С. ВАРШАМОВА**, м.н.с., НТУ "ХПИ", Харьков  
**Е.Г. БОЛЮХ**, н.с., НТУ "ХПИ", Харьков  
**Н.В. КРЮКОВА**, канд. техн. наук, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков  
**К.А. САВЧЕНКО**, студент, НТУ "ХПИ", Харьков  
**Ю.Д. РУДАС**, с.н.с., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ**

З використанням комп'ютерного моделювання проведено аналіз зовнішнього магнітного поля автоматичного вимикача з двома компенсаційними обмотками. Обґрунтовано метод оптимізації їх параметрів.

С использованием компьютерного моделирования проведен анализ внешнего магнитного поля автоматического выключателя с двумя компенсационными обмотками. Обоснован метод оптимизации их параметров.

**Введение.** Проблемы экологической безопасности и электромагнитной совместимости трехфазного электрооборудования (ЭО) являются актуальными и в настоящее время в развитых странах мира проводятся работы по снижению внешнего магнитного поля (ВМП) ЭО. Источниками ВМП ЭО в основном являются проводники с током и намагнитченные ферромагнитные массы магнитных систем. Идеи снижения ВМП проводников с токами и намагнитченных ферромагнитных масс связаны с симметрированием, т.е. симметричным расположением проводников с противоположно направленными токами и намагнитченных объемов с противоположным расположением полюсов [1]. В работе [2] приводится пример снижения ВМП системы трехфазных токов, протекающих в системе трех проводников, расположенных в одной плоскости, с помощью компенсационных контурных обмоток (КО), повторяющих геометрию контуров системы трехфазных проводников. Эта идея реализована в автоматическом выключателе (АВ) серии АЗ700, КО которого выполнены отдельным блоком приставкой в виде двух катушек с ферромагнитными сердечниками. Катушки вклю-

чены последовательно к выводам крайних фаз, причем направления токов КО и контуров силовой цепи АВ и их векторы площадей противоположны. Экспериментально установлено, что при этом ВМП АВ на расстоянии от него 0,3 м (в соответствии стандартом [3]) удастся существенно снизить, а по магнитному моменту – примерно в 100 раз [4]. Однако при этом возникает вопрос об оптимизации КО по показателям энергопотребления. В известной научной литературе такие данные отсутствуют. В этой связи представляет интерес математическое моделирование ВМП АВ с КО, которое для краткости далее названо компенсированным полем.

**Цель работы** – анализ распределения компенсированного переменного ВМП АВ и поиск путей минимизации энергетических показателей ЭО.

**Теоретические положения.** При моделировании ВМП трехфазного ЭО принимаются следующие допущения относительно режимов его работы и геометрии источников: режимы работы ЭО установившиеся; токи проводников силовой цепи изменяются по синусоидальному закону на частоте сети 50 Гц; реальные проводники силовой цепи ЭО с объемным распределением токов представляются в виде тонких линий, повторяющих геометрию осей их линейных участков; нагрузки фаз ЭО одинаковые (симметричные фазы); не учитывается влияние эффекта близости на распределение тока в проводниках [5].

С учетом принятых допущений переменное ВМП характеризуется как квазистационарное магнитное поле и определяется суперпозицией полей отдельных источников в произвольной точке пространства  $P$ .

В данной работе моделируется переменное ВМП трехполюсного автоматического выключателя серии АЗ700. Источниками его ВМП являются токопроводы фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и развилки кабелей на входе и выходе выключателя, образующие два контура, лежащих в одной плоскости. Первый контур образован проводниками фаз  $A$  и  $B$  (контур  $A$ ), второй – проводниками фаз  $C$  и  $B$  (контур  $C$ ). В качестве основного параметра ВМП используется напряженность, характеризующаяся пространственным вектором  $\mathbf{H}(t)$ , направление и величина которого в каждой точке пространства периодически меняются в зависимости от времени  $t$ . Годограф вектора напряженности в каждой точке представляет собой эллипс, параметры которого определяются по значениям амплитуд компонент двух пространственных векторов, изменяющихся во времени по законам синуса и косинуса [6], а наибольшая полуось определяет максимум напряженности. Величина максимума поля определяет уровень как исходного ВМП АВ, так и после компенсации,

т.е. компенсированного магнитного поля.

*Расчетные соотношения.* Согласно принципу суперпозиции, поле контура равно сумме полей его отрезков, а поле ЭО – сумме полей контуров  $A$  и  $C$ . Ток отрезка контура изменяется по синусоидальному закону и в общем виде описывается гармонической функцией

$$i(t) = I \sin(\omega t - \varphi), \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота сети;  $\varphi$  – фазовый сдвиг тока;  $t$  время.

Мгновенные значения ортогональных компонент вектора напряженности в прямоугольной системе координат определяются известными соотношениями [7]:

$$H_x(t) = i(t) \frac{1}{4\pi} \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{r_{p1}^2 r_{21}} [(y_2 - y_1)(z - z_1) - (z_2 - z_1)(y - y_1)], \quad (2)$$

$$H_y(t) = i(t) \frac{1}{4\pi} \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{r_{p1}^2 r_{21}} [(z_2 - z_1)(x - x_1) - (x_2 - x_1)(z - z_1)],$$

$$H_z(t) = i(t) \frac{1}{4\pi} \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{r_{p1}^2 r_{21}} [(x_2 - x_1)(y - y_1) - (y_2 - y_1)(x - x_1)],$$

где  $x, y, z$  – координаты точки наблюдения;  $x_1, y_1, z_1$  – координаты точки начала отрезка контура с током;  $x_2, y_2, z_2$  – координаты точки конца отрезка;  $r$  – радиус-вектор точки наблюдения;  $r_{p1}$  – длина вектора, проведенного из начала отрезка (индекс 1) в точку наблюдения (индекс  $P$ );  $r_{p2}$  – длина вектора, проведенного из конца отрезка (индекс 2) в точку наблюдения;  $r_{21}$  – длина вектора, проведенного из начала в конец отрезка;  $\cos \alpha_1, \cos \alpha_2$  – косинусы углов между векторами  $r_{21}, r_{p1}$  и  $r_{21}, r_{p2}$  соответственно:

$$\cos \alpha_1 = (r_{21} r_{p1})^{-1} [(x_2 - x_1)(x - x_1) + (y_2 - y_1)(y - y_1) + (z_2 - z_1)(z - z_1)];$$

$$\cos \alpha_2 = (r_{21} r_{p1})^{-1} [(x_2 - x_1)(x - x_2) + (y_2 - y_1)(y - y_2) + (z_2 - z_1)(z - z_2)];$$

$$r_{p1} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}; \quad r_{p2} = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2};$$

$$r_{21} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \dots$$

Функции токов фаз  $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$  представляют собой синусоиды с равными амплитудами  $I_A = I_B = I_C = I$ , а фазы сдвинуты на  $2\pi$  рад. Общепринято отсчет сдвигов фаз токов вести относительно начала тока фазы  $A$ . При использовании общего соотношения (1) для токов

контуров  $A$  и  $C$  фазовые сдвиги равны  $\varphi_A = 0$  и  $\varphi_C = 4\pi/3$ . С учетом этого мгновенные значения  $H_{Au}(t), H_{Cu}(t)$  компонент напряженности поля вдоль пространственного направления  $u = x, y, z$  для контуров  $A$  и  $C$  приобретают вид:

$$H_{Au}(t) = H_{Au} \sin(\omega t), \quad H_{Cu}(t) = H_{Cu} \sin(\omega t - 4\pi/3), \quad (3)$$

где  $H_{Au}, H_{Cu}$  – амплитуды пространственных компонент векторов  $\mathbf{H}_A$  и  $\mathbf{H}_C$  напряженности поля контуров  $A$  и  $C$ .

Входящие в (3) амплитуды определяются суммированием полей составляющих их отрезков и рассчитываются с учетом (2):

$$H_{Au} = \sum_{a=1}^A H_{au}; \quad H_{Cu} = \sum_{c=1}^C H_{cu} \quad (u = x, y, z), \quad (4)$$

где  $H_{au}, H_{cu}$  – амплитуды компонент напряженности поля, создаваемого отрезками с номерами  $a$  и  $c$  контуров  $A$  и  $C$ .

Соотношения (4) используются для определения максимума напряженности ВМП на основе подхода, примененного для определения максимума дипольного магнитного момента трехфазного ЭО [6]. Компонента вдоль пространственного направления  $u$  суммарного поля токов фаз с учетом (3) представляется в виде

$$H_u(t) = H_{Au} \sin(\omega t) + H_{Cu} \sin(\omega t - 4\pi/3) = H_{su} \sin(\omega t) + H_{cu} \cos(\omega t), \quad (5)$$

где  $H_{su}, H_{cu}$  – амплитуды синусных и косинусных составляющих компоненты вектора напряженности переменного ВМП вдоль оси  $u$ ,

$$H_{su} = H_{Au} + H_{Cu} \cos(4\pi/3), \quad H_{cu} = -H_{Cu} \sin(4\pi/3). \quad (6)$$

Соотношение (5) представляет собой уравнение эллипса, как проекции годографа вектора напряженности в точке наблюдения. С учетом (6) определяются амплитуды векторов напряженности, пульсирующих в соответствии с законами синуса и косинуса, и косинус угла между ними:

$$H_s = \sqrt{H_{sx}^2 + H_{sy}^2 + H_{sz}^2}, \quad H_c = \sqrt{H_{cx}^2 + H_{cy}^2 + H_{cz}^2}; \quad (7)$$

$$\cos \alpha = \frac{H_{sx}H_{cx} + H_{sy}H_{cy} + H_{sz}H_{cz}}{H_s H_c}.$$

Используя разложение каждого из двух пульсирующих векторов (7) на прямо и обратно вращающиеся составляющие получено следующее соотношение для мгновенного максимума  $H_{\max}$  поля:

$$H_{\max} = 0,5 \left( \sqrt{H_s^2 + 2H_s H_c \sin \alpha + H_c^2} + \sqrt{H_s^2 - 2H_s H_c \sin \alpha + H_c^2} \right). \quad (8)$$

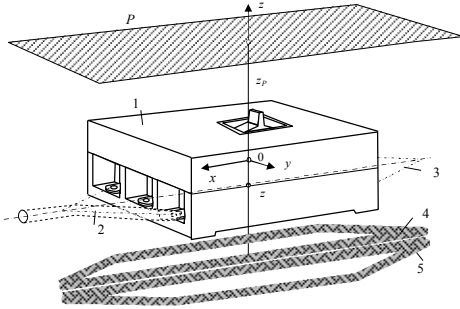


Рис. 1. Схема расположения плоскости точек наблюдения относительно автоматического выключателя с компенсационными обмотками.

показаны пунктиром); 4, 5 – компенсационные обмотки;  $P$  – плоскость точек наблюдения;  $z, z_p, z_k$  – расстояния от начала координат до плоскостей соответственно токопроводов силовой цепи АВ, плоскостей точек наблюдения  $P$  и КО.

Компенсационные обмотки состоит из двух плоских обмоток КО<sub>A</sub> и КО<sub>C</sub>, конфигурация которых повторяет конфигурацию токопроводов контуров  $A$  и  $C$ . Обмотки расположены под АВ в плоскости, параллельной плоскости токопроводов его силовой цепи и удаленной от нее на расстояние, немного больше толщины обмотки.

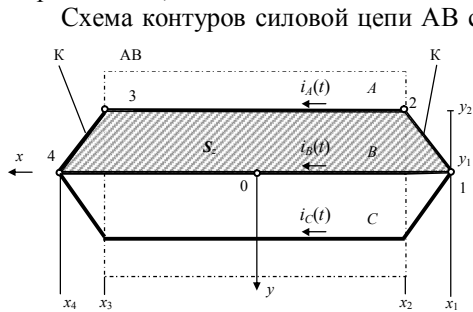


Рис. 2. Схема контуров АВ.

входах и выходах приведена на рис. 2. На схеме использовано общепринятое направление токов фаз  $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ . Точки вершин контура  $A$  с развилками кабеля  $K$ , имеющего форму трапеции с площадью  $S_2$ , пронумерованы 1 – 4. Контур  $C$  расположен симметрично оси  $x$ . Координаты по оси  $x$  точек контуров отмечены индексами соответственно для точек контуров  $x_1, x_2, x_3, x_4$ ; по оси  $y - y_1, y_2$ . По оси  $z$  все точки контуров имеют одинаковую координату  $z_1$ , а точки плоскости  $P - z_p$ .

При моделировании минимальное расстояние до точек плоскости наблюдения  $P$  выбрано в соответствии со стандартом [3] равным  $z_p =$

Исходные данные для моделирования. В качестве объекта математического моделирования использован автоматический выключатель серии АЗ700 на номинальный ток 400 А с КО, схема которого показана на рис. 1. Обозначения на схеме: 0 – геометрический центр АВ, начало прямоугольной системы координат  $x, y, z$ ; 1 – АВ; 2, 3 – развилки кабелей (оси проводников выводов фаз

удаляем от нее на расстояние, немного больше толщины обмотки. Схема контуров силовой цепи АВ с выводами кабелей  $K$  на входах и выходах приведена на рис. 2. На схеме использовано общепринятое направление токов фаз  $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ . Точки вершин контура  $A$  с развилками кабеля  $K$ , имеющего форму трапеции с площадью  $S_2$ , пронумерованы 1 – 4. Контур  $C$  расположен симметрично оси  $x$ . Координаты по оси  $x$  точек контуров

0,3 м. Координаты точек контура  $A$ : 1  $(-0,223; 0; -0,11)$ ; 2  $(-0,123; -0,5; -0,11)$ ; 3  $(0,123; -0,5; -0,11)$ ; 4  $(0,223; 0; -0,11)$ . Для контура  $C$  координаты точек отличаются знаком только для  $y$ . Координаты точек контуров КО при моделировании приняты равными  $-0, 13$ .

Расчет максимальной напряженности ВМП проведен по соотношению (8) с использованием математической системы Maple для трех вариантов: поле контура  $A$ ; поле контура  $C$ ; суммарное поле АВ на поверхности точек наблюдения  $P$ . Ампервитки обмоток равны 400 А.

**Результаты моделирования.** Результаты расчета каждого варианта представлялись в виде поверхности уровня поля и приведены на рис. 3: а – расположение плоскости точек наблюдения над контурами токопроводов и КО; б, в – поверхности уровня максимального поля  $H_{\max}$  для токов контуров  $A, C$ ; г – поверхность уровня  $H_{\max}$  для АВ; д, е, ж – такие же поверхности для токов КО фаз  $A, C$  и суммарного поля.

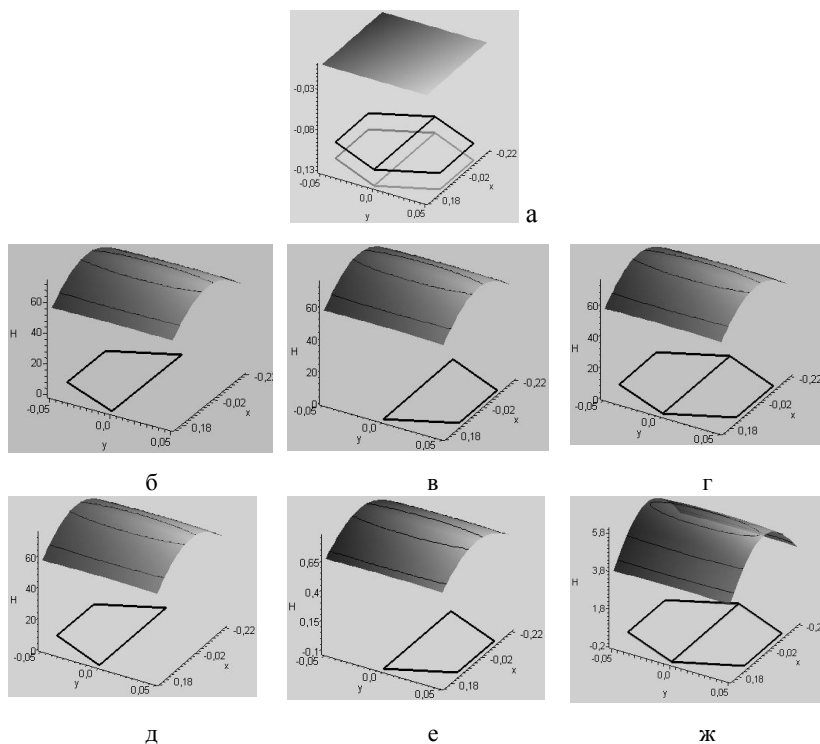


Рис. 3. Расчетные поверхности уровня напряженности поля.

**Оценка распределения поля.** Анализ результатов моделирования показывает, что распределения мгновенных максимумов поля  $H_{\max}$  для всех вариантов оказались одинаковыми. Это можно объяснить особым расположением мгновенных максимумов поля: на фазовой плоскости направления максимумов напряженности поля от контуров  $A$  и  $C$  образуют угол в  $-4\pi/3$  рад. С учетом геометрической симметрии контуров максимумы векторов напряженности полей контуров равны по величине, а их геометрическая сумма дает такую же величину и для суммарного поля (рис. 3, б-г). В случае пофазной компенсации ВМП [2] компенсирующие поля создаются двумя КО, конфигурация которых повторяет конфигурацию контуров  $A$  и  $C$  силовой цепи АВ, а токи в них направлены противоположно токам контуров силовой цепи. Структура ВМП АВ и поля КО при этом совпадают, отличаются только знаками, а максимумы поля несколько отличаются из-за различия расстояний от плоскости  $P$  до плоскостей контуров АВ и КО (рис. 3, д-ж).

Векторные диаграммы, построенные на комплексной плоскости, приведены на рис. 4. Максимальные длины векторов отмечены индексом  $m$  и соответствуют максимумам напряженности ВМП. На рис. 4,а показано взаимное расположение векторов напряженности поля контуров с токами фаз  $A$ ,  $C$  и суммарного

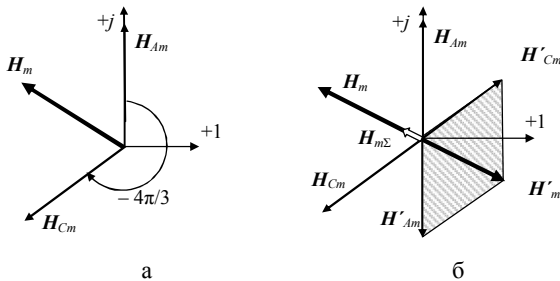


Рис. 4. Векторные диаграммы для точки максимума поля.

поля; на рис. 4,б – взаимное расположение векторов напряженности поля КО фаз  $A$  и  $C$  ( $H'_A$  и  $H'_C$ ), поля КО  $H'_m$  и компенсированного (суммарного) поля  $H_{m\Sigma}$ . Для этих векторов справедливы соотношения:

$$H_m = H_{Am} + H_{Cm}; \quad H'_{Am} = -H_{Am}; \quad H'_{Cm} = -H_{Cm}; \quad (9)$$

$$H'_m = H'_{Am} + H'_{Cm}; \quad H_{m\Sigma} = H_m + H'_m.$$

Эффективность компенсации ВМП на рассматриваемой поверхности точек наблюдения определяется как отношение максимальных величин напряженности исходного и компенсированного поля и для рассматриваемого случая расчетная величина равна 12 единиц.

**Оптимальная компенсация поля двумя обмотками.** Как видно на диаграмме рис. 4,б, расположение векторов напряженности КО обеспечи-

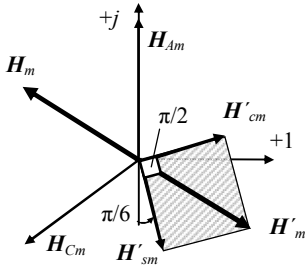


Рис. 5. Ортогональное разложение вектора напряженности компенсирующего поля.

дает "избыточную" компенсацию поля. При пофазной компенсации полей контуров силовой цепи КО используются и для частичной взаимной компенсации полей, а именно, проекция одного вектора на другой имеет составляющую противоположного направления. Этот недостаток можно преодолеть, если результирующий вектор напряженности поля КО формировать из двух ортогональных составляющих, косинусную ( $H'_{cm}$ ) и синусную ( $H'_{sm}$ ). Для этого компенсационные обмотки необходимо запитать токами, сдвиг фаз между которыми равен  $\pi/2$  (рис. 5), а фаза тока синусной составляющей сдвинута на угол  $\pi/6$  относительно тока фазы  $A$ . Достоинством такого ортогонального разложения является то, что ампервитки КО уменьшаются в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с известным исполнением КО [2].

Результаты моделирования поля компенсационных обмоток с токами с ортогональными составляющими токов приведены на рис. 6: а, б – поле КО соответственно с синусоидальным и косинусоидальным токами; в – суммарное поле КО; г – компенсирующее поле.

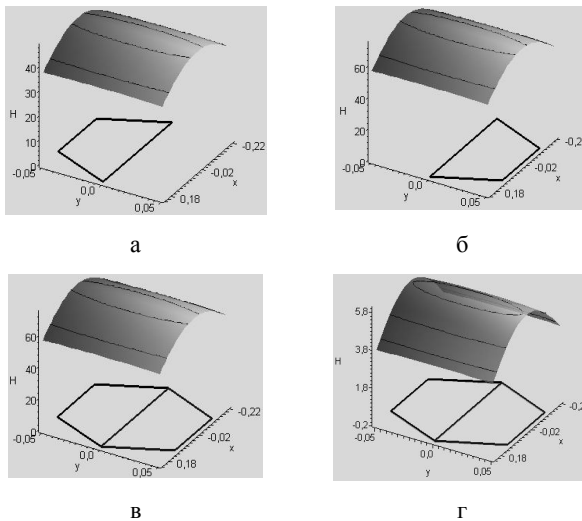


Рис. 6. Поле компенсационных обмоток.

Эти результаты подтвердили, что вариант компенсационных обмоток с ортогональными фазами токов является оптимальным и обеспечивает такую же эффективность компенсации ВМП, что и вариант с обмотками пофазной компенсации.

**Выводы.** 1. Проведено математическое моделирование внешнего магнитного поля трехфазного автоматического выключателя серии А3700. В качестве основного параметра использована величина максимума переменного магнитного поля. Результаты моделирования представлены в виде поверхности уровня для максимальных мгновенных величин напряженности поля на плоскости, удаленной на стандартное расстояние от поверхности выключателя.

2. Установлено, что недостатком известного способа компенсации внешнего магнитного поля с помощью компенсационных обмоток, повторяющих геометрию токовых контуров двух фаз силовой цепи выключателя, является частичная взаимная компенсация полей обмоток.

3. Теоретически обоснован метод компенсации внешнего магнитного поля с помощью двух компенсационных обмоток, повторяющих геометрию токовых контуров двух фаз силовой цепи выключателя, ампервитки которых уменьшены в 1,4 раза, токи изменяются по законам синуса и косинуса, а фаза синусного тока сдвинута на  $\pi/6$  эл. град. относительно тока фазы А выключателя.

**Список литературы:** 1. Лушков В.С., Гелярговская О.А., Крюкова Н.В. Проблема компенсации внешнего магнитного поля электрооборудования с позиций теории симметрии // Электромашинобудовання та електрообладнання. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: Техніка. – 2004. – № 63. – С. 88-91. 2. Salinas E. Field Mitigation from Secondary Substations / Salinas E. // CARIED 2003. 17th International Conference on Electricity Distribution. – Belgium – 15 May 2003. – 32 p. 3. ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. Введ. 01.01.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с. 4. Король Е.Г., Лушков В.С., Серета А.Г. и др. Компенсация вектора переменного магнитного момента электрооборудования с помощью электромагнита с составным ферромагнитным сердечником // Технічна електродинаміка. – Київ: Ін-т електродинаміки, 2011. – №4. – С. 20-25. 5. Лушков В.С. Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплексних пристроїв. – Автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.09.01 / Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків, 2003. – 36 с. 6. Лушков В.С., Крюкова Н.В., Гелярговская О.А. и др. Анализ магнитного момента токов трехфазного источника поля // Електротехніка і електромеханіка – Харків: НТУ "ХПИ", 2006. – № 4. – С. 47-51. 7. Монтомери Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 359 с.

*Надійшла до редколегії 20.09.2011.  
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*