

КОМПЕНСАЦИЯ ВЕКТОРА ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТА С СОСТАВНЫМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Е.Г.Король¹, В.С.Луников², докт.техн.наук, А.Г.Середа³, канд.техн.наук, Ю.Д.Рудас⁴
^{1,2,3} – Национальный технический университет "ХПИ",
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина,
⁴ – Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина.

Приведены результаты исследований по компенсации вектора переменного магнитного момента электрооборудования с помощью электромагнита-компенсатора, состоящего из одной катушки и составного ферромагнитного сердечника. Дано описание оригинальной конструкции электромагнита-компенсатора с составным сердечником, две части которого располагаются под прямым углом. Предложен вариант использования пары электромагнитов-компенсаторов при компенсации переменного магнитного момента трехфазного автоматического выключателя. Библ. 12, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: вектор переменного магнитного момента, электромагнит-компенсатор, ферромагнитный сердечник.

Введение. Современные средства управления объектами энергетики выполняются преимущественно с использованием микропроцессорных и микроэлектронных элементов (ММЭ). К таким средствам относятся системы релейной защиты и автоматики (РЗА), автоматические системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) и коммерческого контроля энергии (АС КУЭ) и другие. Применение ММЭ позволяет существенно расширить функциональные возможности перечисленных систем, повысить качество контроля, делает доступным и надежным энергоснабжение [8]. Разумное внедрение таких систем является необходимым условием развития и модернизации современных электростанций и распределительных подстанций энергетики Украины, и, по авторитетному мнению академика НАН Украины Б.С.Стогния, способствует интеграции энергетической системы Украины в Европейскую энергетическую систему [8]. При этом следует заметить, что стойкость к электромагнитным помехам таких средств контроля и управления значительно ниже, чем в традиционных электромеханических устройствах, например, РЗА. Новейшая аппаратура имеет достаточно "жесткие" ограничения в части электромагнитной совместимости [1,9], которые определяются исходя из возможности надежного функционирования не столько аппаратуры в целом, сколько комплектующих ММЭ в местах их локализации в объеме систем управления и защиты. В этой связи актуальной является задача снижения собственного магнитного поля электрооборудования объектов энергетики, в частности, автоматических выключателей. Особенностью современного автоматического выключателя является то, что он представляет собой интегрированную конструкцию, в состав которой, наряду с традиционными элементами электромеханических (силовых) элементов, входят электромагнитные и полупроводниковые расцепители [6], чувствительные к магнитному полю частоты сети. При этом возникают определенные сложности с реализацией в их объеме параметрических систем автоматической компенсации магнитного момента [5,7,10], являющихся достаточно сложными устройствами, элементы которых трудно выполнить без существенного изменения всей идеологии проектирования выключателя. Для преодоления этого недостатка предложено достаточно простое и небольшое по габаритам устройство для компенсации магнитного момента [4,12].

Цель работы – теоретические и экспериментальные исследования компактного электромагнита-компенсатора магнитного поля.

Схема конструкции электромагнита-компенсатора. Новизна конструкции компактного электромагнита-компенсатора связана с реализацией принципа намагничивания полем одной катушки ферромагнитных частей сердечника, располагаемых ортогонально его оси. Комбинацией намагниченностей ортогонально расположенных частей сердечника обеспечивается подбор компонент вектора компенсирующего магнитного момента. На рис. 1 показана схема конструкции электромагнита, содержащего составной сердечник из двух ортогонально расположенных элементов [12]. Элементы

компенсатора: катушка 1, сердечник 2 из ферромагнитного материала, на торце 3 которого установлен один дополнительный ферромагнитный элемент в виде стержня 4. Ось стержня 5 пересекает ось 6 сердечника 2 в точке 7, причем оси 5 и 6 ортогональны, а центр 8 стержня 4 удален от точки 7. Поперечное сечение в точке 7 разбивает стержень 4 на два участка 9 и 10, намагничивание которых происходит противоположно направленными магнитными потоками Φ_9 и Φ_{10} , образующимися разветвлением рабочего потока Φ катушки 1.

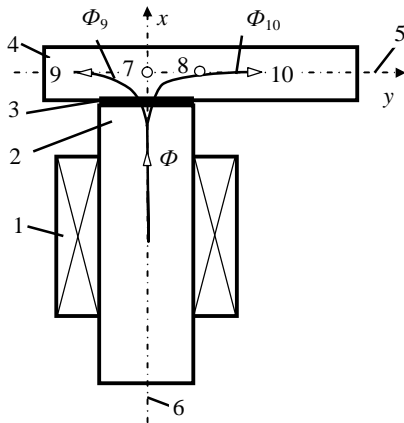


Рис. 1

Вектор магнитного момента M_x катушки 1 с сердечником 2 направлен по оси x (рис. 2). Обе его составляющие, создаваемые током катушки и намагниченностью сердечника 2, совпадают по направлению и суммируются арифметически. Вектор магнитного момента M_y , обусловленный намагниченностью стержня 4, направлен по оси y и определяется геометрическим суммированием магнитных моментов его элементарных объемов. Так как центр 8 стержня 4 располагается асимметрично относительно оси намагничивающего поля катушки, суммарная намагниченность стержня 4 отлична от нуля. Вектор намагниченности определяется намагниченностью большего участка 10 стержня, имеющего большую длину и объем по сравнению с участком 9. В результате вектор намагниченности (магнитный момент) стержня направлен по его оси y в сторону смещения его центра от оси симметрии. Вектор магнитного момента M электромагнита с составным сердечником равен геометрической сумме двух составляющих M_x и M_y . В результате суммарный вектор магнитного момента повернут в пространстве относительно оси намагничивающей катушки 1. Изменением направления тока в катушке 1 и направления и величины смещения центра 8 стержня 4 обеспечивается регулирование этого угла в плоскости xu в пределах $0 - 360$ град.

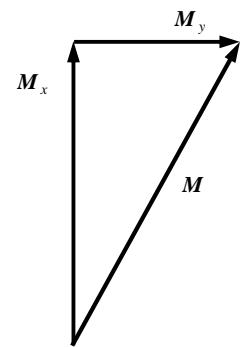


Рис. 2

Описание физической модели. Физическая модель устройства, в состав которого входят исследуемые электромагниты-компенсаторы с составными сердечниками, состоит из двух основных элементов: источника исходного магнитного момента – автоматического выключателя 1 серии А3700 и источника компенсирующего магнитного момента – блока компенсации 2 с двумя электромагнитами-компенсаторами (рис. 3).

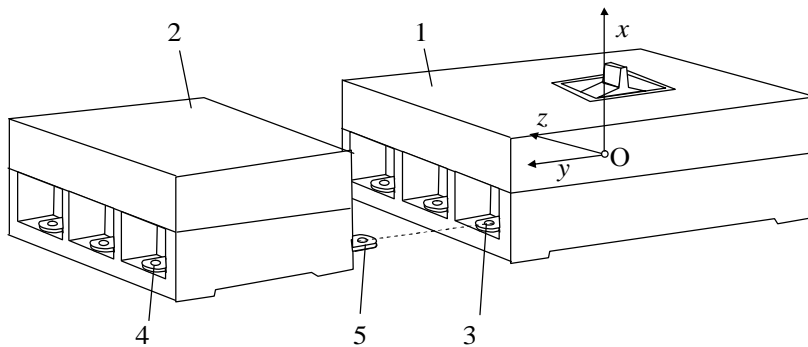


Рис. 3

и источника компенсирующего магнитного момента – блока компенсации 2 с двумя электромагнитами-компенсаторами (рис. 3). Выводы автоматического выключателя 3 и блока компенсации 4 выполнены конструктивно одинаковыми, а вторые выводы 5 блока компенсации выполнены выступающими на расстояние, достаточное для соединения с выводами 3 автоматического выключателя. Выводы двух катушек блока компенсации подсоединяются к выводам крайних фаз автоматического выключателя, а к средней подключается вывод проходной шины блока компенсации.

Блок компенсации (рис. 4, а) выполнен из двух одинаковых по конструкции электромагнитов-компенсаторов 1, подключаемых к выводам крайних фаз силовой цепи автоматического выключателя, и средней проходной шины 2. Выводы катушек электромагнитов-компенсаторов и средней проходной шины блока компенсации выполнены из медной шины такого же сечения, что и выводы автоматического выключателя. На рис. 3 показаны также направления осей координат, принятые при исследовании магнитного момента физической модели. За начало системы координат принят центр автоматического выключателя.

Электромагнит-компенсатор 1 имеет витую катушку 3 (рис. 4, б) и ферромагнитный сердечник 4 (рис. 4, в). Элементы составного ферромагнитного сердечника выполнены из пластин электро-

технической стали, имеют прямоугольные сечения и могут перемещаться вдоль ортогональных осей, сердечник 4 – вдоль оси катушки x , а стержень 5 – по торцевой поверхности сердечника 4 вдоль оси y . На рис. 4, в показаны также вспомогательные элементы 6 для крепления пластин элементов шихтованного сердечника, а на рис. 4, а – элементы 7 для фиксации элементов при стендовой настройке электромагнита-компенсатора.

Схема подключения катушек блока компенсации к выводам фаз автоматического выключателя показана на рис. 5. На схеме использованы обозначения: АВ – автоматический выключатель; БК – блок компенсации; ЭК – электромагнит-компенсатор; К – катушка; ФС – ферромагнитный сердечник; 3 – условная закоротка, соединяющая выводы фаз шинопроводов при расчете магнитного момента; A, B, C – фазы питания; I – действующее значение тока фазы; S_x – площадь контура, образованного шинами фаз A и

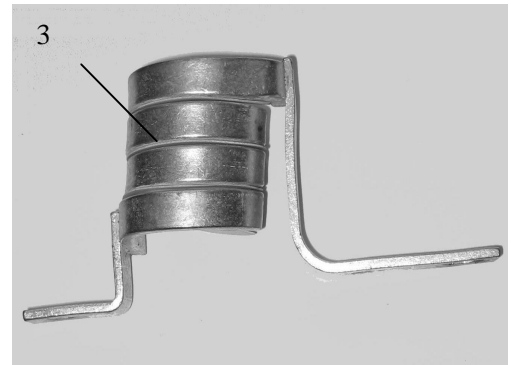
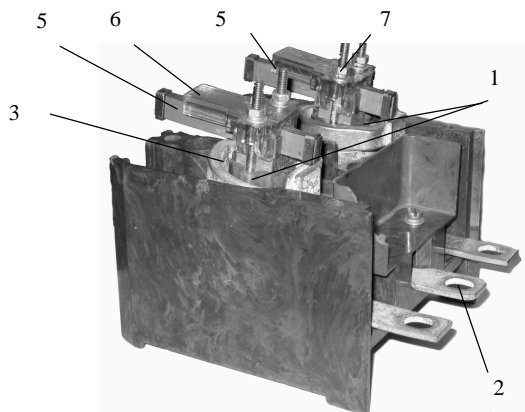


Рис. 4, а, б

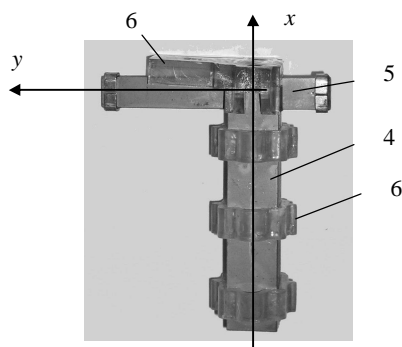


Рис. 4, в

электромагнита-компенсатора в сторону уменьшения при перемещении сердечника от центра катушки, $k=1,2$;

– коэффициент λ отношения длины к диаметру сердечника, $\lambda=4$;

– относительная магнитная проницаемость μ электротехнической стали сердечника, $\mu=1000$.

Расчет размеров стержня выполнен приближенно. В качестве допущений принималось, что магнитные моменты ферромагнитного сердечника и стержня пропорциональны их объемам.

Методика измерений. При проведении экспериментальных исследований электромагнита-компенсатора в составе физической модели использована методика для измерений переменного магнитного момента источника поля на час-

те АВ автоматического выключателя и блока компенсации.

Число витков катушек одинаково и равно четырем. Оно получено расчетным путем на основе методики, предложенной в [3]. Исходными данными для расчета являются:

– величина компоненты вектора магнитного момента, равная магнитному моменту контура, образованного шинами фаз A и B автоматического выключателя и блока компенсации. Действующее значение магнитного момента M_x электромагнита компенсатора выбрано с запасом и определяется произведением действующего значения тока I фазы, площади контура S_x (на рис. 5 этот контур заштрихован) и коэффициента запаса k , $M_x = 34 \text{ A}\cdot\text{м}^2$;

– коэффициент k запаса по магнитному моменту, учитывающий возможность регулирования магнитного момента элект-

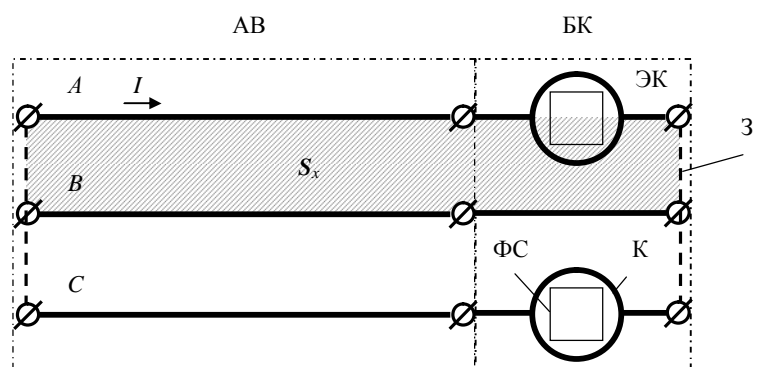


Рис. 5

тоте сети [11]. Система измерений состоит из шести однотипных трехкомпонентных первичных преобразователей магнитного поля, пульта управления измерителя, анализатора частот и меры магнитного момента. Первичные преобразователи располагаются по осям измерительной системы на одинаковом удалении от центра ее рабочего объема, а их оси чувствительности ориентируются вдоль соответствующих осей измерительной системы. Каждый первичный преобразователь конструктивно выполнен в виде трех измерительных индукционных катушек, оси чувствительности которых ортогональны. Пульт управления системы измерений обеспечивает выбор режима работы (измерение либо калибровка), выбор канала для измерений одной из компонент магнитного момента и поканальную компенсацию сигналов помех, создаваемых в рабочем объеме системы измерений полями кабеля и помех сторонних источников поля. При измерениях использован анализатор частот фирмы Брюль и Кьер типа 2120.

Экспериментальные исследования. Исследования проведены на специализированном магнитноизмерительном стенде Научно-технического центра магнетизма технических объектов НАН Украины. Программа исследований включала:

- установку физической модели вдоль осей измерительной системы;
- подключение питания к автоматическому выключателю на номинальный ток;
- измерение трех компонент магнитного момента автоматического выключателя;
- подключение блока компенсации к автоматическому выключателю в соответствии со схемой рис. 5;
- измерение компонент суммарного магнитного момента автоматического выключателя и блока компенсации до настройки электромагнитов-компенсаторов;
- измерение компонент суммарного магнитного момента автоматического выключателя и блока компенсации после настройки электромагнитов-компенсаторов.

Настройка электромагнита-компенсатора проводилась путем перемещения элементов составного сердечника вдоль соответствующих осей (x и y). Настройка считалась оконченной при выполнении условия компенсации измеряемого результирующего магнитного момента. Поскольку результирующий магнитный момент создается автоматическим выключателем и электромагнитом-компенсатором, условие компенсации может быть представлено в следующем виде:

$$M_u + M'_u \leq \varepsilon,$$

где M_u – действующее значение компоненты магнитного момента автоматического выключателя; M'_u – действующее значение компоненты магнитного момента электромагнита-компенсатора; ε – заданная погрешность компенсации магнитного момента; $u=x, y, z$ – индекс компоненты магнитного момента.

Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице.

Устройство	Компонента магнитного момента, А·м ²		
	M_x	M_y	M_z
Автоматический выключатель без блока компенсации	34,0	8,0	0,2
Автоматич. выключатель с настроенным блоком компенсации	0,2	0,2	0,2

Эффективность компенсации определялась для каждой компоненты магнитного момента как отношение соответствующих величин магнитного момента до и после компенсации.

Анализ результатов эксперимента. Как показывают данные эксперимента, величина магнитного момента после компенсации, определяемая методической погрешностью измерений, составляет 0,2 А·м². Полученная эффективность компенсации переменного магнитного момента подтвердила работоспособность устройства и возможность применения его для гарантированного обеспечения требований электромагнитной совместимости автоматических выключателей в части переменного магнитного поля частоты сети.

Выводы. Предложен вариант конструкции компактного электромагнита-компенсатора, содержащего цилиндрическую катушку с составным ферромагнитным сердечником в виде двух частей – ферромагнитного сердечника внутри катушки и дополнительного стержня на его торце, смещенного относительно оси сердечника. Теоретически обоснован поворот результирующего вектора магнитного момента, создаваемого этим электромагнитом-компенсатором, за счет дополнительной составляющей магнитного момента, создаваемой намагниченностью стержня. Достоинством предложенной конструкции является то, что габаритные размеры электромагнита практически не меняются. Разработанный электромагнит может быть рекомендован для компенсации магнитного момента электро-

оборудования, в котором ограничены возможности расположения дополнительных электромагнитов для компенсации составляющих по другим направлениям.

Выполнены экспериментальные исследования предложенного электромагнита-компенсатора в составе блока компенсации магнитного момента автоматического выключателя. В лабораторных условиях достигнута высокая эффективность компенсации двух компонент магнитного момента автоматического выключателя (до 140 единиц), ограниченная методической погрешностью измерений результирующего магнитного момента выключателя и блока компенсации при его стендовой настройке.

1. Вилесов Д.В., Евдокимов О.В., Паршин В.Г. Электромагнитная совместимость электронного оборудования судовых технических средств // Судостроение за рубежом. – 1986. – № 12. – С. 23–38.

Vilesov D.V., Evdokimov O.V., Parshin V.G. Electromagnetic compatibility of electronics of ships' hardware // Sudostroenie za rubezhom. – 1986. – № 12. – P. 23–38. (Rus.)

2. Вороновский Г.К. Размышления об энергетике: судьбы и события, наблюдения и комментарии / Избранные труды в пяти томах. Т.1. – Харьков: Институт системных исследований в энергетике, 2003. – 260 с.

Voronovskii G.K. Thoughts about energetics: fortunes and events, observations and commentaries / Selected works in 5 volumes. – Vol.1. – Kharkov: Institute of system researches in power, 2003. – 260 p. (Rus.)

3. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с.

Kovalenko A.P. Magnetic systems for spaceship control. – Moskva: Mashinostroenie, 1975. – 248 p. (Rus.)

4. Король Е.Г. Компенсатор переменного магнитного момента токов автоматического выключателя // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – 2007. – № 24. – С. 38–42.

Korol E.G. Compensator of magnetic alternating current moment of automatic circuit breaker // Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI". – 2007. – № 24. – P. 38–42. (Rus.)

5. Луников В.С. Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплектних пристроїв / Автореф. дис... д-ра техн.наук: 05.09.01 – Харків: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2003. – 36 с.

Lupikov V.S. Scientific bases of magnetic field compensation technology near low-voltage complete devices / Autoreferat of T.D. thesis: 05.09.01 – Kharkiv, Natsionalnyi tekhnichniy universitet "Kh.PI", 2003. – 36 p. (Ukr.)

6. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.

Mogilevskii G.V. Hybrid low-voltage electric apparatus. – Moskva: Energoatomizdat, 1986. – 232 p. (Rus.)

7. Розов В.Ю. Системы автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля енергонасичених об'єктів / Автореф. дис... д-ра техн.наук: 05.09.03 – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2002. – 38 с.

Rozov V.Yu. Systems of automatic compensation of external magnetic field of energy-saturating objects / Autoreferat of T.D. thesis: 05.09.03. – Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukraine, 2002. – 38 p. (Ukr.)

8. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Тутык В.Л., Панов А.В., Ущяповський К.В. Аналіз типових схем з'єднання мікропроцесорних пристроїв в станційній мережі зі стандартом ІЕК 61850 // Техн. електродинаміка. – 2008. – №1. – С. 42–46.

Stognii B.S., Sopol M.F., Tutyk V.L., Panov A.V., Ushchapovskiy K.V. Analysis of typical connection diagram of microprocessor units in station network with IEC 61850 standard // Tekhnichna elektrodynamika. – 2008. – №1. – P. 42–46. (Ukr.)

9. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Т. 1: Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. – М.: Сов. радио, 1977. – 348 с.

Wait D. Electromagnetic compatibility of radio-electronics and unintentional interference. Vol.1: General problems of EMC. Intersystem interferences. – Moskva: Sovetskoe radio, 1977. – 348 p. (Rus.)

10. Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Техн. электродинаміка. – 1996. – № 1. – С. 3–9.

Shidlovskii A.K., Rozov V.Yu. Automatic compensation systems of external magnetic field of energy-saturated objects // Tekhnicheskaja elektrodynamika. – 1996. – №1. – P. 3–9. (Rus.)

11. *Методика контролю и нормирования магнитных моментов судового оборудования МКММ-90.* – ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1990. – 49 с.

Method of control and normalization of magnetic moments of ship equipment МКММ-90. – Tsentralny nauchno-issledovatelskii institut im. akademika A.N. Krylova, 1990. – 49 p. (Rus.)

12. *Патент №31677*, Україна, МПК G01R 33/00. Пристрій для компенсації змінного магнітного моменту струмів / О.Г.Король, В.С.Лупіков, О.Г.Серета, М.Ю.Гридин, В.Ю.Розов. – № u200708718. // БИ. – 2008. – № 8. – 3 с.

Patent №31677, Ukraine, MPK G01R 33/00. Device for compensation of magnetic moments in the power equipment / O.G. Korol, V.S. Lupikov, O.G. Sereda, M.Yu. Grydin, V.Yu. Rozov. - № u200708718 // Bulletin izobrenii. – 2008. – № 8. – 3 p. (Ukr.)

УДК 621.3.013

О.Г.Король¹, В.С.Лупіков², докт.техн.наук, О.Г.Серета³, канд.техн.наук, Ю.Д.Рудас⁴

^{1,2,3} – Національний технічний університет "ХПІ",

вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна,

⁴ – Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України,

вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна.

Компенсация вектора змінного магнітного моменту електроустаткування за допомогою електромагніта зі складовим феромагнітним осердям

Наведено результати досліджень щодо компенсації вектора змінного магнітного моменту електроустаткування за допомогою електромагніта-компенсатора, що складається з однієї котушки і складеного феромагнітного осердя. Описано оригінальну конструкцію електромагніта-компенсатора зі складним осердям, дві частини якого розташовані під прямим кутом. Запропоновано варіант використання пари електромагнітів-компенсаторів при компенсації змінного магнітного моменту трифазного автоматичного вимикача. Бібл. 12, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: вектор змінного магнітного моменту, електромагніт-компенсатор, феромагнітне осердя.

O.G.Korol¹, V.S.Lupikov², O.G.Sereda³, Yu.D. Rudas⁴

^{1,2,3} – National Technical University "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut"

Frunze Str, 21, Kharkiv, 61002, Ukraine,

⁴ – Scientific and Technical Center of Magnetism of Technical Objects of NAS of Ukraine,

Industrialna Str., 19, Kharkiv, 61106, Ukraine.

Compensation of magnetic moment vector in electrical equipment by an electromagnet with a composite ferromagnetic core

The research results of vector compensation of magnetic moment in electrical equipment by electromagnet-compensator, consisted of a coil and composite ferromagnetic core are shown. The original construction of electromagnet-compensator with complex core, two parts of which are disposed orthogonally, is described. The variant of using a pair of the electromagnets for compensation of alternating magnetic moment in a three-phase circuit breaker is offered. References 12, tables 1, figures 5.

Key words: vector compensation of magnetic moment, electromagnet-compensator, ferromagnetic core.

Надійшла 13.10.2010

Received 13.10.2010