УДК 621.3.013

Е.Г. КОРОЛЬ, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков *В.С. ЛУПИКОВ*, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков *А.Г. СЕРЕДА*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков *Ю.Д. РУДАС*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТЦ МТО НАН

Украины

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЛОКА КОМПЕНСАЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Приведено результати експериментальних досліджень блока автоматичної компенсації магнітного поля у складі автоматичного вимикача серії А3770. Описано методику налагодження параметрів компактного електромагніта компенсатора зі складеним феромагнітним осердям, дві частини якого розташовуються під прямим кутом. Результати досліджень рекомендовано для використання при проектуванні автоматичних систем високоточної компенсації магнітного моменту електроустаткування.

Приведены результаты экспериментальных исследований блока автоматической компенсации магнитного поля в составе автоматического выключателя серии А3770. Описана методика настройки параметров компактного электромагнита компенсатора с составленным ферромагнитным сердечником, две части которого располагаются под прямым углом. Результаты исследований рекомендованы для использования при проектировании автоматических систем высокоточной компенсации магнитного момента электрооборудования.

Введение. Одной из актуальных проблем для энергетических объектов различного назначения является электромагнитная совместимость силового электрооборудования и слаботочных элементов систем контроля и управления [1-3]. В полной мере это относится и к автоматическим выключателям серии А3770 (АВ) на токи более 100 А [4]. Особенностью современных АВ является то, что они выполняются в малых объемах, что ограничивает возможности применения средств снижения их магнитного поля, в частности, систем автоматической компенсации магнитного момента (ММ) [5, 6], являющихся достаточно сложными устройствами, элементы которых трудно выполнить без существенного изменения всей идеологии проектирования АВ. Как показывает анализ, вектор переменного ММ АВ содержит две пространственные компоненты. Большая компонента ММ создается тока-

ми контуров силовой трехфазной цепи, расположенных в одной плоскости, параллельной лицевой стороне AB. Меньшая компонента MM создается контурами петель термобиметаллического расцепителя и направлена по оси выводов AB.

Для преодоления этих трудностей предложено малогабаритное устройство для компенсации ММ [7], состоящее из двух одинаковых электромагнитов компенсаторов (ЭК), конструктивно выполненных в виде блока-приставки (БП). Каждый из ЭК представляет собой цилиндрическую катушку, внутри которой располагается составной ферромагнитный сердечник. Он состоит из двух стержней: основного (ОС), расположенного внутри катушки, и дополнительного (ДС), расположенного на одном торце ОС. Оси ОС и ДС перпендикулярны и параллельны векторам большей и меньшей компонент ММ АВ. Оба сердечника имеют возможность перемещения вдоль своей оси и последующей фиксации положения: ОС – внутри катушки, ДС – на торце ОС. Новизна конструкции БП связана с реализацией принципа намаг-

Новизна конструкции БП связана с реализацией принципа намагничивания полем одной катушки ферромагнитных сердечников ОС и ДС. Наибольшая намагниченность ОС достигается при совпадении центра сердечника с центром катушки. При смещении стержня от центра катушки его суммарная намагниченность уменьшается. Аналогичную характеристику намагниченности имеет и ДС при смещении (удалении) его относительно оси ОС. При этом каждый из намагниченных сердечников характеризуется вектором ММ его намагниченности. Комбинацией намагниченностей этих ортогонально расположенных сердечников обеспечивается регулировка по величине и направлению каждой из компонент вектора компенсирующего ММ ЭК. Регулировка проводится при стендовой настройке БП по результатам измерения компонент результирующего ММ, создаваемого при одновременной работе АВ и БП. Суть регулировки сводится к подбору такого смещения сердечников ОС и ДС, при котором суммарный ММ АВ и БП равен нулю в пределах точности настройки.

Цель работы – Экспериментальная проверка методики настройки блока приставки для компенсации магнитного момента автоматического выключателя.

1 Конструкция блока электромагнитов компенсаторов. В состав БП входят два электромагнита компенсатора, включенные в фазы A и C, и проходная шина фазы B. Схема подключения выводов БП к выводам АВ приведена на рис. 1. Обозначения на схеме: 1 – AB; 2 – БП; 3, 4 – выводы соответственно АВ и БП; 5 – выступающие выводы БП для подключения у внешней цепи; x, y, z – конструкционные оси

АВ; 0 – центр системы координат, совпадающий с геометрическим центром АВ.



Электрическая схема соединения выводов AB и БП показана на рис. 2. Шинопроводы фаз обозначены A, B, C. Электромагнит компенсатор ЭК показан в виде окружности с квадратом внутри, соответствующих катушке К и ОС. Ток фазы обозначен I, площадь контура силовой цепи, образованного шинопроводами фаз A, B и условными закоротками З AB обозначена S_z , а для БП – S'_z



Рис. 2.

Внешний вид БП со снятой верхней крышкой приведен на фото на рис. 3. Основные элементы конструкции: 1 – вывод катушки ЭК, он же вывод БП; 2 – цилиндрическая катушка ЭК; 3, 4 – основной ОС и дополнительный ДС ферромагнитные сердечники; 5 – направляющая шпилька для перемещения ОС; 6 – направляющие полозья для перемещения ДС; 7 – гайки фиксации ОС и ДС; 8 – средняя шина, вывод средней фазы; 9 – корпус, нижняя часть. Более детально конструкция расположения ферромагнитных элементов приведена на фото на рис. 4. Дополнительной позицией 10 обозначены кольцевые направляющие для перемещения ОС внутри катушки.

При проектировании ЭК размеры его ферромагнитного сердечника ОС выбраны такими, чтобы создаваемый компенсирующий ММ по

величине был несколько больше ММ АВ (с учетом увеличения площади контура S_z на величину S'_z дополнительного контура БП и возможности регулирования компенсирующего ММ в сторону уменьшения). Размеры ДС рассчитаны исходя из отношения большей и меньшей компонент ММ АВ равном 10:1. Расчет проведен по методике [8].



Рис. 3.

Рис. 4.

2 Магнитоизмерительный стенд.

Экспериментальные исследования проведены на специализированном магнитноизмерительном стенде Научно-технического центра магнетизма технических объектов НАН Украины. В рабочем объеме стенда обеспечивается минимальный уровень помех от внешних источников магнитного поля. Стенд оснащен источником питания трехфазного переменного тока, устройствами контроля и управления их величинами. Как источник питания использовался индукционный генератор напряжением 380 В частотой 50 Гц, пуск и управление током которого обеспечивалось со штатного пульта управления. Действующее значение тока фазы менялось в диапазоне 0,1-90 А, нагрузка по фазам одинаковая. Измерительная аппаратура стенда соответствует требованиям в части точности измерений и поверена.

В состав измерительной системы входят четыре трехкомпонентных первичных преобразователя (сосредоточенные индукционные катушки $Д_1$ - $Д_4$), пульт управления ПУ питанием, переключатель каналов ПК (измеряемых компонент ММ) и анализатор частот АЧ. Схема расположения на стенде первичных преобразователей $Д_1$ - $Д_4$ относительно АВ при измерении ММ показана на рис. 5. Фото анализатора частот с ПУ и переключателем каналов – на рис. 6, фото измерительного стенда с АВ при измерениях приведено на рис. 7. Фото АВ с приставкой приведено на рис. 8.





Рис. 5.





Рис. 7.





Первичные преобразователи $Д_1$ - $Д_4$ конструктивно выполнены одинаковыми и установлены на координатном устройстве, которое обеспечивает расположение в горизонтальной плоскости и индивидуальную регулировку их удаления *R* от центра 0 рабочего объема измерительной системы. Преобразователи расположены в горизонтальной плоскости на осях координат *x* и *y* и удалены от центра на расстояние *R*. Пульт управления ПУ обеспечивает выбор режима работы измери-

тельной системы (калибровка или измерение), ПК – выбор измеряемой компоненты ММ и компенсацию помехи.

Измерение компонент ММ АВ не стенде проводилось в соответствии с методикой [9], которая включает:

- установку AB в центре измерительной системы и ориентацией конструктивных осей вдоль осей системы измерения (рис. 5);

– установку первичных преобразователей в соответствии со схемой из четырех датчиков (рис.5) на одинаковом удалении R > 1,5 L от центра измерительной системы, где L – наибольший габаритный размер AB. В данных исследованиях выбрано R = 3,2 м, что на порядок превышает габарит AB;

 ориентацию первичных преобразователей в соответствии с измеряемой компонентой MM;

компенсацию сигнала помехи в измерительной системе от внешних источников магнитного поля на измеряемой частоте с помощью ПК;

 компенсацию в измерительной системе составляющей магнитного поля кабеля питания по описанной ниже методике;

- измерение компонент переменного ММ.

Методика компенсации включает установку перемычек на входных выводах AB; установку с помощью ПУ тока питания кабеля, равного номинальному току AB; компенсацию с помощью ПК сигнала в измерительной системе от поля кабеля.

3. Методика настройки. Настройка параметров БП проводилась по следующей методике:

1. Подается питание на фазы *AB* автоматического выключателя с подключенным БП (на рис. 2 образованный контур питания заштрихован).

2. Ферромагнитные сердечники ОС и ДС, устанавливаются симметрично, т.е. их центры совпадают соответственно с центром катушки и осью ОС.

3. Измеряются компоненты $M_x = M_x[0]$ и $M_z = M_z[0]$ вектора MM AB с включенным БП.

4. Устанавливается небольшое фиксированное смещение ОС настраиваемого ЭК в фазе A по оси z (шаг настройки 1).

5. Проводится измерение компоненты ММ $M_z[1]$ после шага настройки 1 и сравнивается с величиной $M_z[0]$. 6. В случае, если знак разности ($M_z[0] - M_z[1]$) не меняется, уста-

6. В случае, если знак разности $(M_z[0] - M_z[1])$ не меняется, устанавливается новое небольшое фиксированное смещение ОС в том же направлении. В случае, если знак этой разности меняется, то устанавливается фиксированное смещение ОС в противоположном направлении.

7. Операция 6 повторяется до тех пор, пока не выполнится условие для суммарного MM на *К* шаге:

$$\left|\frac{M_{z}[K-1]-M_{z}[K]}{M_{z}[0]}\right| \leq \varepsilon,$$

где є – требуемая относительная величина погрешности настройки; *K*, *K*–1 – текущий и предыдущий шаг настройки.

8. Фиксируется положение сердечника ОС.

9. Устанавливается небольшое фиксированное смещение ДС по оси *х* для настраиваемого ЭК.

10. Повторяются операции пп. 5-7 для компоненты ММ М_х.

11. Фиксируется положение сердечника ДС.

12. Подается питание на фазы *CB* автоматического выключателя с подключенным БП.

13. Повторяются операции пп. 2-11 для ЭК, включенного в фазу С.

Для повышения точности настройки измерения проводились только вдоль оси *x* измерительной системы. Для измерения компоненты ММ по оси *z* АВ с подключенным БП поворачивался до совпадение его конструктивной оси *z* с осью *x* измерительной системы. Этим обеспечиваются лучшие условия компенсации поля внешних помех. Такой способ измерений предусмотрен методикой [9] для малогабаритного электрооборудования.

4. Экспериментальные данные. Измерения компонент ММ и настройка БП проведены при токе 60 А. Число шагов настройки для ОС и ДС не превышало 10. Экспериментальные данные пересчитаны на номинальный ток АВ 160 А путем пропорционального умножения на отношение токов. Проверка компенсации на номинальном токе проведена для одной максимальной компоненты. Эффективность компенсации *E* определялась для каждой компоненты магнитного момента как отношение соответствующих величин магнитного момента А3790 до и после компенсации. Результаты пересчета компенсации каждой компоненты ток и величины эффективности компенсации каждой компоненты приведены в табл. 1.

Вариант	Компонента магнитного момента, А·м ²		
	M_x	M_{y}	M_z
АВ без БП	5,00	0,04	13,40
АВ с БП	0,18	0,04	0,19
Ε	28,00	1,00	70,00
Требования	0,20	0,20	0,20

Таблица 1 – Экспериментально определенные вели	чины компонент ММ и
расчетная оценка эффективности их ко	мпенсации.

Максимальная величина эффективности компенсации компоненты магнитного момента в направлении оси контуров силовой цепи выключателя составила 70 единиц.

Анализ данных экспериментов показывает следующее. Максимальная величина эффективности 70 единиц достигнута для наибольшей компоненты $MM - M_z$. Минимальная величина MM после компенсации составляют 0,04 $A \cdot M^2$ (для компоненты M_y); она определяется методиче-

ской погрешностью измерений и наличием поля токопроводов закороток (эти проводники видны на рис. 8, слева от БП). Эффективность компенсация компоненты M_x ниже максимальной, что можно объяснить методической погрешностью измерений для малых величин MM.

Полученные данные по компенсации переменного магнитного момента A3770 подтвердили работоспособность БП и возможность применения его для гарантированного обеспечения требований электромагнитной совместимости автоматических выключателей в части переменного магнитного поля частоты сети.

Выводы.

1. Предложена методика настройки электромагнита компенсатора с составным ферромагнитным сердечником. Достоинством методики является практически независимая регулировка двух компонент ММ с помощью основного и дополнительного ферромагнитных сердечников. Правильность методики подтверждена экспериментально на автоматическом выключателе серии А3770 с блоком приставкой для компенсации магнитного момента.

2. Выполнены экспериментальные исследования блока компенсация переменного магнитного поля, предназначенного для комплектации автоматических выключателей серии А3770. Определены величины эффективности компенсации компонент переменного магнитного момента частоты сети для блока приставки. Эффективность компенсации максимальной компоненты магнитного момента составила 70 единиц. Разработанный блок приставка для компенсации переменного магнитного поля частоты сети может быть рекомендован в качестве опытного образца для промышленного производства.

Список литературы: 1. 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 c. 2. IEC 1000-4-8: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques - Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. - 2001. - 61 p. 3. Salinas E. Mitigation of Power-Frequency Magnetic Fields with Applications to Substation and Other Parts of the Electric Network / E. Salinas // Department of Electric Power engineering, Chalmers University of Technology. – Gothenburg. – 2001. – 149 р. 4. Король Е.Г. Оценка максимального магнитного поля автоматических выключателей // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 29. – С. 25-34. **5.** А.с. 1059631 СССР, МКИ Н 01 F 13/00. Устройство для компенсации внешнего магнитного поля / В.И. Дегтярев (СССР). – № 3443050/24-07; Заявлено 24.05.82; Опубл. 07.12.83, Бюл. № 45. – 3 с. 6. Компенсатор магнитного поля: А.с. 681398 СССР, МКИ G 01R 33/00 / И.А. Трякин, Б.Г. Волков, А.Л. Пермяков и др. (СССР). – № 2574720/18-21; Заявлено 18.01.78; Опубл. 25.08.79, Бюл. № 31. – 3 с. 7. Пат. 31677, Україна, МПК G01R 33/00. Пристрій для компенсації змінного магнітного моменту струмів / О.Г. Король, В.С. Лупіков, О.Г. Середа, М.Ю. Гридін, В.Ю. Розов. – № и200708718. Заявлено 30.06.2007. Опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8. – 3 с. 8. Коваленко А.П. Магнитные

системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с. 9. Методика контроля и нормирования магнитных моментов судового оборудования МКММ-73. – ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Харьковское отделение ВНИИЭМ, 1973. – 26 с. (с приложением).



Король Елена Геннадьевна, ассистент кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "ХПИ". Защитила диплом магистра с отличием в 2004 г. по специальности электрические машины и аппараты.

Научные интересы связаны с проблемой электромагнитной совместимости в части магнитных полей.



Лупиков Валерий Сергеевич, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1973, 1987 и 2004 гг. С 1973 по 1998 гг работал в области магнетизма технических объектов. Заведующий кафедрой "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2005 г. Научные интерсы связаны с проблемами электрических объектов, магнетизмом технических объектов, магнитной левитацией, физическими полями электрических аппаратов.



Середа Александр Григорьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".

Научные интересы связаны с исследованием проблем энергосбережения в электрических аппаратах.



Рудас Юрий Данилович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Научно-технического центра магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков. Окончил Харьковский государственный университет им. М. Горького в 1972 г. по специальности радиофизика.

Научные интересы связаны с проблемами магнетизма технических объектов и магнитной экологии.

Поступила в редколлегию 4.02.2011 Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.