

И.С. ВАРШАМОВА, м.н.с., НТУ "ХПИ", Харьков
В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков
О.А. ГЕЛЯРОВСКАЯ, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков
Ю.Д. РУДАС, с.н.с., канд. техн. наук, НТЦ МТО НАН Украины,
Харьков

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАТУШКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА КОМПЕНСАТОРА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ НАГРЕВЕ

Наведені дані експериментальних досліджень електромагнітів компенсаторів з ферромагнітними осердями і без них. Отримана оцінка зміни опору котушки залежно від часу нагріву. Запропоновані рекомендації по корекції струмів котушки електромагнітів компенсаторів використовуваних як виконавчі елементи параметричних систем автоматичній компенсації зовнішнього магнітного поля.

Приведены данные экспериментальных исследований электромагнитов компенсаторов с ферромагнитными сердечниками и без них. Получена оценка изменения сопротивления катушки в зависимости от времени нагрева. Предложены рекомендации по коррекции токов катушки электромагнитов компенсаторов используемых в качестве исполнительных элементов параметрических систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля.

Введение. Анализ уровней внешнего магнитного поля низковольтных распределительных устройств показывает, что для решения проблем электромагнитной совместимости и магнитной экологии необходимо уменьшение уровня поля примерно в 1000 раз [1, 2]. В этой связи ужесточаются и требования к электромагнитам компенсаторам (ЭК) магнитного поля по точности воспроизводимого компенсирующего магнитного поля. Электромагниты компенсаторы являются исполнительными элементами параметрических систем автоматической компенсации и их токи формируются как линейные комбинации токов силовой цепи распределительного устройства. Традиционные методы проектирования ЭК [3-6] на основе заданной величины магнитного поля ограничены инженерной погрешностью (1-5 %), что не позволяет в принципе получить эффективность компенсации более 100 единиц. Кроме того, при этом не учитывается нагрев электромагнита компенсатора в процессе длительной работы в составе распределительного устройства. Качественный анализ показывает, что независимо от способа питания ЭК (от источника тока либо источника напряжения [3]) его сопротивление ме-

няется в процессе нагрева собственным током. В этой связи актуальной становится задача анализа зависимости сопротивления катушки в процессе нагрева и разработка рекомендаций по коррекции токов катушки электромагнитов компенсаторов.

Цель работы – экспериментальные исследования нагрева электромагнита компенсатора собственным током.

Задачи – определение зависимости величины электрического тока от времени в процессе нагрева электромагнита компенсатора собственным током и оценка разброса сопротивления катушки.

Описание физических макетов. Для экспериментальных исследований было изготовлено три физических макета ЭК: вариант 1 – круглая цилиндрическая катушка без ферромагнитного сердечника (ФС); вариант 2 – катушка со сплошным ФС; вариант 3 – катушка с шихтованным ФС.

Внешний вид катушек показан на рис. 1: а – катушка без сердечника, б – катушка с ФС, в – катушка с сердечником из шихтованной электротехнической стали. Параметры катушки: U – напряжение, I – ток, t – время, R – сопротивление катушки, l – длина катушки, d – наружный диаметр катушки, w – число витков; d_k – длина наружной стороны сечения квадратной катушки; ΔI – максимальная разность величин токов в начале и конце нагрева, относительно тока в начале процесса; параметры ФС: l_c – длина сердечника, d_c – диаметр сердечника. Ферромагнитный сердечник выполнялся сплошным либо шихтованным, квадратного сечения, материал сердечника – электротехническая сталь 330.

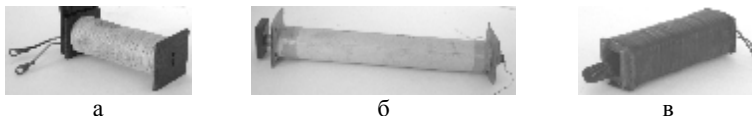


Рис. 1.

Методика экспериментальных исследований. Катушка располагалась горизонтально, на нее подавалось переменное напряжение, амплитуда которого поддерживалась постоянной, и проводились замеры тока катушки через интервалы времени в 15 мин. В месте расположения физического макета катушки отсутствовали внешние источники тепла. Измерения тока проводились миллиамперметром класса 0,1. Для катушек, в которых предусматривалась установка ФС, измерения проводились как при наличии, так и отсутствии сердечника. Температура катушек перед началом измерений контролировалась и была равной температуре окружающей среды.

Результаты измерений тока катушки ЭК в процессе нагрева приведены в табл. 1-3.

Таблица 1 – Измеренные величины тока в процессе нагрева катушки ЭК.

Вариант 1.

($R = 1 \text{ Ом}$, $l = 0,105 \text{ м}$, $d = 0,04 \text{ м}$, $w = 200$).

$U, \text{ В}$	Наличие ФС	$t, \text{ мин}$	$I, \text{ мА}$	$\Delta I, \%$
1,5	без ФС	0	1000	9,0
		15	925	
		30	937,5	
		45	950	
		60	950	
		75	925	
		90	925	
		105	950	
		120	925	
		135	920	
		150	905	
		165	920	
		180	920	
		195	930	
		210	920	
		225	911	

Таблица 2 – Измеренные величины тока в процессе нагрева катушки ЭК.

Вариант 2.

($R = 30 \text{ Ом}$, $l = 0,25 \text{ м}$, $d = 0,03 \text{ м}$, $w = 500$; $l_c = 0,28 \text{ м}$, $d_c = 0,03 \text{ м}$).

$U, \text{ В}$	Наличие ФС	$t, \text{ мин}$	$I, \text{ мА}$	$\Delta I, \%$	$U, \text{ В}$	Наличие ФС	$t, \text{ мин}$	$I, \text{ мА}$	$\Delta I, \%$
20,0	без ФС	0	450,0	2,8	3,8	с ФС	0	24,0	0,8
		15	437,5				15	23,8	
		30	440,0				30	23,9	
		45	440,0				45	24,0	
		60	435,0				60	24,0	
		75	440,0				75	24,0	
		90	436,0				90	23,9	
		105	439,0				105	24,0	
		120	437,5				120	24,0	
		135	437,0				135	24,0	
		150	437,5				150	24,0	
		165	435,5				165	24,0	

Для рассмотренных вариантов ЭК построены графики зависимостей $I(t)$. Зависимость $I(t)$ для ЭК варианта 1, табл. 1 представлена на рис. 2. Для ЭК варианта 2 без ФС и с ФС на рис. 3 и 4 построены графики по данным измерений табл. 2. По данным табл. 3 для ЭК варианта 3 построены два графика: зависимость $I(t)$ для ЭК без ФС – на рис. 5, для ЭК с коротким ФС – на рис. 6.

Таблица 3 – Измеренные величины тока в процессе нагрева катушки ЭК.

Вариант 3.

($R = 30 \text{ Ом}$, $l = 0,25 \text{ м}$, $d_k = 0,03 \text{ м}$, $w = 500$;

ΦC_1 : $l_c = 0,28 \text{ м}$, $d_c = 0,03 \text{ м}$;

ΦC_2 : $l_c = 0,08 \text{ м}$, $d_c = 0,03 \text{ м}$;

шихтованный ΦC : $l = 0,28 \text{ м}$, $d = 0,03 \text{ м}$).

U , В	Наличие ФС	t , мин	I , мА	ΔI , %	U , В	Наличие ФС	t , мин	I , мА	ΔI , %
3,8	без ФС	0	275,0	4,0	3,8	шихтованный ФС	0– 165	11,5	0
		15	270,0						
		30	265,0						
		45	266,0						
		60	265,0						
		75	265,0						
		90	264,0						
		105	265,0						
		120	265,5						
		135	266,0						
		150	265,0						
		165	264,5						
		180	265,0						
		195	265,5						
3,8	с ΦC_1	0– 165	110	0	3,8	с ΦC_2	0	22,0	0,9
							15	21,8	
							30	21,95	
							45	21,8	
							60	21,9	
							75	21,8	
							90	21,8	
							105	21,8	
							120	21,8	
							135	21,8	
							150	21,8	
							165	21,8	

Как видно из данных табл. 3, для ЭК с шихтованным и длинным ФС данные измерений практически не менялись, поэтому для этих вариантов графики не строились.

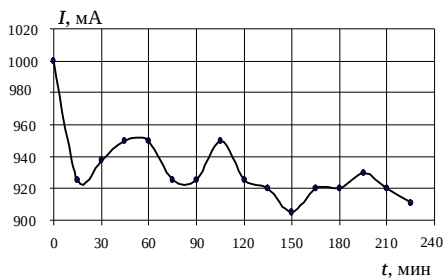


Рис. 2.

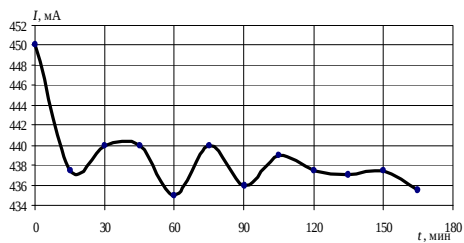


Рис. 3.

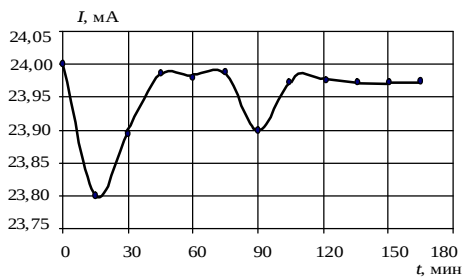


Рис. 4.

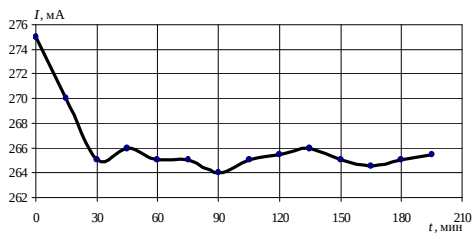


Рис. 5.

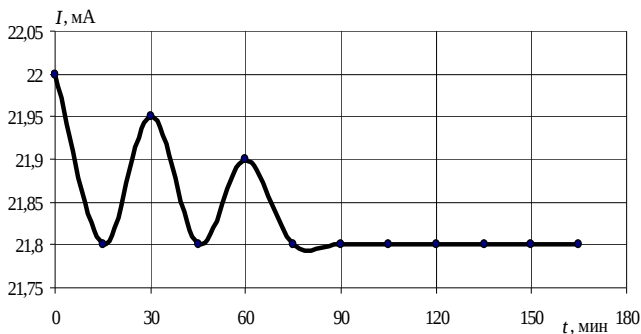


Рис. 6.

Обсуждение результатов эксперимента. Как показывает анализ экспериментальных данных, при использовании катушек без ФС отклонение тока от начальной величины колеблется довольно в широких пределах, от 2,8 (вариант 2) до 9 % (вариант 1). Выбранные временные диапазоны исследования процесса нагрева достаточно велики, примерно до 4 часов, однако для ЭК варианта 1 не достигнут установившийся процесс нагрева.

Для ЭК с ФС процесс нагрева влияет на величину тока существенно меньше, чем при отсутствии ФС. Это объясняется тем, что ФС выполняет роль радиатора, дополнительно охлаждающего катушку. С увеличением длины сердечника возрастает отводимое тепло от катушки и за счет этого ток в катушке практически не меняется и не зависит от процесса нагрева.

Максимальная разность величин токов в начале и конце нагрева, относительно тока в начале процесса для пяти из семи вариантов ЭК составляет величину более 1%. Следовательно, при стендовой настройке ЭК в составе САК даже при высокой точности настройки (в пределах 1%) не может обеспечить эффективность компенсации внешнего магнитного поля на уровне 100 единиц из-за того, что при длительной работе ЭК из-за нагрева его катушки будет наблюдаться отклонение тока от настроенной величины. Это снижение эффективности зависит как от длительности нагрева собственным током, так и от наличия ФС, его длины и выполнения (шихтованный либо сплошной). Для исследуемых ЭК при условии их настройки с погрешностью 1% эффективность может снизиться со 100 до 11 единиц.

Анализ графиков процессов нагрева показывает, что они отличаются от теоретических зависимостей в виде экспонент. Это можно объяснить неточностью ручной стабилизации напряжения питания катушки ЭК.

Выводы.

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что из-за нагрева катушки электромагнита компенсатора собственным током эффективность компенсации внешнего магнитного поля с помощью параметрической системы автоматической компенсации будет падать при условии ее длительной работы в составе низковольтных распределительных устройств. Условия нагрева катушки ЭК собственным током необходимо учитывать при оценке реальной эффективности системы автоматической компенсации, а также при его проектировании.

2. С точки зрения стабильности характеристик электромагнита компенсатора предпочтительным является вариант его выполнения с ферромагнитным шихтованным сердечником.

3. При экспериментальном определении величины эффективности электромагнита компенсатора необходимо учитывать снижение тока его катушки от начала процесса нагрева до установившегося значения.

Список литературы: 1. *Розов В.Ю.* Системы автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов: Автореф. дис. ...доктора техн. наук / Институт электродинамики НАН Украины. – К., 2002. – 37 с. 2. *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 p. 3. *Коваленко А.П.* Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с. 4. *Kildishev A., Volokhov S.A., Erisov A.V.* A local shipboard telemtomagnetic compensator // MARELEC'99Коваленко. 2nd International conference on marine electromagnetics. Ensieta, Brest, France, 5-7 July1999. – P. 453-458. 5. *Розов В.Ю., Волохов С.А., Ерисов А.В.* Электромагнитный компенсатор магнитных полей технических объектов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №15. – С. 191-197. 6. *Пелевин Д.Е.* Оптимизация параметров электромагнитов управления магнитным полем // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – №3. – С. 31-34.



Варшамова Ирина Сергеевна, м.н.с. кафедры электрических аппаратов НТУ "ХПИ". Защитила диплом магистра в 2006 г. с отличием.

Научные интересы связаны с магнетизмом технических объектов, физическими полями электрических аппаратов.



Лушков 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 интересы связаны с проблемами электромагнитной совместимости технических средств, магнетизмом технических объектов, магнитной левитацией, физическими полями электрических аппаратов.



Геляровская Оксана Анатольевна, старший преподаватель кафедры компьютерной математики и математического моделирования НТУ "ХПИ". Защитила диплом специалиста в НТУ "ХПИ". Научные интересы связаны с математическим моделированием и магнетизмом технических объектов.



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 22.03.2010