

*А.М. ГРЕЧКО*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В СЕРДЕЧНИКЕ МАГНИТОПРОВОДА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА**

В статье приведены результаты экспериментального исследования степени влияния вихревых токов в сердечнике электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения на его динамические характеристики.

**Ключевые слова:** вихревые токи, электромагнитный привод, вакуумный выключатель.

**Введение.** В большинстве практических случаях влияние вихревых токов, циркулирующих в магнитной цепи, на работу электромагнитов настолько мало, что им можно пренебречь. Однако в случае габаритных быстродействующих электромагнитных приводов (ЭМП), применяемых в качестве приводов в вакуумных выключателях среднего напряжения 6-35 кВ, вихревые токи могут оказывать существенное влияние на быстродействие ЭМП. Это приводит к увеличению времени срабатывания вакуумного выключателя, что влечет за собой увеличение термического действия тока короткого замыкания на защищаемые выключателем электрические цепи.

Известно, что действие вихревых токов направлено в сторону замедления процесса изменения магнитного потока, то есть они увеличивают как время нарастания тока в обмотке до начала движения якоря, так и во время его движения. Магнитная цепь в этом случае является как бы вторичной обмоткой, которая магнитно связана с обмоткой ЭМП (первичной обмоткой). Когда желательно иметь замедление работы электромагнитов, стремятся искусственно увеличить вихревые токи, устанавливая, например, короткозамкнутые гильзы на сердечнике электромагнита [1-3]. Наоборот, в быстродействующих электромагнитах магнитные системы выполняются из листового трансформаторной стали с изоляцией между листами для уменьшения вихревых токов (как, например, магнитопроводы ЭМП вакуумных выключателей серии VM1 производства АВВ [4] и серии VP1 производства РЗВА [5]). Однако такое решение усложняет процесс изготовления ЭМП, снижает его надежность и износостойкость.

© Гречко А.М., 2012

При изготовлении цельных магнитных систем аппаратов уменьшение действия вихревых токов можно достичь увеличением омического сопротивления путем введения радиальных щелей, проходящих параллельно оси сердечника [6-8].

**Цель работы** – экспериментальное исследование степени влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП вакуумного выключателя среднего напряжения на динамические характеристики (время включения, время отключения, время трогания при включении и отключении).

**Основная часть.** Для проведения экспериментального исследования по определению влияния вихревых токов на динамические характеристики ЭМП на кафедре электрических аппаратов НТУ "ХПИ" совместно с ООО "АВМ АМПЕР" (г. Кременчуг) разработаны и изготовлены опытные образцы ЭМП с цельной и разрезанной частью магнитопровода (сердечника), в разобранном виде представленный на рис. 1.



Рис. 1. Основные узлы опытных образцов ЭМП: а – с цельной частью магнитопровода (сердечника); б – с разрезанной частью магнитопровода (сердечника); 1 – корпус; 2 – сердечник; 3 – якорь; 4 – шток; 5 – постоянные магниты; 6 – катушка.

Следует отметить, что конструкции ЭМП с разрезанным и цельным сердечниками отличались друг от друга не только наличием четырех разрезов (толщина каждого разреза составляет 3 мм, расстояние от внутреннего диаметра сердечника до начала разрезов – 5 мм), но также незначительно формой и габаритными размерами сердечника и

корпуса. Данные конструктивные изменения необходимы для проведения экспериментальных исследований ЭМП не только на опытной установке, но и при натурных испытаниях с размещением ЭМП непосредственно в корпусе серийно выпускаемого вакуумного выключателя ВБ4-ЭЗ [9] в испытательной лаборатории ООО "АВМ АМПЕР".

Наличие четырех разрезов в сердечнике, увеличение его внутреннего диаметра, изменение размеров корпуса, приводят к уменьшению площади рабочих зазоров, что снижает силу удержания ЭМП при притянutom якоре и обесточенных обмотках приблизительно на 25 % (с 3700 Н до 2800 Н). По этой причине для соблюдения идентичных условий при проведении экспериментальных исследований уменьшено значение максимальной противодействующей силы с 2800 Н до 2400 Н. Для обеспечения равенства сил удержания двух исследуемых ЭМП при притянutom якоре и обесточенных обмотках в ЭМП с цельным сердечником уменьшено количество постоянных магнитов с 24 до 20 штук. Сила удержания для данного количества постоянных магнитов составляет 2850 Н.

При проведении экспериментальных исследований в обоих ЭМП поочередно используется одна и та же двухобмоточная катушка со следующими обмоточными данными:  $R_{\text{вкл}} = 8 \text{ Ом}$ ,  $w_{\text{вкл}} = 460$ ,  $d_{\text{твкл}} = 0,5 \text{ мм}$ ,  $R_{\text{откл}} = 38 \text{ Ом}$ ,  $w_{\text{откл}} = 460$ ,  $d_{\text{моткл}} = 0,25 \text{ мм}$ , марка обмоточного провода ПЭВ-2; а также одни и те же постоянные магниты марки NQ3G ( $B_r = 1,14 \text{ Тл}$ ;  $H_c = 750 \text{ кА/м}$ ).

Материал магнитопровода обоих ЭМП – сталь 10895. Материал штока обоих ЭМП – сталь 12X18H10T.

Экспериментальные исследования по определению влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП на его динамические характеристики проводились при варьировании параметров (емкости и напряжения) емкостного накопителя энергии (ЕНЭ)

Результаты исследований для операции включения и отключения ЭМП приведены в табл. 1, 2 соответственно и изображены на рис. 2, 3, где пунктирной линией показаны зависимости для ЭМП с разрезанным сердечником, сплошной линией – для ЭМП с цельным сердечником.

Полученные динамические характеристики ЭМП с цельным и разрезанным сердечниками при различных параметрах ЕНЭ позволяют с качественной и количественной точек зрения оценить степень влияния вихревых токов в сердечнике исследуемого ЭМП на его быстроедействие.

Значения времен трогания и срабатывания при варьировании параметров ЕНЭ для осциллограмм тока (рис. 3) сведены в табл. 3.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований по определению влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП на его динамические характеристики для операции включения

C, мкФ	U, В	Время трогания $t_{тр}$ , мс		Время включения $t_{вкл}$ , мс	
		с разрезами	цельный	с разрезами	цельный
2000	225	5,3	5,4	18,1	18,7
	250	4,1	4,7	16,5	17,1
	275	4,0	4,3	14,6	16,2
	300	3,7	4,0	13,5	14,8
	350	3,1	3,4	12,3	13,7
2500	225	4,6	5,0	17,8	18,2
	250	4,0	4,2	16,3	16,6
	275	3,4	4,1	14,8	16,0
	300	3,5	3,5	13,5	14,8
	350	2,7	3,1	12,3	13,5
3000	225	4,4	5,2	17,9	18,5
	250	3,9	5,1	15,7	16,1
	275	3,0	4,0	14,8	15,7
	300	2,8	3,7	13,3	14,4
	350	2,6	3,3	12,2	13,2

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований по определению влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП на его динамические характеристики для операции отключения

C, мкФ	U, В	Время трогания $t_{тр}$ , мс		Время отключения $t_{откл}$ , мс	
		с разрезами	цельный	с разрезами	цельный
300	100	2,4	5,3	15,2	26,7
	120	2,2	3,8	14,1	22,6
	150	1,4	2,8	12,4	18,2
	200	1,1	2,5	10,6	14,4
600	100	2,0	5,3	15,1	27,7
	120	1,6	4,0	14,6	24,2
	150	1,3	3,3	12,5	19,1
	200	1,3	2,7	10,9	14,7
900	100	2,2	5,7	15,1	22,7
	120	1,4	4,4	13,6	18,9
	150	1,1	3,7	12,0	15,5
	200	0,7	2,6	10,6	12,7
1200	100	1,3	5,6	15,2	21,0
	120	2,2	4,3	14,2	17,8
	150	1,1	3,6	11,8	15,0
	200	0,8	2,9	10,3	12,1

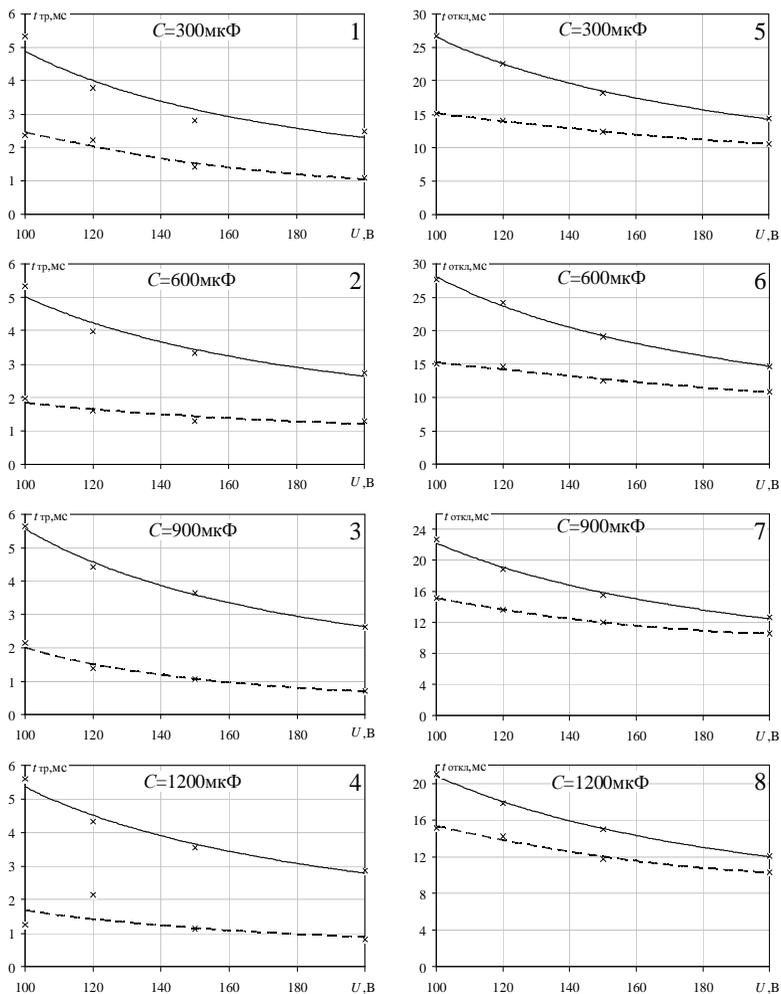


Рис. 2. Зависимость времен трогания (1-4) и срабатывания (5-8) при отключении ЭМП с разрезанным и цельным сердечниками от напряжения питания при фиксированной емкости ЕНЭ

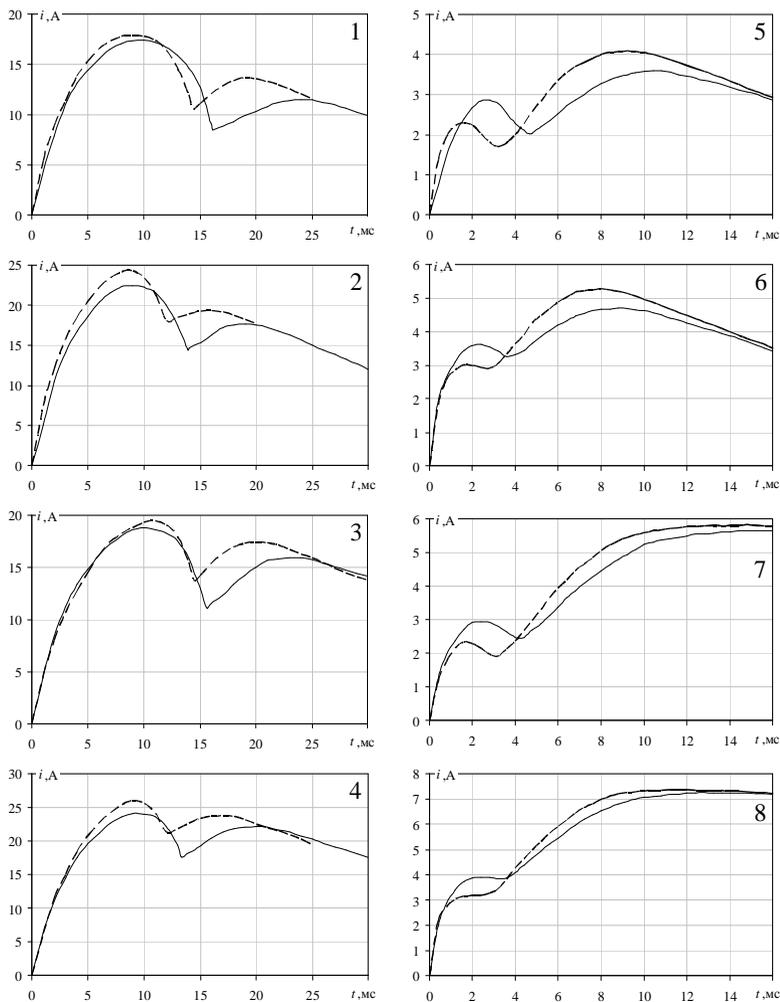


Рис. 3. Кривые изменения тока в ЭМП с разрезанным и цельным сердечниками при включении (1-4) и отключении (5-8) при различных параметрах ЕНЭ

Таблица 3 – Значения времен трогания, включения и отключения ЭМП при варьировании параметров ЕНЭ

№ осциллограммы на рис. 3	С, мкФ	U, В	$t_{тр}$ , мс		$t_{сраб}$ , мс	
			с разрезами	цельный	с разрезами	цельный
1	2000	270	4,0	4,3	14,6	16,2
2	2000	350	3,1	3,4	12,3	13,7
3	3000	270	3,0	4,0	14,8	15,7
4	3000	350	2,6	3,3	12,2	13,2
5	300	270	0,9	2,2	9,0	11,2
6	300	350	0,8	2,0	8,2	9,6
7	2000	270	1,1	1,8	8,8	10,4
8	2000	350	0,8	1,6	8,0	10,0

**Выводы.** С помощью изготовленных опытных образцов ЭМП с цельной и разрезанной частью магнитопровода (сердечника) экспериментально установлена степень влияния вихревых токов в сердечнике ЭМП на его динамические характеристики, а именно:

1. Так как магнитная система ЭМП при включении является разомкнутой, то вихревые токи в сердечнике не оказывают существенного влияния на быстродействие ЭМП. Отношения времен трогания и включения ЭМП с цельным сердечником к соответствующим временам ЭМП с разрезанным сердечником при различном напряжении и емкости ЕНЭ лежат в пределах:

- для времени трогания: 1,05-1,32;
- для времени включения: 0,9-1,06.

2. При отключении замкнутая магнитная система ЭМП является насыщенной. Поэтому вихревые токи оказывают значительное демпфирующее действие на скорость нарастания тока в обмотке до начала движения якоря, а также увеличивают время движения якоря. Отношения времен трогания и отключения ЭМП с цельным сердечником к соответствующим временам ЭМП с разрезанным сердечником при различном напряжении и емкости ЕНЭ лежат в пределах:

- для времени трогания: 1,7-4,5;
- для времени отключения: 1,2-1,8.

3. Степень влияния параметров ЕНЭ на динамические характеристики ЭМП различна. Емкость ЕНЭ не оказывает значительного влияния на времена трогания и срабатывания, как при включении, так и при отключении ЭМП. Наоборот, напряжение питания ЕНЭ существенно влияет на быстродействие ЭМП; причем с увеличением напряжения питания степень влияния вихревых токов на динамические характеристики ЭМП ослабевает.

4. При включении вихревые токи в сердечнике в зависимости от напряжения (225-350 В) и емкости (2000-3000 мкФ) ЕНЭ увеличивают время трогания в 1,05-1,32 раза, время включения – в 0,9-1,06 раза.

5. При отключении вихревые токи в сердечнике в зависимости от напряжения (100-200 В) и емкости (300-1200 мкФ) ЕНЭ увеличивают время трогания в 1,7-4,5 раза, время отключения – в 1,2-1,8 раза.

6. При окончательном выборе конструкции сердечника ЭМП и параметров ЕНЭ необходимо руководствоваться требуемыми временами срабатывания вакуумного выключателя. Для повышения быстродействия вакуумного выключателя рекомендуется выполнять сердечник ЭМП с радиальными разрезами.

**Список литературы:** 1. *Клименко Б.В.* Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі. Навчальний посібник / Клименко Б.В. – Харків: Талант, 2008. – 208 с. 2. *Родштейн Л.А.* Электрические аппараты / *Родштейн Л.А.* – Л.: Энергоиздат, 1981. – 304 с. 3. *Чунихин А.А.* Электрические аппараты: Общий курс / *Чунихин А.А.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с. 4. *VM1. Vakuum Leistungsschalter mit Magnetantrieb.* Каталог ABB 2007 [Электронный ресурс] / ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH. ABB Sace T.M.S. S.p.A. – Режим доступа: [www.abb.de/calor](http://www.abb.de/calor). 5. *Мельник Я.В.* Выключатели вакуумные серии ВР. Особенности конструкции, результаты испытаний и эксплуатации / *Я.В. Мельник* // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2003. – № 3. – С. 90-94. 6. *Лысов Н.Е.* Расчет электромагнитных механизмов / *Лысов Н.Е.* – М.: Оборонгиз, 1949. – 112 с. 7. *Клименко Б.В.* Форсированные электромагнитные системы / *Клименко Б.В.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с. 8. *Карасев В.А.* Влияние вихревых токов на переходные процессы в электромагнитах / *В.А. Карасев* // *Электричество.* – 1963. – № 9. – С. 33-37. 9. Выключатель вакуумный с электромагнитным приводом ВБ4-Э3 10(6) кВ. Техническая информация [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.abm-amper.com/userfiles/file/ВБ4-Э3\\_каталог.pdf](http://www.abm-amper.com/userfiles/file/ВБ4-Э3_каталог.pdf). 10.



**Гречко Александр Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических аппаратов НТУ "ХПИ". Защитил диссертацию кандидата технических наук в 2009 г. в НТУ "ХПИ" по специальности "Электрические машины и аппараты". Научные интересы связаны с проблемой усовершенствования электромагнитных механизмов электрических аппаратов.

*Поступила в редколлегию 16.05.2012*

УДК 621.316

**Экспериментальное исследование влияния вихревых токов в сер-**

**дечнике магнітопровода на динамічні характеристики електромагнітного привода / Гречко А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 9-17. Бібліогр.: 9 назв.**

У статті наведені результати експериментального дослідження ступеня впливу вихрових струмів в осерді електромагнітного привода вакуумного вимикача середньої напруги на його динамічні характеристики.

**Ключові слова:** вихрові струми, електромагнітний привід, вакуумний вимикач.

In the paper results of experimental research of the degree of influence of the eddy currents in the core of the medium voltage vacuum circuit breaker electromagnetic drive on its dynamic characteristics are presented.

**Key words:** eddy currents, electromagnetic drive, vacuum switch.