

Е.Г. КОРОЛЬ, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Запропоновано аналітичні співвідношення для розрахунку максимуму поля струмів автоматичного вимикача. Проведено аналіз максимальних рівнів поля на видаленнях від поверхні автоматичного вимикача. Отримано оцінки поля для автоматичних вимикачів серії А3700 з урахуванням величин номінальних струмів. Установлено невідповідність окремих автоматичних вимикачів серії А3700 вимогам стандартів по електромагнітній сумісності в частині магнітних полів частоти мережі.

Предложены аналитические соотношения для расчета максимума поля токов автоматического выключателя. Проведен анализ максимальных уровней поля на удаленных от поверхности автоматического выключателя. Получены оценки поля для автоматических выключателей серии А3700 с учетом величин номинальных токов. Установлено несоответствие отдельных автоматических выключателей серии А3700 требованиям стандартов по электромагнитной совместимости в части магнитных полей частоты сети.

Введение. В Украине и за рубежом актуальной является проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) силового электрооборудования (ЭО) со слаботочными элементами систем контроля, управления и измерения, о чем свидетельствуют принятые стандарты в этой области [1-3]. Эти требования разделяются на требования по электрическому и магнитному полю. Во втором случае для обеспечения ЭМС необходимо снижение внешнего магнитного поля (ВМП) до требуемого уровня. Основным источником ВМП, в частности автоматических выключателей (АВ), являются силовые токопроводы со сложной трехмерной пространственной конфигурацией. Отрицательное влияние ВМП очевидно и проявляется в снижении надежности функционирования технических объектов. Кроме того, ухудшается экологическая обстановка, снижающая степень безопасности обслуживающего персонала при эксплуатации ЭО [4].

Уровни ВМП существенно отличаются в известных стандартах нормативных документах. Это связано с тем, что в зарубежных странах поразному оценивается негативное влияние ВМП на технические объекты и человека. Диапазон уровней ВМП колеблется от 110 мкТл (85 А/м по напряженности для силовых шинопроводов) [2] до 1 мкТл (0,77 А/м) [5] для

технических средств и до 0,4 мкТл (0,31 А/м) [6] для экологической безопасности. В этой связи при разработке АВ необходимо иметь четкое представление о требуемом уровне ВМП, что, в конечном счете, определяет не только его технические характеристики, но и возможности создания конкурентно способного ЭО.

Цель работы – оценка ВМП автоматических выключателей серии АЗ700 и его соответствие требованиям стандартов.

Методика оценки ВМП АВ. Силовая цепь АВ представляет собой систему шинопроводов, обтекаемых системой трехфазных переменных токов. В большинстве случаев изменяются по синусоидальному закону и в этом случае сдвиги фаз токов трехфазной системы составляют 120 эл. град. Случай несинусоидальных токов возможен при условии, что АВ установлен в силовой цепи, в которой имеются полупроводниковые приборы (например, тиристоры). Такой случай на практике встречается для комплектных распределительных устройств, предназначенных для компенсации реактивной мощности, либо в сочетании с гибридными электрическими аппаратами. В этом случае через АВ протекают несинусоидальные токи [7]. В данной работе рассматривается только оценки для синусоидальных токов частоты сети. Это допущение оправдано тем, что при наличии несинусоидальных составляющих токов их амплитуды в большинстве случаев не превышают 0,1 амплитуды основной гармоники частоты сети, а отличие в величинах ВМП еще меньше.

Оценка проводится на основе результатов расчета ВМП системы трехфазных токов АВ. При этом силовая цепь АВ представляется в виде "проволочной" модели, т.е. элементы токопроводов заменяются тонкими линиями, совпадающими с осями токопроводов. Кроме того,

"проволочная" модель представляется в виде системы линейных отрезков с токами. Методика расчета ВМП в этом случае известна [8].

Предлагаемая методика оценки основана на расчете напряженности ВМП контуров, обтекаемых системой трехфазных токов, суммировании напряженности в точке и определении максимума поля на заданном удалении.

Расчет декартовых компонент напряженности ВМП линейного отрезка контура с током (рис. 1) проводится на основе известных соотношений [8] для

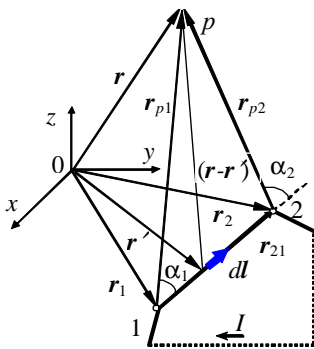


Рис. 1.

элементарного отрезка длины dl с током I . На рис. 1 использованы обозначения: r_{p1} – вектор, проведенный из начала отрезка (индекс 1) в точку наблюдения (индекс p); r_{p2} – вектор, проведенный из конца отрезка (индекс 2) в точку наблюдения; r_{21} – вектор, проведенный из начала в конец отрезка; $\cos \alpha_1$, $\cos \alpha_2$ – косинус угла между векторами r_{21} , r_{p1} и r_{21} , r_{p2} соответственно; x, y, z – координаты точки, в которой рассчитывается поле; x_1, y_1, z_1 – координаты точки начала отрезка; x_2, y_2, z_2 – координаты точки конца отрезка; r – радиус-вектор точки наблюдения; r' – радиус-вектор элементарного отрезка с током.

Выражения для компонент напряженности получаются интегрированием компонент ВМП элементарного отрезка с током в пределах длины отрезка:

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

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

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

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

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

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

$$\cos \alpha_2 = \frac{[(x_2 - x_1)(x - x_2) + (y_2 - y_1)(y - y_2) + (z_2 - z_1)(z - z_2)]}{r_{21} r_{p2}}.$$

Для определения максимума переменного магнитного поля в точке можно воспользоваться подходом, примененным в работе [9] для определения максимума переменного магнитного момента. Суть этого подхода заключается в том, что переменный магнитный момент фиксированной частоты может быть представлен на фазовой плоскости в виде вращающегося вектора, описывающего годограф.

Для этого система исходных векторов, характеризующих источник поля переменных токов, преобразуется к системе двух фиксированных векторов в пространстве. Оба вектора являются пульсирующими, а их временные фазы сдвинуты на 90 эл. град. При этом один из них можно считать изменяющимся во времени по закону синуса, а второй – по закону косинуса. Учитывая, что годограф магнитного момента расположен в плоскости этих векторов, разложение каждого из векторов на прямо и обратно вращающиеся составляющие позволяет определить максимум поля на основе значений пространственных компонент пульсирующих векторов. При этом решение задачи определения максимума поля получается в результате операций геометрических преобразований пульсирующих векторов с фиксированными амплитудами.

Силовая цепь АВ может быть представлена двумя контурами, обтекаемыми токами фаз А и С [9]. Для контура силовой цепи АВ, обтекаемой током фазы А, амплитуда напряженности поля в точке наблюдения определяется суммированием соответствующих амплитуд компонент ВМП:

$$H_{u\Sigma A} = \sum_k H_{ukA} , \quad (2)$$

где H_{ukA} – амплитуда компоненты напряженности ВМП в пространственном направлении u , создаваемого током фазы А k -го отрезка контура; u – индекс направления, принимающий значение x, y, z ; $H_{u\Sigma A}$ – амплитуда компоненты напряженности ВМП контура.

Составляющая напряженности H_{ukA} рассчитывается по соотношениям (1), для каждого k -го отрезка контура.

Аналогично соотношению (2) определяется составляющая напряженности ВМП для второго контура АВ, обтекаемого током фазы С. При этом суммирование проводится по l отрезкам этого контура:

$$H_{u\Sigma C} = \sum_l H_{ulC} . \quad (3)$$

С учетом (2), (3) мгновенное значение компоненты напряженности ВМП в точке наблюдения может быть представлено в виде:

$$H_u(t) = H_{u\Sigma A} \sin(\omega t) + H_{u\Sigma C} \sin(\omega t + 2\pi/3) , \quad (4)$$

где ω – круговая частота сети; t – время.

Соотношение (4) может быть преобразовано к двум ортогональным составляющим, изменяющимся по законам синуса и косинуса:

$$H_u(t) = H_{us} \sin(\omega t) + H_{uc} \cos(\omega t) , \quad (5)$$

где $H_{u\Sigma s}$, $H_{u\Sigma c}$ – амплитуды синусных и косинусных составляющих компонент напряженностей ВМП вдоль оси u ,

$$H_{us} = H_{u\Sigma s} + H_{u\Sigma c} \cos(2\pi/3) = H_{u\Sigma s} - H_{u\Sigma c}/2; \quad (6)$$

$$H_{uc} = H_{u\Sigma c} \sin(2\pi/3) = \sqrt{3} H_{u\Sigma c}/2.$$

С учетом (6) определяются модули пространственных векторов напряженности ВМП в точке наблюдения, изменяющихся по законам синуса и косинуса:

$$H_s = \sqrt{\sum_{u=x,y,z} H_{us}^2}; \quad H_c = \sqrt{\sum_{u=x,y,z} H_{uc}^2}. \quad (7)$$

На основе соотношения (5) с учетом (7) получена следующая формула для максимума напряженности ВМП в точке наблюдения:

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

где α – угол между векторами H_s и H_c определяется исходя из соотношения для косинуса угла между двумя прямыми:

$$\cos \alpha = (H_{xc}H_{xs} + H_{yc}H_{ys} + H_{zc}H_{zs}) / (H_c H_s). \quad (9)$$

Соотношения (8) и (9) позволяют проводить расчет распределений напряженности ВМП в заданных точках.

Для плоских контуров с осевой симметрией соотношение (8) для максимума ВМП упрощается:

$$H_{max} \approx \sqrt{3} H_s. \quad (10)$$

Исходные данные для расчета ВМП. Согласно [2], требования по величине ВМП приводятся для четырех расстояний от поверхности ЭО. В большинстве случаев АВ располагаются в распределительных устройствах (секциях) низкого напряжения, таким образом, что их лицевая панель совпадает с плоскостью лицевой панели секции. С учетом этого нормируемые значения величины напряженности ВМП при оценке поля АВ приняты равными значениям поля для секции типовой подстанции напряжением 6 кВ, приведенным в табл. 1.

Таблица 1 – Нормированные значения напряженности ВМП.

Источник магнитного поля	Секция 6 кВ			
	Поле на расстоянии, м	0,3	0,5	1,0
Напряженность магнитного поля, А/м	8-13	6,5-9	3,5-4,3	2-2,4

Учитывая, что АВ секций располагаются обычно вертикально, то

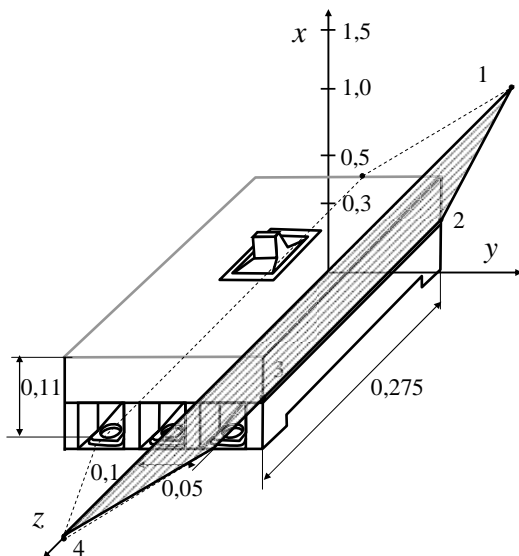


Рис. 2.

величина максимального поля оценивается в горизонтальном направлении. С учетом этого на рис. 2 приведена схема расположения АВ в выбранной системе координат xuz : ось x направлена перпендикулярно лицевой панели АВ и секции, ось z – вдоль шин АВ, а ось y – перпендикулярно осям x и z . Центр системы координат располагается

в плоскости шин АВ.

Кроме самих шин как источников ВМП при расчете учитывались развилки кабелей питания и нагрузки соответственно на входе и на выходе АВ. Форма этих развилок треугольная, точки ветвления фаз кабелей располагаются на оси шинопровода центральной фазы (В). Нумерация точек одного из контуров показана на рис. 2 (контур заштрихован). В зависимости от серии АВ координаты точек контура приведены в табл. 2. Расположение точек наблюдения p также показано на рис. 2. Расстояния r от поверхности АВ (секции) принимают значения 0,3; 0,5; 1,0; 1,5 м.

Результаты расчета. В табл. 3 приведены результаты расчета максимальной напряженности H^* поля для различных серий АВ и расстояний точек наблюдения r , соответствующих стандартам [1,2]. Расчеты проведены на основе соотношения (10). В этой же табл. 3 приведены диапазоны допустимых значений напряженности по ГОСТ.

По данным табл. 3 на рис. 3,а-г построены серии графических зависимостей $H^*(r)$ для различных номинальных токов и области допустимых значений напряженности $H(r)$ по ГОСТ для рассматриваемых серий АВ:

а – для А3720; б – для А3770; в – для А3780; г – для А3790.

Таблица 2 – Координаты точек 1-4 контура силовой цепи АВ

Серия АВ	I, А	Точка контура	Координаты точек силовой цепи		
			x	y	z
А3720	160, 250	1	-0,11	0	0,245
		2	-0,11	0,05	0,145
		3	-0,11	0,05	-0,145
		4	-0,11	0	-0,245
А3770	100, 125, 160	1	-0,11	0	0,215
		2	-0,11	0,05	0,115
		3	-0,11	0,05	-0,115
		4	-0,11	0	-0,215
А3780	160, 200, 250	1	-0,11	0	0,223
		2	-0,11	0,05	0,123
		3	-0,11	0,05	-0,123
		4	-0,11	0	-0,223
А3790	100, 160, 250, 320, 400, 500, 630	1	-0,13	0	0,249
		2	-0,13	0,05	0,149
		3	-0,13	0,05	-0,149
		4	-0,13	0	-0,249

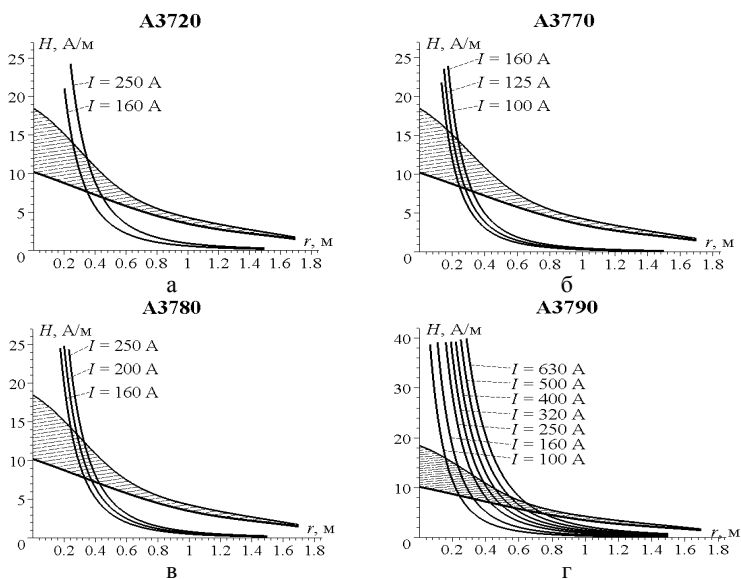


Рис. 3

Таблица 3 – Результаты расчета напряженности ВМП для АВ.

Серия	I, А	Точка р	Расстояния r, м	Напряженность по ГОСТ, А/м	H, А/м
А3720	160	1	0,3	8-13	10,25
		2	0,5	6,5-9	3,45
		3	1	3,5-4,3	0,61
		4	1,5	2-2,4	0,2
	250	1	0,3	8-13	16,03
		2	0,5	6,5-9	5,38
		3	1	3,5-4,3	0,95
		4	1,5	2-2,4	0,32
А3770	100	1	0,3	8-13	5,7
		2	0,5	6,5-9	1,87
		3	1	3,5-4,3	0,33
		4	1,5	2-2,4	0,11
	125	1	0,3	8-13	7,13
		2	0,5	6,5-9	2,34
		3	1	3,5-4,3	0,41
		4	1,5	2-2,4	0,13
	160	1	0,3	8-13	9,13
		2	0,5	6,5-9	2,99
		3	1	3,5-4,3	0,52
		4	1,5	2-2,4	0,17
А3780	160	1	0,3	8-13	9,45
		2	0,5	6,5-9	3,12
		3	1	3,5-4,3	0,54
		4	1,5	2-2,4	0,18
	200	1	0,3	8-13	11,81
		2	0,5	6,5-9	3,90
		3	1	3,5-4,3	0,68
		4	1,5	2-2,4	0,23
	250	1	0,3	8-13	14,77
		2	0,5	6,5-9	4,87
		3	1	3,5-4,3	0,85
		4	1,5	2-2,4	0,28
А3790	100	1	0,3	8-13	5,72
		2	0,5	6,5-9	2,00
		3	1	3,5-4,3	0,37
		4	1,5	2-2,4	0,12
	160	1	0,3	8-13	9,16
		2	0,5	6,5-9	3,20
		3	1	3,5-4,3	0,59
		4	1,5	2-2,4	0,20
	250	1	0,3	8-13	14,31
		2	0,5	6,5-9	5,00
		3	1	3,5-4,3	0,92
		4	1,5	2-2,4	0,31
	320	1	0,3	8-13	18,31
		2	0,5	6,5-9	6,40
		3	1	3,5-4,3	1,18
		4	1,5	2-2,4	0,40
	400	1	0,3	8-13	22,89
		2	0,5	6,5-9	8,0
		3	1	3,5-4,3	1,48
		4	1,5	2-2,4	0,50
	500	1	0,3	8-13	28,61
		2	0,5	6,5-9	10,0
		3	1	3,5-4,3	1,84
		4	1,5	2-2,4	0,62
630	1	0,3	8-13	36,06	
	2	0,5	6,5-9	12,59	
	3	1	3,5-4,3	2,32	
	4	1,5	2-2,4	0,79	

Анализ результатов расчета. Как видно на графиках рис. 3,а-г в области вблизи поверхности АВ (секции) расчетные величины напряженности ВМП превышают требования стандарта Украины [2]. Более точную информацию о превышениях уровня ВМП дают данные табл. 3, в которой повышенные уровни ВМП выделены затенением.

С точки зрения величин токов в табл. 3 видно, что АВ на токи более 160 А имеют уровни поля превышающие требования стандартов. С точки зрения расстояния, уровни ВМП АВ серий А3720, А3780 превышают требования [2] на расстояниях менее 0,5 м, а для АВ серии А3790 – на расстоянии менее 1,0 м.

Полученные данные свидетельствуют о том, что практически все АВ на малых расстояниях не соответствуют требованиям действующих стандартов в Украине. В этой связи актуальной становится задача снижения ВМП АВ серии А3700.

Что касается требований по ВМП, действующих в зарубежных странах [5], то на расстоянии менее 1,0 м практически все АВ превышают эти требования. Это же относится и к экологической безопасности.

Выводы. 1. Разработана инженерная методика оценки максимального уровня поля автоматических выключателей. Методика предполагает определение максимальной величины напряженности по оси автоматического выключателя в точках, удаленных на расстояния от его поверхности, указанные в действующем стандарте Украины.

2. Проведено численное моделирование внешнего магнитного поля автоматических выключателей серий А3720, А3770, А3780 и А3790 на все номинальные токи. Установлено, что для автоматических выключателей на токи более 160 А существует превышение требований действующего стандарта. Уровни внешнего магнитного поля автоматических выключателей А3720, А3780 превышают требования стандарта на расстояниях менее 0,5 м, а для А3790 – на расстоянии менее 1,0 м.

3. Проведенный анализ показывает необходимость разработки мероприятий по снижению уровня внешнего магнитного поля автоматических выключателей серии А3700. Степень снижения уровня поля должна выбираться для каждого выключателя этой серии на основе экспериментальных данных.

Список литературы: 1. ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля. – Введ. 01.07.93. – М.: Изд-

во стандартів, 1993. – 5 с. **2.** 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. **3.** 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 р. **4.** Крыжов Г.П., Кравченко О.А. Как защититься от вредного воздействия электромагнитного поля (допустимые нормы напряженности поля, ограничения на время пребывания в поле без защитных средств) // Электропанорама. – 2002. – № 11. – С. 40-42. **5.** 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. **6.** National and International EMF Reviews. – June 2002. – pp. 50-58. <http://www.niehs.nih.gov/emfrapid>. **7.** Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита: Учебник / Под ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравелла, 2005. – 344 с **8.** Лупиков В.С., Себякина Н.В., Крюкова Н.В., Вырвец С.В. Особенности расчета внешнего магнитного поля сложного кусочно-линейного контура с током // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – Луганськ: Видавництво СХУ. – 2002. – № 8 (54). – С. 169-178. **9.** Лупиков В.С., Крюкова Н.В. и др. Анализ магнитного момента токов трехфазного источника поля // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2006. – № 4. – С. 47-51.



Король Елена Геннадиевна, 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.

Поступила в редколлегию 10.06.10