

В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук., проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков

И.С. ВАРШАМОВА, м.н.с., НТУ "ХПИ", Харьков

О.А. ГЕЛЯРОВСКАЯ, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков

Н.В. КРЮКОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

И.В. ПОЛЯКОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

К.А. САВЧЕНКО, студент, НТУ "ХПИ", Харьков

О.Ю. ПИЛЮГИНА, канд. техн. наук, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

Ю.Д. РУДАС, канд. техн. наук, с.н.с., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ С ТРАНСПОНИРОВАННЫМ ТОКОПРОВОДОМ

A technique of external magnetic field modeling in the three-phase electric equipment is developed. By results of modeling recommendations concerning transposition of switchboards conductors before terminals of a three-phase automatic switch are proposed to satisfy requirements of ecological safety in electric substations.

Разработан алгоритм математического моделирования внешнего магнитного поля трехфазного электрооборудования. По результатам моделирования предложены рекомендации по использованию транспонированных токопроводов в распределительных устройствах электрических подстанций при обеспечении требований экологической безопасности.

Розроблено алгоритм математичного моделювання зовнішнього магнітного поля трифазного електроустановки. За результатами моделювання запропоновано рекомендації щодо використання транспонування струмопроводів в розподільних пристроях електричних підстанцій при забезпеченні вимог екологічної безпеки.

Введение. Электрические подстанции являются электроустановками, предназначенными для преобразования и распределения электроэнергии. Выполняются они в виде распределительных устройств (РУ) и располагаются в городах, где поблизости постоянно находятся люди, например, вблизи жилых домов или непосредственно в них на первом этаже [1]. При работе входящего в их состав электрооборудования (ЭО) создается внешнее магнитное поле (ВМП) в основном на

частоте сети (50 Гц), которое присутствует как внутри, так и снаружи РУ. Это поле действует как на человека, так и на технические средства – электрические аппараты защиты, управления и автоматики. Длительное влияние ВМП на человека негативно влияет на его психику, приводит к расстройству нервной и сердечнососудистой систем, обуславливает снижение работоспособности [2]. Научные исследования по этой проблеме проводятся во многих развитых странах мира, в том числе в США, Японии, Канаде, Украине, России. Для примера, действующие нормы по уровню ВМП частоты сети в разных странах составляют: Украина – 1750 мкТл; Россия, Великобритания – 100 мкТл; Италия – 3 мкТл [3]; Швеция – 0,25 мкТл. В Украине ведется подготовка к введению нормы в 0,5 мкТл (перспективные требования, 0,63 А/м). В условиях предполагаемого резкого ужесточения требований по уровню ВМП необходимо изменить и подход к РУ как источникам ВМП и выбору средств его снижения. Известные данные [4] относятся к эффективности компенсации магнитного момента ЭО (порядка 100 единиц), что обеспечивало требуемое снижение ВМП на больших удалениях от его поверхности. На малых расстояниях от поверхности ЭО эффективность снижения ВМП с использованием транспонирования не оценивалась и конкретных исследований в этом направлении в Украине не проводилось.

Цель работы – оценка эффективности снижения ВМП плоских трехфазных токопроводов с помощью транспонирования плоских трехфазных токопроводов.

Условия моделирования. В качестве объекта моделирования выбран автоматический выключатель серии АЗ700 (АВ) на номинальный ток 400 А (действующее значение). Силовая цепь АВ представлена двумя плоскими контурами, обтекаемыми системой трехфазных токов. Предполагается что режим работы АВ установившийся, переменные токи фаз синусоидальные, имеют одинаковую амплитуду и сдвинуты во времени на $2\pi/3$ рад. В качестве контрольной использована плоскость P параллельная лицевой стороне АВ. За начало декартовой системы координат принят геометрический центр АВ. Направления осей x , y , z совпадают с конструктивными осями АВ. Схема расположения плоскости P относительно лицевой стороны АВ в выбранной системе координат приведена на рис. 1. Обозначения на рис. 1: 1 – АВ; 2 – при моделировании расстояние от лицевой стороны АВ до плоскости P выбрано в соответствии со стандартом [5] равным 0,3; 0,5; 1,0; 1,5 м. Эти же расстояния сохраняются для РУ при условии расположения лицевой стороны АВ на передней панели РУ.

Рассмотрено два варианта транспонирования токопроводов:

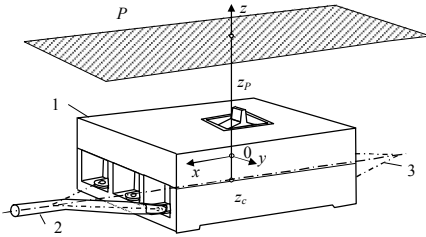


Рис. 1. Расположение контрольной плоскости относительно АВ.

первый вариант – одностороннее (асимметричное) транспонирование фаз входных токопроводов относительно средней фазы на одной стороне АВ и *второй вариант* – двухстороннее (симметричное) транспонирование токопроводов на входных и выходных выводах АВ. При расчетах предполагается, что токопроводы силовой

цепи АВ и подводящие токопроводы с объемным распределением токов представляются в виде тонких линий, повторяющих геометрию осей их линейных участков.

На рис. 2 приведены схемы расположения токопроводов АВ и транспонированных токопроводов:

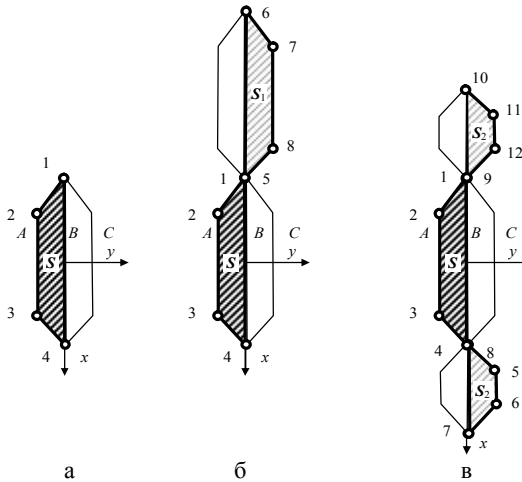


Рис. 2. Контуры АВ с подводящими кабелями и варианты выполнения транспонированных токопроводов.

а – контуры АВ, образованные токопроводами фаз АВ и СВ (В средняя фаза) и подводящими токопроводами (развилками кабелей); б, в – первый и второй варианты расположения АВ и транспонированных токопроводов. Точки излома токопроводов пронумерованы и показаны для контуров фаз АВ на рис. 2. Числовые значения координат x_i, y_i, z_i точек

i контуров фаз AB приведены в табл. 1. Координаты точек контура фаз CB отличаются от координат контура AB только по координате y и имеют противоположные по знаку значения и в табл. 2 не приведены.

Таблица 1 – Координаты точек контуров АВ и транспонированных токопроводов (м).

| Источник поля | Фазы | Номер точки | x_i | y_i | z_i |
|----------------|------|-------------|--------|-------|--------|
| АВ | AB | 1 | -0,223 | 0 | -0,055 |
| | | 2 | -0,123 | -0,05 | |
| | | 3 | 0,123 | -0,05 | |
| | | 4 | 0,223 | 0 | |
| Первый вариант | AB | 1 | -0,223 | 0 | -0,055 |
| | | 2 | -0,123 | -0,05 | |
| | | 3 | 0,123 | -0,05 | |
| | | 4 | 0,223 | 0 | |
| | | 5 | -0,223 | 0 | |
| | | 6 | -0,669 | 0 | |
| | | 7 | -0,569 | 0,05 | |
| | | 8 | -0,323 | 0,05 | |
| Второй вариант | AB | 1 | -0,223 | 0 | -0,055 |
| | | 2 | -0,123 | -0,05 | |
| | | 3 | 0,123 | -0,05 | |
| | | 4 | 0,223 | 0 | |
| | | 5 | 0,323 | 0,05 | |
| | | 6 | 0,396 | 0,05 | |
| | | 7 | 0,496 | 0 | |
| | | 8 | 0,223 | 0 | |
| | | 9 | -0,223 | 0 | |
| | | 10 | -0,496 | 0 | |
| | | 11 | -0,396 | 0,05 | |
| | | 12 | -0,323 | 0,05 | |

Площади транспонированных контуров выбирались из условия полной компенсации магнитных моментов:

$$S = -S_1 = -2S_2, \quad (1)$$

где S , S_1 , S_2 – векторы площадей контуров фаз AB выключателя и первый и второй варианты транспонирования токопроводов.

При выполнении условий (1) предполагается, что с увеличением расстояния от АВ эффективность компенсации ВМП также увеличивается.

Алгоритм моделирования ВМП трехфазного ЭО. Особенности моделирования переменного ВМП, создаваемого системой трехфазных токов частоты сети, связаны с различием фаз токов. Учет этих фаз мо-

жет быть выполнен либо применением комплексных величин для токов, либо с использованием гармонического анализа для мгновенных значений токов. В работе использован второй подход, что позволяет проводить моделирование поля не только синусоидальных, но и несинусоидальных токов.

Алгоритм включает:

- расчет трех приведенных компонент \mathbf{H}'_{xk} , \mathbf{H}'_{yk} , \mathbf{H}'_{zk} вектора напряженности ВМП для каждого k -го контура ЭО для единичного тока без учета фазы по одинаковым соотношениям [6] для отрезка контура с током и суммирования составляющих полей отрезков;

- разложение токов контуров на синусные и косинусные составляющие с амплитудами I_{kcf}, I_{ksf} (f – индекс частоты, принимающий значения 1, 2, 3... для частот 50, 100, 150 ... Гц;

- расчет синусных и косинусных составляющих $\mathbf{H}_{uc}, \mathbf{H}_{us}$ компонент векторов напряженности ВМП ЭО путем перемножения удельных компонент векторов напряженности и составляющих токов и их суммирования по всем K контурам:

$$\mathbf{H}_{uc} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}'_{uk} \cdot I_{kc}; \quad \mathbf{H}_{us} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}'_{uk} \cdot I_{ks} \quad (u = x, y, z).$$

- расчет мгновенной максимальной величины \mathbf{H}_m суммарного вектора напряженности ВМП ЭО по кривой годографа. В случае синусоидальных токов ЭО в [7] получено соотношение для \mathbf{H}_m

$$H_m = \frac{1}{2} \left(\sqrt{H_c^2 + 2H_c H_s \sin \alpha + H_s^2} + \sqrt{H_c^2 - 2H_c H_s \sin \alpha + H_s^2} \right), \quad (2)$$

где H_c, H_s – амплитуды векторов \mathbf{H}_c и \mathbf{H}_s напряженности полей, создаваемых косинусными и синусными составляющими токов ЭО;

$$H_c = H_{xc}^2 + H_{yc}^2 + H_{zc}^2; \quad H_s = H_{xs}^2 + H_{ys}^2 + H_{zs}^2;$$

α – угол между векторами \mathbf{H}_c и \mathbf{H}_s , который определяется исходя из соотношения для косинуса этого угла:

$$\cos \alpha = \frac{H_{xc}H_{xs} + H_{yc}H_{ys} + H_{zc}H_{zs}}{H_c H_s}.$$

В случае несинусоидальных токов величина \mathbf{H}_m может быть определена по кривой годографа [8].

Результаты моделирования. Моделирование проведено для синусоидальных токов АВ частотой 50 Гц, индекс $f = 1$. Величина ам-

плитуды тока фазы равна $400\sqrt{2} \approx 570 \text{ A}$. На основе данных табл. 1 по соотношениям (2) выполнены расчеты максимальных величин напряженности H_m ВМП на контрольной плоскости на различных удалениях x L от поверхности АВ для трех вариантов: исходное поле АВ; первый и второй варианты транспонирования токопроводов.

Эффективность компенсации ВМП определялась как отношение максимальных величин напряженности ВМП, рассчитанных для вариантов транспонирования, к исходному максимальному полю.

Результаты расчета сведены в табл. 2. Здесь же приведены нормированные максимальные величины напряженности.

Таблица 2 – Расчетные величины эффективности компенсации максимального ВМП на удалении L от поверхности АВ

| Источник поля | Удаление L , м | Напряженность H_m , А/м | Норма, А/м | Перспективные требования, А/м | Эффективность |
|----------------|------------------|---------------------------|------------|-------------------------------|---------------|
| АВ | 0,3 | 28,28 | 18,38 | 0,63 | – |
| | 0,5 | 9,90 | 12,73 | | – |
| | 1,0 | 1,73 | 6,08 | | – |
| | 1,5 | 0,62 | 3,39 | | – |
| Первый вариант | 0,3 | 26,16 | 13,00 | | 1,08 |
| | 0,5 | 7,71 | 9,00 | | 1,28 |
| | 1,0 | 0,98 | 4,30 | | 1,77 |
| | 1,5 | 0,25 | 2,40 | | 2,51 |
| Второй вариант | 0,3 | 21,21 | 13,00 | | 1,33 |
| | 0,5 | 5,37 | 9,00 | | 1,84 |
| | 1,0 | 0,42 | 4,30 | | 4,07 |
| | 1,5 | 0,07 | 2,40 | | 8,80 |

Анализ результатов моделирования. Результаты моделирования показывают следующее. Поле АВ вблизи поверхности превышает существующие нормы примерно в 1,5 раза и перспективные требования – примерно в 50 раз.

Сравнение асимметричного и симметричного вариантов транспонирования показывает, что предпочтительным является второй вариант, так как эффективность снижения поля для всех указанных удалений от поверхности АВ выше. Максимальная эффективность (8,8 единиц) достигается при применении симметричного транспонирования, но существенно ниже (более чем на порядок), чем эффективность компенсации магнитного момента (100 единиц). При удалении от поверх-

ности АВ на расстояние 1 м и более транспонирование по второму варианту обеспечивает достижение перспективных требований.

Для обеспечения требований экологической безопасности на удалении более 1 м от поверхности АВ, используемых в составе РУ электрических подстанций, может быть предложено симметричное транспонирование подводящих токопроводов внутри РУ. Оно выполняется как симметричное транспонирование токопроводов на входе и выходе АВ при соблюдении условия равенства по величине площадей контуров АВ с выводами подводящих проводников (развилки кабелей) и суммарной площади контуров транспонированных токопроводов.

Выводы. 1. Разработан алгоритм математического моделирования переменного внешнего магнитного поля трехфазного электрооборудования. Его отличительной особенностью является то, что в качестве контрольного параметра используется максимальная мгновенная величина вектора напряженности магнитного поля в точках на контрольной поверхности. Алгоритм позволяет построить распределение поля в точках на контрольной поверхности, определить точки контрольной поверхности с максимальной величиной напряженности поля и использовать полученные величины для сравнения с требованиями экологической безопасности.

2. С использованием разработанного алгоритма проведено моделирование внешнего магнитного поля, создаваемого системой трехфазных токов автоматического выключателя серии А3700 в составе распределительного устройства электрической подстанции при использовании двух вариантов транспонирования токопроводов для снижения его внешнего магнитного поля: одностороннее транспонирование и симметричное двухстороннее транспонирование токопроводов на входных и выходных выводах выключателя. Показано, что применение симметричного транспонирования токопроводов обеспечивает более эффективное снижение магнитного поля по сравнению с асимметричным вариантом, что позволяет приблизить границу зоны требуемого снижения поля ближе к поверхности автоматического выключателя.

3. По результатам математического моделирования установлено, что эффективность метода транспонирования для уменьшения внешнего магнитного поля вблизи поверхности трехфазного электрооборудования существенно (на порядок) снижается по сравнению с эффективностью этого метода для снижения магнитного момента. Для автоматического выключателя серии А3700 на номинальный ток 400 А (действующее значение) транспонирование токопроводов позволяет обеспечить действующие требования на удалении более 0,5 м от его

поверхности для обоих вариантов транспонирования токопроводов, а для обеспечения перспективных требований – только при симметричном транспонировании токопроводов на удалении более 1 м. В области внешнего пространства с удалением 0,3 м от поверхности транспонирование токопроводов по рассмотренным вариантам не обеспечивает существующих и перспективных требований.

Список литературы: 1. *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. 2. *Любимов В.В.* Искусственные и естественные электромагнитные поля в окружающей человека среде и приборы для их обнаружения и фиксации. – Препр. №11 (1127). – Троицк: ИЗМИРАН, 1999. – 28 с. 3. *D'Amore M., Grifa S., Maradey F.* Shielding techniques of power frequency magnetic field aboard high speed train: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://w3.uniroma1.it/maradei/Pubblicazioni/ACI-19.pdf>. 4. *Лутиков В.С.* Оптимальное использование методов, применяемых для снижения внешнего магнитного поля электрооборудования // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ: Вид-во СУДУ. – 1999. – №6(22). – С. 113-123. 5. 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. 6. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 359 с. 7. *Король Е.Г.* Оценка максимального магнитного поля автоматических выключателей // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 29. – С. 25-34. 8. *Лутиков В.С., Крюкова Н.В., Гелярговская О.А.* и др. Анализ магнитного момента токов трехфазного источника поля // Електротехніка і електромеханіка – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – № 4. – С. 47-51.

*Поступила в редколлегию 20.01.2012.
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*