

*М.М. РЕЗИНКИНА*, д-р техн. наук, гл.н.с., Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков  
*В.С. ГРИНЧЕНКО*, м.н.с., Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКОПРОВОДА ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ПЛАСТИН**

Описаны экспериментальные исследования экранирующих свойств системы двух электропроводных пластин в зависимости от их расположения относительно трехфазного токопровода, являющегося источником первичного магнитного поля. Показано, что наибольшая эффективность экранирования магнитного поля токопроводов достигается, если одна из пластин расположена над токопроводами, а другая – на определенном расстоянии между токопроводами и защищаемой областью.

**Ключевые слова:** электромагнитный экран, эффективность экранирования, трехфазная линия, промышленная частота.

Описані експериментальні дослідження екрануючих властивостей системи двох електропровідних пластин залежно від їх розташування відносно трифазного струмопровода, яке є джерелом первинного магнітного поля. Показано, що найбільша ефективність екранування магнітного поля струмопроводів досягається, якщо одна з пластин розташована над струмопроводами, а інша – на певній відстані між струмопроводами та областю, що захищається.

**Ключові слова:** електромагнітний екран, ефективність екранування, трифазна лінія, промислова частота.

The experimental research of two conductive plates screening properties depending on their location in relation to three-phase bus-bar (which is a source of primary magnetic field) has been described. It has been shown that three-phase bus-bar magnetic field screening factor is the biggest if one of the plates is located above the bus-bars, and the other one is located on the definite distance between bus-bars and protected region.

**Keywords:** electromagnetic shield, screening factor, three-phase line, power frequency.

**Введение.** Магнитное поле (МП) промышленной частоты (ПЧ) является техногенным фактором окружающей среды и, как свидетельствуют медико-статистические исследования, может оказывать негативное

влияние на здоровье людей. В связи с этим в большинстве стран мира вводятся все более жесткие санитарные нормативы по предельно допустимому уровню магнитной индукции низкочастотного поля.

Одним из распространенных источников МП ПЧ являются трехфазные линии электропередачи (ЛЭП): традиционные воздушные ЛЭП и подземные кабельные линии, уже получившие широкое распространение за рубежом и являющиеся перспективным средством передачи электрической энергии в жилых зонах Украины. Эффективным методом снижения переменного МП кабельных линий электропередачи является электромагнитное экранирование. Поэтому актуальной является задача поиска конфигураций электромагнитных экранов, обеспечивающих требуемую эффективность экранирования при меньшем объеме металла, необходимого для их изготовления. Так как аналитическое описание процесса электромагнитного экранирования трехфазной линии затруднительно, то данную задачу решают при помощи численного моделирования [1-3] либо экспериментально [4-8]. В литературе рассмотрено снижение МП трехфазных токопроводов при помощи плоских экранов, представляющими собой электропроводные пластины [1, 2, 5-8],  $U$ -образных [1-4] и экранов замкнутой конфигурации [1, 2, 5]. В [3] путем численного моделирования было показано, что применение электромагнитных экранов, состоящих из двух  $U$ -образных элементов, позволяет на 15-20 % увеличить эффективность экранирования МП трехфазного токопровода по сравнению с однослойным  $U$ -образными экранами эквивалентного объема. В свою очередь, электромагнитные экраны, состоящие из двух электропроводных пластин, не рассматривались.

**Целью работы** является экспериментальное исследование возможности повышения эффективности экранирования МП трехфазной линии системой двух электропроводных пластин путем размещения одной из них над источником МП и выбора оптимального расположения второй пластины.

**Постановка эксперимента.** Измерения проводились на магнитоизмерительном стенде НТЦ МТО НАН Украины. Физическая модель трехфазной линии электропередачи (обозначена "4" на рис. 1) состояла из трех токопроводов длиной 14,5 м каждый, размещенных в горизонтальной плоскости параллельно земле. Конструкция макета трехфазной линии позволяла варьировать расстояние  $\delta$  между соседними токопроводами от 10 см до 30 см. Через токопроводы протекал электрический ток частотой 50 Гц. Действующее значение силы тока было равно 21 А. В токопроводах с координатами  $x=\delta$ ,  $x=0$  и  $x=-\delta$  фаза тока

составляла, соответственно,  $-120^\circ$ ,  $0^\circ$  и  $+120^\circ$  (рис. 1). Измерение тока проводилось при помощи токоизмерительных клещей типа Ц4505М, зав. № 3984, класс точности 4.0.

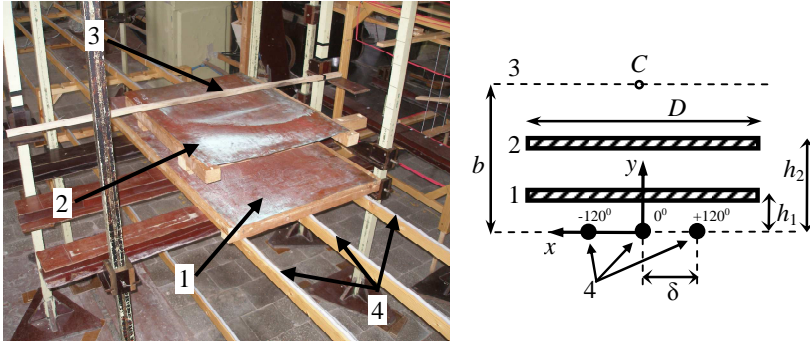


Рис. 1 – Экспериментальная установка

Электромагнитный экран представлял собой систему двух медных пластин прямоугольной формы (обозначены "1" и "2" на рис. 1). Толщина каждой из пластин – 1 мм, ширина  $D=72$  см. Чтобы не ограничивать общность рассматриваемой задачи, длины пластин были выбраны различными: 140 см (пластина № 1) и 85 см (пластина № 2). Расположение пластин относительно токопроводов показано на рис. 1: пластина № 1 и пластина № 2 устанавливались, соответственно, на высоте  $h_1$  и  $h_2$  над токопроводами.

Датчик магнитометра размещался в точках оси измерений, обозначающей положение области экранирования. Ось измерений (обозначена "3" на рис. 1) располагалась на высоте  $b$  параллельно токопроводам в плоскости, проходящей через середины пластин.

Измерение компонент магнитной индукции  $B_x$  и  $B_y$  поля ПЧ проводилось магнитометром типа EMF-827. На рис. 1 показана ориентация осей введенной системы координат: ось  $X$  лежала в горизонтальной плоскости и была направлена перпендикулярно токопроводам, ось  $Y$  была перпендикулярна плоскости расположения трехфазного токопровода. Действующее значение магнитной индукции  $B$  вычислялось по измеренным действующим значениям ее проекций  $B_x$  и  $B_y$ :

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad [9].$$

При проведении эксперимента для каждого из наборов значений  $\{\delta, h_1, h_2, b\}$  находилось распределение действующего значения магни-

тной индукции вдоль оси измерений и определялась ее максимальная величина.

**Результаты эксперимента.** Были проведены две серии измерений: в одном случае расстояние между фазами  $\delta$  было намного меньше ширины пластин  $D$ , в другом значения  $\delta$  и  $D$  были сравнимы.

В первом случае параметры системы "трехфазная линия – электромагнитный экран" были следующими:  $\delta=10$  см,  $h_1=10$  см, высота  $h_2$  пластины № 2 варьировалась от 10 см до 35 см, высота  $b$  расположения оси наблюдения принимала значения 40 см, 50 см и 60 см. В результате измерений была получена представленная на рис. 2 зависимость максимального действующего значения магнитной индукции от высоты размещения пластины № 2 для различных высот расположения оси наблюдения.

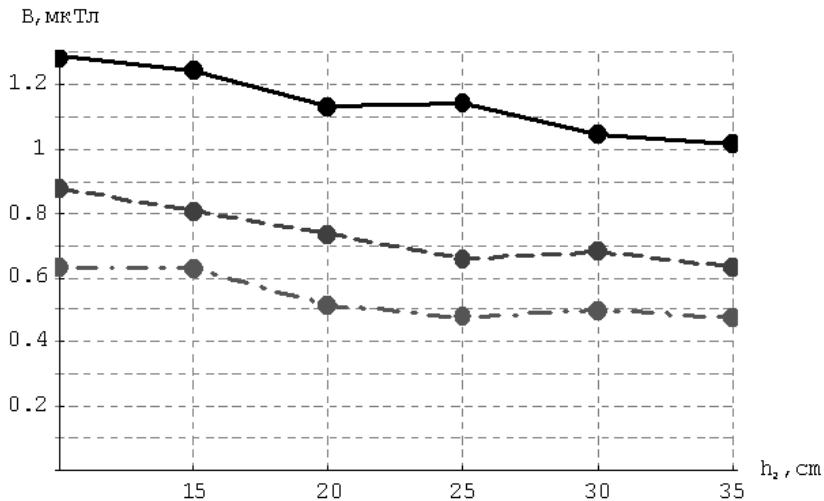


Рис. 2 – Зависимость максимального действующего значения магнитной индукции от высоты размещения пластины № 2 для различных высот расположения оси наблюдения.

На рис. 2 сплошная кривая соответствует расположению оси наблюдения на высоте  $b=40$  см над трехфазной линией, пунктирная кривая – расположению оси наблюдения на высоте  $b=50$  см, точка-тире кривая – на высоте  $b=60$  см. Как видно из представленного графика, зависимости  $B(h_2)$  монотонно убывают. Это обусловлено тем, что в случае  $\delta \ll D$  действующее значение магнитной индукции  $B$  на оси измерений достигает максимума в точке  $C$ , находящейся над центром

экрана (рис. 1). Поэтому приближение верхней пластины к экранируемой области приводит к снижению магнитной индукции и вместе с тем к увеличению эффективности экранирования.

Во второй серии измерений параметры системы были положены следующими: межфазное расстояние  $\delta=30$  см,  $h_1=6,5$  см, высота  $h_2$  пластины № 2 варьировалась от 13,5 см до 24 см, высота расположения оси измерений составляла  $b=29$  см. В этом случае отличие между расстоянием между крайними токопроводами и шириной экрана невелико:  $2\delta \approx D$ . На рис. 3 представлен график зависимости максимальной магнитной индукции на оси измерений от высоты расположения пластины № 2.

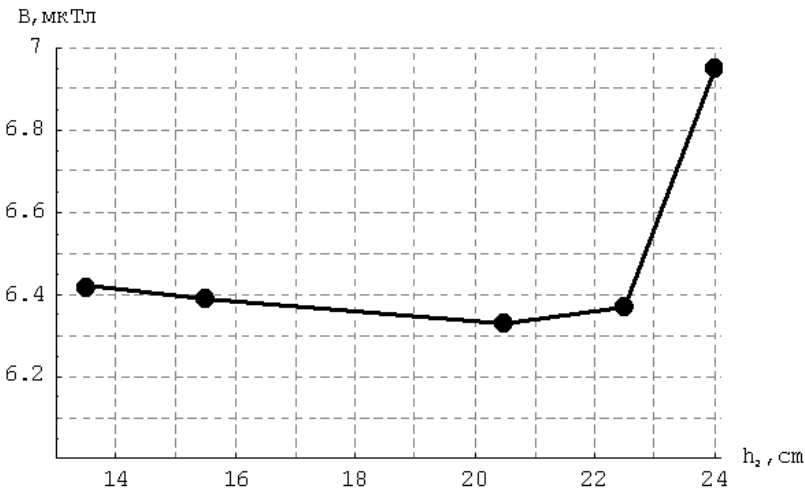


Рис. 3 – График зависимости максимальной магнитной индукции на оси измерений от высоты расположения пластины № 2.

Как видно из представленной зависимости, при приближении пластины № 2 к области экранирования величина магнитной индукции сначала незначительно падает, достигает минимума в окрестности  $h_2 = h_2^* = 20$  см и далее увеличивается. Причем при  $h_2 < h_2^*$  магнитная индукция на оси наблюдения максимальна в точке  $C$ , находящейся над центром экрана, а при  $h_2 > h_2^*$  – в точках областей, которые находятся над краями экрана. В свою очередь, при  $h_2 \approx h_2^*$  магнитная индукция в точке  $C$  и в областях, которые находятся над краями экрана, снижена

примерно до одного значения.

Качественно этот эффект можно объяснить следующим образом: нижняя пластина находится возле трехфазной линии, тем самым реализуя подход "экранирование источника" [2]; верхняя пластина расположена ближе к той части экранируемого пространства, где уровень МП трехфазной линии изначально выше, и обеспечивает в этой области большее его снижение, тем самым реализуя подход "экранирование защищаемой области".

**Выводы.** В результате экспериментальных исследований было показано: если межфазное расстояние намного меньше ширины экрана, то приближение верхнего элемента к экранируемой области увеличивает эффективность экранирования. В свою очередь, если удвоенное межфазное расстояние ненамного меньше ширины экрана, то существует оптимальное расположение верхней пластины, при котором достигается наибольшая эффективность экранирования, и дальнейшее ее приближение к защищаемой области ухудшает экранирующие свойства системы двух электропроводных пластин. Полученный результат подтверждает возможность повышения эффективности экранирования экраном, состоящим из двух электропроводных элементов, за счет оптимизации их расположения без увеличения суммарного объема этих элементов.

**Список литературы:** 1. *Zucca M.* Magnetic field mitigation above a double trefoil HV underground power line / *M. Zucca, P. Ribaldone* // 18th International Conference on Electricity Distribution, 6-9 June 2005. – Turin, 2005. – Paper 91. 2. *del Pino López J.C.* Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables / *J.C. del Pino López, P. Cruz Romero, P. Dular* // International conference on renewable energies and power quality, 28-30 Mach, 2007. – Sevilla, 2007. – Paper 326. 3. *Резинкина М.М.* Снижение уровня магнитного поля подземных токопроводов электромагнитными экранами, состоящими из U-образных элементов / *М.М. Резинкина, В.С. Гринченко* // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 49. – С. 73-78. 4. *Bourdages M.* Assessment of magnetic field mitigation methods for distribution networks / *M. Bourdages, A. Turgeon* // 19th International Conference on Electricity Distribution, 21-24 May 2007. – Vienna, 2007. – Paper 0480. 5. *De Wulf M.* Electromagnetic shielding of high-voltage cables / *M. De Wulf, P. Wouters, P. Sergeant, L. Dupré, E. Hoferlin, S. Jacobs, P. Harlet* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – № 316. – P. 908-911. 6. *Salinas E.* Conductive and ferromagnetic screening of 50 Hz magnetic fields from a three-phase system of busbars / *E. Salinas* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2001. – V. 226-230. – P. 1239-1241. 7. *Beltran H.* Optimal screen width for field reduction applications of low frequency magnetic fields in three-phase conductors / *H. Beltran, V. Fuster, C. Garcia, V. Ferrer, I. Piqueras* // 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica. – Marbella,

Málaga, 2005. – Paper 236. **8.** *D'Amore M.* Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines / *M. D'Amore, E. Menghi, M.S. Sarto* // 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 18-22 Aug. – Istanbul, 2003. – V. 1. – P. 203-208. **9.** *Белицын И.В.* Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. Метод их расчета и нормирования / *И.В. Белицын, Т.В. Котырло, А.В. Макаров* // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 4. – С. 61-65.

*Поступила в редколлегию 19.11.2012*