

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

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛОСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ ТОКОПРОВОДОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Исследована эффективность экранирования магнитного поля трехфазного токопровода системой плоских электропроводных элементов. Показано, что эффективность экранирования системой двух плоских электропроводных элементов, расположенных на высотах δ и 2δ над трехфазным токопроводом, где δ – расстояние между его фазами, на 15% выше эффективности экранирования одним плоским электропроводным элементом эквивалентного объема.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, многослойный плоский экран, подземные кабельные линии, промышленная частота, численное моделирование.

Введение. Традиционно для передачи электрической энергии используются воздушные линии (ЛЭП). Ширина охранной зоны воздушных ЛЭП составляет 10–40 м [1]. Стоимость земли в городах велика, поэтому, как показывает опыт зарубежных стран [2-4], замена в жилой зоне воздушных ЛЭП подземными кабельными линиями (КЛ) является экономически целесообразной, поскольку позволяет существенно уменьшать размеры охранной зоны.

В настоящее время в качестве токопроводов подземных КЛ используют кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Действующее значение силы тока в токопроводах КЛ составляет 500-1000 А, а в некоторых случаях достигает 3000 А [4]. Поэтому на поверхности земли над КЛ действующее значение магнитной индукции промышленной частоты зачастую превышает допустимые санитарно-обоснованные уровни.

Одним из распространенных методов снижения величины переменного магнитного поля (МП) является электромагнитное экранирование. Как правило, электромагнитные экраны выполняют из алюминия, который обладает высокой электропроводностью при относительно низкой стоимости. Для количественного описания степени ослабления МП экраном используют понятие эффективности экранирования, определяемое как отношение магнитной индукции B_0 в отсутствии экрана к магнитной индукции B при его наличии: $k=B/B_0$. Повышение эффективности экранирования МП трехфазных токопроводов достигается за счет применения электромагнитных экранов, состоящих из U -образных элементов [5, 6]. Однако в ряде случаев использование конструктивно более простых плоских экранов оказывается предпочтительным [3, 4]. Обеспечение необходимой эффективности экранирования

© Резинкина М.М., Гринченко В.С., 2013

МП за счет увеличения толщины экрана экономически нецелесообразно. В [7] экспериментально показана возможность повышение эффективности экранирования МП трехфазного токопровода экраном, состоящим из двух параллельных плоских проводящих элементов.

Целью данной работы является исследование эффективности экранирования МП трехфазного токопровода подземной КЛ плоскими проводящими элементами в зависимости от их толщины и высоты расположения над токопроводами.

Параметры системы. Рассмотрим наиболее распространенный на практике случай, когда источником первичного МП является подземная КЛ, представляющая собой трехфазный токопровод с горизонтальным расположением фаз. Параметры трехфазного токопровода следующие: расстояние между фазами $\delta=20$ см, глубина заложения кабелей $h=1$ м, действующее значение тока – 500 А.

Ширина элементов экрана ограничена размерами кабельного канала, в который помещают трехфазный токопровод. Обычно ширина кабельного канала не превышает 4δ . Таким образом, ширина плоских проводящих элементов, из которых состоят рассматриваемые в работе экраны, не должна превышать 0,8 м. Толщина электромагнитных экранов, применяемых в таких случаях на практике, составляет порядка нескольких миллиметров, что существенно меньше толщины скин-слоя, который для алюминия при промышленной частоте равен 12 мм. Исследование электромагнитных процессов при помощи стандартных пакетов (таких как ANSYS, Microwave Studio, OPERA) в случаях наличия проводящих элементов, ширина которых на два порядка превышает их толщину, затруднительно в связи с чрезвычайно высокими требованиями к используемым вычислительным средствам. Поэтому для проведения ряда численных экспериментов по исследованию эффективностей экранирования МП трехфазного токопровода различными системами плоских проводящих элементов воспользуемся методом численного моделирования, который описан в [8]. Этот численный метод основывается на использовании метода конечных разностей, ограничении расчетной области при помощи метода поглощающих граничных условий, ее разделении на ряд дополнительных подобластей, которые содержат проводящие элементы, и применении неравномерной расчетной сетки для вычисления поля в толще стенок экрана с последующей «сшивкой» полученных в каждой подобласти решений. Причем рассматриваемая в данной работе задача снижения МП КЛ может решаться в двумерной постановке, т.к. длина токопроводов КЛ и экранирующих элементов намного превышают расстояние между фазами.

Определение числа плоских проводящих элементов экрана. Для нахождения числа плоских проводящих элементов, из которых должен состоять электромагнитный экран подземной КЛ, проведем две серии численных экспериментов. Стоит отметить, что приближение экрана к

токопроводам улучшает эффективность экранирования, но, как показал анализ литературы, минимально допустимая высота расположения экрана над токопроводами равна δ . В первой серии экспериментов рассмотрим экранирование МП трехфазного токопровода системой $N=2-6$ плоских алюминиевых элементов шириной 4δ , в которой нижний элемент расположен на высоте $h_1=\delta=20$ см над токопроводами, верхний – на высоте $h_2=4\delta=80$ см, расстояния между соседними элементами равны $\Delta = \frac{h_2 - h_1}{N - 1}$, а суммарная

толщина всех элементов равна 6 мм. Тогда при $N=2$ расстояние между элементами равно $\Delta=60$ см, толщина каждого элемента $d=3$ мм, при $N=3$ – $\Delta=30$ см, $d=2$ мм, при $N=4$ – $\Delta=20$ см, $d=1.5$ мм и т.д. Полученное в результате численного моделирования распределение линий равных уровней магнитной индукции ($B_d=4-500$ мкТл) поля трехфазного токопровода, экранированного системой 3-х элементов, представлено на рис. 1, а («1» – трехфазный токопровод, «2» – плоские проводящие элементы).

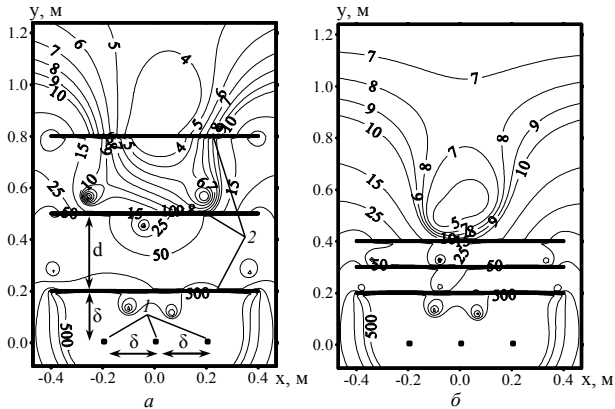


Рис. 1 – Распределение линий равных уровней магнитной индукции поля трехфазного токопровода, экранированного системой 3-х элементов:
а – $B_d=4-500$ мкТл; б – $B_d=5-500$ мкТл

В каждом случае найдем максимальное действующее значение магнитной индукции B_d экранированного поля на уровне земли (который находится на высоте h над токопроводами) и построим зависимость B_d от числа N плоских Al элементов, из которых состоит экран (рис. 2, а). Аналогично проведем вторую серию численных экспериментов с тем отличием, что верхний элемент расположим на высоте $h_2=2\delta=40$ см над токопроводами. На рис. 1, б представлено распределение линий равных уровней магнитной индукции ($B_d=5-500$ мкТл) поля трехфазного токопровода при наличии 3-х элементов, верхний из которых расположен на высоте $h_2=2\delta$. Варьируя число элементов экрана, построим зависимость $B_d(N)$ (рис. 2, б).

Из графиков, представленных на рис. 2, видно, что использование более трех плоских проводящих элементов не ведет к существенному улучшению экранирующих свойств системы. Поэтому сосредоточим внимание на исследовании систем, состоящих из двух и трех элементов.

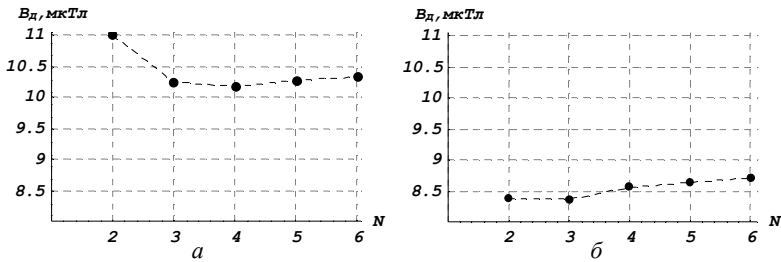


Рис. 2 – Зависимость B_d от числа N плоских А1 элементов, из которых состоит экран: а – верхний элемент расположен на высоте h (на уровне земли) над токопроводами; б – верхний элемент расположен на высоте $h_2=2\delta=40$ см над токопроводами

Сравнивая величины, до которых была снижена магнитная индукция в первом (рис. 2,а) и втором (рис. 2,б) случаях, можно сделать вывод, что лучшими экранирующими свойствами обладает система, верхний и нижний элементы которой находятся на высотах, соответственно, δ и 2δ над токопроводами.

Экранирование МП трехфазного токопровода системой трех плоских проводящих элементов. Исследуем экранирующие свойства системы трех плоских А1 элементов толщиной 2 мм в зависимости от высот их расположения над токопроводами. В первой серии численных экспериментов нижний элемент расположим на высоте $h_1=\delta=20$ см и будем варьировать расстояние Δ между соседними элементами. Полученная зависимость максимального действующего значения магнитной индукции B_d на уровне земли от Δ представлена на рис. 3, а.

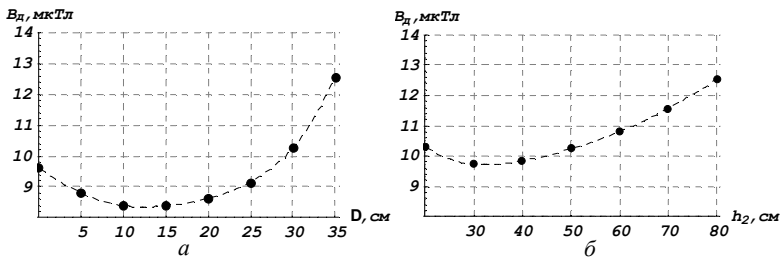


Рис. 3 – Экранирующие свойства системы трех плоских А1 элементов толщиной 2 мм в зависимости от высот их расположения над токопроводами: а – зависимость максимального действующего значения магнитной индукции B_d на уровне земли от Δ ; б – зависимость значения магнитной индукции B_d от расположения среднего элемента $B_d(h_2)$

Во второй серии численных экспериментов нижний элемент расположим на высоте $h_1 = \delta = 20$ см над токопроводами, верхний – на высоте $h_3 = 4\delta = 80$ см. Варьируя высоту h_2 расположения среднего элемента построим зависимость $B_d(h_2)$, которая представлена на рис. 3, б.

Из рис. 3, а видно, что снижение МП максимально при $\Delta = 10$ см, а дальнейшее увеличение расстояния между элементами системы ухудшает ее экранирующие свойства. Значению $\Delta = 10$ см соответствует следующий набор высот расположения элементов: $h_1 = 20$ см, $h_2 = 30$ см, $h_3 = 40$ см.

Зависимость $B_d(h_2)$ для случая $h_3 = 4\delta$ представлена на рис. 3, б, и она также имеет немонотонный характер. Сравнивая ее с зависимостью, представленной на рис. 3, а, можно сделать вывод, что система, в которой верхний элемент расположен вблизи защищаемой области, обладает худшими экранирующими свойствами.

Экранирование МП трехфазного токопровода системой двух плоских проводящих элементов. Теперь рассмотрим экранирующие свойства системы двух плоских проводящих элементов толщиной 3 мм: нижний элемент расположим на высоте $h_1 = \delta = 20$ см над токопроводами, верхний элемент будем перемещать от токопроводов к защищаемой области. В результате получим зависимость максимального действующего значения магнитной индукции B_d на уровне земли от высоты h_2 расположения верхнего элемента (см. рис. 4, а). Наибольшая эффективность экранирования достигается при $h_2 = 2\delta = 40$ см. В этом случае магнитная индукция на уровне земли снижается до 8,4 мкТл. Этот результат аналогичен тому, который был получен при экранировании системой трех элементов. Однако система из двух элементов конструктивно проще.

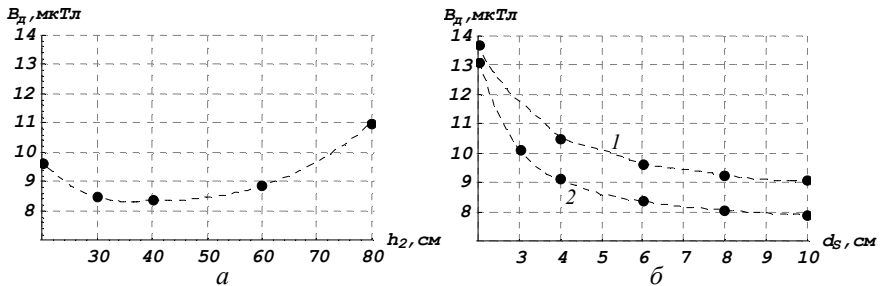


Рис. 4 – Экранирование МП трехфазного токопровода системой двух плоских проводящих элементов: а – зависимость максимального действующего значения магнитной индукции B_d на уровне земли от высоты h_2 расположения верхнего элемента; б – рассчитанные зависимости максимального действующего значения магнитной индукции B_d на уровне земли от d_s

Таким образом, целесообразно использовать экран, состоящий из двух плоских проводящих элементов, расположенных на высотах δ и 2δ над

токопроводами. Суммарную толщину элементов обозначим $d_s=2d$, где d – толщина каждого из элементов. Сравним экранирующие свойства такой системы двух элементов (кривая 2 на рис. 4, б) и одинарного плоского электропроводного элемента равной ширины и эквивалентного объема (кривая 1 на рис. 4, б), расположенного на высоте δ над токопроводами. Толщина одинарного элемента составляла d_s . На рис. 4, б представлены рассчитанные зависимости максимального действующего значения магнитной индукции B_d на уровне земли от d_s . Можно отметить характерную горизонтальную асимптоту полученной зависимости при увеличении d_s . Как видно из рис. 4, б, в области малых d_s экранирующие свойства одинарного элемента толщиной d_s и системы двух элементов (толщиной d каждый) эквивалентны.

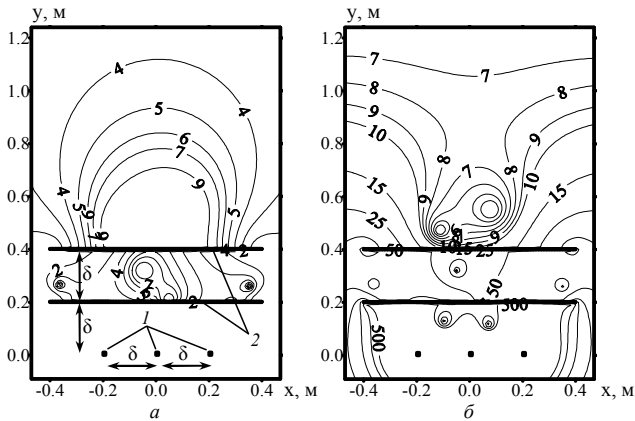


Рис. 5 – Экранированное поле трехфазного токопровода: а – распределение линий равных уровней эффективности экранирования ($k=2-9$); б – линий равных уровней магнитной индукции ($B_d=7-500$ мкТл)

В то же время, если толщина d элементов составляет 2–4 мм, эффективность экранирования системой двух таких элементов на 15 % выше эффективности экранирования одним элементом удвоенной толщины.

В качестве иллюстрации рассмотрим систему двух плоских Al элементов толщиной $d=3$ мм, расположенных на высотах $\delta=20$ см и 2δ над токопроводами. На рис. 5 трехфазный токопровод обозначен «1», экранирующие элементы – «2». Найденные в результате численного моделирования распределение линий равных уровней эффективности экранирования ($k=2-9$) и распределение линий равных уровней магнитной индукции ($B_d=7-500$ мкТл) экранированного поля трехфазного токопровода представлены, соответственно, на рис. 5, а и рис. 5, б.

Выводы. С помощью численного моделирования показано, что для более эффективного снижения магнитной индукции трехфазного токопровода может быть использован экран, состоящий из двух параллельных

плоских проводящих элементов, расположенных на высотах δ и 2δ над токопроводами. Эффективность экранирования МП трехфазного токопровода такой системой примерно на 15 % выше эффективности экранирования одинарным плоским электропроводным элементом эквивалентного объема.

Список литературы: 1. Правила устройства электроустановок. – X.: Форт, 2009. – 704 с. 2. *Battistelli L.* Underground power cables in urban areas: of the magnetic field a simple technique for the passive shielding / *L. Battistelli, A. Geri, P. Prignani, G.M. Veca* – The Sustainable City III: Urban Regeneration and Assessment, Edited By: C.A. Brebbia, N. Marchettini. – WIT Press, 2004. – 748 p. – P. 581-590. 3. *Bascom C.* Magnetic field management considerations for underground cable duct bank / *C. Bascom, J. Cooper, W. Banker, R. Piteo, A. Regan, S. Boggs* // The transactions of the IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition, 9-14 October 2005. – New Orleans, Louisiana, 2005. – Paper 05TD0399. 4. *Conti R.* Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines / *R. Conti, A. Giorgi, R. Rendina, L. Sartore, E.A. Sena* // IEEE Bologna Power Tech Conference, 23-26 June, 2003. – Bologna, 2003. – Paper 147. 5. *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. 6. *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. 7. *Резинкина М.М.* Экспериментальное исследование распределения магнитной индукции трехфазного токопровода при наличии электропроводных пластин / *М.М. Резинкина, В.С. Гринченко* // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 61. – С. 75-81. 8. *Резинкина М.М.* Расчетный выбор параметров электромагнитных экранов сложной пространственной конфигурации / *М.М. Резинкина, А.А. Щерба, В.С. Гринченко, К.О. Резинкина* // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 10-16.

Поступила в редколлегию 18.12.2012

УДК 621.3.013

Моделирование статистических процессов при ударе молнии в наземные объекты для выбора средств молниезащиты повышенной надежности. / *М.М. Резинкина В.С. Гринченко* // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – X. : НТУ «ХП», 2013. – № 8 (982). – С. 96–102. Бібліогр.: 8 назв.

Досліджена ефективність екранування магнітного поля трифазного струмопроводу системою плоских електропровідних елементів. Показано, що ефективність екранування системою двох плоских електропровідних елементів, що розташовані на висотах δ і 2δ над трифазним струмопроводом, де δ – відстань між його фазами, на 15% вища за ефективність екранування одним плоским електропровідним елементом еквівалентного об'єму.

Ключові слова: електромагнітне екранування, багаточаровий плоский екран, підземні кабельні лінії, промислова частота, чисельне моделювання.

The three-phase busbar magnetic field shielding effectiveness with the help of flat conductive elements has been investigated. It was shown that shielding effectiveness by means of two flat conductive elements, located on the distances δ and 2δ above the three-phase busbar, where δ is distance between its phases, is on 15% higher then shielding effectiveness of the equal volume single conductive element.

Keywords: electromagnetic shielding, multilayer shield, underground cable transmission lines, power frequency, numerical simulation.