

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ 330 КВ
И СПОСОБЫ ЕГО УМЕНЬШЕНИЯ**

А.А. Щерба*, чл.-корр. НАН Украины, **А.Д. Подольцев****, докт.техн.наук,
И.Н. Кучерявая, докт.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. E-mail: podol@ied.org.ua

Рассчитано магнитное поле на поверхности земли подземной двухцепной кабельной линии на напряжение 330 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Рассмотрены способы снижения уровня поля за счет оптимальной последовательности расположения фаз кабелей в кабельной линии, применения тонкого и объемного магнитного экрана, выполненного из композиционного материала, а также использования тонкого электромагнитного экрана. Показано, что при оптимальной фазировке кабелей в исследуемой кабельной линии возможно снижение уровня поля на поверхности земли в 3,3 раза. Проанализирована эффективность применения магнитных и электромагнитных экранов в зависимости от их расположения и эффективных магнитных и электрических характеристик. Библ. 10, рис. 8.

Ключевые слова: подземные кабельные линии, допустимый уровень магнитного поля, магнитный экран, электромагнитный экран, композиционный материал, эффективные характеристики.

На практике часто возникает необходимость уменьшения уровня магнитного поля до безопасного согласно принятым нормам значения на поверхности грунта, в котором проложена высоковольтная или сверхвысоковольтная кабельная линия (КЛ) [1]. В этом случае могут использоваться следующие способы уменьшения магнитного поля, общие, в большинстве случаев, как для воздушных линий электропередачи, так и подземных кабельных линий [2–5]:

- применение магнитных и/или электромагнитных экранов;
- применение активного экранирования;
- увеличение глубины размещения кабелей в подземной КЛ;
- уменьшение расстояния между однофазными кабелями в одноцепной КЛ;
- выбор оптимальной последовательности расположения фаз (т.е. взаимной фазировки) кабелей в многоцепной КЛ и др.

Для выбора в каждом конкретном случае того или иного способа экранирования, позволяющего получить на поверхности земли магнитное поле с показателями, удовлетворяющими принятым в Украине санитарным нормам (менее 0,5 мкТл для магнитного поля частотой 50 Гц [1]), а также для оценки технико-экономических показателей того или иного способа целесообразно использовать математическое и компьютерное моделирование, основанное на расчете электромагнитного поля, создаваемого КЛ, с учетом способа прокладки, основных геометрических размеров и значений токов, протекающих в фазных токопроводах, а также наличия или отсутствия экранов различного типа.

В указанных выше работах в качестве экранов рассматриваются дополнительные элементы конструкции КЛ, которые устанавливаются при монтаже линии и в дальнейшем усложняют ее техническое обслуживание. В настоящей работе наряду с анализом эффективности снижения уровня поля известными способами рассматривается также способ, когда в качестве магнитных экранов используются существующие элементы конструкции, выполненные только из композиционного материала, обладающего магнитными свойствами. При этом вопрос выбора рациональных значений эффективной магнитной проницаемости такого материала с точки зрения снижения магнитного поля КЛ на поверхности грунта ранее не рассматривался.

Целью настоящей работы является количественный анализ эффективности применения различных способов снижения уровня магнитного поля на поверхности грунта двухцепной КЛ напряжением 330 кВ, в том числе снижения магнитного поля с помощью магнитных экранов, выполненных из композиционного материала с магнитными свойствами и являющихся одновременно элементами конструкции

КЛ. В основу такого анализа положен численный расчет методом конечных элементов магнитного поля в активной зоне КЛ при наличии экранов различного типа и расположения по отношению к кабелям.

1. Описание физической и математической моделей. Для расчетов магнитного поля выбирается двухцепная КЛ напряжением 330 кВ и с номинальным током 630 А, используемая в настоящее время для снабжения сталелитейного комплекса завода "Днепросталь" [6, 7]. Линия содержит шесть однофазных кабелей с полиэтиленовой изоляцией, расположенных в траншее двумя треугольниками

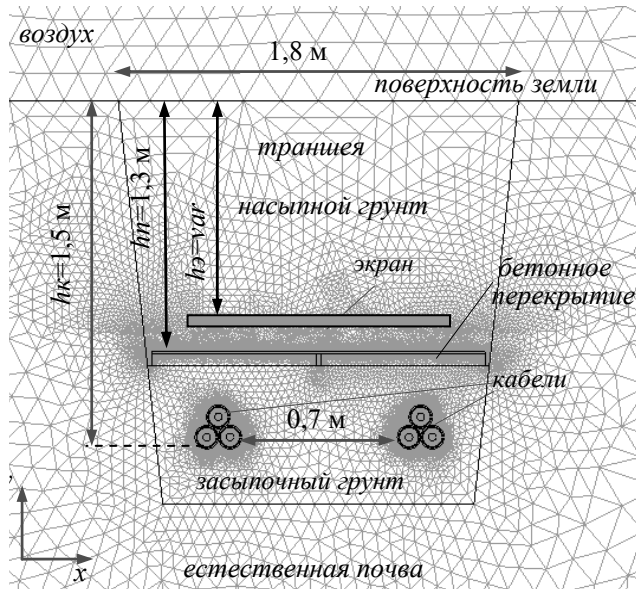


Рис. 1

на глубине $h_k = 1,5$ м, как показано на рис. 1.

Кабели находятся в засыпочном грунте, который отделяется от насыпного грунта бетонным перекрытием, расположенным на глубине $h_n = 1,3$ м. В общем случае в конструкции КЛ может содержаться экран (магнитный или электромагнитный), расположенный на глубине h_s , имеющей оптимальное значение. Характеристики кабелей приведены в работах [6, 7], а основные геометрические размеры КЛ показаны на рис. 1 вместе с указанием конечно-элементного разбиения фрагмента расчетной области. Электропроводность грунта принималась равной 10^{-3} См/м.

Электромагнитное поле моделируется в стационарном режиме для двумерного случая в предположении, что кабельная линия является достаточно протяженной, проложена параллельно поверхности земли и

условия прокладки кабелей одинаковы по всей длине трассы.

Источниками переменного магнитного поля являются трехфазные токи частотой 50 Гц, протекающие в жилах кабелей. При расчете магнитного поля токи в экранах кабелей не учитываются, что соответствует реализованному на практике случаю транспозиции экранов. В общем случае предполагается также, что дополнительно используется относительно длинный магнитный и/или электромагнитный экран (рис. 1), предназначенный для снижения уровня магнитного поля до требуемого значения.

Электромагнитная задача формулируется в декартовой системе координат в плоскости xOy (рис. 1) относительно комплексного значения векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$, имеющего единственную z -составляющую $\dot{A}_z(x, y)$.

Потенциал $\dot{\mathbf{A}}$ определяется из решения следующих дифференциальных уравнений [8].

В области токопроводящих жил кабелей:

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma \Delta \dot{U}_i / L, \quad i = 1 \dots 6, \quad (1)$$

$$\int_{S_i} \dot{J}_z dS = \int_{S_i} (-j\omega\sigma \dot{A}_z + \sigma \Delta \dot{U}_i / L) dS = \dot{I}_i. \quad (2)$$

В области грунта и электропроводящего экрана:

$$j\omega\sigma_i \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma_i \Delta \dot{U}_i / L, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

$$\int_{S_i} \dot{J}_z dS = \int_{S_i} (-j\omega\sigma_i \dot{A}_z + \sigma_i \Delta \dot{U}_i / L) dS = 0. \quad (4)$$

В области воздуха и магнитного экрана:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_i^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Здесь ω – угловая частота тока; σ , μ_i – электропроводность и относительная магнитная проницаемость соответственно; \dot{J}_z – плотность тока в проводящей среде; S_i – площадь поперечного сечения

i -ой среды; $\Delta \dot{U}_i$ – падение напряжения в проводящей среде на участке длиной L ; \dot{I}_i – комплексная величина тока в жиле i -ого кабеля (полагается известной и равной току кабеля в номинальном режиме). Отметим, что хотя токи, наведенные в области грунта (уравнение (3), (4)) слабо влияют на магнитное поле, создаваемое токами в жилах промышленной частоты, однако их влияние будет существенным на высоких частотах (коммутационные явления, грозовые перенапряжения) и поэтому эти токи учитываются в описанной модели для расширения области ее применения.

В качестве граничных условий на всех внешних границах расчетной области выбирается условие магнитной изоляции – $\dot{A}_z = 0$ (на рис. 1 границы области не показаны, а показан только ее фрагмент в окрестности КЛ). Компьютерные расчеты выполнены в пакете программ Comsol [9].

2. Результаты компьютерного моделирования. В работе рассмотрены следующие способы снижения уровня магнитного поля, создаваемого исследуемой КЛ на поверхности земли: 1) оптимальная взаимная фазировка кабелей в КЛ; 2) применение магнитных экранов; 3) применение электромагнитного экрана.

2.1. Оптимальная взаимная фазировка кабелей в КЛ. На рис. 2, а в виде графиков показано изменение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ на поверхности земли при различной фазировке кабелей в двухцепной КЛ для трех различных последовательностей фаз кабелей (указаны на вставках к рис. 2 справа). Фазы соответствуют кабелям слева направо. Рис. 2, б отображает распределение магнитного поля в оттенках цвета и изолинией, соответствующей значению магнитной индукции 0,5 мкТ. Как видно, наименьшее значение магнитного поля реализуется для расположения фаз $ABC-CAB$ (кривая 3). Такая последовательность фаз является оптимальной и обеспечивает уровень магнитного поля над кабельными линиями не выше 0,7 мкТ при гранично-допустимом уровне поля 0,5 мкТ. Наихудший выбор расположения фаз $ABC-ABC$ характеризуется максимальным значением поля 2,3 мкТ. Во всех случаях зона отчуждения не превышает по ширине 7 м.

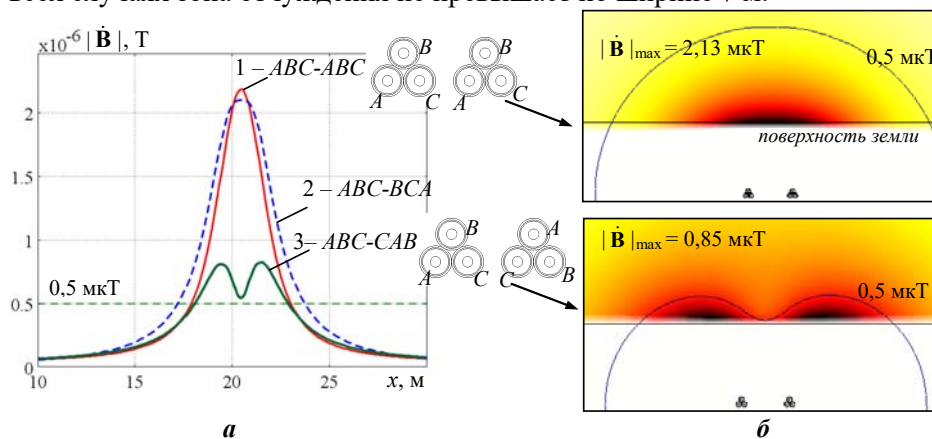


Рис. 2

Таким образом, в каждом случае прокладки двухцепной и в общем случае многоцепной КЛ существует оптимальная взаимная фазировка кабелей, при которой магнитное поле на поверхности земли имеет наименьшее значение. Для исследуемой КЛ при оптимальной фазировке кабелей магнитное поле на поверхности земли может

быть уменьшено в $2,3/0,7 = 3,3$ раза по сравнению со случаем наихудшей последовательности фаз.

В последующем рассматривается способ прокладки кабельных линий в траншее с наиболее неблагоприятным расположением фаз $ABC-ABC$, который в большинстве случаев реализуется на практике, когда не применяются специальные меры по снижению уровня магнитного поля.

2.2. Применение тонких и объемных магнитных экранов, изготовленных из композиционного материала. Рассматривается два вида магнитных экранов:

- тонкий экран из композиционного материала, например, бетонные плиты перекрытия, содержащие ферромагнитные частицы заданной объемной концентрации,
- объемный магнитный экран в виде, например, насыпного или засыпного грунта также с добавлением ферромагнитных частиц.

Для двух таких случаев в зависимости от объемной концентрации ферромагнитных частиц изменяется эффективное значение магнитной проницаемости экрана μ_{eff} . Для расчета значения магнитной проницаемости могут быть использованы данные монографии [10].

В качестве тонкого магнитного экрана рассматривается элемент конструкции КЛ – бетонное перекрытие толщиной $b = 5$ см, выполненное из магнитного композиционного материала и рас-

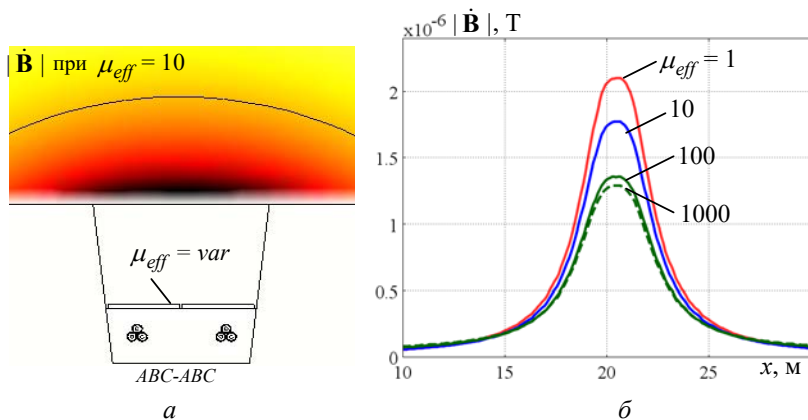


Рис. 3

проницаемости такого экрана μ_{eff} показано на рис. 3, б. Как следует из результатов расчетов, при $\mu_{eff} > 100$ магнитное поле незначительно изменяется с ростом μ_{eff} .

Анализ расчетных данных на рис. 3, б показывает следующее.

Для бетонного перекрытия с магнитными свойствами оптимальное значение (с точки зрения снижения уровня магнитного поля на поверхности земли) эффективной магнитной проницаемости находится в пределах $\mu_{eff} = 20-100$.

Наличие такого вида магнитного экрана позволяет уменьшить магнитное поле на поверхности земли с 2,3 мкТ (при отсутствии экрана) до 1,35 мкТ, т.е. снизить уровень поля в 1,7 раза.

Исследуемый магнитный экран является относительно тонким и его экранирующие свойства определяются произведением $\mu_{eff} \cdot b$, где b – толщина экрана. В таком случае при увеличении толщины, например, в 2 раза значение эффективной магнитной проницаемости может быть уменьшено также в 2 раза (в приближении тонкого экрана), и при этом экранирующие свойства такого экрана практически не изменятся.

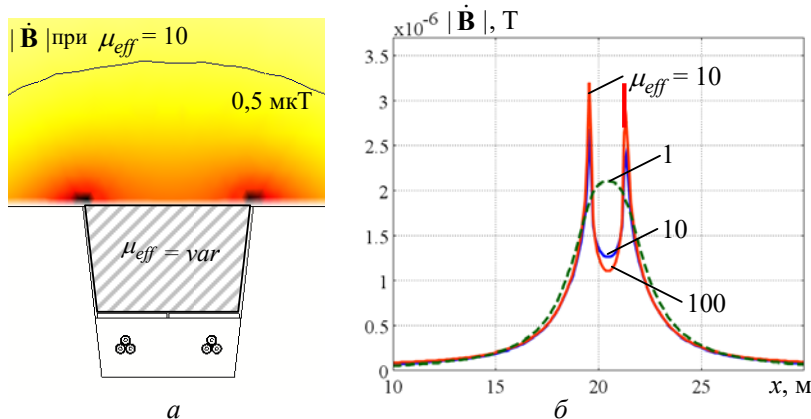


Рис. 4

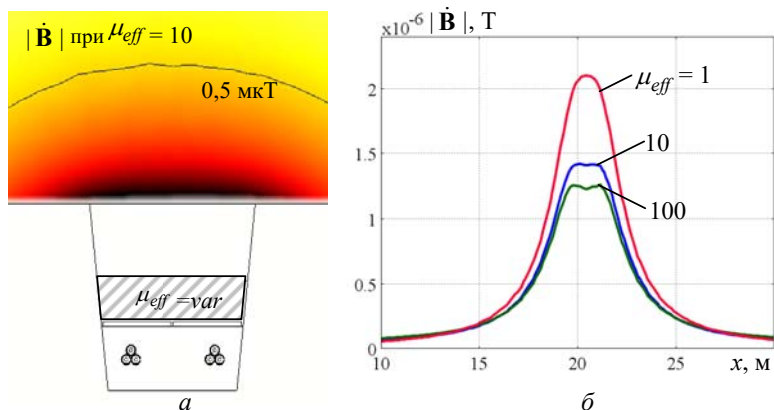


Рис. 5

положенное на глубине $h_i = 1,3$ м (рис. 1). Распределение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ на поверхности земли в оттенках серого цвета и изолинией со значением поля 0,5 мкТ представлено на рис. 3, а при эффективной относительной магнитной проницаемости $\mu_{eff} = 10$. Изменение магнитного поля на поверхности земли над расположением кабелей при различных значениях эффективной магнитной

Эффективность применения объемных магнитных экранов различного исполнения демонстрируется расчетными данными на рис. 4 – 6. Здесь рассмотрены три случая, когда насыпной грунт (грунт выше плит перекрытия в траншее вплоть до поверхности земли) обладает магнитными свойствами по всей высоте (рис. 4), только на определенной высоте вблизи бетонного перекрытия (рис. 5), а также случай, когда засыпка непосредственно кабелей обладает магнитными свойствами (рис. 6). Магнитные свойства этих материалов могут быть получены путем добавления в их объем ферромагнитных частиц.

Из показанных на рис. 4 – 6 результатов можно заключить следующее.

Случай насыпного грунта с магнитными свойствами (рис. 4) хотя и приводит к снижению магнитного поля в области между кабельными линиями, однако из-за

проявления концевого эффекта поле значительно возрастает в угловых зонах по краям засыпки (рис. 4); в этих зонах значение поля даже выше, чем при отсутствии магнитных экранов.

Применение насыпного грунта с магнитными свойствами на небольшой высоте (рис. 5) по экранирующим свойствам эквивалентен случаю тонкого экрана, показанному на рис. 3.

Наиболее эффективным с точки зрения реализации экранирующих свойств является вариант, показанный на рис. 6, когда засыпка самих кабелей обладает магнитными свойствами. В этом случае при $\mu_{eff} = 20$ и выше магнитное поле на поверхности земли над кабелями становится меньше $0,5 \text{ мкТ}$. Однако следует отметить, что такой способ приводит к увеличению индуктивности кабелей на участке экранирования, что необходимо учитывать при проектировании КЛ.

При значениях $\mu_{eff} > 100$ экранирующие свойства магнитных экранов рассматриваемых видов слабо отличаются от случая $\mu_{eff} = 100$. Учитывая это, значение эффективной магнитной проницаемости насыпного грунта рекомендуется выбирать в пределах 20–100.

2.3. Применение тонкого электромагнитного экрана. Рассматривается возможность применения относительно тонкого по отношению к другим геометрическим размерам экрана толщиной 1 см, выполненного из токопроводящего немагнитного материала и расположенного на бетонном перекрытии. Для этого случая распределение магнитной индукции $|\vec{B}|$ на поверхности земли в оттенках серого цвета и изолинией, соответствующей $0,5 \text{ мкТ}$, показано на рис. 7, а, а на рис. 7, б – изменение поля при различных значениях электропроводности экрана. Как видно, при выполнении экрана из алюминия (пунктирная кривая на рис. 7, б) максимальное значение магнитного поля уменьшается до $0,65 \text{ мкТ}$. Экранирование при электропроводности материала $\sigma < 10^6 \text{ См/м}$ является малоэффективным. Зона отчуждения в случае использования электромагнитного экрана составляет около 4 м по ширине. Отметим, что совместное применение оптимальной фазировки кабелей и электромагнитного экрана (например, изготовленного из алюминия) позволяет удовлетворить действующим санитарным нормам по допустимому уровню магнитного поля на поверхности земли над КЛ.

Заметим также, что рассматриваемый экран является относительно тонким и его экранирующие свойства определяются произведением $\sigma \cdot b$, где b – толщина экрана. Следовательно, при уменьшении толщины экрана, например, в 2 раза и при одновременном увеличении его электропроводности также в 2 раза (например, для экрана, выполненного из меди) его экранирующие свойства практически не изменятся. Сказанное будет справедливо при выполнении условия тонкого экрана, согласно которому глубина проникновения магнитного поля в экран $\delta \gg b$.

Компьютерные расчеты показывают, что экранирующие свойства электромагнитного экрана зависят от его расположения по отношению к кабелям. Результаты расчетов магнитного поля для случая экрана с электропроводностью $\sigma = 10^7 \text{ См/м}$ показаны на рис. 8. Здесь значения h_y соответ-

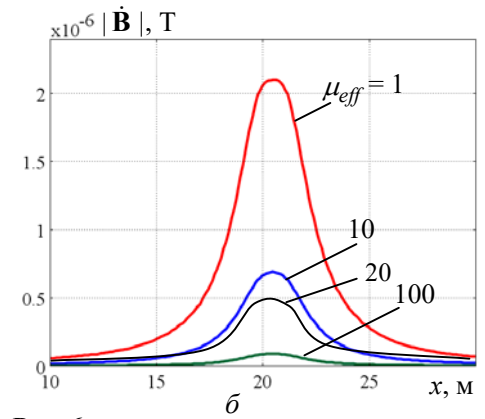
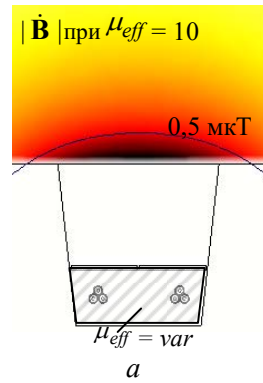


Рис. 6

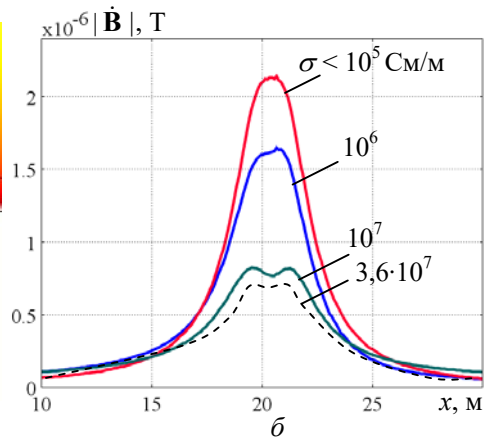
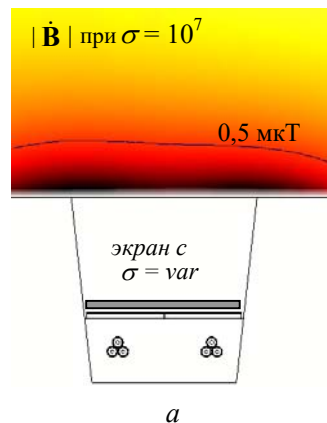


Рис. 7

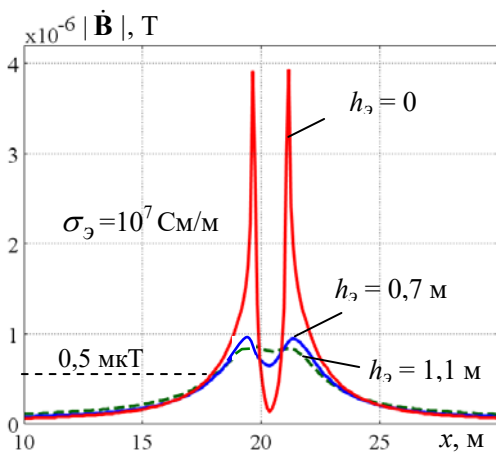


Рис. 8

Заключение. На примере двухцепной кабельной линии 330 кВ подземной прокладки с использованием метода конечных элементов исследован характер распределения магнитного поля, создаваемого кабелями. Показано, что значение поля линии на поверхности земли, достигающее 2,3 мкТ, превышает допустимое по санитарным нормам Украины значение 0,5 мкТ, а ширина зоны отчуждения составляет примерно 7 м.

Для снижения уровня магнитного поля выполнен количественный анализ трех способов – оптимальная последовательность фаз кабелей в кабельной линии, применение тонких и объемных магнитных экранов из композиционного материала и использование тонкого электромагнитного экрана. Показано, что для исследуемой кабельной линии выбор оптимальной фазировки позволяет снизить уровень магнитного поля на поверхности земли в 3,3 раза.

Установлено, что при использовании магнитных и электромагнитных экранов, магнитное поле существенно зависит от их расположения. При этом, хотя магнитное поле в центре экранов снижается, вследствие проявления краевого эффекта магнитное поле может увеличиваться на концах экранов при определенном их расположении.

Найдено, что рациональное значение эффективной относительной магнитной проницаемости магнитных экранов находится в пределах $\mu_{eff} = 20-100$, а наиболее эффективным способом уменьшения магнитного поля на поверхности земли является использование в качестве засыпчного грунта композиционного материала, обладающего магнитными свойствами, например, за счет добавления в грунт ферромагнитных частиц.

Применение тонкого электромагнитного экрана наиболее эффективно при его расположении в грунте вблизи кабелей, например, на бетонном перекрытии в траншее. При этом наличие алюминиевого экрана толщиной 1 см позволяет снизить магнитное поле на поверхности земли с 2,3 до 0,65 мкТ.

1. Правила улаштування електроустановок. Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
2. Грешняков Г.В., Доронин Н.В., Коровкин Н.В. Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий. *Кабели и провода*. 2015. № 5. С. 8–13.
3. Розов В.Ю., Дорофеев П.Н., Квицинский А.А. Двухконтурное пассивное экранирование магнитного поля высоковольтных кабельных линий в зонах соединительных муфт. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 1. С. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.01.023>
4. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 2. С. 3–8.
5. D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. *IEEE Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 18–22 Aug., 2003, Istanbul. Vol. 1. Pp. 203–208.
6. Лях В.В., Молчанов В.М., Сантоцкий В.Г., Квицинский А.А. Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования. *Промэлектро*. 2009. № 6. С. 27–33.
7. Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. *Электрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16–21.
8. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.

вуют следующему: $h_y = 0$ – экран расположен на поверхности земли; $h_y = 0,7$ м – экран в насыпном грунте; $h_y = 1,1$ м – экран находится на бетонном перекрытии. Из рис. 8 видно, что при расположении экрана на поверхности земли имеет место резкое увеличение поля на концах экрана из-за краевого эффекта. При этом поле над центром между кабельными линиями значительно снижается. Проявление краевого эффекта снижается по мере приближения экрана к кабелям. Допустимый уровень магнитного поля 0,5 мкТ превышает во всех рассмотренных на рис. 8 случаях. Ширина зоны отчуждения составляет от 4 до 7 м, и чем глубже в земле расположен электромагнитный экран, тем уровень поля на поверхности земли ниже, а зона отчуждения меньше.

9. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed 15.11.2018)

10. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2011. 255 с.

УДК 621.315.2: 004.94

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПІДЗЕМНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ 330 КВ ТА СПОСОБИ ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ

А.А. Щерба, чл. кор НАН України, О.Д. Подольцев, докт.техн.наук,

І.М. Кучерява, докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: podol@ied.org.ua

Розраховано магнітне поле на поверхні землі підземної двоколової кабельної лінії на напругу 330 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Розглянуто способи зниження рівня поля за рахунок оптимальної послідовності розташування фаз кабелів у кабельній лінії, застосування тонкого й об'ємного магнітного екрана, виготовленого з композиційного матеріалу, а також використання тонкого електромагнітного екрана. Показано, що при оптимальній фазировці кабелів у досліджуваній кабельній лінії можливо знизити рівень поля на поверхні землі у 3,3 рази. Проаналізовано ефективність застосування магнітних та електромагнітних екранів залежно від їхнього розташування та ефективних магнітних та електричних характеристик. Бібл. 10, рис. 8.

Ключові слова: підземні кабельні лінії, припустимий рівень магнітного поля, магнітний екран, електромагнітний екран, композиційний матеріал, ефективні характеристики.

THE MAGNETIC FIELD OF UNDERGROUND 330 KV CABLE LINE AND WAYS FOR ITS REDUCTION

Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M.

Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: podol@ied.org.ua

The magnetic field of underground double-circuit 330 kV cable line with cross-linked polyethylene insulation is computed. The ways to reduce the field level due to the optimal sequence of cable phases in the cable line, the use of thin and volume magnetic shields made of composite material, as well as the use of thin electromagnetic shield are considered. As shown, with optimal cable phasing in the cable line under study it is possible to reduce 3.3 times the field level on the ground. The efficiency of the magnetic and electromagnetic shields depending on their location and the effective magnetic and electrical characteristics is analyzed. References 10, figures 8.

Key words: underground cable lines, permissible magnetic field, magnetic shield, electromagnetic shield, composite material, effective characteristics.

1. Electric installation code. Minpalyvenerho Ukrainy, 2010. 776 p. (Ukr)
2. Greshniakov G.V., Doronin M.V., Korovkin N.V. Combined magnetic shields for cable power lines. *Kabeli i provoda*. 2015. No 5. Pp. 8–13. (Rus)
3. Rozov V.Yu., Dobrodeyev P.N., Kvytsynskiy A.A. Double-circuit passive shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines in junction zones. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 1. Pp. 23–28. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/teched2017.01.023>
4. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.E., Piliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its reduction to a safe level. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 2. Pp. 3–9. (Rus)
5. D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. *IEEE Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 18–22 Aug., 2003, Istanbul. 2003. Vol. 1. Pp. 203–208.
6. Lyach V.V., Molchanov V.M., Santatskii V.G., Kvitsinskii A.A. 330 kV cable line: some aspects of designing. *Promelektro*. 2009. No 6. Pp. 27–33. (Rus)
7. Lyach V.V., Molchanov V.M., Sudakov I.V., Pavlichenko V.P. 330 kV cable line is a new step in development of Ukrainian power networks. *Elektricheskie seti i sistemy*. 2009. No 3. Pp. 16–21. (Rus)
8. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Extra-high voltage cables with polymer insulation. Kyiv: Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. 550 p. (Rus)
9. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed 15.11.2018)
10. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiscale modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2011. 255 p. (Rus)

Надійшла 28.12.2018
Остаточний варіант 18.03.2019