

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.2:004.94

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОДЗЕМНОЙ ОДНОЦЕПНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина
e-mail: rB.irinan@gmail.com

Рассчитано электромагнитное поле подземной одноцепной кабельной линии на напряжение 330 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Проанализированы явления скин-эффекта и эффекта близости в силовых кабелях. Изучены распределения магнитного поля кабельной линии на поверхности земли при различной глубине расположения линии в грунте. Определены зоны отчуждения и максимальные значения поля над поверхностью земли. Библ. 13, рис. 5, таблица.

Ключевые слова: подземная кабельная линия, сверхвысоковольтные силовые кабели, изоляция из сшитого полиэтилена, экологическая безопасность, компьютерное моделирование.

В настоящее время в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения (свыше 161 кВ) широко используются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) [1–3]. Кабельные линии с СПЭ-изоляцией применяются в энергосистемах больших городов, на энергоемких промышленных предприятиях и крупных энергообъектах. В Украине впервые линия с кабелями, имеющими СПЭ-изоляцию, на напряжение 330 кВ была проложена в системе энергоснабжения металлургического завода "Днепросталь". Описание и основные характеристики этого кабельного проекта приведены в работах [1, 2]. Промышленное производство кабелей на напряжение до 330 кВ освоено на заводе "Южкабель" (г. Харьков) [4]. К примеру, завод, поставляющий силовой кабель на напряжение 220 кВ для подстанции "Кременская" Луганской области, изготавливал силовой кабель с СПЭ-изоляцией на напряжение 330 кВ для электростанции в Беларуси [5].

Кабельные линии прокладываются различными способами, эксплуатируются в самых разных условиях и режимах. Важным при сооружении линий является вопрос о гарантировании их безопасного функционирования, особенно в условиях густонаселенных районов больших городов, когда экологический аспект приобретает первостепенное значение.

Кабельные линии при протекании по ним электрического тока создают в окружающем пространстве электромагнитное поле. Значительный интерес к распределению поля в окружающей среде [3, 6, 7] связан с данными о его вредном влиянии на человека [8, 9]. Определение уровня и распределения электромагнитного поля, создаваемого кабельными ли-

ниями, позволяет в случае их практической реализации в населенных пунктах соблюсти зону отчуждения в соответствии с санитарными нормами и правилами защиты населения от воздействия электромагнитного поля [9, 10]. Согласно международным стандартам гранично-допустимый уровень магнитного поля частотой 50 Гц составляет 0,25 мкТ [11], в Украине – 0,5 мкТ [9]. При этом повы-

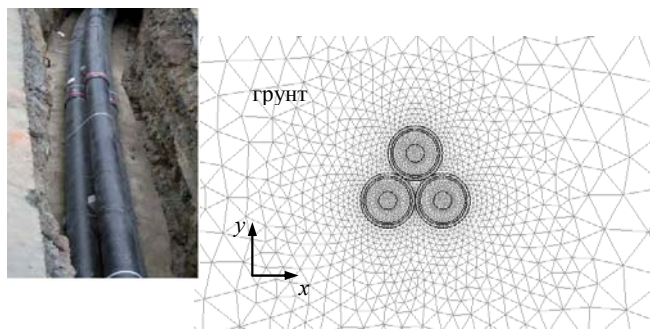


Рис. 1

шенные требования к безопасности предъявляются к кабельным линиям высокого и сверхвысокого напряжений, а нормативные уровни магнитного поля и близкие к ним значения поля рассматриваются как небезопасные.

В связи с отмеченным целью настоящей работы является исследование электромагнитного поля подземной одноцепной кабельной линии с СПЭ-изоляцией на напряжение 330 кВ (рис. 1), а также ее электромагнитного влияния на окружающую среду.

Изучение электромагнитного поля проводится путем компьютерного моделирования в программе Comsol [12] с использованием метода конечных элементов.

Отметим, что определение электромагнитного поля и связанных с ним электромагнитных характеристик кабелей, в том числе плотности тока и джоулевых потерь в активных элементах кабелей важно для тепловых расчетов кабельных линий [13].

Математическая модель для исследования. Электромагнитное поле моделируется в стационарном режиме для двухмерного случая в предположении, что кабельная линия является достаточно длинной, проложена в земле параллельно ее поверхности, а условия прокладки кабелей одинаковы по всей трассе. Источниками переменного магнитного поля являются трехфазные токи в жилах и экранах кабелей.

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

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma \Delta \dot{U}_i, \quad i = 1 \dots 7, \quad (1)$$

$$\int_{\Sigma_{i=1}^7 S_i} \dot{J}_z dS = \int_{\Sigma_{i=1}^7 S_i} (-j\omega\sigma \dot{A}_z + \sigma \Delta \dot{U}_i) dS = 0. \quad (2)$$

Здесь ω – круговая частота тока; σ , μ_r – электропроводность и относительная магнитная проницаемость соответственно; \dot{J} – плотность тока; S_i – площадь поперечного сечения i -й проводящей среды (трех жил, трех экранов кабелей и земли) в рамках расчетной области; $\Delta \dot{U}_i$ – падение напряжения в проводящей среде на участке единичной длины. При этом $\Delta \dot{U}_i$ в области экранов полагается равным нулю, в области земли определяется из условия (2) равенства нулю полного тока, протекающего во всей расчетной области. В области жил падение напряжения $\Delta \dot{U}_i$ задается из условия равенства тока номинальному значению. Как установлено, в таком случае различие значений действующих значений токов в жилах менее 5%. В качестве граничных условий на всех внешних границах расчетной области задается условие магнитной изоляции – $\dot{A}_z = 0$.

Электромагнитная задача является цепно-полевой и учитывает схему заземления экранов кабелей. Более подробно математическая модель описана в монографии [7].

Результаты компьютерного моделирования. Рассчитывалась трехфазная кабельная линия 330 кВ с кабелями, расположенными треугольником (рис. 1). Характеристики кабелей приведены в таблице [1, 2]. Элементное разбиение фрагмента расчетной области показано на рис. 1 справа.

Распределение плотности тока $|\dot{\mathbf{J}}|$ в жилах и экранах кабелей показано на рис. 2 а и б соответственно. На рис. 2 в приведены контурные линии

Основные характеристики кабелей	
Площадь сечения алюминиевой жилы, мм ²	800
Площадь сечения медного экрана, мм ²	150
Толщина СПЭ-изоляции, мм	23,5
Толщина наружной оболочки, мм	6
Наружный диаметр кабеля, мм	105
Геометрические размеры	
Диаметр жилы, мм	34,8
Внутренний радиус внешнего экрана, мм	42,8
Глубина прокладки кабелей в земле треугольником, м	1,6 / 1,0 / 0,7
Электрические характеристики	
Номинальное напряжение сети, кВ	330
Наибольший ток при глубине прокладки 1,5 м, А	630
Частота, Гц	50

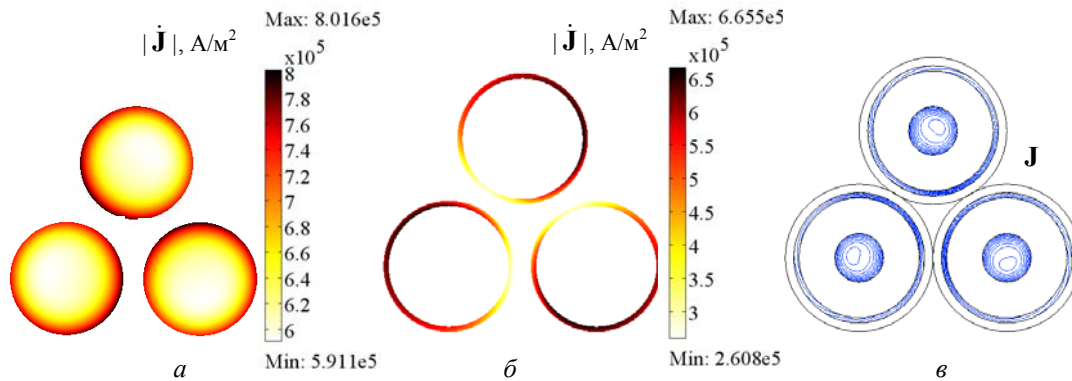


Рис. 2

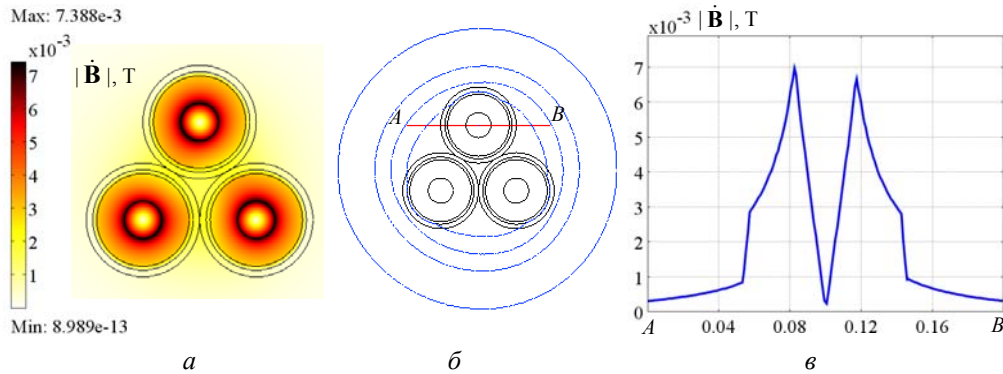


Рис. 3

плотности тока $|\mathbf{J}|$ в сечении кабельной линии. Как показано, взаимное влияние совокупности проводников (жил и экранов) кабелей проявляется в вытеснении тока на поверхность. Картины плотности тока в жилах и экранах кабелей демонстрируют результат совместного проявления эффекта близости и скин-эффекта.

Распределение магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ в сечении кабелей в цвете и в виде контурных линий вокруг кабелей дано на рис. 3 а и б. Показано также изменение магнитной индукции вдоль линии AB , проходящей через центр кабеля (рис. 3 в). Заметно неравномерное распределение магнитного поля в сечении кабелей. Магнитное поле концентрируется на поверхности жил (рис. 3 б, в).

Рис. 4 а показывает изменение магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ на поверхности земли (кривая 1) и на уровне 1 м над землей (кривая 2). Изолинии магнитного поля, соответствующие безопасным уровням 0,5 мкТ (согласно стандартам Украины) и 0,25 мкТ (по международным нормам), для исследуемой кабельной линии на глубине ее расположения 1,6 м построены на рис. 4 б. Указаны размеры зоны отчуждения – 2,2 м для соблюдения санитарных норм Украины и 3,4 м для удовлетворения международным требованиям.

Поскольку кабели могут быть проложены в грунте на различной глубине, проведены расчеты электромагнитного поля для глубины расположения кабелей 1,6 ; 1,0 ; 0,7 м. Для та-

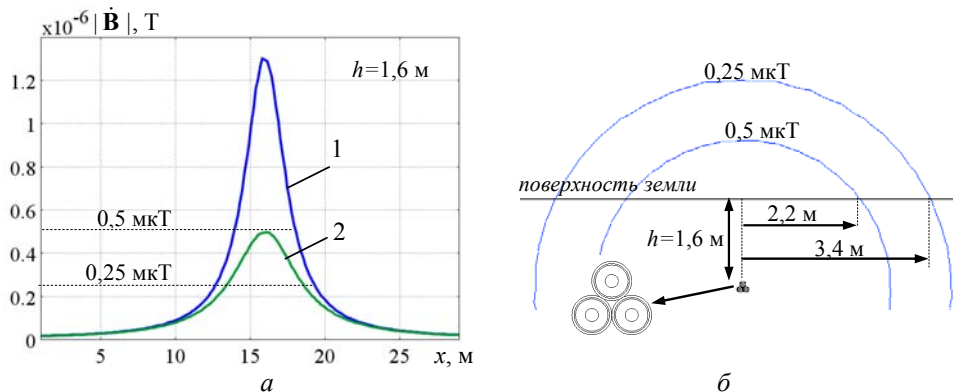


Рис. 4

ких випадках результати моделювання магнітної індукції $|\dot{\mathbf{B}}|$ на поверхні землі зображені в вигляді графіків на рис. 5. Максимальні значення магнітного поля мають місце безпосередньо над розташуванням кабельної лінії. Значення поля тем менше, чим глибше в землі прокладені кабелі. При значительному збільшенні максимальної магнітної індукції зона відчуження для кабельної лінії значительно розширюється (згідно з пунктирною лінією, що відповідає 0,5 мкТ).

Висновок. На прикладі одноцепної кабельної лінії 330 кВ підземної прокладки трикутником досліджено електромагнітне поле в кабелях і оточуючій середі. Показано нерівномірність витіснення струму на поверхню жил кабелів і проявлення ефекту близькості, а також нерівномірність розподілу густоти струму в мідних екранах кабелів. Визначено розміри зон відчуження в відповідності з рівнем магнітного поля лінії на поверхні землі при різному заглибленні кабелів в ґрунт.

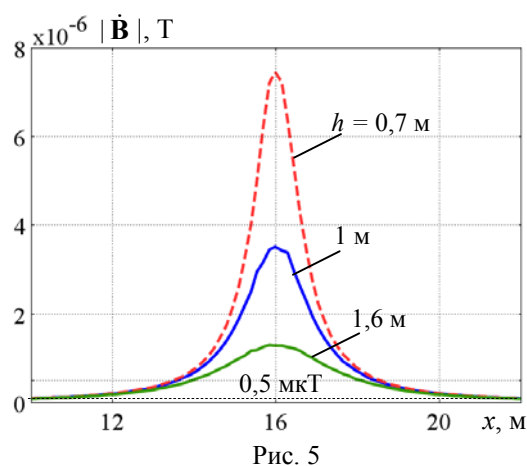


Рис. 5

1. Лях В.В., Молчанов В.М., Сантацкий В.Г., Квицинский А.А. Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования. *Промэлектро*. 2009. № 6. С. 27–33.
2. Лях В.В., Молчанов В.М., Судаков 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.
3. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
4. Золотарев В.М. Решение проблемы создания отечественных электротехнологических комплексов производства кабелей энергетического назначения напряжением до 330 кВ. *Вісник Нац. техн. ун-ту "Харківський політехнічний інститут"*. 2009. № 39. С. 50–63.
5. Новости завода "Южкабель" – <https://yuzhcable.com.ua/category/novosti/>
6. Дубицкий С.Д., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Управление магнитным полем подземной кабельной линии электропередач. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 3. С. 88–100.
7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
8. Шевель Д.М. Электромагнитная безопасность. Киев: ВЕК+, НТИ, 2002. 432 с.
9. Салтыков В.М. Проблемы электромагнитной безопасности по магнитным полям промышленной частоты от токов кабелей с изоляцией СПЭ. 13.02.2018. – https://www.ruscable.ru/article/Problemy_elektromagnitnoj_bezopasnosti_SPE/
10. Правила улаштування електроустановок. Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
11. Электромагнитное поле и его влияние на здоровье человека – www.it-med.ru/library/ie/el_magn_field.htm
12. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
13. Кучерявая И.Н. Компьютерное моделирование теплового состояния подземной кабельной линии на напряжение 330 кВ. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Зб. наук. праць. Київ: ІЕД НАНУ, вип. 30, 2011. С. 29–34.

УДК 621.315.2:004.94

І.М. Кучерява, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ПІДЗЕМНОЇ ОДНОЛАНЦЮГОВОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

Розраховано електромагнітне поле підземної одноланцюгової кабельної лінії на напругу 330 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Проаналізовано прояви скін-ефекту й ефекту близькості в силових кабелях. Вивчено розподіл магнітного поля кабельної лінії на поверхні землі при різній глибині розташування кабелів у ґрунті. Визначено зони відчуження та максимальні значення поля над поверхнею землі. Бібл. 13, рис. 5, таблиця.

Ключові слова: підземна кабельна лінія, надвисоковольтні силові кабелі, ізоляція зі зшитого поліетилену, екологічна безпека, комп'ютерне моделювання.

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

ELECTROMAGNETIC FIELD OF UNDERGROUND SINGLE-CIRCUIT EXTRA-HIGH VOLTAGE CABLE LINE

The computer modeling of the electromagnetic field generated by underground three-phase single-circuit 330 kV cable line with XLPE insulation is carried out. The skin effect and proximity effect in the power cables are studied. The distributions of magnetic field on the ground for different depth of cable-laying are computed and analyzed. The right-of-way and maximum magnetic flux density above ground level are determined. References 13, figures 5, table.

Key words: underground cable line, extra-high voltage (EHV) power cables, cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, ecological safety, computer modeling.

14. Lyach V.V., Molchanov V.M., Santatskii V.G., Kvitsinskii A.A. 330 kV cable line: some aspects of designing. *Promelektro*. 2009. № 6. P. 27–33.
15. 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. № 3. P. 16–21.
16. 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, Ukrainian Academy of Sciences, 2013. 550 p.
17. Zolotarev V.M. Problem solving for creation of domestic electrotechnological systems for production of power cables of voltage up to 330 kV. *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu "Harkivskii politekhnichnii institut"*. 2009. № 39. P. 50–63.
18. News of Yuzhcable works PJSC – <https://yuzhcable.com.ua/category/novosti/>
19. Dubitskii S.D., Greshniakov G.V., Korovkin N.V. Control of magnetic field of underground cable line. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Natural and engineering science*. 2017. T. 23. № 3. P. 88–100.
20. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015. 305 p.
21. Shevel D.M. Electromagnetic safety. Kyiv: VEK+, Kyiv: NTI, 2002. 432 p.
22. Saltikov V.M. Problems of electromagnetic safety on industrial frequency magnetic fields from currents of XLPE insulated cables. 13.02.2018. – https://www.ruscable.ru/article/Problemy_elektromagnitnoj_bezопасnosti_SPE/
23. Electric installation code. Minpalivo Ukrainy, 2010. 776 p.
24. Electromagnetic field and its effect on health of man. – www.it-med.ru/library/ie/el_magn_field.htm
25. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
26. Kucheriava I.M. Computer modeling of thermal state of 330 kV underground cable line. *Pratsi Institutu Elektrodinamiki NAN Ukrainy. Composite book of scientific works*. Kyiv: IED NANU, is. 30, 2011. P. 29–34.

Надійшла 17.07.2018

Received 17.07.2018

УДК 621.3

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОФІЛЮ СОЛЕНОЇДА ДЛЯ СТВОРЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПЛОСКІЙ ГРАНИЦІ ПРОВІДНИКА

В.М. Михайлов*, докт. техн. наук, **М.П. Петренко****

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна

e-mail: valery.m.mikhailov@gmail.com

Розвинено метод продовження магнітного потоку за допомогою системи співвісних кільцевих елементарних провідників зі струмами та відповідної функції Гріна стосовно плоскої граничної поверхні. Отримано функції Гріна плоскомеридіанного магнітного поля системи кільцевий елементарний провідник зі струмом – ідеально надпровідний півпростір. Наведено приклади визначення профілів масивних одновиткових соленоїдів, що утворюють на плоскій поверхні провідника заданий розподіл індукції імпульсного магнітного поля при різкому поверхневому ефекті. Виконано перевірку відповідності отриманих профілів заданим граничним розподілам поля. Досліджено вплив зрізу верхньої частини профілю соленоїда на розподіл індукції магнітного поля на граничній поверхні. Бібл. 9, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: продовження магнітного потоку, функція Гріна, імпульсне магнітне поле, профіль масивного соленоїда, різкий поверхневий ефект.

Вступ. У техніці сильних імпульсних магнітних полів, що використовується в експериментальній фізиці, технологіях обробки різних матеріалів та для прискорення провіднико-