

УДК 621.315.2:004.94

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ДВУХЦЕПНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина
e-mail: rB.irinan@gmail.com

Исследовано магнитное поле подземной двухцепной 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 и выше при различном расстоянии между цепями кабельной линии. Показано, что только за счет изменения взаимного расположения цепей линии для рассматриваемого случая не удастся снизить внешнее магнитное поле до допустимого уровня, определяемого согласно требованиям электромагнитной безопасности. Библ. 8, рис. 6.

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

Введение. Силовые кабели на высокое и сверхвысокое напряжение представляют собой значительные источники магнитного поля и в большинстве случаев в непосредственной близости от своего расположения приводят к превышению норм электромагнитной безопасности [1–3]. Актуальность соблюдения безопасности кабельных линий велика в связи с подтвержденными случаями влияния магнитного поля на людей и другие биологические объекты [1, 3].

Для соблюдения условий безопасности и защиты населения от воздействия электромагнитного поля электроустановок разработаны стандарты относительно допустимого уровня создаваемого ими поля. В Украине гранично-допустимый уровень магнитного поля промышленной частоты составляет 0,5 мкТ [4].

Снижение уровня магнитного поля кабельных линий может достигаться различными способами [1, 5, 6], в том числе за счет взаимного расположения кабелей в линии, глубины прокладки в земле, выбора последовательности фаз кабелей, применения магнитных и немагнитных экранов.

Для определения путей достижения допустимого уровня магнитного поля кабельных линий широко используется компьютерное моделирование [1, 2, 5, 6].

В связи с широким внедрением в Украине сверхвысоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), например, первой такой линии, описанной в [7], в данной работе методом компьютерного моделирования исследуется магнитное поле двухцепной кабельной линии на напряжение 330 кВ в отсутствие средств экранирования. Рассматривается подземная кабельная линия с заданной глубиной прокладки. Каждая цепь линии состоит из трех однофазных кабелей с СПЭ-изоляцией, расположенных треугольником (по равностороннему треугольнику вплотную друг к другу вершиной вверх). Общий вид такой кабельной линии показан на рис. 1 а.

Целью работы является исследование влияния расстояния между цепями двухцепной сверхвысоковольтной подземной кабельной линии с СПЭ-изоляцией при определенной

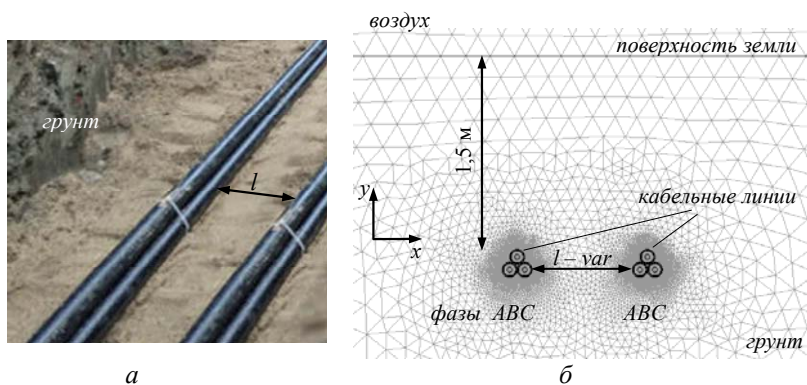


Рис. 1

последовательности расположения фаз кабелей на уровень создаваемого магнитного поля на поверхности земли.

Для достижения цели рассчитывается распределение внешнего магнитного поля линии непосредственно на поверхности земли и на заданной высоте 1,5 м над землей, что ассоциируется с воздействием поля на людей, находящихся в зоне над кабелями.

Исследование в работе проводится методом конечных элементов в программе моделирования Comsol [8].

Модель для расчетов и исследования. Предположения модели следующие:

- 1) кабельная линия является протяженной и проложенной параллельно поверхности земли на определенной глубине; условия прокладки неизменны по всей кабельной трассе;
- 2) металлические экраны кабелей заземлены с двух концов;
- 3) источниками переменного магнитного поля являются трехфазные токи в жилах и наведенные токи в экранах кабелей, иные источники поля вблизи линии отсутствуют;
- 4) магнитное поле гармонически меняется с частотой 50 Гц;
- 5) средства экранирования магнитного поля кабельной линии не используются.

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 $\dot{A}_z(x, y)$.

Модель для расчета магнитного поля основывается на уравнении

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

Здесь ω – круговая частота тока; σ , μ_0 – электропроводность и магнитная постоянная, соответственно; j – мнимая единица; $\Delta \dot{U}_i$ – падение напряжения в проводящей среде на участке единичной длины. Значения $\Delta \dot{U}_i$ в области экранов кабелей определяются из дополнительного условия для полного тока, протекающего во всей расчетной области. Полагается, что падения напряжения на жилах каждой цепи линии одинаковы и смещены по фазе на 120° : $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j0}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j2\pi/3}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j4\pi/3}$ – соответственно на жилах фаз A , B , C . В этих выражениях $\Delta \dot{U}_{жс}$ задается из условия равенства токов в жилах номинальному значению.

В качестве граничных условий на всех внешних границах расчетной области выбирается условие магнитной изоляции – $\dot{A}_z = 0$.

Результаты численных расчетов. Рассчитывалась двухцепная кабельная линия 330 кВ с кабелями, расположенными в земле треугольником на глубине 1,5 м (рис. 1). Используемые в расчетах характеристики кабелей приведены в [7]. Номинальный ток кабельной линии – 630 А.

Элементное разбиение фрагмента расчетной области показано на рис. 1 б).

На первом этапе исследования задавалась последовательность фаз кабелей $ABC-ABC$.

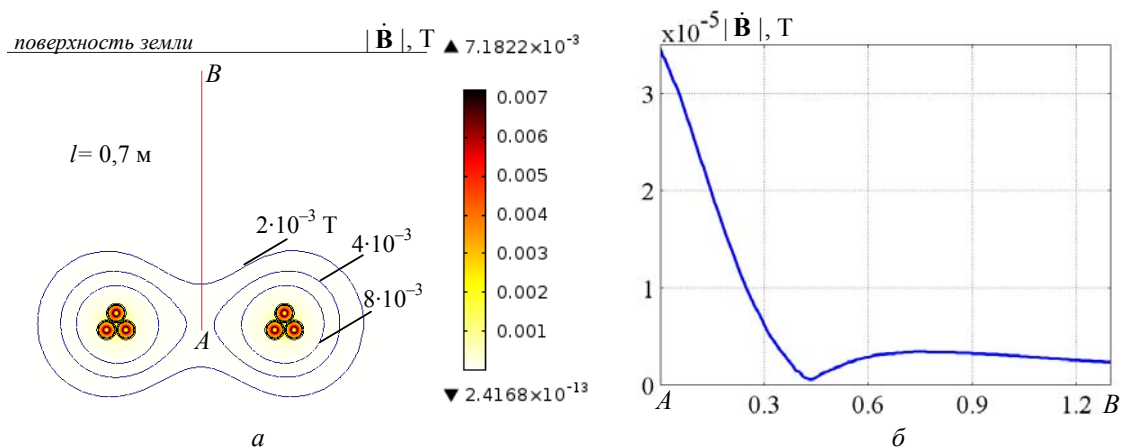


Рис. 2

Распределение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ вокруг кабелей линии представлено на рис. 2 а в цвете и изолиниями, соответствующими значениям поля $2 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-3}$ и $8 \cdot 10^{-3}$ Т. Изменение магнитного поля по глубине земли – вдоль линии AB , равноотстоящей от кабельных линий, приведено на рис. 2 б. В зоне расположения кабелей поле максимально, у поверхности земли оно значительно затухает.

Совместное проявление скин-эффекта и эффекта близости кабелей отображено на рис. 3. Здесь показана картина плотности тока $|\dot{\mathbf{J}}|$ в жилах кабелей одной из цепей кабельной линии. Видно, что ток концентрируется на поверхности жил.

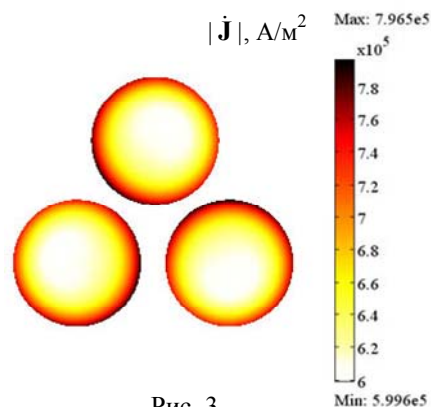


Рис. 3

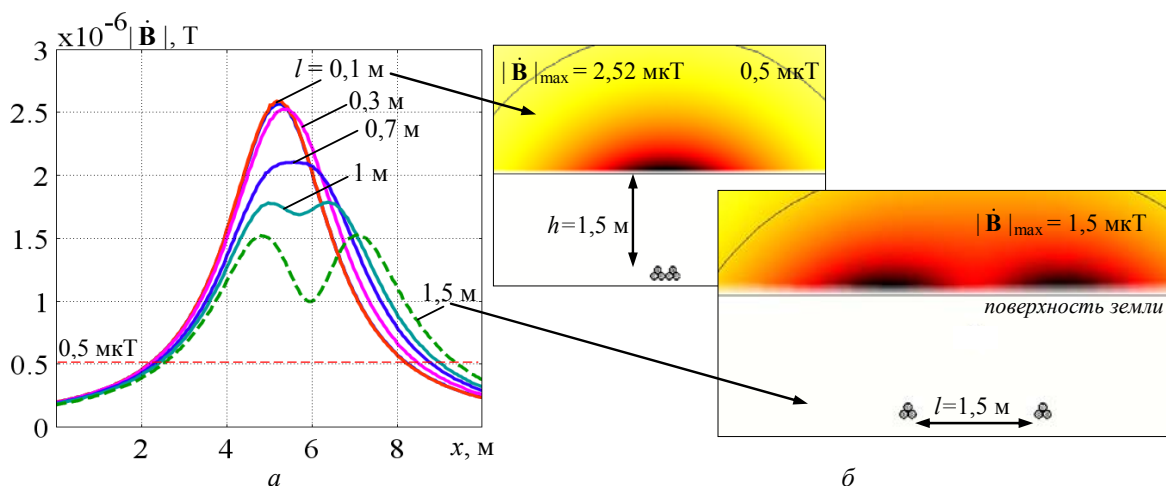


Рис. 4

Данные рис. 2 а и 3 отображают взаимное влияние совокупности проводников (жил и экранов) кабелей, что приводит к вытеснению тока на поверхность жил и взаимному воздействию магнитного поля, создаваемого каждой цепью линии.

На рис. 4 а показано изменение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ на поверхности земли над кабелями при различных расстояниях l между цепями кабельной линии. Для отображения характера распределения магнитной индукции на рис. 4 б приведены картины поля в оттенках цвета и в виде изолинии, соответствующей $0,5 \text{ мкТ}$, для сближенных групп кабелей ($l = 0,1 \text{ м}$) и при расстоянии между ними $1,5 \text{ м}$. Интересно отметить, что при расстоянии $l < 0,1 \text{ м}$ (т.е. при сильном сближении кабелей) максимальное значение поля несколько уменьшается, однако это не сказывается на его общем характере изменения и размерах зоны отчуждения в соответствии с безопасным уровнем $0,5 \text{ мкТ}$ [4].

Зависимость от расстояния между цепями кабельной линии l максимального значения магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max}$ на высоте $1,5 \text{ м}$ от поверхности земли показана на рис. 5. Чем более удалены друг от друга группы кабелей, тем ниже значения индукции. Исключение составляет небольшой интервал изменения l от 0 до $\sim 0,1 \text{ м}$.

На заключительном этапе проведены расчеты для различного расположения фаз кабелей как $ABC-ABC$, так и $ABC-CBA$ при одинаковом расстоянии между цепями кабельной линии $l = 0,7 \text{ м}$. Графическое отображение магнитного поля для этих случаев приведено в виде силовых линий на рис. 6 а и б соответственно. Как видно, изменение последовательности фаз кабелей изменяет характер распределения силовых линий магнитного поля и способно повлиять на значения магнитной индукции в окрестности расположения кабелей, а также на и над поверхностью земли.

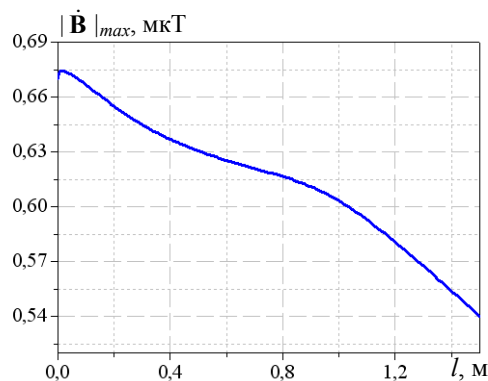


Рис. 5

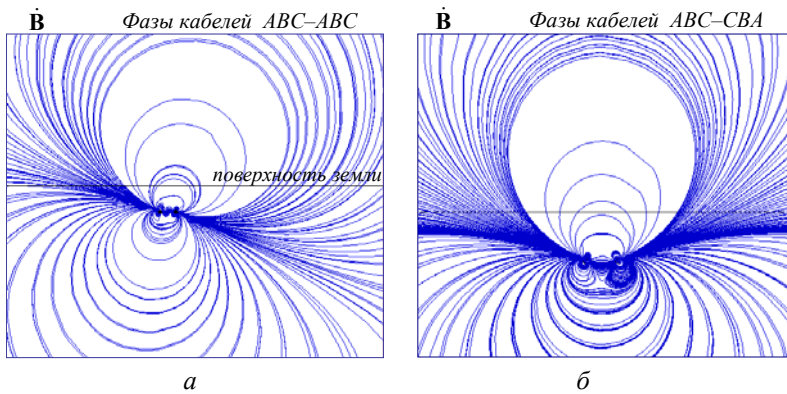


Рис. 6

нии с СПЭ изоляцией на напряжение 330 кВ в двухцепном исполнении проведены компьютерные расчеты при различном расстоянии между цепями линии и заданной последовательности фаз кабелей. Детально исследован характер распределения поля в зоне расположения линии, на поверхности земли и над ее поверхностью.

Показана возможность изменения уровня магнитного поля в зависимости от последовательности расположения фаз кабелей.

Для рассматриваемого случая кабельной линии не удастся снизить значения магнитной индукции до допустимого уровня, установленного в соответствии с требованиями безопасности, и поэтому необходимо использовать другие пути снижения внешнего поля, включая применение магнитных экранов.

1. Дубицкий С.Д., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Управление магнитным полем подземной кабельной линии электропередач. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки.* 2017. Т. 23. № 3. С. 88–100.
2. Кучерявая И.Н. Электромагнитное поле подземной одноцепной кабельной линии сверхвысокого напряжения. *Праці Інституту електродинаміки НАН України.* 2018. Вип. 50. С. 92–96.
3. Салтыков В.М. Проблемы электромагнитной безопасности по магнитным полям промышленной частоты от токов кабелей с изоляцией СПЭ. М. 13.02.2018. Сайт: RusCable.Ru. https://www.ruscable.ru/article/Problemy_elektromagnitnoj_bezopasnosti_SPE/
4. Правила улаштування електроустановок. Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
5. Грешняков Г.В., Доронин М.В., Коровкин Н.В. Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий. *Кабели и провода.* 2015. № 5. С. 8–13.
6. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
7. 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.
8. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>

УДК 621.315.2:004.94

І.М. Кучерява, докт. техн. наук

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

МАГНІТНЕ ПОЛЕ НАДВИСОКОВОЛЬТНОЇ ДВОЛАНЦЮГОВОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ З ІЗОЛЯЦІЄЮ ЗІ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ

Досліджено магнітне поле підземної дволанцюгової кабельної лінії на напругу 330 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Проаналізовано явища скін-ефекту та ефекту близькості в силових кабелях. Вивчено розподіли магнітного поля кабельної лінії на поверхні землі та вище за різної відстані між ланцюгами кабельної лінії. Показано, що тільки за рахунок зміни взаємного розташування ланцюгів лінії для розглянутого випадку не вдається знизити зовнішнє магнітне поле до припустимого рівня, визначеного відповідно до вимог електромагнітної безпеки. Бібл. 8, рис. 6.

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

I.M. Kucheriava

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

Отметим также, что уменьшение расстояния между цепями кабельной линии и соответственно усиление их взаимного влияния может приводить к росту температуры нагрева проводящих элементов и, как следствие, к необходимости уменьшения токовой нагрузки линии.

Заключение. Для снижения внешнего магнитного поля подземной кабельной ли-

Magnetic field of extra-high voltage two-circuit cable line with XLPE insulation

The magnetic field generated by underground two-circuit 330 kV cable line with XLPE insulation is studied. The skin effect and proximity effect in the power cables are analyzed. The distributions of magnetic field on the ground for different distance between the cable circuits are computed and discussed. As shown for the case under consideration, the external magnetic field of cable power line can be reduced down to admissible safety level by using another ways. References 8, figures 6.

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

1. 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. Vol. 23. No. 3. P. 88–100. (Rus)
2. Kucheriava I.M. Electromagnetic field of underground single-circuit extra-high voltage cable line. *Pratsi Institutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. № 50. P. 92–96. (Rus)
3. Saltykov V.M. Problems of electromagnetic safety on industrial frequency magnetic fields from currents of XLPE insulated cables. 13.02.2018. Site: RusCable.Ru. https://www.ruscable.ru/article/Problemy_elektromagnitnoj_bezopasnosti_SPE/ (Rus)
4. Electric installation code. Minpalyvo Ukrainy, 2010. 776 p. (Ukr)
5. Greshniakov G.V., Doronin M.V., Korovkin N.V. Combined magnetic shields for cable power lines. *Kabeli i provoda*. 2015. No. 5. P. 8–13. (Rus)
6. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015. 305 p. (Rus)
7. Lyach V.V., Molchanov V.M., Santatskii V.G., Kvitsinskii A.A. 330 kV cable line: some aspects of designing. *Promelektro*. 2009. No. 6. P. 27–33. (Rus)
8. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>

Надійшла 14.11.2018

Received 14.11.2018

УДК 621.3.061; 621.3.051.2.

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОМОСТА УКРАЇНА – ЄВРОСОЮЗ

М.С. Сегеда*, докт. техн. наук, **К.Б. Покровський****, канд. техн. наук, **О.І. Маврін**, канд. фіз.-мат. наук, **В.П. Олійник**, канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», Інститут енергетики та систем керування,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

e-mail: mseheda@ukr.net, kpokrov@gmail.com, olherd.i.mavrin@lpnu.ua, svevolkat@gmail.com

Розроблено модель для дослідження усталених режимів та перехідних процесів варіантів схеми енергомоста Україна – Європейський Союз у програмному середовищі Power Factory v.15.2 на основі набору типових моделей елементів мережі. Модель перевірено на результатах контрольних замірів. Показано вплив надлишкової реактивної потужності в схемі мережі на координати режимів та відносно невисоку ефективність шунтових реакторів для її компенсації в умовах застосування синхронного генератора. Запропоновано застосування асинхронізованого генератора для підвищення ефективності роботи енергомоста Україна – Європейський Союз. Бібл. 7, рис. 5, таблиця.

Ключові слова: енергомост Україна – Євросоюз, моделювання, реактивна потужність, асинхронізований генератор.

Важливою проблемою розвитку енергосистеми України є проведення заходів для забезпечення переходу на паралельну роботу з енергосистемою Євросоюзу – ENTSO-E. Перспективним етапом такого переходу є увімкнення енергоблока № 2 Хмельницької АЕС до європейської енергосистеми через існуючі лінії електропередавання 750 кВ ХАЕС – Жешув і ХАЕС – Західно-Українська ПС. Для реалізації енергомоста ХАЕС – ENTSO-E [7] необхідно провести комплекс технічних заходів, що передбачає приєднання блока № 2 ХАЕС до схеми Бурштинського острова (рис. 1). Загальна характеристика основних елементів реалізації про-