



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ 330 кВ

Рассчитано магнитное поле подземной одноцепной кабельной линии на напряжение 330 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Для случаев различного расстояния между фазами кабелей изучено распределение магнитного поля кабельной линии непосредственно вокруг кабелей, по глубине грунта и вдоль поверхности земли над линией. Показано, что за счет сближения фаз кабелей с 0,6 до 0,005 м возможно уменьшение максимального значения магнитного поля на поверхности земли более, чем в 2 раза.

К л ю ч е в ы е с л о в а: подземная кабельная линия, прокладка кабелей в одной плоскости, электромагнитная безопасность, компьютерное моделирование.

Введение. Современные силовые кабели производятся с изоляцией из сшитого полиэтилена и широко применяются во всем мире в сетях различного класса напряжения (вплоть до 500 кВ) [1, 2]. В настоящее время получен положительный опыт работы таких кабелей [2], включая опыт их использования на гидроэлектростанциях, например, в Японии, Китае, России [3, 4].

Кабельные линии прокладываются различными способами, в том числе непосредственно в земле без траншеи. На сегодняшний день бестраншейная прокладка кабелей имеет место практически во всех проектах кабельных сетей электроснабжения.

Среди различных геометрических конфигураций прокладки кабелей в кабельных линиях наиболее распространенными являются расположение кабелей треугольником вплотную друг к другу и в одной горизонтальной плоскости на определенном расстоянии между фазами. По сравнению с кабелями в одной плоскости, расположение фаз по вершинам равностороннего тре-

угольника является более благоприятным с точки зрения снижения внешнего магнитного поля, создаваемого кабельной линией [5]. Распределение поля вокруг высоковольтной кабельной линии с расположением кабелей треугольником детально исследовано в работе [6].

Учитывая, что в кабельной линии горизонтальной прокладки кабели могут находиться на различном расстоянии l друг от друга (Рис. 1), целью настоящей работы является исследование зависимости магнитного поля кабельной линии с горизонтальным расположением кабелей от расстояния между ними.

Рассматривается распределение магнитного поля, создаваемое кабельной линией, не только в грунте и непосредственно вблизи кабелей, но и на поверхности земли, что важно для практических вопросов защиты окружающей среды и организации зоны отчуждения в соответствии с санитарными нормами и правилами защиты населения от воздействия магнитного поля [7, 8].

Изучение магнитного поля кабельной линии выполняется в работе путем компьютерного моделирования в программе Comsol [9] с использованием метода конечных элементов.

Математическая модель для исследования. Численное моделирование магнитного поля кабельной линии проводится для стационарного режима в двумерном случае в предположении, что кабельная линия является протяженной и проложенной параллельно поверхности земли на заданной глубине h (Рис. 1); условия прокладки неизменны по всей длине кабельной трассы.

Задача расчета магнитного поля формулируется в декартовой системе координат в плоскости xOy (Рис. 1) относительно комплексного векторного магнитного потенциала, имеющего единственную z -составляющую. Модель для расчета магнитного поля состоит из системы интегро-

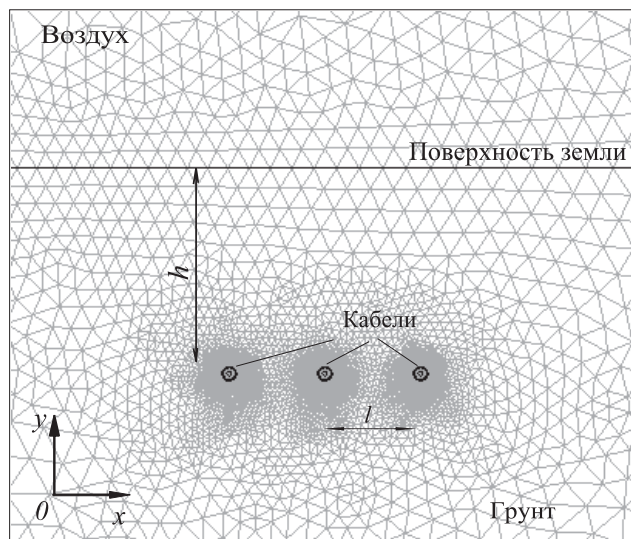


Рис. 1. Фрагмент расчетной области с сеткой разбиения на конечные элементы.

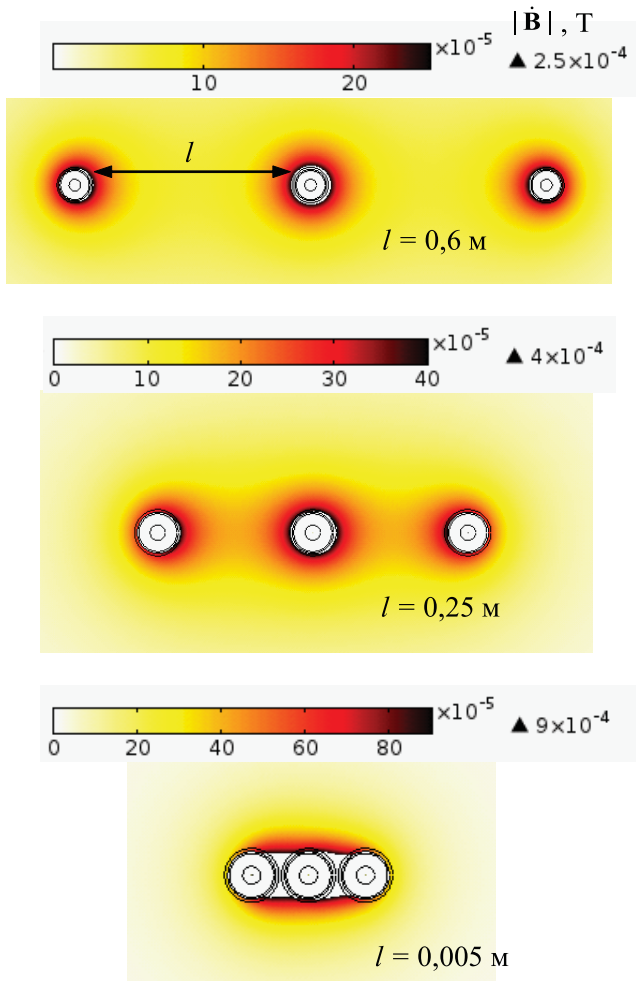


Рис. 2. Распределение (в цвете) магнитной индукции вокруг кабельной линии с горизонтальным расположением кабелей при различном расстоянии между ними: $l = 0,6; 0,25$ и $0,005 \text{ м}$.

дифференциальных уравнений, приведенных и детально описанных в работах [6, 10]. В модели учитывается, что источниками переменного магнитного поля являются трехфазные токи промышленной частоты, протекающие в жилах, и наведенные токи в экранах кабелей; иные источники поля отсутствуют. Рассматривается случай заземления экранов с двух концов. Решаемая

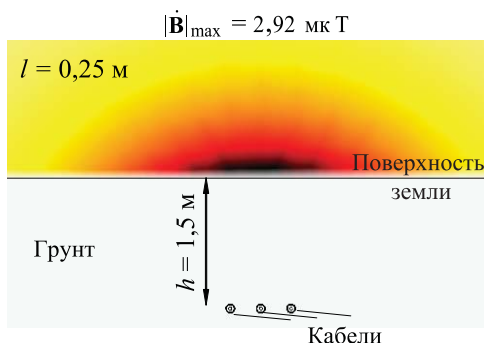


Рис. 3. Характерное распределение (в цвете) магнитной индукции на поверхности земли над кабелями. Указано максимальное значение поля при расстоянии между кабелями $l = 0,25 \text{ м}$.

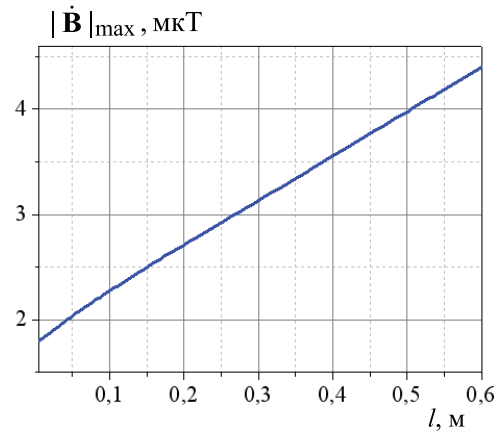


Рис. 4. Максимальное значение магнитной индукции на поверхности земли над кабелями в зависимости от расстояния l между ними.

задача является цепно-полевой [11].

Данные для расчетов и компьютерные результаты. Исследуется магнитное поле кабельной линии на напряжение 330 кВ, проложенной в земле на глубине $h = 1,5 \text{ м}$ (Рис. 1). Используемые в расчетах характеристики кабелей приведены в статье [6]. Номинальный ток кабельной линии – 630 А.

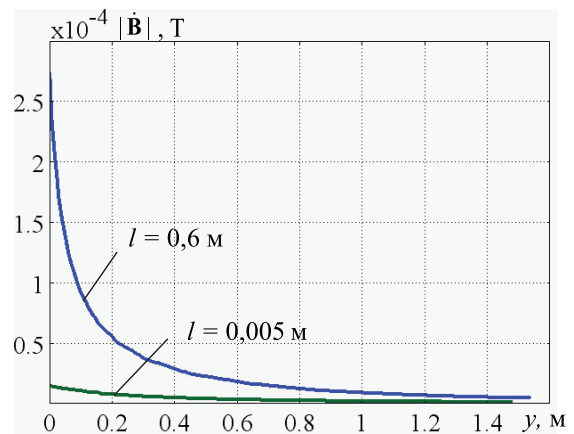


Рис. 5. Изменение поля от центрального кабеля в кабельной линии до поверхности земли при расстоянии между кабелями $l = 0,6$ и $0,005 \text{ м}$.

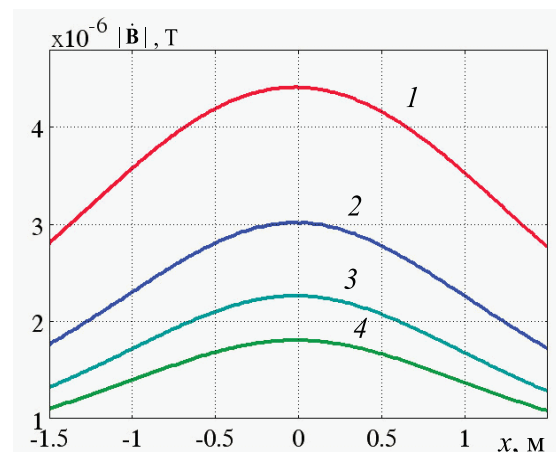


Рис. 6. Изменение поля на поверхности земли при различном расстоянии между кабелями: 1 – $l = 0,6 \text{ м}$; 2 – $0,25 \text{ м}$; 3 – $0,1 \text{ м}$ и 4 – $0,005 \text{ м}$.



Расчетная область, фрагмент которой показан на Рис. 1, состоит из подобластей с характеристиками грунта (электропроводность 10^{-3} См/м), воздуха, включает также элементы каждого из трех кабелей – алюминиевую жилу, медный экран, полиэтиленовую изоляцию и полиэтиленовую оболочку. Последовательность фаз кабелей – ABC. Расстояние между кабелями в линии варьируется в пределах $l = 0–0,6$ м.

Распределение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ в непосредственной близости от рассматриваемой кабельной линии при различном расстоянии между кабелями – $l = 0,6; 0,25$ и $0,005$ м показано на картинах Рис. 2. Как видно, при более близком расположении кабелей внешнее магнитное поле вблизи их поверхности увеличивается, достигая при $l = 0,6$ м значения $|\dot{\mathbf{B}}| = 250$ мкТ, а при $l = 0,005$ м – 900 мкТ. При малом расстоянии между фазами в значительной степени проявляется взаимное влияние кабелей.

Распределение в цвете магнитной индукции на поверхности земли над кабелями (вдоль оси Ox) показано на Рис. 3. Для случая расстояния между кабелями $l = 0,25$ м максимальное значение поля составляет $2,92$ мкТ и имеет место в зоне над центральным кабелем.

На Рис. 4 приведен график зависимости наибольшего значения магнитной индукции на поверхности земли над кабелями от расстояния между ними. Показано, что при большем удалении кабелей друг от друга максимальное значение поля на поверхности земли увеличивается.

Характер изменения магнитной индукции по глубине грунта над кабелями графически отображен на Рис. 5. Здесь, в дополнение к данным Рис. 4, представлены кривые изменения поля на отрезке от центрального кабеля в кабельной линии до поверхности земли (вдоль оси Oy) для случаев $l = 0,6$ и $0,005$ м. Как видно, при большем расстоянии между кабелями значения поля в грунте выше.

Изменения магнитной индукции на поверхности земли (вдоль оси Ox) при различном расстоянии между кабелями $l = 0,6; 0,25; 0,1; 0,005$ м приведены на Рис. 6.

Заключение. Компьютерное моделирование показывает, что внешнее магнитное поле одно-

цепной кабельной линии с расположением кабелей горизонтально может быть снижено за счет сближения кабелей.

Расчетные данные, приведенные на Рис. 4–6, свидетельствуют о необходимости выбора наиболее оптимального расстояния между кабелями с тем, чтобы удовлетворить условию безопасного уровня магнитного поля вдоль и над поверхностью земли (согласно стандартам, принятым в Украине [8], гранично-допустимый уровень магнитного поля частотой 50 Гц составляет $0,5$ мкТ).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Electrical power cable engineering*. Third Edition, edited by W.A. Thue, CRC Press: 2011, 460 p.
2. Щерба А.А., Кучерявая И.Н., Курик В.В., Цыганенко Б.В. Мировой опыт применения сшитой полиэтиленовой изоляции для производства силовых кабелей разных классов напряжения. *Электрические сети и системы*, 2015, № 5, С. 11–20.
3. Suzuki A., Nakamura S., Matsuda M., Tanaka H. Installation of the world's first 500 kV XLPE cable with intermediate joints. *Furukawa Review*, 2000, No. 19, P. 115–122.
4. *Силовые кабели и кабельные системы 10–220 кВ*. Современные решения в области силовых кабелей, ABB, Power and productivity for a better world™, 30 p., – <http://www02.abb.com/global/ruabb/ruabb052.nsf/0/aba877956e74b657c1257498004363f4/>
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, p. 203–208.
6. Кучерявая И.Н. Электромагнитное поле подземной одноцепной кабельной линии сверхвысокого напряжения. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Зб. наук. праць. Київ: ІЕД НАНУ, вип. 50, 2018, с. 92–96.
7. Шевель Д.М. Электромагнитная безопасность. К.: ВЕК+, К.: НТИ, 2002, 432 с.
8. *Правила улаштування електроустановок*. Мінпалив-енерго України, 2010, 776 с.
9. *Comsol multiphysics modeling and simulation software* – <http://www.comsol.com/>
10. Кучерявая И.Н. Экранирование подземной кабельной линии сверхвысокого напряжения с помощью плоского ферромагнитного экрана. *Технічна електродинаміка*, 2019, № 5.
11. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.

