

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ НА НАПРЯЖЕНИЕ 330 кВ

**И.Н. Кучерявая**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Рассчитано температурное поле подземной кабельной линии на напряжение 330 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, предназначенной для электроснабжения производственного процесса на металлургическом заводе "Днепросталь" (г. Днепропетровск). Проанализировано влияние тепловых характеристик грунта вокруг траншеи на нагрев кабелей. Найдено предельное значение теплопроводности грунта, больше которого не происходит перегрев токопроводящих жил кабелей и гарантируется их тепловая устойчивость. Библиограф. 14, рис. 4, таблица.*

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

В настоящее время в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения (220 кВ и более) широко используются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Такая изоляция имеет высокие электрическую прочность и пластичность, низкие диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Ее электрофизические характеристики остаются стабильными при повышении температуры на 30 % и более. Однако надежность и длительность службы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена во многом зависят от условий их эксплуатации. При прокладке кабелей в земле важными являются расположение кабелей в линиях, характеристики окружающей среды (засыпочно́го грунта и естественной почвы), соблюдение тепловых режимов работы. Превышение температуры элементов кабелей выше установленных норм приводит к ускоренному старению изоляции, что является причиной снижения ее электрической прочности [14]. Особо важно это учитывать для кабелей, эксплуатируемых в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения.

В Украине для металлургического завода "Днепросталь" разработан и внедрен проект кабельной линии на напряжение 330 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена для обеспечения внешнего электроснабжения электросталеплавильного комплекса. Описание и основные характеристики этого кабельного проекта приведены в работах [6, 7].

Проектом предусмотрено использование подземной двухцепной кабельной линии на 330 кВ, состоящей из кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и с алюминиевой жилой фирмы Südkabel (Германия). Характеристики кабелей и способа их прокладки в проекте приведены в таблице и на рис. 1.

Кабели каждой из цепей при прокладке располагаются треугольником, что обеспечивает минимальные размеры траншеи и что важно в стесненных условиях города. На дно траншеи и для засыпки кабельной линии положена песчано-цементная смесь определенного соотношения составляющих, что обеспечивает заданную величину удельной теплопроводности (указана в таблице). Для защиты от механических повреждений предусмотрено перекрытие железобетонными плитами. Длина трассы кабельной линии составляет около 13

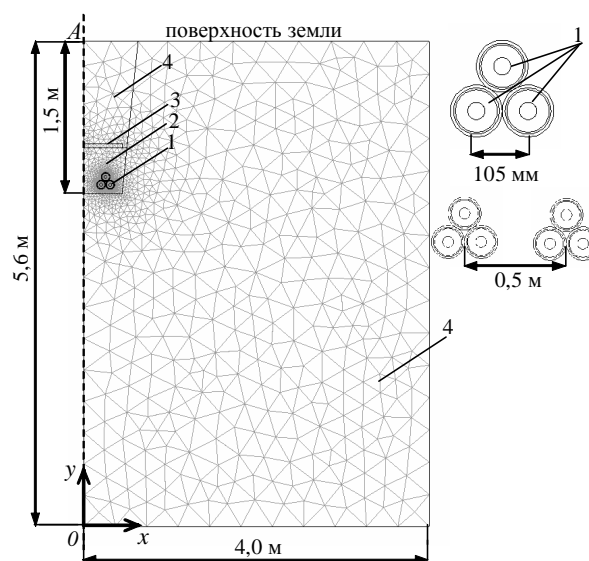


Рис. 1

км. Линия проходит в черте города Днепропетровска, пересекает пути Приднепровской железной дороги и реку Самара.

Следует отметить, что в Украине впервые в СНГ на ПАО "Завод "Южкабель" (г. Харьков) налажено промышленное производство кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией на напряжения до 330 кВ [1, 12].

Данная работа посвящена исследованию теплового состояния указанной выше кабельной линии. Тепловые процессы изучаются с учетом взаимного теплового влияния двух цепей кабельной линии, проложенных в одной траншее, и влияния теплопроводности грунта вокруг траншеи на нагрев кабелей в линии. Более широкое исследование в работе не проводится в силу заданных условий прокладки кабелей и их характеристик. Вместе с тем в аналогичном случае траншейной прокладки кабелей электромагнитные и тепловые процессы для двух кабельных линий с расположением кабелей треугольником детально исследованы в работах [4, 5, 10].

**Математическая модель и ее реализация.** Моделируется процесс распределения тепла в неоднородной среде, включающей двухцепную кабельную линию. Схема траншейной прокладки кабелей показана на рис. 1. Расчетная область в силу симметрии (по оси  $OA$  на рис. 1) включает одну цепь кабельной линии. Камера в траншее с кабелями (1) засыпается специальным грунтовым материалом (2) и закрывается съемными бетонными плитами (3) на всем протяжении трассы, что служит защитой кабелям от механических повреждений. Сверху до уровня поверхности земли траншея заполняется природным почвенным материалом (4).

Задача формулируется для двумерного случая в системе координат  $xOy$  (рис. 1) в предположении, что условия прокладки кабельных линий неизменны по всей длине достаточно протяженной трассы. Кроме того, принимаются следующие допущения: на всей поверхности земли вдали от линии температура одинакова; почва и засыпочный грунт однородны и не изменяют своих свойств по всей глубине. В более общем случае свойства земли претерпевают изменения в результате функционирования кабельных линий, а также под действием метеорологических факторов вследствие усадки, увлажнения или высыхания.

Распределение температуры в области с кабельными линиями траншейной прокладки в стационарном режиме работы описывается дифференциальным уравнением теплопроводности вида

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (1)$$

где  $\lambda(x, y, T)$  – зависящая от пространственных координат и температуры теплопроводность соответствующего материала;  $Q(x, y)$  – плотность мощности действующих в области тепловых источников, к которым относятся джоулево тепло, выделяемое в массивных проводниках токопроводящих жил кабелей, потери от электрического тока, протекающего в медном экране каждого кабеля, и диэлектрические потери в изоляционном материале.

Мощность удельного тепловыделения в элементах расчетной области вычисляется на основании выражения

$$Q = \begin{cases} J_{жс}^2 / \sigma_{жс} & \text{в токонесущих жилах;} \\ tg \delta \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r E_r^2 & \text{в полимерной изоляции;} \\ J_{э}^2 / \sigma_{э} & \text{в медных экранах;} \\ 0 & \text{в остальных элементах кабелей и подобластях.} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $J_{жс}$ ,  $J_{э}$  – соответственно действующие значения плотности тока в жилах и введенного тока в экранах кабелей;  $\sigma_{жс}$ ,  $\sigma_{э}$  – электропроводность жил и экранов;  $tg \delta$ ,  $\varepsilon_r$  – тангенс угла диэлектрических потерь и относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции;  $\omega = 314$  1/с – круговая частота изменения тока;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м –

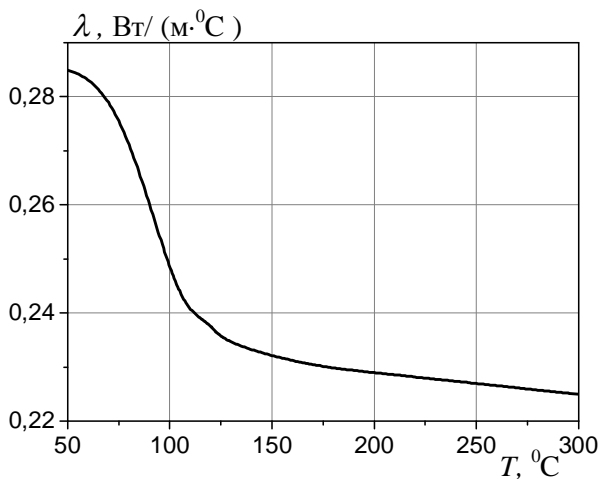


Рис. 2

электрическая постоянная;  $E_r$  – напряженность электрического поля в изоляции, рассчитываемая по формуле [11]

$$E_r(r) = \frac{U}{r \ln(r_э / r_{жс})},$$

где  $U$  – действующее напряжение между жилой и экраном кабеля;  $r$  – текущее расстояние от оси рассматриваемого кабеля;  $r_э$ ,  $r_{жс}$  – соответственно радиусы экрана и жилы.

В работе использована температурная зависимость  $\lambda = \lambda(T)$  для сшитого полиэтилена из [9], показанная на рис. 2.

Значение тока, протекающего в жилах кабелей, принимается равным номинальному. Ток в экранах кабелей полагается  $I_э = 0,06 I_{жс}$  в соответствии с оценками работ [3, 10].

Граничные условия задачи задаются следующим образом:

1. На оси симметрии  $OA$ :

$$\partial T / \partial n = 0. \quad (3)$$

2. На поверхности земли – условие теплообмена:

$$-\lambda \partial T / \partial n = k(T - T_э). \quad (4)$$

Здесь  $k$  – коэффициент теплоотдачи в воздух;  $T_э$  – температура воздуха;  $\mathbf{n}$  – вектор внешней нормали к рассматриваемой границе.

3. Исходя из выбранных размеров расчетной области (рис. 1), остальные границы считаются изотермическими:

$$T = T_0, \quad (5)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды (почвы).

Краевая задача (1)...(5) решалась численно методом конечных элементов с помощью программы Comsol [13]. Разбиение расчетной области на конечные элементы отображено на рис. 1.

**Результаты компьютерного моделирования.** Технические характеристики рассматриваемых кабелей и исходные данные для расчетов приведены в таблице [2, 6–8]. Размеры, характеризующие прокладку кабелей, указаны на рис. 1. Здесь же на вставке справа показано расположение кабелей.

Данные, использованные в расчетах [2, 6–8].

Основные характеристики кабелей	
Площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup>	800
Площадь сечения экрана, мм <sup>2</sup>	150
Толщина изоляции, мм	23,5
Толщина наружной оболочки, мм	6
Наружный диаметр, мм	105
<i>Геометрические размеры</i>	
Диаметр жилы, мм	34,8
Внутренний радиус внешнего экрана, мм	42,8
Прокладка кабелей в земле треугольником на глубине (см. рис. 1), м	1,5
Расстояние между кабельными линиями (см. рис. 1), м	0,5
Толщина железобетонных плит для покрытия в траншее, мм	50
<i>Электрические характеристики</i>	
Номинальное напряжение сети, кВ	330
Наибольший ток при глубине прокладки 1,5 м, А	630

<i>Тепловые характеристики</i>	
Допустимая температура основной изоляции, °С	
– в нормальном режиме	90
– в режиме перегрузки	105
– в режиме короткого замыкания	250
Допустимая температура экрана, °С	
– в нормальном режиме	80
– в режиме перегрузки	90
– в режиме короткого замыкания	350
Теплопроводность основной изоляции, Вт/(К·м) (также зависимость на рис. 2)	0,29
Теплопроводность наружной оболочки, Вт/(К·м)	0,29
Теплопроводность засыпочного грунта, Вт/(К·м)	1
Теплопроводность естественной почвы вокруг траншеи, Вт/(К·м)	0,4–2,5
Температура окружающей среды при прокладывании в земле, °С	15
Температура воздуха над поверхностью земли, °С	20

В расчетах учитывались такие элементы многослойной конструкции кабеля: алюминиевая токопроводящая жила; изоляционный слой из сшитого полиэтилена; экран из медных проволок, поверх которого спирально наложена медная лента; герметичная наружная оболочка, защищающая кабель от возможных механических повреждений и проникновения воды.

Полученная расчетным путем характерная картина распределения температурного поля вокруг кабелей в траншее дана на рис. 3. Здесь распределение температуры показано в оттенках серого цвета и контурными линиями с шагом 10 °С, векторы теплового потока отображены стрелками. Приведенная картина теплового поля соответствует температуре грунта  $T_0 = 15$  °С и его теплопроводности  $\lambda = 0,8$  Вт/(м·°С). На рис. 3 на вставках справа указаны значения температуры жил кабелей и приведены графики: изменение температуры на поверхности земли (верхний график), а также изменения температуры вдоль горизонтальных линий, проходящих через центральные точки жил кабелей (два нижних графика).

Как видно, наиболее нагревается жила внутреннего кабеля, ближе всего расположенного к оси симметрии и, соответственно, к соседней цепи кабельной линии. При выбранных данных температура кабелей не превышает установленных норм нагрева элементов согласно [7] и таблице – 90 °С. Грунт в траншее и вокруг нее на удалении до 2 м нагревается до температуры не менее 30 °С.

Характеристики окружающей траншею естественной почвы в значительной степени влияют на тепловое состояние кабелей в линии. Как показано в работах [2, 8], теплопроводность различных грунтов может принимать значения в диапазоне от 0,4 до 2,6 Вт/(м·°С). Осушенные грунты имеют меньшую

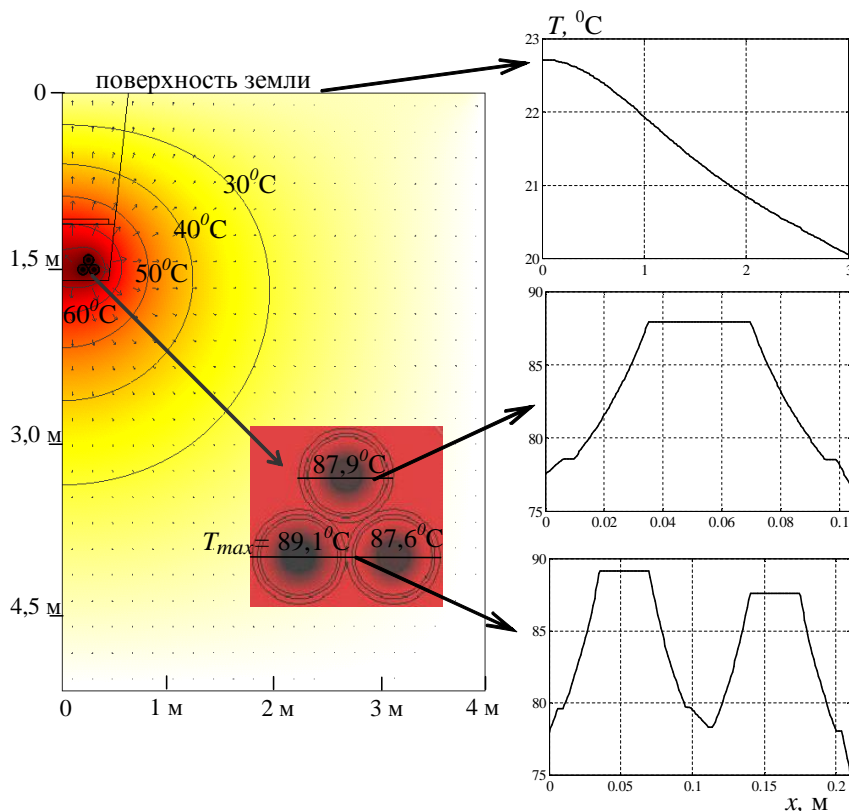


Рис. 3

теплопроводность, более влажные – характеризуются более высокими значениями теплопроводности.

На рис. 4 представлено изменение температуры жилы наиболее нагретого кабеля (см. рис. 3) в зависимости от теплопроводности грунта  $\lambda$ . Здесь отмечено также предельное значение  $\lambda_{np} = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ , ниже которого температура жилы кабеля превышает установленное значение длительно допустимой температуры  $90^\circ\text{С}$ . Таким образом, в рассматриваемом случае сухие грунты (с теплопроводностью менее  $0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ ) не обеспечивают допустимого нагрева проводников, что может приводить к перегреву кабелей и их термическому старению.

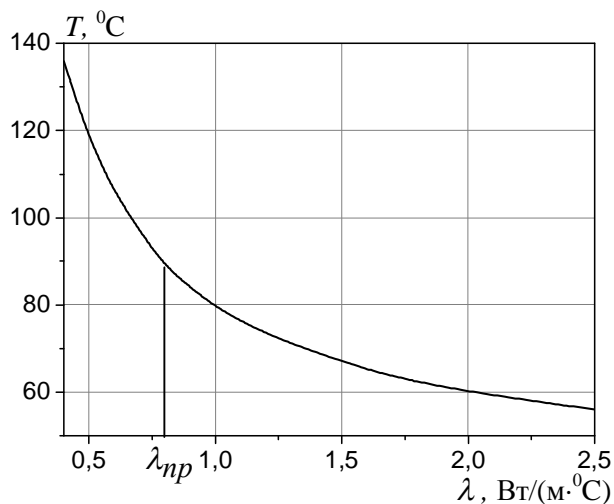


Рис. 4

Основными результатами работы являются следующие.

Описаны математическая модель и компьютерная методика по расчету температурного поля кабельных линий подземного исполнения.

Выполнен тепловой расчет двухцепной кабельной линии на 330 кВ, предназначенной для передачи мощности к электросталеплавильному комплексу металлургического завода "Днепросталь". Показано, что наиболее нагретыми являются внутренние кабели линии.

Найдены допустимые значения теплопроводности естественного грунта вокруг траншеи с кабелями, при которых обеспечиваются приемлемые тепловые режимы работы кабелей. В случае грунтов с низкими значениями теплопроводности во избежание перегрева элементов кабелей рекомендуется снижать токовую нагрузку или проводить мероприятия по увлажнению грунта по трассе прокладки кабелей.

1. Золотарев В.М. Решение проблемы создания отечественных электротехнологических комплексов производства кабелей энергетического назначения напряжением до 330 кВ // Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". – 2009. – № 39. – С. 50–63.
2. Кабели высокого напряжения / Докл. Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-80): Под ред. И.Б. Пешкова, С.Е. Глейзера. – М.: Энергоиздат, 1982. – 80 с.
3. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Кандаков С.А. Кабели 6–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Требования к прокладке // Новости электротехники. – 2005. – № 6(36).
4. Кучерявая И.Н. Компьютерное моделирование и анализ теплового состояния подземной кабельной линии на напряжение 10 кВ // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 5. – С. 3–8.
5. Кучерявая И.Н. Тепловой расчет силового кабеля на напряжение 110 кВ с учетом нелинейных характеристик полимерной изоляции // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 4. – С. 7–11.
6. 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.
7. 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.
8. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – М.: Папирус-Про, 2005. – Т. 4. – 640 с.
9. Овсиенко В.Л. Исследование нелинейных тепловых полей в высоковольтных кабелях с полимерной изоляцией // Наука и техника. Кабели и провода. – 2000. – № 4. – С. 26–29.
10. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Численный расчет электромагнитных и тепловых процессов в подземной кабельной линии. Стационарный режим // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силовая электроника и энергоэффективность". – 2006. – Ч. 1. – С. 91–95.
11. Уиди Б. Кабельные линии высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
12. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антоненко Ю.А., Василец Л.Г., Гримуд Г.И. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 64/110 кВ // Науч.-метод. издание РТМ К28–004:2006. – Харьков: Майдан, 2007. – 62 с.

13. *Comsol Multiphysics*, version 3.3 – [www.comsol.com](http://www.comsol.com)

14. *Dissado L.A., Fothergill J.C.* Electrical degradation and breakdown in polymers. – Published by Peter Peregrinus for the IEE. – 1992. – 601 p.

УДК 621.315.2:004.94

**І.М. Кучерява**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Комп'ютерне моделювання теплового стану підземної кабельної лінії на напругу 330 кВ**

*Розраховано температурне поле підземної кабельної лінії на напругу 330 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену, призначеної для електропостачання виробничого процесу на металургійному заводі "Дніпросталь" (м. Дніпропетровськ). Проаналізовано вплив теплових характеристик ґрунту навколо траншеї на нагрівання кабелів. Знайдено граничне значення теплопровідності ґрунту, більше якого не відбувається перегрівання струмопровідних жил кабелів і гарантується їхня теплова стійкість. Бібл. 14, рис. 4, таблиця.*

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

**I.M. Kucheryava**

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Computer modeling of thermal state of underground 330 kV cable line**

*The thermal field of 330 kV underground cable line intended for production process in "Dneprosteel" metallurgical works (Dnepropetrovsk) is computed. The line consists of two circuits with XLPE-insulated power cables. The effect of thermal characteristics of the soil around cable trench on heating of the cables is analyzed. The limiting value of soil thermal conductivity that provides admissible temperature of cable conductors and thermal stability of the power line is determined. References 14, figures 4, table.*

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

Надійшла 1.08.2011

Received 1.08.2011