



ЦЕПНО-ПОЛЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Представлена и реализована цепно-полевая математическая модель расчета электромагнитных процессов в двухцепной кабельной линии при горизонтальном расположении кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. По результатам определения мощности тепловых источников (джоулевых потерь в жилах и экранах кабелей) сформулирована тепловая модель подземной кабельной линии, позволяющая определить ее нагрузочную способность по условиям неперевышения допустимой температуры нагрева жил, с учетом характеристик окружающей среды и нагрева засыпочного грунта.

В настоящее время силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее напряжение (6–35 кВ) и высокое напряжение (вплоть до 110 кВ–500 кВ) получают все более широкое применение в энергосистемах больших городов, на транспорте (метрополитене), энергоёмких промышленных предприятиях и энергетических объектах, где требуется высокая надежность электроснабжения, и в том числе на гидроэлектростанциях для соединения электрического оборудования, вывода мощности от энергоблоков к распределительным устройствам или пунктам перехода.

Ряд крупных кабельных проектов для ГЭС описан в работах [1–3]. Среди них — первая в мире кабельная линия со сшитополиэтиленовой изоляцией на напряжение 500 кВ длиной 2300 м, смонтированная в 1998 г. японской фирмой Furukawa Electric на токийской гидроэлектростанции Kazunogawa, а также кабельная линия протяженностью 15 км для Бурейской ГЭС на Дальнем Востоке в России (Рис. 1).

Большая роль в достижении надежного и стабильного функционирования электрических кабелей отводится совершенствованию способов их прокладки, обеспечению оптимальных режимов

работы с учетом условий окружающей среды, в том числе установлению допустимой нагрузочной способности кабелей по току, которая определяется по допустимой температуре токопроводящих жил. Допустимая температура нагрева жил зависит от типа кабелей, номинального напряжения, способа и схемы прокладки кабелей в линии. Для определения предельно допустимого тока нагрузки кабельных линий наряду с их электромагнитным расчетом важную роль играет уточненный тепловой расчет.

В данной работе с целью определения нагрузочной способности кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена описывается и реализуется математическая модель электротепловых процессов, учитывающая схему заземления экранов кабелей, что предполагает совместное решение уравнений электромагнитного поля и электрической цепи. В [5] обоснована необходимость учета в расчетах кабелей схемы заземления экранов, поскольку это влияет на величину тока в экранах в нормальных и аварийных режимах, на электрические потери в экранах (а значит на тепловой режим кабелей и пропускную способность), на основные электрические параметры кабелей (активное и индуктивное сопротивление). Учет схемы соединения экранов (одностороннее, двустороннее заземления или с транспозицией) проведен в статье [6] путем совместного решения уравнений магнитного поля и присоединенной электрической цепи.

Представленная в настоящей работе математическая модель впервые описана в работе [7], где разработанная на ее основе численная методика использована для расчетов подземной кабельной линии с расположением кабелей треугольником. В данной работе проводится исследование двухцепной кабельной линии с горизонтальным расположением кабелей. Связанные электромагнитная и тепловая задачи решаются последовательно: электромагнитная задача — в двухмерной, а стационар-



Рис. 1. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена производства АВВ "Energiekabel", используемые на Бурейской ГЭС (Россия), [1].



ная тепловая задача – в трехмерной постановке с целью учета возможных неоднородных условий прокладки линии на трассе. В исследованиях рассмотрены факторы и связи, показанные на Рис. 2. Компьютерные расчеты проведены с использованием метода конечных элементов в пакете программ Comsol Multiphysics [8].

Математическая модель для исследования

Постановка задачи. Моделируются электромагнитные и тепловые процессы в стационарном режиме, протекающие в гетерогенной области. Область включает две кабельные линии (двухцепную линию) траншейной прокладки. Каждая линия состоит из трех кабелей однофазного исполнения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Элементами конструкции кабелей в линии, учитываемыми в расчетах, являются алюминиевые токонесущие жилы, каждая из которых окружена изоляционным слоем из сшитого полиэтилена, затем экраном из медных проволок и поверх всего герметичной наружной полиэтиленовой оболочкой.

Моделирование и расчет электромагнитного и температурного полей проводятся при следующих допущениях и упрощениях:

- кабельные линии предполагаются достаточно длинными и горизонтально проложенными параллельно поверхности земли на определенной глубине;
- экраны кабелей заземляются по концам строительных участков, как показано на Рис. 3;
- засыпной грунт и почва однородны и имеют одни и те же свойства по глубине; отметим, что в общем случае свойства земли претерпевают изменения в результате функционирования кабельных линий, а также под действием метеорологических факторов вследствие усадки, увлажнения или высыхания.

Электромагнитная задача решается в двумерной постановке, в поперечном сечении кабельной линии, в декартовой системе координат относительно комплексного векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$, характеризующегося единственной z -составляющей $\dot{A}_z(x, y)$. Тепловая задача формулируется в трехмерной постановке с учетом неоднородного участка грунта на трассе прокладки относительно температуры $T = T(x, y, z)$.

Электромагнитное поле кабельной линии. Источниками переменного магнитного поля в рас-

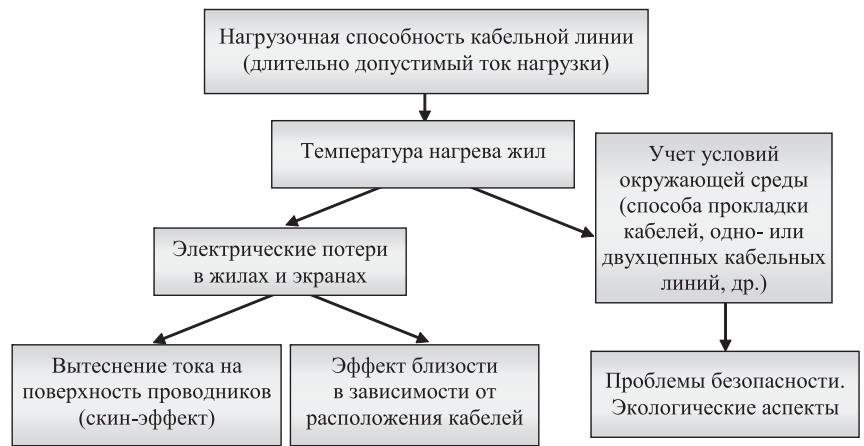


Рис. 2. Схема учета различных факторов при моделировании электротепловых процессов в кабельных линиях

сматриваемой области являются трехфазные токи, протекающие в жилах и экранах кабелей. Задача решается в предположении, что задана трехфазная система падения напряжения на единице длины жил и затем в ходе решения задачи определяются токи в жилах и в экранах, а также падение напряжения на экранах. Рассматривается случай заземления экранов на обоих концах согласно Рис. 3.

Распределение векторного потенциала определяется следующей системой уравнений:

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

$$\int_{\sum_i S_i} \dot{J}_z dS = \int_{\sum_i S_i} (-j\omega\sigma \dot{A}_z + \sigma \Delta \dot{U}_i) dS = 0, \quad (2)$$

$$\Delta \dot{U}_y = \Delta \dot{U} - 2R_3(\dot{I}_{yA} + \dot{I}_{yB} + \dot{I}_{yC}), \quad (3)$$

Здесь ω – круговая частота изменения тока; σ, μ_r – электропроводность и относительное значение магнитной проницаемости среды, соответственно; \dot{J} – плотность тока; S_i – площадь поперечного сечения i -ой проводящей среды в рамках расчетной области (среди таких сред рассматриваются жилы,

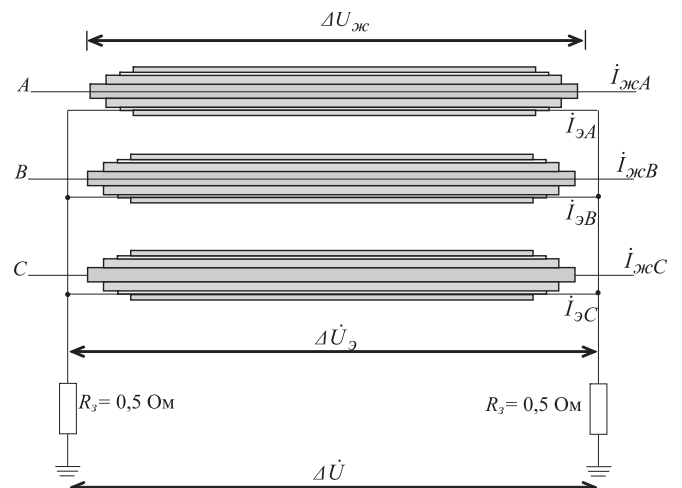


Рис. 3. Схема заземления экранов кабельной линии

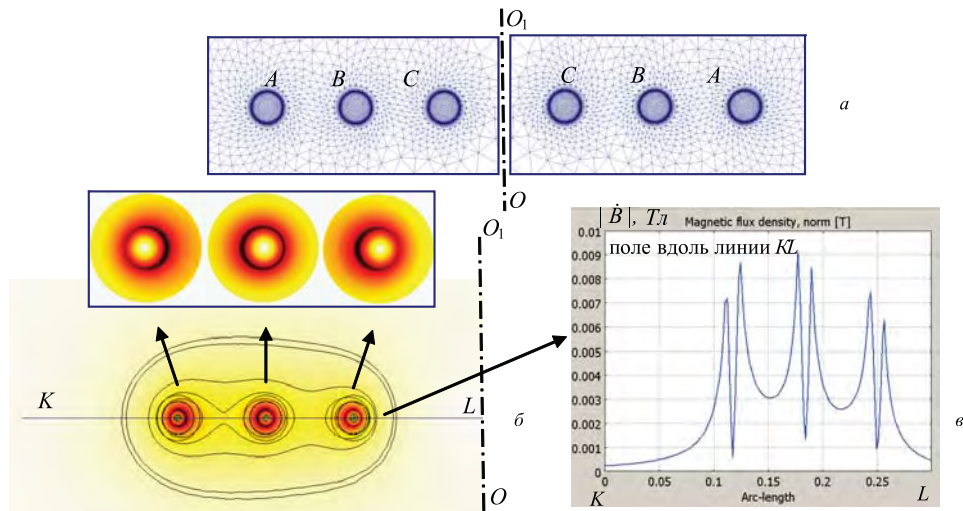


Рис. 4. Расчетная конечно-элементная сетка в окрестности двухцепной кабельной линии (а). Распределение модуля вектора магнитной индукции $|\vec{B}|$, (в цвете и изолиниями) в кабелях и вокруг них (б); изменение $|\vec{B}|$ вдоль линии KL (в).

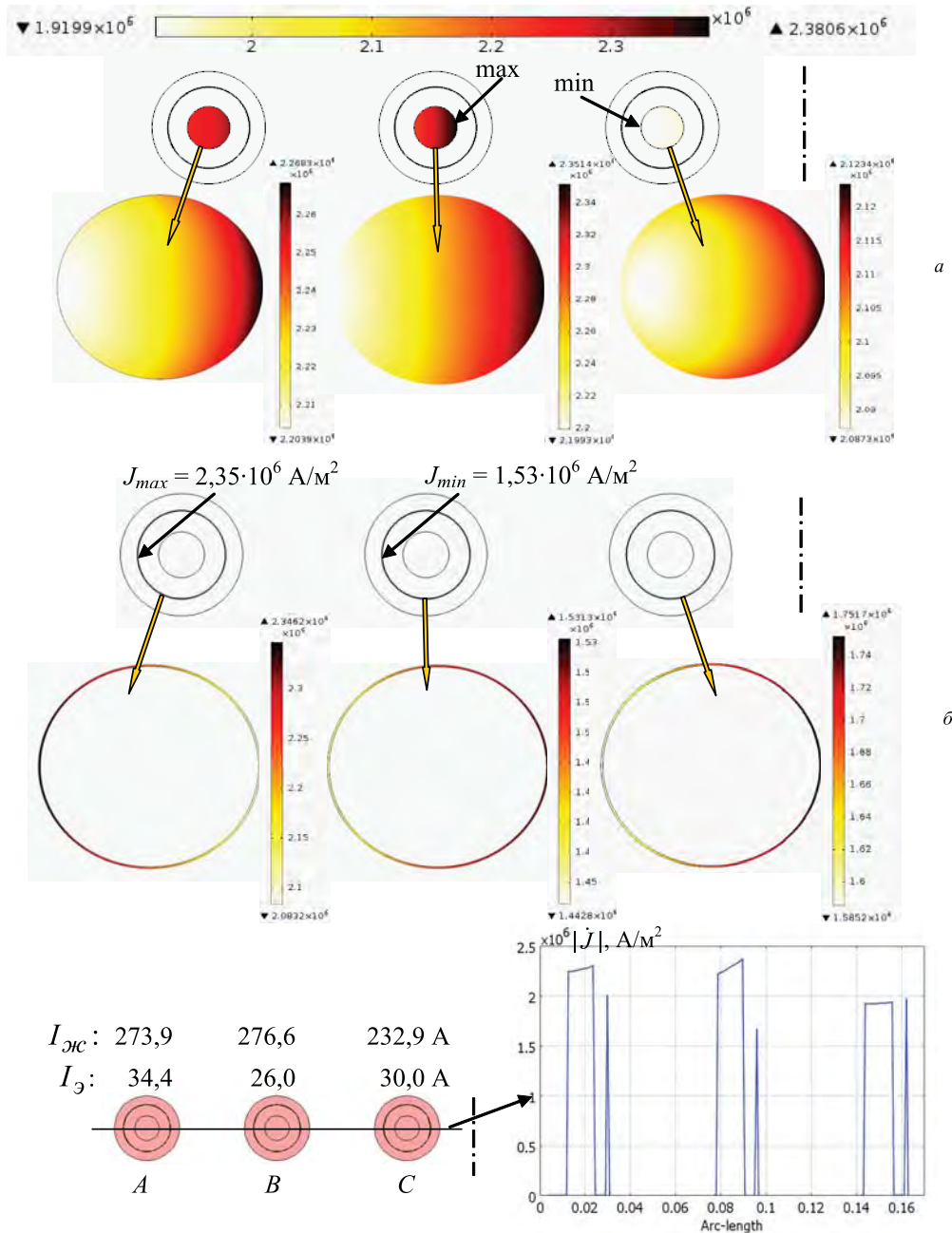


Рис. 6. Распределение плотности тока $|j|$ (в цвете) в жилах и экранах кабелей одной цепи и отдельно в каждой жиле и экране в соответствующем масштабе (а, б). Изменение $|j|$ вдоль линии, проходящей через центр кабелей. Указаны значения токов в жилах $I_{жс}$ и в экранах $I_э$ (в).



экраны кабелей и земля); $\Delta\dot{U}_{\text{эс}}$ – падение напряжения в проводящей среде на участке единичной длины; R_3 – сопротивление земли; $\dot{I}_{\text{э}A}$, $\dot{I}_{\text{э}B}$, $\dot{I}_{\text{э}C}$ – токи в экранах фаз кабелей A , B , C , соответственно; $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{\text{эс}}$ – в области жил (полагается известной величиной); $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_s$ – в области экрана; $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_g$ – в области грунта.

Система (1)–(3) содержит три уравнения и три неизвестные величины – \dot{A}_z , $\Delta\dot{U}_s$, $\Delta\dot{U}_g$ и является основой математической модели задачи в замкнутом виде.

В качестве граничных условий на внешних

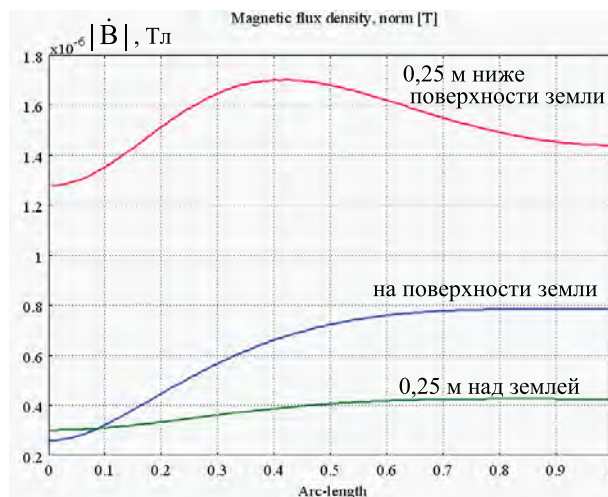


Рис. 5. Изменение магнитной индукции $|\dot{B}|$ над кабелями одной линии на различных уровнях относительно поверхности земли.

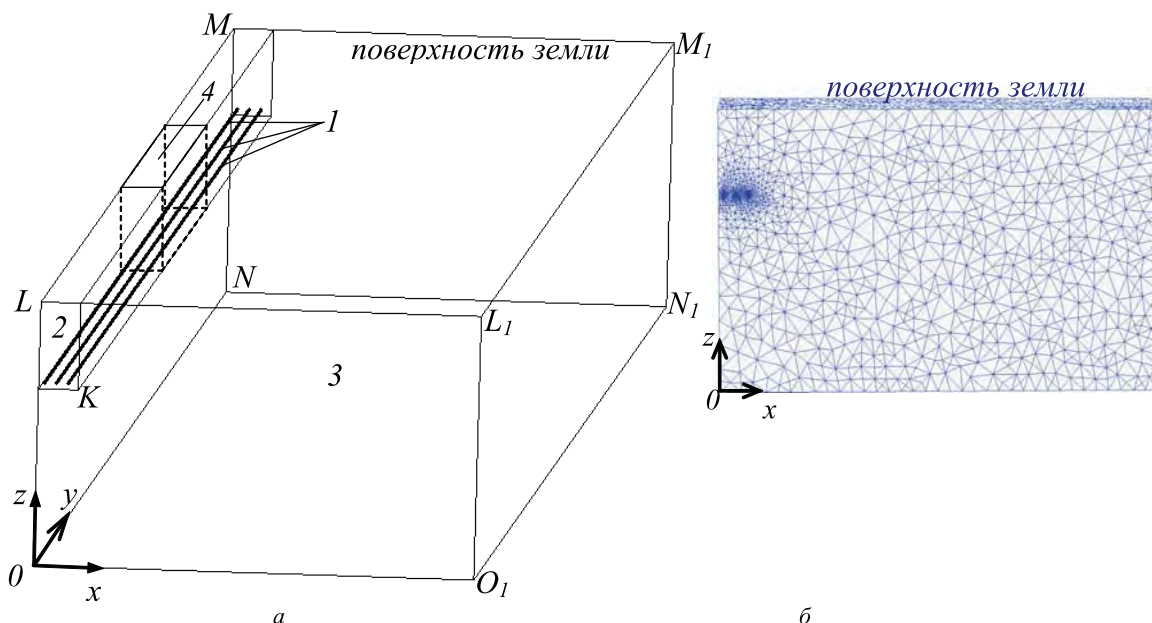


Рис. 7. Трехмерная расчетная область тепловой задачи (а) и конечно-элементная сетка в плоскости xOz (б). Здесь: 1 – кабели; 2 – засыпочный грунт; 3 – природная почва; 4 – неоднородное включение на трассе прокладки; LMM_1L_1 – поверхность земли; $LMNO$ – поверхность симметрии

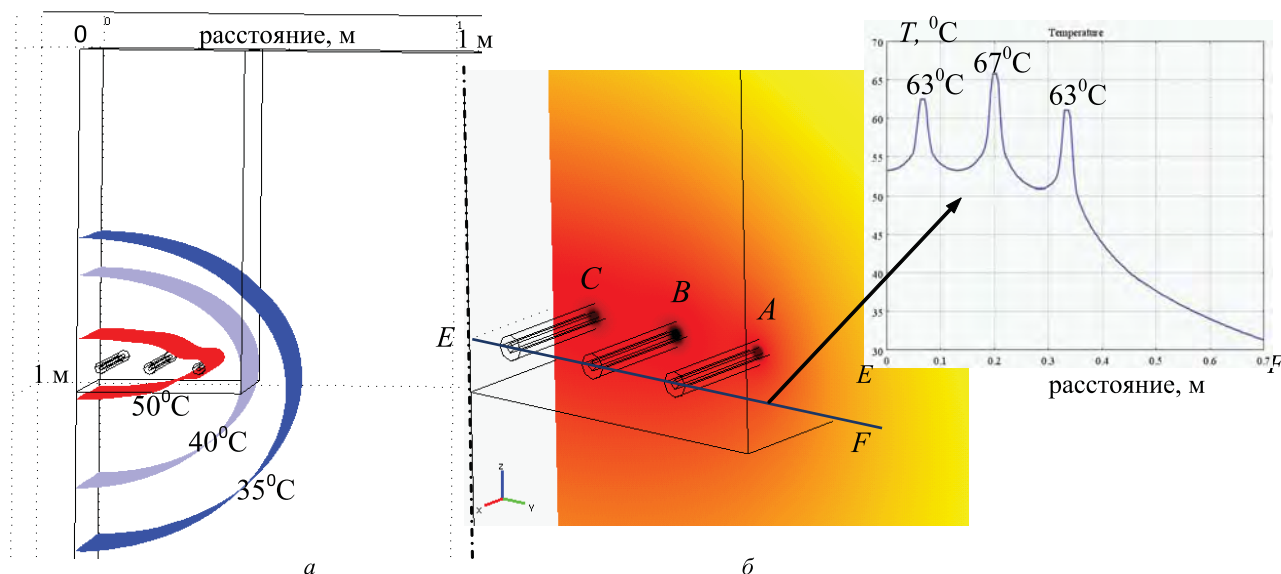


Рис. 8. Распределение температуры вокруг кабельной линии в виде изотермических поверхностей (а) и в цвете для фрагмента с увеличением (б). На вставке справа – изменение температуры вдоль линии EF , проходящей через центр кабелей. На графике указана температура нагрева жил.



границах расчетной области задавалось условие магнитной изоляции: $\dot{A}_z = 0$. Наличие второй цепи учитывалось граничным условием на оси симметрии OO_1 (Рис. 4) – $B_r = 0$.

Тепловое поле. Распределение стационарного температурного поля описывается дифференциальным уравнением теплопроводности вида

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (4)$$

где $\lambda(x, y, z)$ – теплопроводность соответствующего материала в рассматриваемой неоднородной среде; Q – удельная мощность тепловых источников, к которым относятся джоулево тепло, выделяемое в массивных проводниках токнесущих жил кабелей, $-|J_{жс}|^2/\sigma_{жс}$ и потери от электрического тока, протекающего в медном экране каждого кабеля, $-|J_э|^2/\sigma_э$. В приведенных формулах: $J_{жс}$, $J_э$ – соответственно действующие значения плотности тока в жилах и наведенного тока в экранах кабелей; $\sigma_{жс}$, $\sigma_э$ – электропроводность жилы и экрана;

Уравнение (4) дополняется граничными условиями (в соответствии с обозначениям Рис. 7 а далее).

$$T = T_0 \text{ на поверхностях } ONN_1O_1 \text{ и } L_1M_1N_1O_1;$$

$$\partial T/\partial n = 0 \text{ на поверхностях } OLMN, OLL_1O_1, \\ MM_1N_1N;$$

$$-\lambda \partial T/\partial n = k(T - T_{окр}) \text{ на поверхности земли} \\ LMM_1L_1$$

где T_0 – температура окружающей среды (естественной почвы); $T_{окр}$ – температура воздуха над поверхностью земли; k – коэффициент теплоотдачи в воздух; \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали к рассматриваемой границе расчетной области.

Результаты компьютерного моделирования.

Рассчитывались две трехфазные кабельные линии с номинальным током кабелей (наружным диаметром 33 мм) $I_{ном} = 296$ А при частоте – 50 Гц. Кабели размещены в одной горизонтальной плоскости на равном расстоянии друг от друга – 100 мм, считая по центру фаз кабелей. Жила кабелей алюминиевая сечением 120 мм². Длительно допустимая температура нагрева жил – 90°С. Глубина прокладки кабелей в земле – 0,75 м. Температура грунта – 15°С. Расстояние от центра крайнего кабеля до границы области засыпки – 100 мм. Теплопроводность естественной почвы $\lambda = 0,83$ Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи с поверхности земли $k = 15$ Вт/(м²·К). Размеры расчетной области составляли 5×10×3 м соответственно по осям x , y , z (см. далее Рис. 7 а). Рассмотрен случай проклад-

ки кабелей в однородном грунте.

Электромагнитные расчеты. Конечно-элементное разбиение фрагмента расчетной области с кабелями показано на Рис. 4 а.

Основные численные результаты представлены на Рис. 4–6. Результаты компьютерного моделирования показывают неоднородное распределение магнитного поля и плотности тока по сечению проводников. Поле концентрируется на поверхности жил (Рис. 4 б, в).

На Рис. 5 показано изменение магнитной индукции $|\dot{\mathbf{B}}|$ над кабелями одной линии на различных уровнях относительно поверхности земли. Вблизи кабелей значение $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max}$ составляет 0,0092 Т (Рис. 4 в), тогда как на поверхности земли $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} \approx 0,8$ мкТ, а на уровне 0,25 м над землей – ~0,4 мкТ (Рис. 5). Отметим, что на основании массовых эпидемиологических обследований населения, проживающего в условиях облучения магнитными полями от объектов электроснабжения, в мире установлен безопасный уровень магнитной индукции 0,2–0,3 мкТл [9].

Путем компьютерного моделирования и с помощью данных Рис. 5 показано, что математическая модель и вычислительные средства по расчету магнитного поля кабельных линий позволяют определять размеры требуемой зоны отчуждения при прокладке линий для обеспечения экологической безопасности кабелей при любом их расположении в линиях. При этом необходимо также соблюдение санитарных норм, в соответствии с которыми проектируются и строятся все объекты электроснабжения [10].

Как показано на Рис. 6, взаимное влияние совокупности проводников (жил и экранов) кабелей проявляется в вытеснении тока на поверхность, сказывается также действие магнитного поля со стороны симметрично расположенной кабельной линии. Картины распределения плотности тока отдельно в жилах и экранах кабелей на Рис. 6 демонстрируют результат совместного проявления эффекта близости и скин-эффекта.

Детальное распределение плотности тока вдоль диаметров кабелей представлено на Рис. 6 в. Видно, что вследствие взаимного влияния кабелей в кабельных линиях ток концентрируется в жилах внутренних кабелей (фазы B каждой линии). Имеет место несимметрия токов в жилах и экранах (Рис. 6 в). Это объясняется сложным взаимным влиянием проводников каждого кабеля и влиянием кабельных линий между собой.

Использование вычислительной методики позволяет находить значения токов в токопрово-



дящих жилах и экранах кабелей путем интегрирования плотности тока по сечению. Знание распределения плотности тока во всех проводниках кабелей дает возможность проводить более точные тепловые расчеты кабельных линий.

Тепловые расчеты. Данные тепловой модели и результаты численных расчетов представлены на Рис. 7 и 8. Пространственное распределение температуры вокруг кабельной линии дано на Рис. 8. Отметим, что в виду симметрии здесь представлена лишь одна линия. Температурное поле вокруг кабелей характеризуется пространственной неравномерностью. Наибольшую температуру (67°C) имеет кабель фазы *B*, что отражает взаимное тепловое влияние двух линий. В непосредственной близости от линий почва нагревается до 50°C (Рис. 8 *a*), что может стать причиной ее высыхания и, как следствие, дополнительного повышения температуры кабелей и их перегрузки по току.

Тепловые расчеты позволяют определить нагрузочную способность кабельных линий с учетом не только допустимой температуры нагрева жил, но и дополнительного нагрева окружающего грунта.

Заключение.

Проведены совместные электротепловые исследования подземной кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена с горизонтальным расположением кабелей, отличающиеся учетом схемы заземления экранов, определением электромагнитных потерь в токопроводящих жилах и экранах кабелей. Путем уточненного теплового расчета возможно определение нагрузочной способности кабельных линий различными способами прокладки и при различных условиях окружающей среды.

Отличительными особенностями представленной математической модели и разработанной на ее основе компьютерной методики являются:

- возможность расчета электромагнитного поля кабельных линий не только в установившихся симметричных режимах, но и нестационарных аварийных, несимметричных режимах, например, при неполнофазных коротких замыканиях;

- учет схемы заземления экранов кабелей, определение в них наведенных токов и потерь от них;

- рассмотрение электромагнитного и теплового взаимного влияния кабелей и кабельных линий при двухцепной прокладке;

- возможность получения информации отно-

сительно электромагнитной безопасности кабельных линий в соответствии с установленными санитарными нормами по уровню магнитной индукции;

- учет локальных перегревов вдоль трассы прокладки кабелей за счет рассмотрения неоднородных условий на линии трассы (неоднородных свойств засыпочного материала и природного грунта);

- уточненное определение предельно допустимой токовой нагрузки по условию соблюдения приемлемых тепловых режимов работы кабельных линий и экологических условий, что особенно важно для кабелей, проложенных на ответственных густонаселенных, промышленных и энергетических объектах, включая гидроэлектростанции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяков В.М. Кабельная линия 500 кВ — уникальный проект на реке Бурея. // Новости электротехники. — 2005. — № 2 (32).
2. 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.
3. Кучерявая И.Н. Высоковольтные кабельные линии для гидроэлектростанций. // Гідроенергетика України. — 2006. — № 4. — С. 53—56.
4. <http://photos-media.ru/index.php?id=33>
5. Дмитриев, М.В., Евдокимин Г.А. Однофазные кабели 6—10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Расчет заземления экранов. // Новости Электротехники — 2007. — № 5(47). — <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/47/13.php>
6. Грешняков Г.В., Ковалёв Г.Г., Дубицкий С.Д. Численный метод анализа нагрузочной способности высоковольтной кабельной системы. // Кабель-news. — 2013. — № 3. — http://www.ruscable.ru/article/Chislennyj_metod_analiza_na_gruzochnoj_sposobnosti_vysokovoltnoj_kab
7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Численный расчет электромагнитных и тепловых процессов в подземной кабельной линии. Стационарный режим. // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". — 2006. — Ч. 1. — С. 91—95.
8. Comsol multiphysics modeling and simulation software — <http://www.comsol.com/>
9. Семенов А.В. Обоснование предельно допустимых норм на индукцию магнитных полей промышленной частоты для человека. // Известия Томского политехн. университета. — 2012. — Т. 321, № 1. — С. 197—200. — http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2012/v321/i1/30.pdf
10. Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты, № 2971-84 /Нормативная документация, 1984. — 9 с.