

УДК 621.315.232

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Навалихина Екатерина Юрьевна,

аспирант каф. «Конструирование и технологии в электротехнике»
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», Россия, 614990,
г. Пермь, Комсомольский пр., 29. E-mail: ekaterinanavalikhina@yandex.ru

Труфанова Наталия Михайловна,

д-р техн. наук, профессор, зав. каф. «Конструирование и технологии в
электротехнике» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», Россия, 614990, г. Пермь,
Комсомольский пр., 29. E-mail: ktei@pstu.ru

Обеспечение работоспособности и повышение надежности работы высоковольтных кабельных линий, проложенных в кабельных каналах под землей, при их проектировании и эксплуатации в условиях ограниченного теплообмена с окружающей средой невозможно без глубокого понимания процессов тепломассопереноса в кабельном канале с учетом реализующегося в кабельных линиях переменного электромагнитного поля и индуцированных токов в металлических экранах. Данное исследование посвящено решению совместной задачи процессов тепломассопереноса и электромагнитодинамики, возникающих в кабельных линиях, проложенных в подземном кабельном канале, в условиях естественной конвекции с учетом энергии излучения и индуцированных электромагнитных полей.

Цель исследования: разработка двумерных стационарных математических моделей процессов тепломассопереноса в условиях естественной конвекции с учетом процессов электро- и магнитодинамики, протекающих в кабельных каналах, для определения рациональной величины токовой нагрузки и обеспечения безопасной эксплуатации силовых кабелей.

Методы исследования: Для решения совместной задачи использовалась теория тепломассопереноса и электромагнитодинамики, методы математического моделирования. Численное моделирование проводилось с помощью метода конечных элементов в современных инженерных пакетах.

Результаты: Решена совместная задача тепломассопереноса и электродинамики. Определены поля температур с учетом дополнительных тепловыделений в металлических экранах силовых кабелей, возникающих за счет индуцированных токов. Оценен вклад тепловых потерь за счет индуцированных токов в экранах кабелей в общий тепловой баланс нагруженных кабельных линий. Приведены рекомендации по величине пропускной способности кабельных линий в зависимости от температуры окружающей среды.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, кабельные линии, тепломассоперенос, охлаждение, электромагнитные поля кабелей, тепловые потери в кабелях, токовая нагрузка, индуцированные токи в экранах.

В последнее время в России наблюдается тенденция роста применения кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена при прокладке сетей всех классов напряжения. Зачастую единственной альтернативой передачи больших мощностей электрической энергии в стесненных городских условиях являются линии в подземном канале. При этом электроэнергетика ожидает от подземных сетей высочайшей надежности функционирования и эффективной передачи электроэнергии.

Монтаж силовых кабельных линий под землей может производиться в туннелях, траншеях, кабельных каналах.

Величина номинальной токовой нагрузки кабелей в каждом конкретном случае будет зависеть от ряда факторов: геометрических параметров кабельных линий и подземного канала, теплофизических характеристик конструктивных элементов кабелей и окружающей среды, условий теплообмена и многих других.

Основоположниками методов расчета кабельных линий являются Э.Т. Ларина, Н.И. Белорус-

сов, В.А. Привезенцев, в работах которых тепловой расчет и определение допустимой нагрузки производились с помощью тепловых схем замещения силового кабеля, построенных по аналогии с электрическими цепями. Задачи решались с использованием интегральных уравнений [1].

В данной методике смоделированы простейшие тепловые схемы замещения при стационарной работе силового кабеля в номинальном режиме.

Однако данная методика по определению пропускной способности кабельных линий не позволяет учесть в полной мере все вышеперечисленные факторы, что приводит к результатам с высокой степенью погрешности.

Таким образом, появляется необходимость разработки методики анализа тепловых режимов силовых кабелей с помощью математического моделирования.

Математические модели, построенные на основе законов сохранения и теории электромагнитного поля, дополненные начальными и граничными условиями, позволят определять эксплуатацион-

ные характеристики силовых кабельных линий для различных условий прокладки и эксплуатации.

На сегодняшний день существует многообразие математических моделей тепловых и электродинамических процессов, протекающих в кабельных линиях и в кабельных каналах.

В работах [2, 3] авторы оценивают повышение температуры на поверхности кабеля при увеличении токовой нагрузки с помощью интегрального метода, однако такой подход имеет ограничения, касающиеся различных конструктивных элементов кабельного канала и неоднородности используемых материалов. Данные допущения не дают возможности оценить полученные результаты при конкретной геометрии кабельного канала и свойств конструктивных элементов кабелей.

Математические модели, представленные в работах [4–6], описывают процессы теплопереноса без учета конвективного переноса тепла, лучистого теплообмена и тепловыделений в металлических экранах кабельных линий. В работах зарубежных ученых [7–9] представлено исследование только электромагнитного поля. Авторы проводили численные расчеты с помощью метода конечных элементов для исследования электромагнитного поля, создаваемого трехфазным кабелем, проложенным в трубе под землей. Для проверки расчетов сравнивались численные результаты с экспериментальными данными.

Влиянию дополнительных тепловыделений в металлических экранах кабелей посвящены работы [10, 11]. Тепловыделения объясняются значительными токами, которые индуцируются в защитных металлических экранах. Однако авторы не учитывают конвекцию, зависимость теплофизических свойств от температуры и сложную конструкцию кабелей.

Влияние толщины металлического экрана в кабеле на величину тепловыделений рассматривается в работе [12]. Сделаны выводы о том, что при увеличении сечения экрана увеличиваются паразитные потери мощности. Также немаловажным фактором является взаимное расположение кабелей. При прокладке фаз сомкнутым треугольником снижаются потери, которые не зависят от длины кабеля.

В работе [13] предложен метод расчета допустимых токовых нагрузок в трехфазной системе с учетом тепловыделений в медном экране и проволочной броне из алюминиевого сплава, где появляется возможность использовать различные геометрические параметры расчетной области, теплофизические характеристики используемых материалов, начальные и краевые условия. Данный метод реализован в программном комплексе ELCUT [14].

В работах [15, 16] предложен общий подход к анализу процессов конвективного теплообмена, но не рассматриваются электромагнитные поля кабелей и дополнительные тепловые потери за счет индуцированных токов в металлических экранах.

Также в данных работах не рассматривалось влияние энергии излучения на тепловое поле в кабельном канале.

Несмотря на достаточное многообразие работ по исследованию процессов, происходящих в кабельных линиях, актуальным является решение совместной задачи по определению электродинамических и тепловых процессов, происходящих в силовых кабелях.

В данной работе рассмотрены процессы сложного теплообмена в кабельном канале, проложенном под землей, с учетом реализующегося в кабельных линиях переменного электромагнитного поля и индуцированных токов в металлических экранах кабеля с целью определения допустимых токовых нагрузок.

Для определения температурных полей силовых кабельных линий, работающих в условиях сложного теплообмена с окружающей средой (с учетом естественного конвективного теплообмена и теплового излучения), процессами теплопроводности будет решена задача теплообмена с использованием программного комплекса ANSYS.

Предыдущие исследования [17–19] позволяли получать температурные поля в подземном канале с определенным количеством кабельных линий в нем, по найденному тепловыделению с токопроводящей жилы. Тепловыделения определялись по инженерным формулам с учетом поправочных коэффициентов, рекомендованных МЭК [20]. Однако с помощью численных методов появляется возможность связать рабочий ток в кабельной линии с тепловыделениями, с учетом всех электромагнитных эффектов.

Решение поставленной задачи состояло из двух последовательных этапов. На первом этапе рассмотрена задача электродинамики, решение которой позволило определить электромагнитные поля в кабельной линии и рассчитать тепловые потери в конструктивных элементах кабеля. На втором этапе по ранее найденному тепловому потоку в конструкции кабельной линии определялось суммарное тепловое поле с учетом конвективного теплообмена, теплопроводности, энергии излучения в кабельном канале в условиях естественной конвекции.

Поперечное сечение рассматриваемой кабельной линии представлено на рис. 1. Конструктивное исполнение кабельной линии представляет собой трехфазный проводник, помещенный в полиэтиленовую трубу, внутри которой циркулирует воздух. Труба помещается в массив земли. Проводник имеет металлический экран, выполненный из меди.

Математическая модель электродинамических процессов в кабельных линиях, позволяющая учесть дополнительные тепловыделения в металлических экранах кабелей, основывается на уравнениях Максвелла.

При расчете сделаны следующие допущения: материал изоляции является изотропным, конструктивные элементы кабельной линии составляют композиционную дисперсную систему.

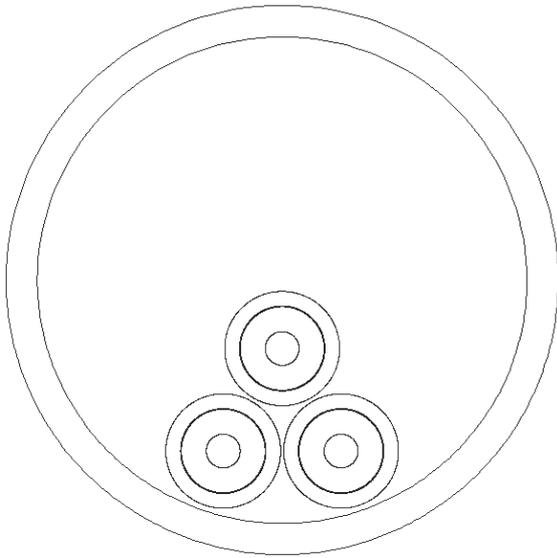


Рис. 1. Конструкция исследуемой кабельной линии

Fig. 1. Construction of the cable line

Система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитное поле, имеет следующий вид:

Уравнения векторного магнитного потенциала и плотности тока для проводника:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma_c A_z + J_{iz}^s = 0, \quad (1)$$

$$-j\omega\sigma_c A_z + J_{iz}^s = J_{iz}, \quad (2)$$

$$\iint_{S_c} J_{iz} = I_i, i = a, b, c. \quad (3)$$

Уравнения векторного магнитного потенциала и плотности тока для экранов кабеля:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma_s A_z + J_{sz}^s = 0, \quad (4)$$

$$-j\omega\sigma_s A_z + J_{sz}^s = J_{sz}, \quad (5)$$

$$\iint_{S_s} J_{sz} ds = I_s. \quad (6)$$

Металлические экраны кабелей, составляющих трехфазную линию, заземлены на обоих ее концах, тогда сумма обратных токов в экранах равна сумме токов в проводниках кабеля:

$$\sum_i^{[i=a,b,c]} I_i = \sum_i^{[i=a,b,c]} I_{si}. \quad (7)$$

В воздухе, который является диэлектриком, уравнение векторного магнитного потенциала имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0. \quad (8)$$

В массиве земли, в котором проложена кабельная линия, уравнение для магнитного векторного потенциала имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_e} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_e} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma_e A_z = 0, \quad (9)$$

где x, y – декартовы координаты; ω – круговая частота; A_z – компонента векторного магнитного потенциала; J_{iz}^s, J_{sz}^s – плотность тока в проводнике и в экране кабеля соответственно; μ_0, μ_e – магнитная проницаемость воздуха и массива земли соответственно; $i=a, b, c$ – фазы проводников; ε_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха; $\sigma_c, \sigma_s, \sigma_e$ – электропроводность проводника, экрана кабеля и массива земли соответственно; I_i, I_s – ток в проводнике и в экране кабеля соответственно; S_c, S_s – площадь поперечного сечения проводника и экрана кабеля соответственно.

Система дифференциальных уравнений (1)–(9) замыкается следующими краевыми условиями:

- векторный магнитный потенциал $A_z=0$ в бесконечно удаленных от кабелей точках;
- векторный магнитный потенциал $A_z=A_{zmax}$ на внешней поверхности токопроводящей жилы;
- на границе раздела двух сред принято условие непрерывности $n(J_1 - J_2) = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали; J – плотность тока.

Поставленная задача электродинамики решалась с помощью метода конечных элементов [21, 22].

Для проверки адекватности результатов, получаемых с помощью предложенной математической модели, были проведены сравнения результатов с данными, полученными в статье [7]. В работе [7] авторами была представлена двумерная математическая модель электродинамических процессов, протекающих в трехфазовом проводнике, который располагается в трубе под землей. Конструкция кабельной линии показана на рис. 2.

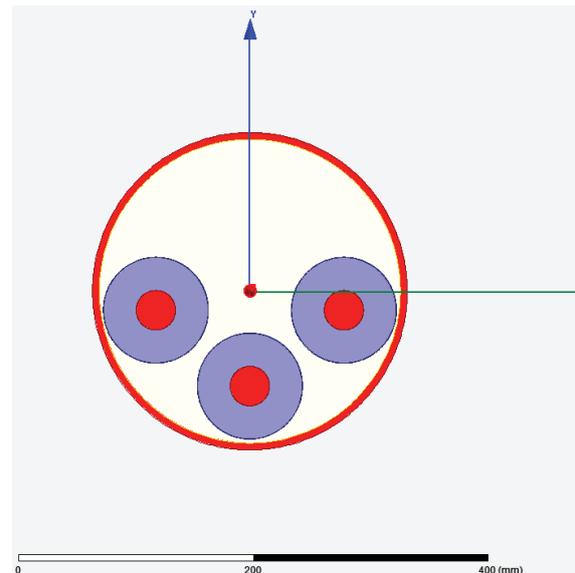


Рис. 2. Расположение силовых кабелей в кабельной линии согласно работе [7]

Fig. 2. Energy cable arrangement in a cable line according to [7]

Рассматривался трехфазный проводник с изоляцией из сшитого полиэтилена, верх изоляции

наложен медный экран. Труба выполнена из стали. Сама труба располагается в массиве земли на глубине 500 мм от поверхности.

В рассматриваемой постановке уравнение (7) примет следующий вид:

$$\sum_i^{[i=a,b,c]} I_i = I_p + \sum_i^{[i=a,b,c]} I_{si}. \quad (10)$$

Уравнения векторного магнитного потенциала и плотности тока для трубы, выполненной из стали:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_p} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_p} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma_p A_z + J_{pz}^s = 0, \quad (11)$$

$$-j\omega\sigma_p A_p + J_{pz}^s = J_{pz}, \quad (12)$$

$$\iint_{S_c} J_{pz} ds = I_p. \quad (13)$$

Система дифференциальных уравнений (1)–(6), (8)–(13) дополняется уравнением (14), которое получено на основе физического расположения стальной трубы и проводников. Как правило, в этом случае труба и металлические экраны проводников соединяются параллельно между собой и заземлены:

$$\frac{J_{zs}^s}{\sigma_s} = \frac{J_{zp}}{\sigma_p}, \quad (14)$$

где J_{zp} – плотность тока в стальной трубе; σ_p – электропроводность стальной трубы; μ_p – магнитная проницаемость стальной трубы; I_p – ток в стальной трубе; σ_p – электропроводность стальной трубы.

Авторы провели сравнения численных результатов, полученных с помощью метода конечных элементов и экспериментальных данных. При расчете электродинамических процессов на проводник подавали нагрузку в 600 А.

На рис. 3 представлены зависимости магнитной индукции в массиве земли на расстоянии от стальной трубы на 500 мм, рассчитанные с помощью приведенной выше математической модели, и приведенные данные расчета из работы [7].

Из анализа результатов, представленных на рисунке, видно, что расчетные данные, полученные с помощью представленной математической модели электродинамических процессов, достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [7]. Максимальное расхождение по значению магнитной индукции составило не более 8 %.

Таким образом, предложенная математическая модель достаточно адекватно описывает электродинамические процессы, происходящих в кабельных линиях.

На рис. 4 представлены результаты расчета тепловыделений в конструкционных элементах одного кабеля трехфазного проводника (рис. 1), которые получены из решения электродинамической задачи (1)–(9).

Нелинейное распределение омических потерь по сечению проводника и в металлическом экране объясняется поверхностным эффектом, который возникает вследствие уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды.

Распределение магнитной индукции по кабельной линии и внутри трубы, возникающей при переменном электромагнитном поле, представлено на рис. 5.

На следующем этапе был проведен расчет температурных полей в кабельной линии с учетом тепловыделений в экранах и без них.

Полученные ранее результаты теплового потока в конструкции кабельной линии (рис. 4) используются для определения суммарного теплового поля с учетом конвективного теплообмена, те-

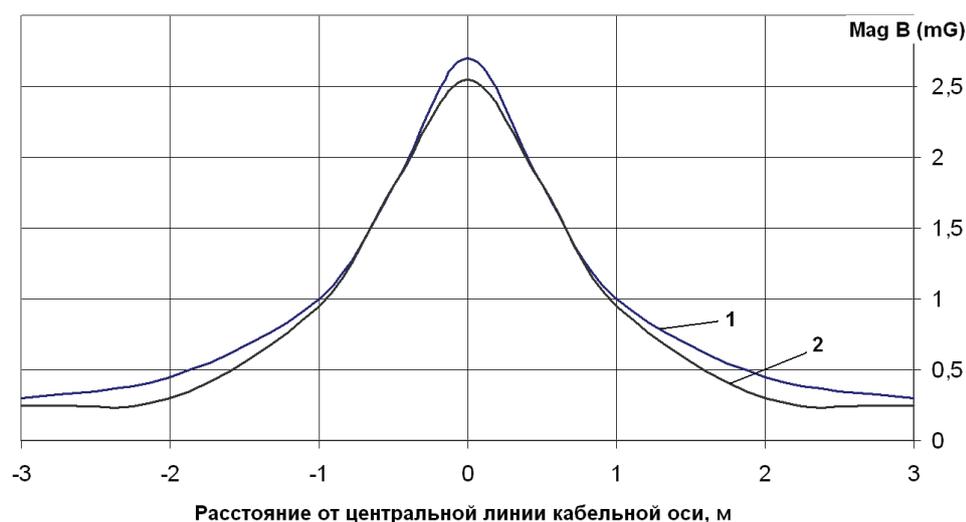


Рис. 3. Распределение магнитной индукции по поверхности земли. Данные расчета: 1) по предложенной математической модели; 2) из работы [7]

Fig. 3. Magnetic induction distribution over the earth surface. Calculation data: 1) by the model proposed; 2) from the paper [7]

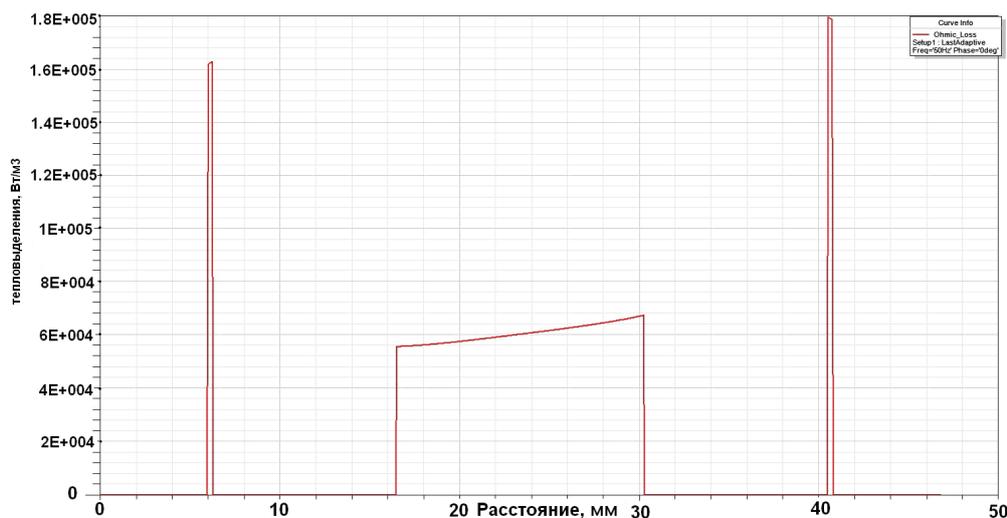


Рис. 4. Распределение омических потерь по сечению проводника

Fig. 4. Ohmic loss distribution over a conductor section

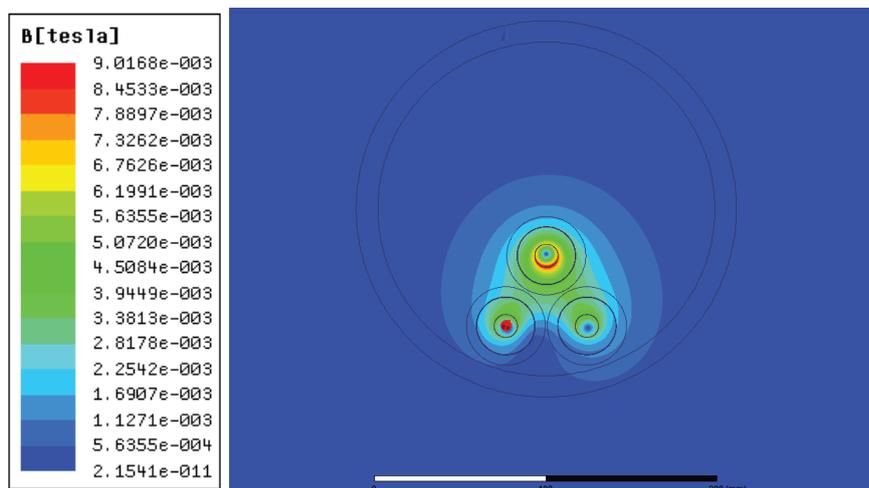


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в кабельной линии

Fig. 5. Magnetic induction distribution in a cable line

плопроводности, энергии излучения в кабельном канале в условиях естественной конвекции.

Для анализа тепловых процессов, протекающих в кабельном канале, была сформулирована задача сложного теплообмена.

Математическое представление процессов движения и сложного теплопереноса воздуха в канале основывалась на законах сохранения массы, количества движения и энергии [23].

Были сделаны следующие допущения: задача стационарная, движение теплового потока ламинарное, теплофизические характеристики материалов постоянны, воздух является ньютоновской жидкостью ($\mu = \text{const}$).

Математическое описание законов сохранения приводит к системе дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплопереноса в ламинарном воздушном потоке, которые имеют следующий вид:

Уравнение неразрывности:

$$\vartheta_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_i}. \quad (15)$$

Уравнение движения:

$$\rho \vartheta_j \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_j} = \mu \Delta \vartheta_i + f_i. \quad (16)$$

Уравнение энергии для воздуха:

$$\rho c \vartheta_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \lambda \Delta T + q_v. \quad (17)$$

Уравнение теплопроводности для кабельных линий:

$$\lambda_k \Delta T + q_v = 0. \quad (18)$$

Уравнение теплопроводности земли:

$$\lambda_3 \Delta T = 0, \quad (19)$$

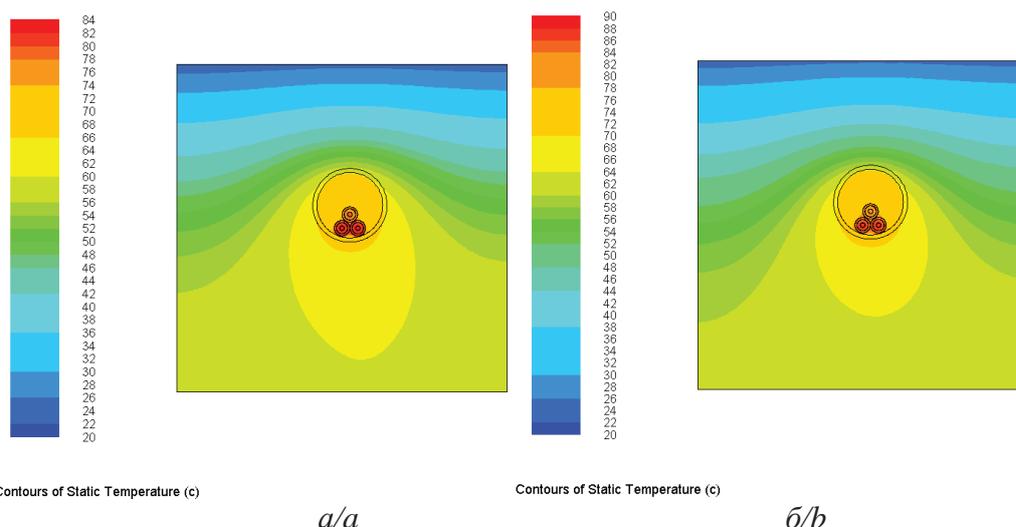


Рис. 6. Температурное поле в кабельной трубе и в массиве земли: а) без учета тепловых потерь в экране; б) с учетом тепловых потерь в экране

Fig. 6. Temperature field in a cable duct and in earth massive: a) without heat loss in the screen; b) with heat loss in the screen

где ρ – плотность воздуха (в зависимости от температуры); x – декартовы координаты; \mathcal{G} – компоненты вектора скорости воздуха в канале; f_i – вектор плотности массовых сил; c – теплоемкость среды; T – температура; λ – теплопроводность воздуха; q_v – мощность внутренних источников тепла; λ_k – теплопроводность конструктивных элементов кабельного канала; λ_3 – теплопроводность земли.

Конвективный теплообмен между кабелями и стенками полиэтиленовой трубы дополняется энергией излучения между сегментами поверхностей, являющихся границами областей.

Система уравнений (15)–(19) дополняется граничными условиями: на твердых непроницаемых границах канала и на поверхности кабелей задается условие прилипания и непроникновения; на поверхности земли задано граничное условие третьего рода; на двух других границах в массиве земли заданы адиабатические условия теплообмена; на границах контакта разнородных сред заданы граничные условия четвертого рода и условия сопряжения температур.

Оценка сходимости численного метода была проведена ранее в работе [17]. Строилась неструктурированная сетка с гексагональным типом ячеек. Была проведена дискретизация сетки для достижения относительной независимости результатов расчета от количества элементов с необходимой точностью.

На рис. 6 представлены температурные поля, полученные после решения поставленной температурной задачи.

Из рис. 6 видно, что дополнительные тепловые деления в металлических экранах кабеля приводят к увеличению температуры на 6 °С для данной конструкции кабельной линии и условий прокладки. Этот факт необходимо учитывать при расчете нагрузочной способности кабельной линии во избежание превышения допустимой температуры в

изоляции кабеля, что может привести к выходу из строя кабельной линии.

Данные расчеты допустимы при температуре окружающей среды, равной 20 °С. Естественно было бы предположить, что при понижении температуры окружающей среды появляется возможность увеличить номинальную токовую нагрузку кабельных линий.

На рис. 7 представлена зависимость температуры в кабельной линии от температуры окружающей среды при заданной токовой нагрузке.

Из рис. 6 видно, что при охлаждении грунта до отрицательных значений (зимнее время года) максимальная температура в кабельной линии существенно падает при постоянстве других параметров (условий теплообмена, заданной токовой нагрузки).

При понижении температуры окружающей среды появляется возможность догрузить кабельные линии токовой нагрузкой. Такая необходимость может возникнуть при аварийном режиме работы рядом расположенных кабельных линий либо при режиме перегрузки.

Таблица. Эксплуатационные характеристики силовой кабельной линии

Table. Performance specifications of energy cable line

$T_{cp}, ^\circ\text{C} / T_{avr}, ^\circ\text{C}$	-20	-10	0	10	20
Расчетный ток, А Rated current, A	335	318	305	292	274
Увеличение номинального тока, % Increase in nominal current, %	22	16	11	6	0
Мощность, передаваемая по кабельной линии, МВ·А Capacity in a cable line, MV·A	20,3	19,3	18,5	17,7	16,6

В таблице приведены рассчитанные токовые нагрузки при различных температурах силового кабеля и мощности, передаваемые по одной ка-

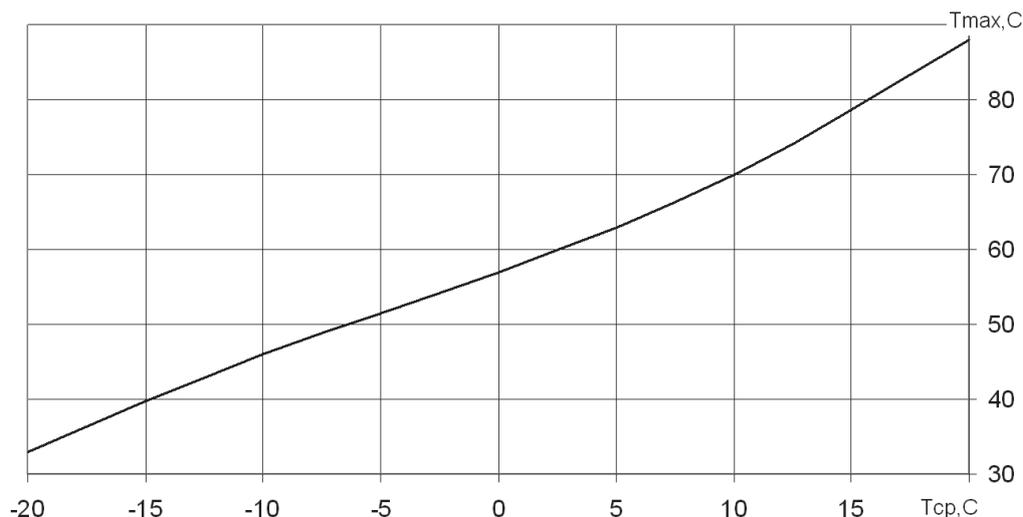


Рис. 7. Температурные зависимости в кабельной линии от температуры окружающей среды

Fig. 7. Temperature dependences in a cable line on environmental temperature

бальной линии. Полученные значения по пропускной способности носят рекомендательный характер и приемлемы для конкретных геометрии кабельной линии, условий тепломассопереноса, дополнительных тепловыделений в металлических экранах.

Важно для каждого варианта условий прокладки и эксплуатации кабельных линий рассчитывать свои токовые нагрузки.

Из рис. 7 и из таблицы видно, что при температуре окружающего массива земли равной $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ максимальная температура кабельной линии составляет $33\text{ }^{\circ}\text{C}$, что дает нам возможность увеличить передаваемую мощность по кабельной линии на 22 %, тем самым увеличивая пропускную способность всей энергетической системы в целом.

Из проведенных численных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложена математическая модель, учитывающая тепловые и электродинамические процессы, происходящие в кабельных линиях, для определения токовых нагрузок.

2. Необходимо исследовать процессы тепломассопереноса и электродинамики, возникающие в кабельных линиях, для конкретных геометрических параметров силовых кабелей и кабельной линии, условий прокладки и эксплуатации.

3. Учет дополнительных тепловыделений в металлических экранах силовых кабелей позволяет рассчитать оптимальную токовую нагрузку кабельной линии для безопасной эксплуатации электрической системы.

4. Изменение климатических условий окружающей среды влияет на реализующееся температурное поле в кабельной линии, что, в свою очередь, позволяет увеличивать либо снижать нагрузочную способность силовых кабелей.

Для дальнейших исследований представляет научный интерес задача по определению токовых нагрузок нескольких кабельных линий, расположенных в кабельных каналах под землей при различных режимах нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.
2. Lin S., Hau X. Analytical method of calculating the transient and steady-state temperature rises for cable-bundle in tray and ladder // IEEE Transactions Power Delivery. – 1998. – V. 13. – № 3. – P. 691–698.
3. Liang M. An assessment of conductor temperature rises of cables caused by a sudden application of short pulse in a daily cyclic load // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – V. 14. – № 2. – P. 307–313.
4. De Leon F., Anders G.J. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite elements method // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – V. 23. – № 2. – P. 537–543.
5. R. de Lieto Vollaro, Fontana L., Vallati A. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Applied Thermal Engineering. – 2011. – V. 31. – P. 772–778.
6. Modeling the impact of electric vehicle charging on heat transfer around underground cables / J.S. Marshall, P.D. Hines, J.D. Zhang, F. Minervini, S. Rinjitham // Electric Power Systems Research. – 2013. – V. 97. – P. 76–83.
7. Xiao-Bang Xu, Guanghao Liu. Investigation of the magnetic field produced by unbalanced phase current in an underground three-phase pipe-type cable // Electric Power Systems Research. – 2002. – V. 62. – P. 153–160.
8. Xiao-Bang Xu, G. Liu. A two-step numerical solution of magnetic field produced by elf sources within a steel pipe // Progress in Electromagnetics Research, PIER. – 2000. – V. 28. – P. 17–28.
9. Kuang J., Boggs S. Pipe-type cable losses for balanced and unbalanced currents // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – V. 17. – № 2. – P. 313–317.

10. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // Кабель-news. – 2009. – № 10. – С. 47–51.
11. Dmitriev V., Gonzalez L. Electrical and thermal analysis on optical ground wire cables in short-circuit regime by coupled equations // Electric Power Systems Research. – 2013. – V. 201. – P. 80–87.
12. Дмитриев М.В. Выбор сечения экранов однофазных силовых кабелей // Кабель-news. – 2009. – № 5. – С. 69–73.
13. Грешняков Г.В., Ковалев Г.Г., Дубицкий С.Д. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – С. 12–16.
14. Дубицкий С.Д. Elcut 5.1. – платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 1. – С. 14–20.
15. Yang Liu, Nhan Phan-Thien, Kemp R. Coupled conduction-convection problem for an underground duct containing eight insulated cables // International Journal of Computational Engineering Science. – 2000. – V. 1. – № 2. – P. 187–206.
16. Hwang C.C., Chang J.J., Chen H.Y. Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements // Electric Power Systems Research. – 2000. – V. 54. – P. 75–81.
17. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 12. – № 4 (5) – С. 1318–1321.
18. Навалихина Е.Ю. Численное исследование нестационарного режима работы кабельных линий, проложенных в подземном канале // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 38–41.
19. Determining operating characteristics of cables laid within a cable duct / A.G. Shcherbinin, N.M. Trufanova, E.Yu. Navalikhina, V.G. Savchenko // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – № 11. – P. 588–591.
20. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 1-1. – М.: Стандартинформ, 2009. – 28 с.
21. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
22. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / пер. с англ. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.
23. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.

Поступила 17.04.2014 г.

UDC 621.315.232

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND ELECTROMAGNETIC PROCESSES WHEN DETERMINING CURRENT CAPACITY IN CABLE LINES

Ekaterina Yu. Navalikhina,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky prospect,
Perm, 614990, Russia. E-mail: ekaterinanavalikhina@yandex.ru

Natalia M. Trufanova,

Dr. Sc., Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky
prospect, Perm, 614990, Russia. E-mail: ktei@pstu.ru

Ensuring performance and reliability of high-voltage cable lines laid in underground conduits, when designing and operating in limited heat exchange with the environment, it is impossible without a thorough understanding of heat and mass transfer in a duct considering alternating electromagnetic field and induced currents in metal screens realized in cable lines. The study focuses on solution of a collaborative problem of heat and mass transfer and electric and magneto dynamics arising in cable lines laid in underground cable channel under natural convection considering radiation energy and induced electromagnetic fields.

The main aim of the study is to develop two-dimensional steady-state mathematical models of heat and mass transfer in natural convection considering electro- and magneto dynamics occurring in cable ducts to determine the rational value of current load and to ensure safe operation of the power cables.

The methods used in the study. In order to solve the collaborative problem the authors used the theory of heat and mass transfer and electric and magneto dynamics, methods of mathematical modeling. Numerical simulation was carried out using the finite element method in modern engineering packages.

The results. The authors solved the joint task of heat and mass transfer and electrodynamics and determined the temperature fields considering the additional heat generation in metal screens of power cables, arising due to the induced currents. The contribution of heat loss due to the induced currents in the cable shield into the overall heat balance of loaded cables was estimated. The paper introduces the recommendations for the largest bandwidth of cable lines depending on the ambient temperature.

Key words:

Mathematical modeling, cable lines, heat and mass transfer, refrigeration, electromagnetic fields, heat losses in the cables, current load, induced currents in the screens.

REFERENCES

- Larina E.T. *Silovye kabeli i kabelnye linii* [Power cables and cable lines]. Moscow, Energoaudit Publ., 1984. 368 p.
- Lin S., Hau X. Analytical method of calculating the transient and steady-state temperature rises for cable-bundle in tray and ladder. *IEEE Transactions Power Delivery*, 1998, vol. 13, no. 3, pp. 691–698.
- Liang M. An assessment of conductor temperature rises of cables caused by a sudden application of short pulse in a daily cyclic load. *IEEE Transactions Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 2, pp. 307–313.
- De Leon F., Anders G.J. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite elements method. *IEEE Transactions Power Delivery*, 2011, vol. 23, pp. 537–543.
- R. de Lieto Vollaro, Fontana L., Vallati A. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils. *Applied Thermal Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 772–778.
- Marshall J.S., Hines P.D., Zhang J.D., Minervini F., Rijntham S. Modeling the impact of electric vehicle charging on heat transfer around underground cables. *Electric Power Systems Research*, 2013, vol. 97, pp. 76–83.
- Xiao-Bang Xu, Guanghao Liu. Investigation of the magnetic field produced by unbalanced phase current in an underground three-phase pipe-type cable. *Electric Power Systems Research*, 2002, vol. 62, pp. 153–160.
- X.-B. Xu, G. Liu. A two-step numerical solution of magnetic field produced by elf sources within a steel pipe. *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, 2000, vol. 28, pp. 17–28.
- Kuang J., Boggs S. Pipe-type cable losses for balanced and unbalanced currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 313–317.
- Titkov V.V. K otsenke teplovogo rezhima trekhfaznoy linii iz SPE-kabelya [The estimation of thermal regime of three-phase line of XLPE cable]. *Kabel-news*, 2009, no. 10, pp. 47–51.
- Dmitriev V., Gonzalez L. Electrical and thermal analysis on optical ground wire cables in short-circuit regime by coupled equations. *Electric Power Systems Research*, 2013, vol. 201, pp. 80–87.
- Dmitriev M.V. Vybore secheniya ekranov odnofaznykh silovykh kabeley [Sizing screens of single-phase power cables]. *Kabel-news*, 2009, no. 5, pp. 69–73.
- Greshnyakov G.V., Kovalev G.G. K voprosu o vybore predelno-dopustimyykh tokov silovykh kabeley [On selection of maximum allowable current of power cables]. *Kabeli i provoda*, 2011, no. 6, pp. 12–16.
- Dubitskiy S.D. Elcut 5.1. – platforma razrabotki prilozheniy analiza poley [Elcut 5.1. is the platform for developing field analysis application]. *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh*, 2004, no. 1, pp. 14–20.
- Yang Liu, Nhan Phan-Thien, Kemp R. Coupled conduction-convection problem for an underground duct containing eight insulated cables. *International Journal of Computational Engineering Science*, 2000, vol. 1, no. 2, pp. 187–206.
- Hwang C.C., Chang J.J., Chen H.Y. Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements. *Electric Power Systems Research*, 2000, vol. 54, pp. 75–81.
- Trufanova N.M., Navalikhina E.Yu. Upravlenie tokovoy nagruzkoy linii v kabelnom kanale s ucheto slozhnogo teploobmena [Controlling line current load in a cable channel considering complex heat]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 12, no. 4 (5), pp. 1318–1321.
- Navalikhina E.Yu. Chislennoe issledovanie nestacionarnogo rezhima raboty kabelnykh linii, prolozhenykh v podzemnom kanale [Numerical study of unsteady operation mode of cable lines in an underground channel]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya*, 2013, no. 3, pp. 38–41.
- Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Navalikhina E.Yu., Savchenko V.G. Determining operating characteristics of cables laid within a cable duct. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, no. 11, pp. 588–591.
- GOST R IEC 60287-1-1-2009. *Kabeli elektricheskie. Raschet nominalnoy tokovoy nagruзки. Ch. 1-1* [Electric cables. RLA calculation. P. 1-1]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 28 p.
- Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Application of the Finite Element Method]. Moscow, Mir Publ., 1979. 392 p.
- Patankar S.V. *Chislenoye resheniye zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh* [Computation of conduction and Duct Flow Heat Transfer]. Moscow, MEI Press, 2003. 312 p.
- Loitsyansky L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of fluids and gas]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 848 p.

Received: 17 April 2014.