

Численная оценка токовой нагрузки XLPE-кабельной системы

Проектирование кабельных линий высокого напряжения предполагает необходимость проведения расчетов длительной и кратковременной допустимой токовой нагрузки. Общепринятым инструментом для подобного анализа является ГОСТ Р МЭК 60287–2009, который обобщает опыт, накопленный в разных странах в течение нескольких десятилетий. Теоретической базой стандарта ГОСТ Р МЭК 60287 служит подробно разработанная тепловая схема замещения. Альтернативным подходом является прямой расчет электромагнитного и температурного поля численным методом. Полевой подход к определению потерь позволяет исчерпывающим образом учесть эффект вытеснения тока, эффект близости, обусловленный взаимовлиянием кабелей друг на друга, учитывая реальное распределение плотности индуцированного тока в броне и экране при различных способах заземления экрана. В работе представлена методика совместного расчета электромагнитного и температурного поля трехфазной кабельной линии при однофазной прокладке с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Георгий Грешняков, к. т. н.

geogresh@rambler.ru

Семен Дубицкий

sdubitsky@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении нескольких десятилетий, в том числе и в последнее время публикуются работы, демонстрирующие применение метода конечных элементов для расчета температурного поля кабельной линии. В простейшем случае рассчитывается температурное поле при заданной плотности омических потерь без учета токов в экранах [3, 4]. В [5] учет потерь в экране и броне проводится при помощи специализированной программы «Экран» [8].

В [6] приводится совместное решение уравнений электромагнитного поля и теплопроводности. Здесь рассматриваются различные схемы заземления экранов, однако отсутствие присоединенной электрической цепи заставляет использовать упрощенные условия заземления и не позволяет оценивать потери при одновременном использовании экрана и брони.

Использование современных программ расчета электромагнитных и тепловых полей методом конечных элементов позволяет учесть максимальное число факторов, ограничивающих нагрузочную способность кабелей, без дополнительных упрощающих предположений, а именно:

- позволяет анализировать как установившееся, так и переходное тепловое поле в режиме симметричной нагрузки и в любых видах коротких замыканий и иных аномальных режимах;
- снимает ограничения на моделирование реальных условий прокладки кабельных групп — в земле, на воздухе, в лотках и каналах, с применением засыпки и т. п.;

- позволяет включать в модель несколько параллельных кабельных линий с учетом их электромагнитного и теплового влияния друг на друга;
- дает возможность одновременного получения данных о величине внешнего магнитного поля, которое нормируется с точки зрения электромагнитной экологии и позволяет детально учесть эффективность принятых мер по экранированию конструкции кабельной линии.

Методика расчета

Расчет состоит из нескольких этапов.

На первом этапе проводится решение уравнений электромагнитного поля для определения Джоулевых потерь в экранах и броне. Уравнения квазистационарного переменного магнитного поля в частотной области с вихревыми токами записываются относительно комплексного векторного магнитного потенциала, который в двумерном плоско-параллельном приближении имеет только одну ненулевую компоненту $A = A_z$:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j_{\text{стор}} + i\omega\gamma A, \quad (1)$$

где: μ — магнитная проницаемость [Гн/м], γ — удельная электропроводность [См/м], ω — циклическая частота [рад/с], $j_{\text{стор}}$ — плотность стороннего тока [А/м²].

При расчете электромагнитного поля двумерная расчетная область представляет собой поперечные сечения всех трех кабелей, погруженных в грунт на проектную глубину. Электропроводность грунта также

учтена, равно как возможные металлические конструкции (лотки, трубопроводы, арматура), находящиеся вблизи кабельной линии.

Необходимость учета схемы соединения экранов (одностороннего, двустороннего заземления или с транспозицией) требует совместного решения уравнения магнитного поля (1) с уравнениями присоединенной электрической цепи. Уравнение ветви, содержащей массивный проводник в магнитном поле, имеет вид:

$$I = \frac{U}{R} - \gamma \int_{\Omega} i \omega A \times dS, \quad (2)$$

где: U — разность потенциалов на концах проводника [В]; R — активное сопротивление проводника на постоянном токе [Ом]; A — векторный магнитный потенциал [Вб/м]. Интегрирование выполняется по площади поперечного сечения проводника Ω .

Результатом совместного численного решения уравнений (1, 2) является распределение плотности тока в проводящих элементах системы (жиле, экране и броне кабеля, прилегающих металлоконструкциях). Расчет может проводиться как при номинальной симметричной токовой нагрузке линии, так и в аварийных, в том числе несимметричных режимах.

Основным результатом расчета в нашем случае является распределение мощности омического тепловыделения, которое передается в качестве источника тепла в следующий этап решения. Отметим также, что в результате электромагнитного расчета мы получаем распределение магнитного поля на поверхности земли и над нею, что может быть полезно для оценки условий электромагнитной экологии.

На втором этапе в той же расчетной области на той же самой сетке конечных элементов решается уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

где: T — температура [К]; t — время [с]; λ — теплопроводность [Вт/(м·К)]; q — плотность мощности источника тепла [Вт/м³]; c — удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)]; ρ — плотность [кг/м³].

Решение уравнения (3) осуществляется с граничными условиями, которые могут моделировать конвекцию при заданной скорости обдува, солнечную радиацию и другие условия прокладки. Естественным образом учитывается различная теплопроводность грунта. Имеется также возможность учета изменения теплопроводности грунта из-за его высыхания путем организации итерационного процесса.

Электромагнитный расчет

Рассмотрим одноцепную трехфазную кабельную линию, собранную из трех однофазных кабелей напряжением 35 кВ (таблица 1) при различных способах их объединения: треугольником встык (рис. 1), линейно с зазором, равным диаметру кабеля, и с удаленным расположением одной из трех фаз. В данной статье анализируется подземное расположение

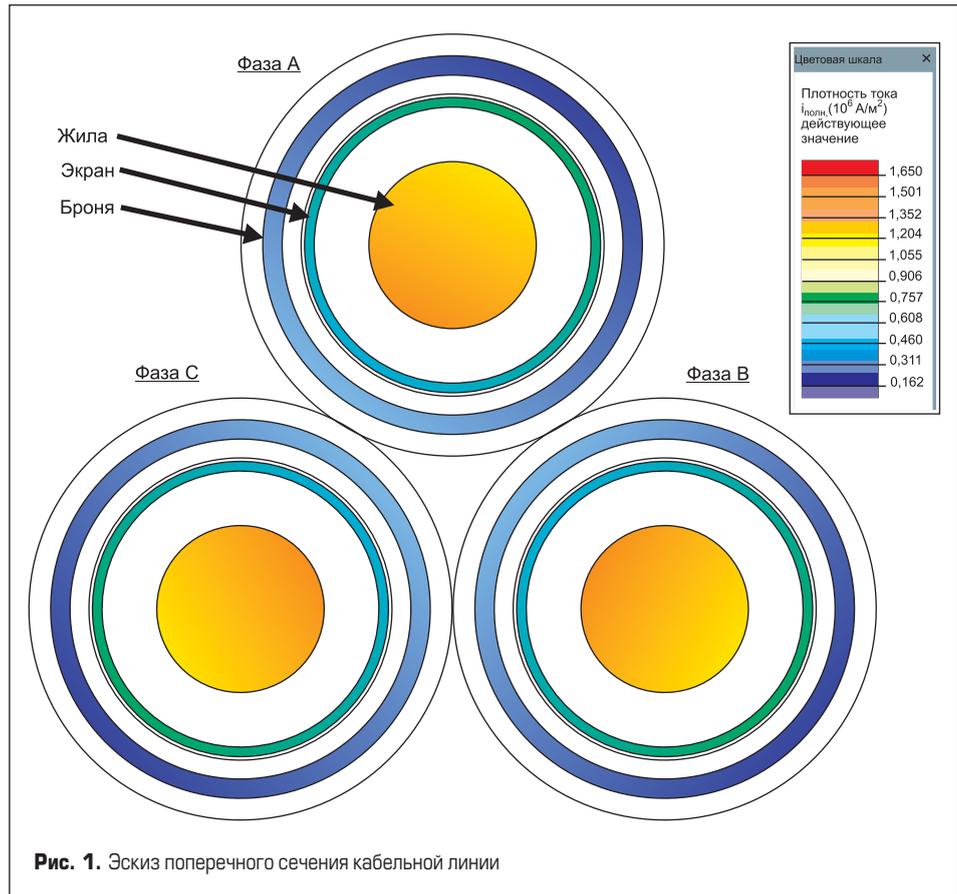


Рис. 1. Эскиз поперечного сечения кабельной линии

Таблица 1. Параметры кабеля

Элемент	Материал	Внешний радиус, мм	Толщина, мм	Площадь сечения, мм²	Активное сопротивление постоянному току, Ом/м
Токпроводящая жила	Медь	14,8		688,134	$2,595 \times 10^{-5}$
Экран	Медь	26,75	3,3	315,8	$5,655 \times 10^{-5}$
Броня	Алюминий	33,85	1,95	667,651	$5,93 \times 10^{-5}$
Кабель в целом		37,7			

кабелей с засыпкой окружающим грунтом, однако методика пригодна и для других условий прокладки, в том числе в кабельных лотках, в воздухе и т. п.

Кабели расположены треугольником

Зададимся длиной кабельной линии $L_K = 1$ км. Задача состоит в вычислении наведенных токов в экранах и броне и потерь от них. Примем в качестве допущения симметричный характер нагрузки и симметричную систему токов жил с действующим значением тока I фазы 700 А. Предположение симметрии токов жил является упрощающим допущением, поскольку ввиду особенностей расположения кабелей магнитные условия взаимодействия разных фаз слегка отличаются. Однако это предположение является обычным для практики расчетов. Важно отметить, что относительно экранов и брони никаких допущений о симметрии токов не делается.

Одностороннее заземление экрана

Рассмотрим линию, в которой заземление экрана выполнено с одной стороны, но каждый кабель поверх экрана имеет алюминиевую броню, которая соединяется с экраном на обоих концах кабеля. Схема электрических соединений для этого случая показана на рис. 2.

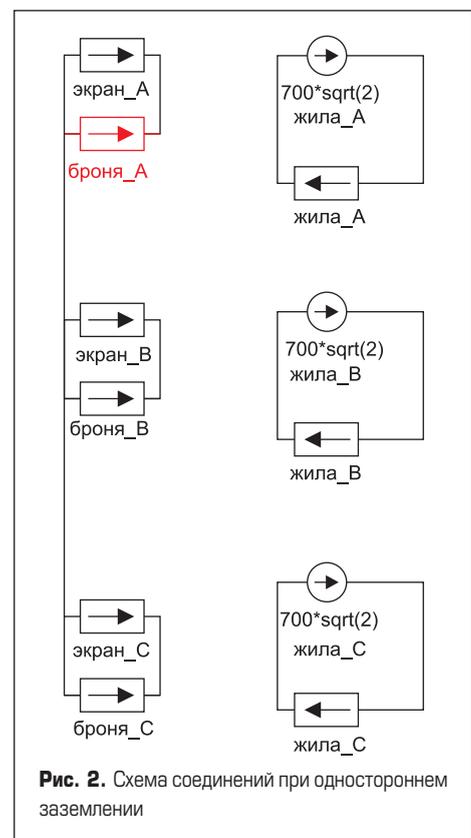


Рис. 2. Схема соединений при одностороннем заземлении

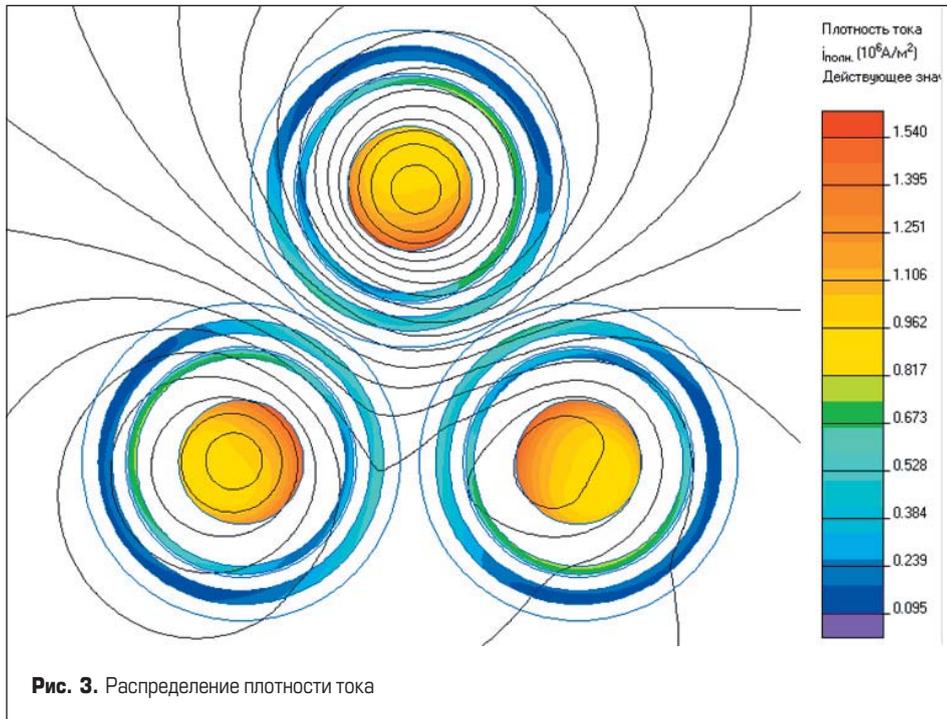


Рис. 3. Распределение плотности тока

Таблица 2. Токи и потери при прокладке треугольником с односторонним заземлением

Элемент	Ток, А	Потери, кВт/км	Напряжение, В/км
Жила	700	14,47	
Экран	88,9	1,80	37,1
Броня	88,9	3,09	37,1

Результатом моделирования электромагнитного поля является картина распределения плотности тока по сечению кабелей:

Обратим внимание, что, несмотря на одностороннее заземление, в экранах появляется вихревой ток (рис. 3), а в системе экран-броня — также и индуцированный циркуляционный ток. Расчет позволяет оценить напряжение на 1 км кабеля, индуцированное в односторонне заземленном экране. Результаты сведены в таблицу 2.

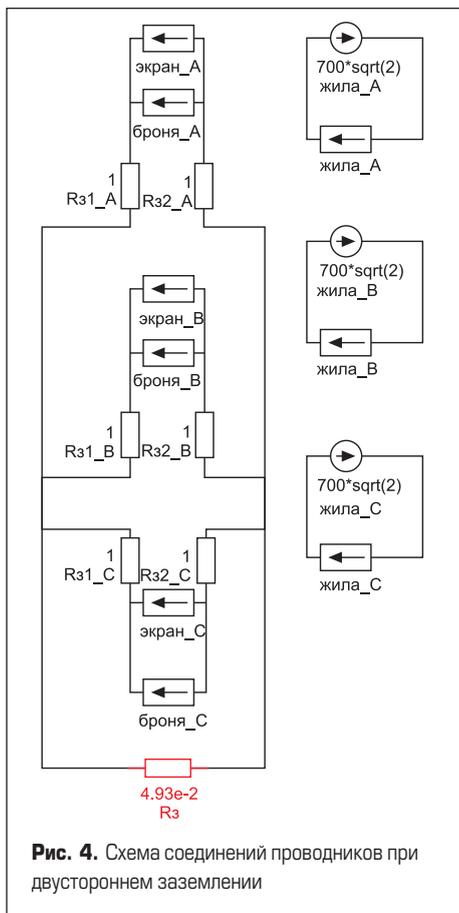


Рис. 4. Схема соединений проводников при двустороннем заземлении

Заземление экранов с двух сторон

Далее рассмотрим двустороннее заземление экранов кабелей. Схема соединений, представленная на рис. 4, при этом несколько усложнится, поскольку включает

в себя сопротивления заземлителей экранов на концах линии.

Учет сопротивления заземлителей экранов необходим, поскольку оно составляет единицы Ом, что почти на порядок превосходит активное сопротивление постоянному току километрового участка экрана. Красным цветом на рис. 4 показано эквивалентное сопротивление грунта между концами участка кабеля, через которое замыкаются токи нулевой последовательности.

Численные эксперименты показывают, что величина эквивалентного сопротивления Земли слабо влияет на распределение токов и потерь в экранах и броне, поскольку ток через эквивалентный обратный провод не превышает 0,5% от тока экрана или брони. В свою очередь, сопротивление заземлителя влияет на результат существенно (см. далее). Поэтому, интересно исследовать зависимость токов и потерь в экране и броне от сопротивления заземления.

Влияние сопротивления заземлителя на токи и потери в экране и броне

С помощью утилиты сериальных и статистических расчетов, входящей в состав пакета ELCUT [7], проведено исследование зависимости токов экрана и брони в зависимости от сопротивления заземлителя ($R_{31A} = R_{31B} = R_{31C} = R_{32A} = R_{32B} = R_{32C} = R_3$). Сопротивление заземлителя изменялось в диапазоне 0,001–11 Ом, который с избытком охватывает все встречающиеся на практике значения сопротивлений заземлителей экранов. Результат численного эксперимента показан на рис. 5, 6.

Из графиков рис. 5, 6 можно сделать вывод, что в реальном диапазоне сопротивления заземлителя 1–5 Ом распределение токов и потерь меняется слабо: так, суммарные потери в броне различаются на концах указанного диапазона всего на 2%, в то время как при уве-

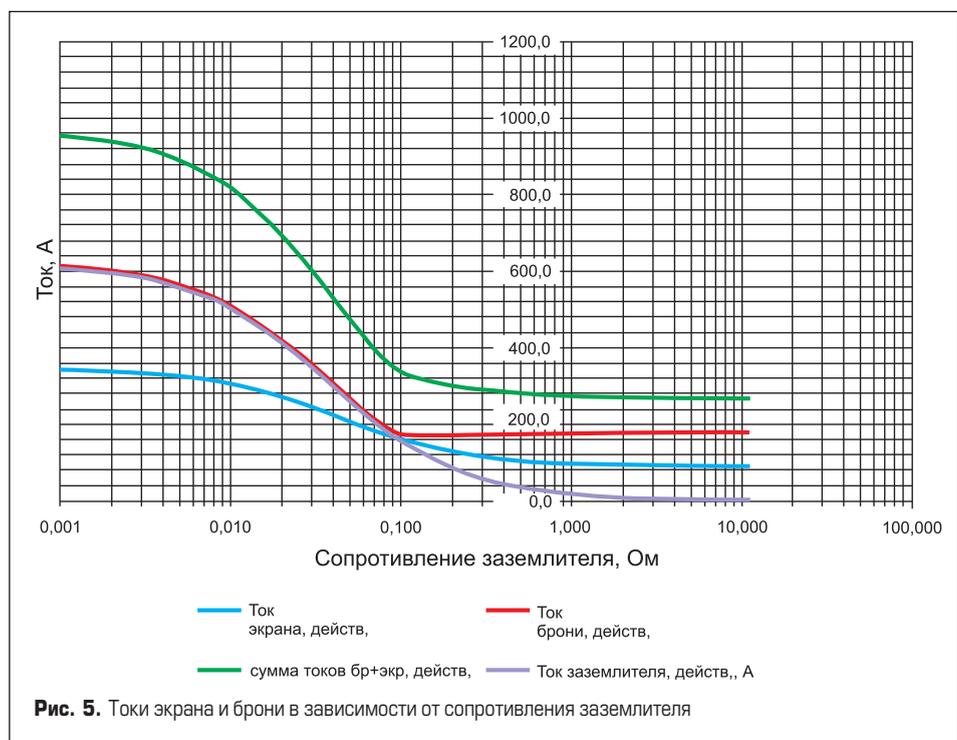


Рис. 5. Токи экрана и брони в зависимости от сопротивления заземлителя

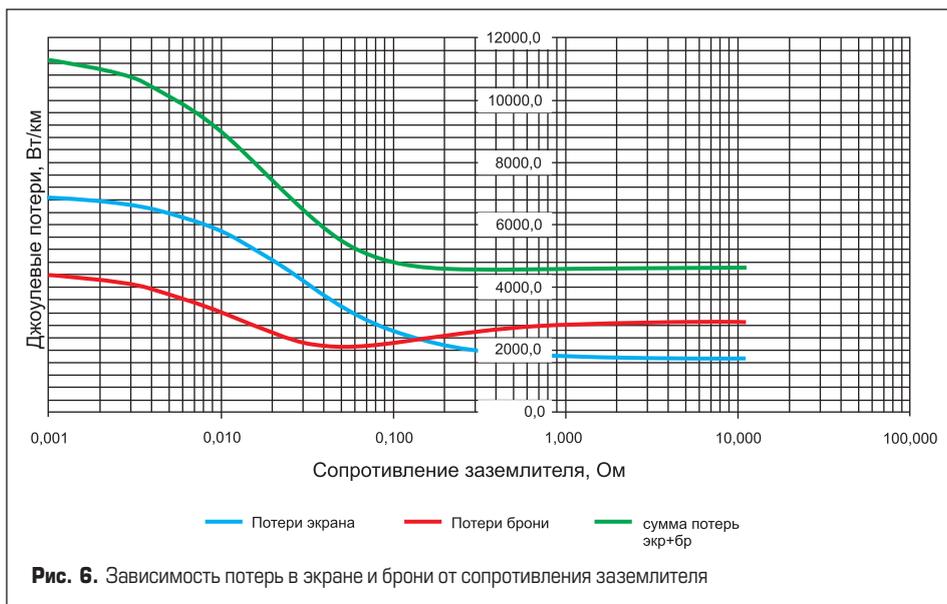
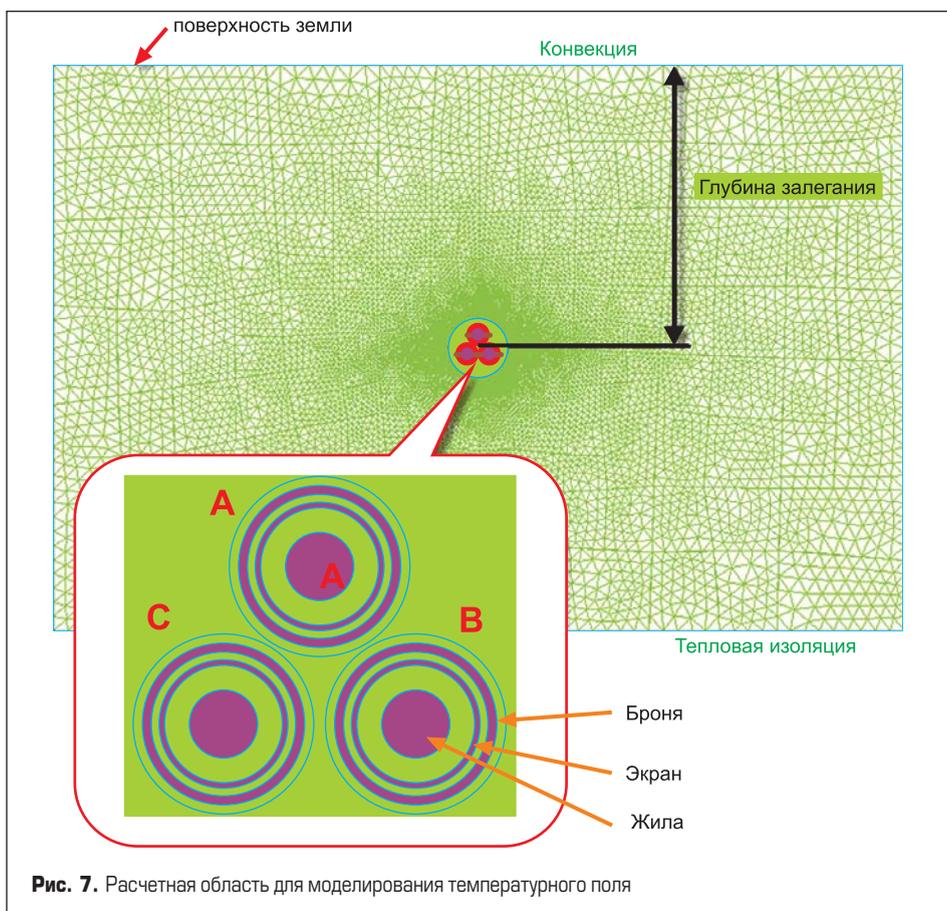


Таблица 3. Тепловые свойства материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/К м,	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К
Медь	383	8930	385
Алюминий	237	2700	920
Сшитый полиэтилен	0,25	952	2000
Внутренняя оболочка	0,25	952	2000
Наружная оболочка	0,25	952	2000
Полупроводящий слой	0,3	0,68	1500
Грунт	0,833	1500	1000
Засыпка	2,2	1800	2000



личении сопротивления заземлителя от 0,001 до 1 Ом суммарные потери в броне и экране уменьшаются более чем в три раза.

Для расчетной методики это означает следующее:

- Сопротивлением заземлителя пренебрегать нельзя. Это обстоятельство обуславливает необходимость совместного решения уравнений электрической цепи и электромагнитного поля.
- Выбирать конкретные значения сопротивления заземлителя в диапазоне единиц Ом можно достаточно свободно, поскольку оно не оказывает существенного влияния на мощность потерь в экране и броне.

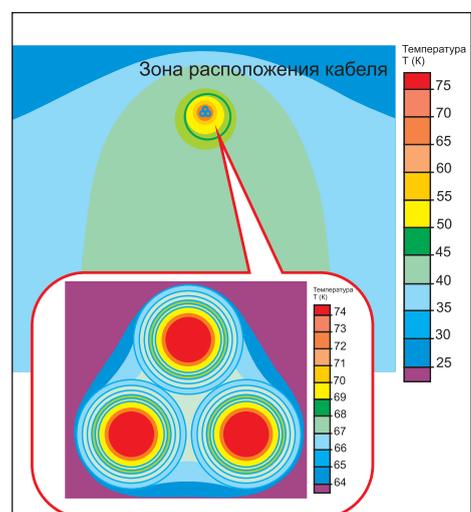
Тепловой расчет

Знание токовой нагрузки кабеля, брони и экрана позволяет рассчитать тепловой режим кабельной линии. Рассмотрим тепловое состояние кабельной линии при условии прокладки в земле треугольником (рис. 8).

Тепловые свойства материалов, использованные в расчетной модели, приведены в таблице 3.

Источником температурного поля для данной задачи является распределенная по сечению токопроводящих жил, экранов и брони удельная плотность Джоулевых потерь, рассчитанная на предыдущем этапе. Обе задачи решаются на одной и той же сетке конечных элементов. Передача данных из электромагнитного расчета в тепловой происходит автоматически. Расчетная область для температурной задачи при подземной прокладке кабелей показана на рис. 7.

Граничным условием для задачи установившегося теплового режима выберем условие конвекции в воздух с поверхности земли. Примем температуру окружающего воздуха равной +25 °С, а коэффициент конвекции $\alpha = 5 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$. Остальные границы модели описываются естественным граничным условием нулевого нормального теплового потока.



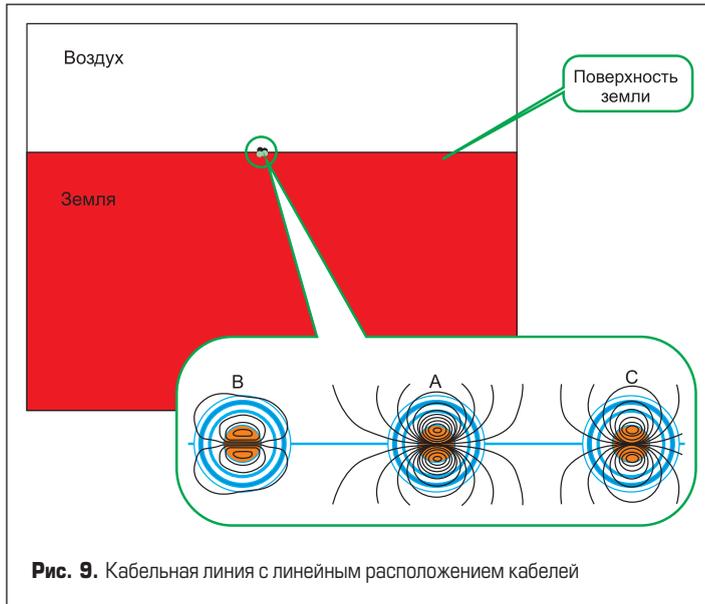


Рис. 9. Кабельная линия с линейным расположением кабелей

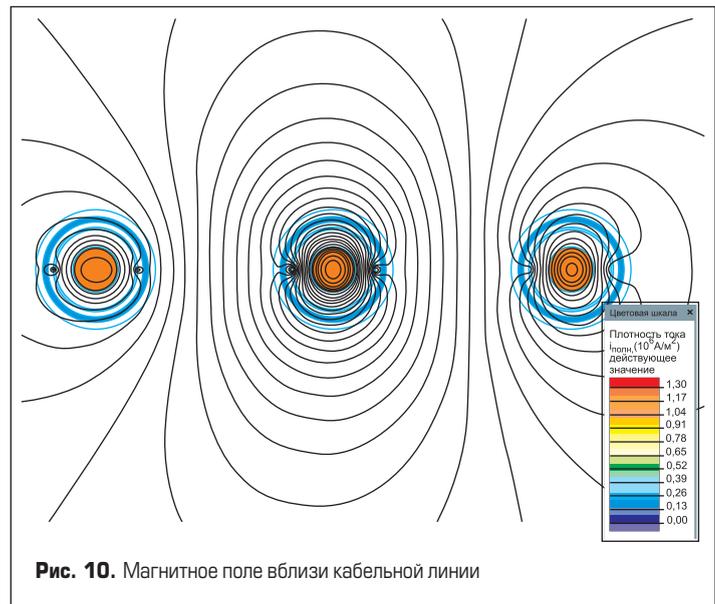


Рис. 10. Магнитное поле вблизи кабельной линии

Результатом стационарного теплового расчета является картина температурного поля, показанная на рис. 9.

Расчет показывает, что при температуре окружающего воздуха $T_0 = +25\text{ }^\circ\text{C}$, максимальная температура жилы составит $T = 73,1\text{ }^\circ\text{C}$.

Итерационно повторяя электромагнитный и тепловой расчет, можно подобрать токовую нагрузку таким образом, чтобы температура жилы и экрана вплотную приблизились к допустимым значениям для данного типа кабеля. Вычислительную процедуру можно построить простым перебором значений тока в заданном диапазоне, либо использовать встроенную в ELCUT утилиту оптимизации. В последнем случае оптимизация происходит в ограниченном диапазоне одномерного пространства значений тока с целевой функцией «максимальная близость температуры жилы к заданному значению». В ELCUT для этого используется метод Брента.

Расположение кабелей в ряд с просветом

Рассмотрим другой распространенный вариант объединения однофазных кабелей

в трехфазную кабельную группу — линейно с зазором, равным диаметру кабеля (рис. 9). Габариты расчетной области и глубина залегания кабельной группы — такая же, как на рис. 7. Электромагнитный расчет проводился при двустороннем заземлении экранов.

Электромагнитное и температурное поле вблизи кабелей показано на рис. 10 и 11.

На рис. 11 изотермы проведены через 1° , стрелки показывают относительную величину и направление тепловых потоков.

Сравнение с рис. 8 показывает, что при данной глубине прокладке и теплопроводности грунта расположение фаз в линию оказывается термически более выгодным. Это связано и как с большей индуктивной связью между экранами отдельных кабелей, так и с относительно худшими условиями охлаждения при прокладке треугольником.

Заключение

В работе применен метод конечных элементов для расчета потерь и температурного режима кабельной линии. Он позволяет учесть

электромагнитное и тепловое взаимное влияние кабелей друг на друга, а также особенности прокладки и наличие металлоконструкций в непосредственной близости.

В дополнение к предыдущим работам на указанную тему применено совместное решение цепно-полевой задачи. Это позволяет точно учесть особенности схемы заземления и, тем самым, достоверно оценить электромагнитные потери в экранах и броне.

Исследованы установившиеся симметричные режимы работы кабельной линии. Метод конечных элементов позволяет проводить нестационарные расчеты при различных аварийных режимах, в том числе несимметричных.

Литература

- ГОСТ Р МЭК 60287-2009 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки».
- George J. Anders Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications. McGraw Hill Professional.
- IEC Technical Report TR 62095. Electric cables — Calculations for current ratings — Finite element method. First Edition 2003.
- Ковригин Л. А. и др. Расчет температурных полей и токовых нагрузок кабелей в ANSYS// КАБЕЛЬ-News. 2009. № 4.
- Грешняков Г. В., Ковалев Г. Г., Дубицкий С. Д. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей // Кабели и провода. 2011.
- Титков В. В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // КАБЕЛЬ-News. 2009. № 10.
- ELCUT 5.10. Руководство пользователя. СПб: ООО «Тор». 2012.
- Дмитриев М. В., Евдокунин Г. А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования. СПб. 2008.

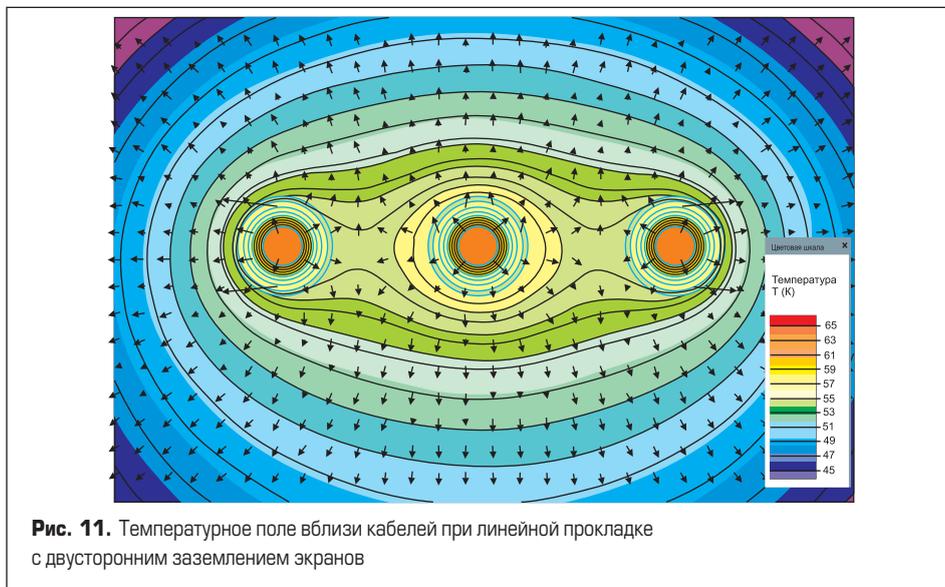


Рис. 11. Температурное поле вблизи кабелей при линейной прокладке с двусторонним заземлением экранов