

# К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля

**В.В. Тутков**, д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, техника высоких напряжений» СПбГПУ, профессор кафедры «Теоретических основ Электротехники» ПГУПС, профессор кафедры «Диагностика электроэнергетического оборудования» ПЭИПК

Широкое внедрение в последние годы силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена обнаружило проблему термической стойкости трехфазных кабельных линий. Повышенный нагрев, возникающий в линиях, выполненных из однофазного кабеля, объясняется значительными токами, которые индуцируются в защитных металлических экранах. Поскольку сечение этих экранов значительно меньше сечения токоведущей жилы, то в них возникает существенное тепловыделение, которым принято сегодня объяснять случаи выхода из строя кабельных линий по причине превышения рабочих температур.

В качестве предотвращения данного типа аварий применяется одностороннее заземление экранов или транспозиция экранов кабелей с помощью промежуточных муфт. Оба метода призваны обеспечить отсутствие токов в экранах и следовательно исключение джоулева тепловыделения в них. Применение первого способа ограничено длиной линии, поскольку связано с возникновением на разземленном конце недопустимо высоких напряжений. Транспозиция требует дополнительных затрат при строительстве кабельной линии, связанных с приобретением и установкой промежуточных муфт.

В данной работе предпринимается попытка оценить влияние экранов на тепловой режим кабельной линии, эффективность описанных мер для снижения температуры линии. В качестве метода расчета температурного поля подземной кабельной линии используются дифференциальные уравнения в частных производных электродинамики и теплопередачи.

Один из рекомендуемых производителем способов подземной прокладки демонстрирует рис.1, где изображено сечение трехфазной кабельной линии.

Подробный вид сечения единичного кабеля представлен на рис. 2.

Геометрические размеры на рис. 1, 2 даны в метрах. Представленная на рис. 2 конструкция сече-



Рис.1. Сечение трассы прокладки трехфазной кабельной линии

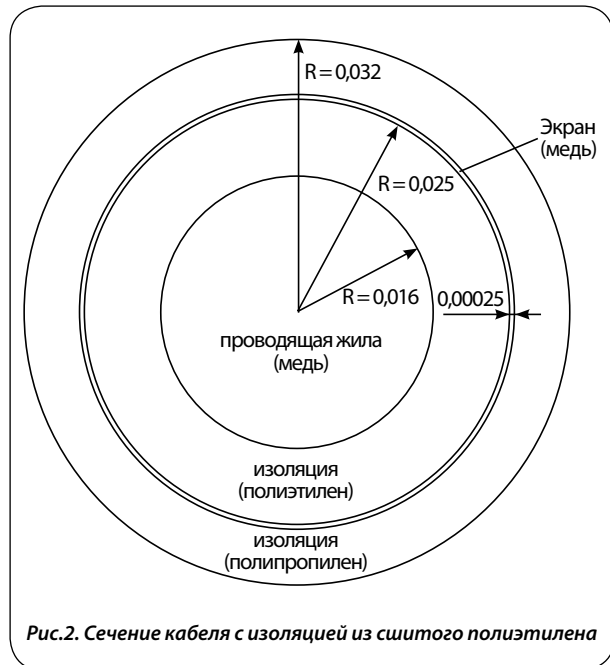


Рис.2. Сечение кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена

ния кабеля с указанными размерами соответствует кабелю на напряжение 35 кВ с заявленной производителем пропускной способностью по току 900 А [1].

Электромагнитные поля и токи в трехфазной кабельной линии в рабочем режиме (режим передачи мощности на промышленной частоте) можно описать с помощью уравнения плоскопараллельного квазистационарного поля, для комплексной

амплитуды компоненты векторного магнитного потенциала  $\dot{A} = \dot{A}_z$ , направленного вдоль кабеля

$$\left( \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} \right) = i\omega\gamma\mu\dot{A}_z + \gamma\mu\dot{E}_e + \mu\dot{j}_e, \quad (1)$$

где  $x, y$  — декартовы координаты в плоскости чертежа (рис. 1),  $i$  — мнимая единица,  $\omega$  — круговая частота,  $\gamma$  — электропроводность,  $\mu$  — магнитная проницаемость,  $\dot{j}_e$  — плотность тока, создаваемая сторонними источниками,  $\dot{E}_e$  — напряженность внешнего электрического поля, возникающая вследствие особенностей соединения проводящих элементов (экранов).

В качестве граничных условий для уравнения (1) используется равенство нулю векторного магнитного потенциала  $\dot{A}_z$  в бесконечно удаленных от кабельной линии точках. Источниками электромагнитного поля в кабельной линии являются рабочие токи, создающие в жилах плотности тока  $\dot{j}_{ek} = \frac{\dot{i}_k}{S_{ж}}$ , где номер фазы  $k=1, 2, 3$ ,

$$\dot{i}_1 = I_m \exp(-i2\pi/3), \dot{i}_2 = I_m, \dot{i}_3 = I_m \exp(i2\pi/3).$$

Если экраны кабелей, составляющих трехфазную линию, заземлены на обоих ее концах, обратный ток — сумма токов в экранах, равен сумме токов в жилах кабеля.

В случае симметричного питания и нагрузки кабеля полный обратный ток равен нулю. В соответствии с этим в сечении экранов возникает напряженность электрического поля  $\dot{E}_e$ , обеспечивающая выполнение условия

$$\int_{s1} \dot{j} ds + \int_{s2} \dot{j} ds + \int_{s3} \dot{j} ds = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3, \quad (2)$$

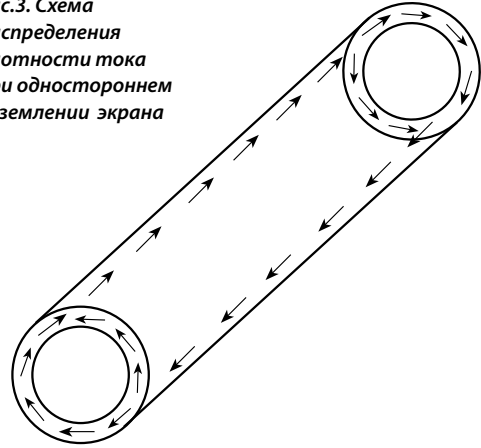
где в левой части фигурируют интегралы от комплексной плотности тока  $\dot{j}$  по сечениям  $S_1, S_2, S_3$  экранов кабелей, а в правой — сумма комплексных токов в жилах  $\dot{i}_1, \dot{i}_2, \dot{i}_3$ .

В случае одностороннего заземления экранов или их транспозиции ток в сечении каждого экрана равен нулю, т.е. выполняются условия

$$\int_{s1} \dot{j} ds = 0, \int_{s2} \dot{j} ds = 0, \int_{s3} \dot{j} ds = 0. \quad (3)$$

Следует заметить, что равенство нулю тока в каждом экране не означает равенства плотности тока во всем его сечении. В одной части сечения ток может

Рис.3. Схема распределения плотности тока при одностороннем заземлении экрана



иметь направление противоположное направлению тока в другой части сечения (рис.3). В этом случае ток в экране замыкается за счет перетекания на разомкнутых торцах (донных областях). Эти процессы не могут оказывать существенного влияния на распределение плотности тока в экранах на расстояниях порядка нескольких (5-10) диаметров экрана.

Для расчета температурного поля в сечении трассы кабельной линии используется уравнение стационарной теплопередачи

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q} = 0, \quad (4)$$

где  $T$  — температура,  $k$  — коэффициент теплопроводности среды  $\dot{q}$  — объемная плотность мощности энерговыделения в проводящих элементах кабельной линии.

Тепловыделение в жилах и экранах кабеля вычисляется по формуле

$$\dot{q} = \frac{|j|^2}{\gamma},$$

где плотность тока  $j = i\omega\gamma\dot{A}_z + \gamma\dot{E}_e + \dot{j}_e$ .

При этом плотность тока в жилах фаз линии  $\dot{j}_{e1} = \dot{i}_1/S_{ж}$ ,  $\dot{j}_{e2} = \dot{i}_2/S_{ж}$ ,  $\dot{j}_{e3} = \dot{i}_3/S_{ж}$ , где  $\dot{i}_1 = I_m \exp(-2\pi i/3)$ ,  $\dot{i}_2 = I_m$ ,  $\dot{i}_3 = I_m \exp(2\pi i/3)$ ,  $I_m$  — действующее значение тока в жилах,  $S_{ж}$  — площадь сечения жилы.

В качестве граничного условия в уравнении теплопроводности (4) на поверхности земли принимаются условия конвективного охлаждения Ньютона-Рихмана

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_e),$$

где  $h = 5-10$  Вт/м<sup>2</sup>К — коэффициент теплоотдачи с поверхности земли,  $T_e$  — температура воздуха вблизи трассы прокладки кабеля.

Использованные в расчетах электрические и теплофизические характеристики материалов элементов конструкции кабельной линии приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Электрические характеристики элементов кабельной линии

№	Наименование	Значение
1	Электропроводность жилы кабеля	0,5 10 <sup>8</sup> 1/Ом м
2	Электропроводность экрана кабеля	0,5 10 <sup>8</sup> 1/Ом м
3	Электропроводность грунта	0,1 1/Ом м

Таблица 2. Теплофизические свойства материалов кабельной линии

Материал	Теплопроводность, Вт/м К
Грунт	0,5
Медь	400
Бетон	1
Полипропилен	0,15
Полиэтилен	0,15

Описанная выше математическая модель кабельной линии позволяет рассчитать температурное поле кабельной линии при различных сочетаниях токов нагрузки в жилах кабеля при учете взаимной магнитной связи токоведущих жил и экранов. Для решения уравнений описанной в данной работе модели применялся метод конечных элементов.

В качестве примера рассмотрим результат расчета температурного поля кабельной линии, проложенной в соответствии с рекомендациями производителя (рис.1). При этом для медных жил и заземленного на обоих концах кабеля экрана, сечение которого составляет 35 мм<sup>2</sup>, допустимый ток указанный производителем составляет 900 А. Результат расчета поля температуры для этого базового режима представлен на рис. 4. Максимальная температура в области прокладки (температура жил) при этом составляет 90 °С, что соответствует норме, установленной производителем [1].

Существенным фактором, влияющим на стационарный температурный режим кабельной линии, является толщина проводящего экрана. Сечение экрана выбирается по условиям протекания тока

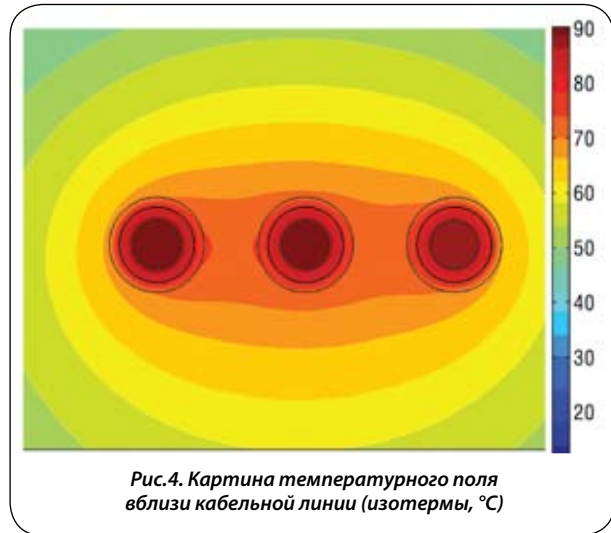


Рис.4. Картина температурного поля вблизи кабельной линии (изотермы, °С)

короткого замыкания. Увеличение сечения экрана с одной стороны обеспечивает большую устойчивость к току короткого замыкания. Вместе с тем увеличение сечения экрана приводит к росту индуцированных в экранах токов в нормальном режиме передачи мощности и росту джоулева тепловыделения в них. Об этом в частности указывается в документации производителя [1]. То есть увеличение толщины экрана приводит в рабочем режиме к более высоким температурам кабеля. Это иллюстрирует рис. 5, где построены распределения температуры в поперечнике кабельной линии для площади сечения

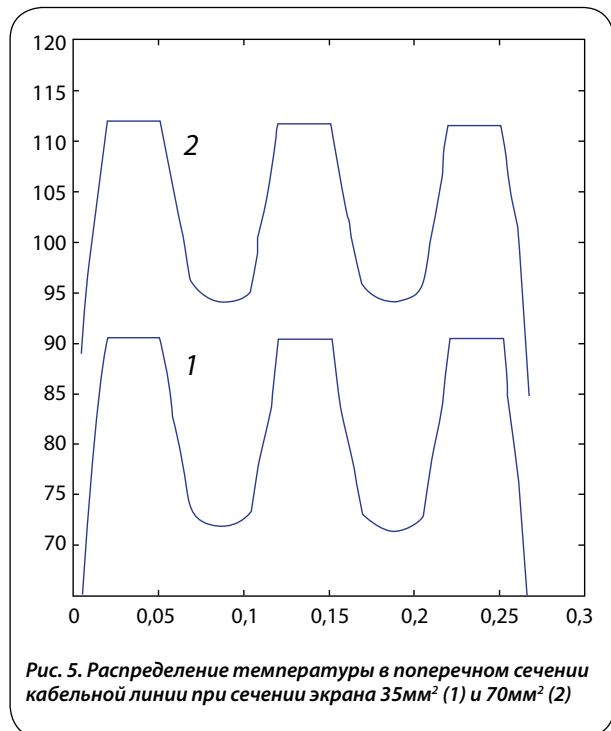
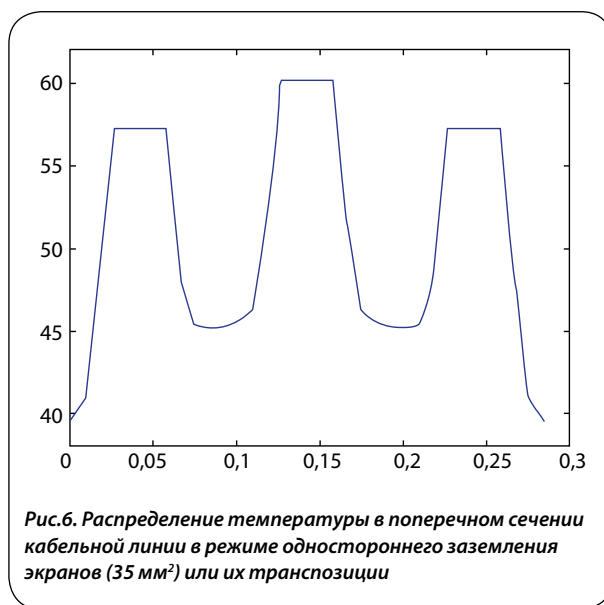


Рис. 5. Распределение температуры в поперечном сечении кабельной линии при сечении экрана 35мм<sup>2</sup> (1) и 70мм<sup>2</sup> (2)

экранов 35 мм<sup>2</sup> и 70 мм<sup>2</sup>. Как видно из рисунка, во втором случае максимальная температура кабеля возрастает на 20% и достигает 112 °С.

Таким образом, при увеличении толщины экрана следует уменьшать максимальный рабочий ток кабельной линии. При отсутствии данных производителя о величине необходимого снижения допустимого рабочего тока при увеличении толщины экранов выбор рабочего режима следует выполнять на основе расчетов, учитывающих геометрию сечения кабелей их взаимное расположение, электрические и теплофизические характеристики материалов конструкции кабеля и грунта. Игнорирование этого обстоятельства может являться причиной выхода из строя кабельных линий в связи с превышением допустимой температуры.

В ранее опубликованных работах [2] в качестве мер, обеспечивающих снижение нагрева кабеля, рекомендуется применение одностороннего заземления экранов или их транспозиция. Данные меры создают условия, при которых полные токи в экранах будут равны нулю. Для реализации этих условий в описанной выше расчетной модели следует заменить условие равенства прямого и обратного тока (2) на условия равенства нулю тока в каждом экране (3). Результаты расчета этого режима исследуемой линии показывают существенное (на 30%) снижение максимальной температуры. Это объясняется снижением тепловыделения в экранах, что качественно показывает и распределение температуры в сечении линии (рис. 6), для которого характерно заметное превышение температуры в средней фазе по сравнению с крайними. Важно отметить, что тепловыделение в экранах при выполнении условия равенства нулю тока в них не исчезает совсем, поскольку в экранах сохраняются индуктированные токи, замыкающиеся в пределах тела самого экрана (рис. 3).



*Рис.6. Распределение температуры в поперечном сечении кабельной линии в режиме одностороннего заземления экранов (35 мм<sup>2</sup>) или их транспозиции*

На рис. 7 показано распределение плотности тока в экране средней фазы в режиме двухстороннего заземления и для случая одностороннего заземления (или транспозиции). Следует отметить, что при одностороннем заземлении экрана, когда выполнено условие (3), максимальная плотность тока в среднем на порядок ниже, чем в случае двухстороннего заземления. При этом одностороннее заземление экрана приводит к принципиально иному распределению плотности тока в сечении экрана, когда знаки плотности тока на противоположных (левой и правой) сторонах сечения оказываются противоположными (рис. 7). В то же время полный ток в сечении экрана равен нулю. Существенно более низкая плотность тока в экранах при их одностороннем заземлении или транспозиции обеспечивает значительное снижение тепловыделения в экранах. Расчетные значения потерь в жилах и экранах кабеля сечением 35 мм<sup>2</sup> в различных режимах приведены в табл. 3.

*Рис. 7. Распределение плотности тока в экране средней фазы при двухстороннем заземлении (слева) и одностороннем заземлении (справа)*

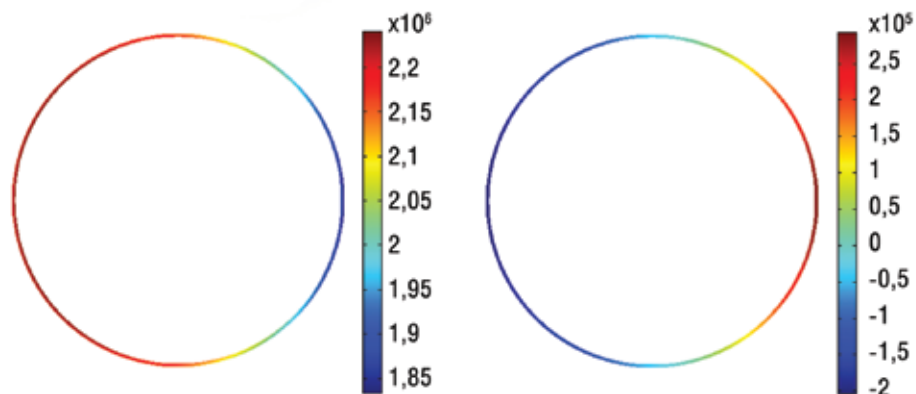


Таблица 3. Интегральное тепловыделение в сечении проводящих элементов кабельной линии (Вт/м).

Проводник	Двухстороннее заземление экранов	Одностороннее заземление экранов или транспозиция
Жила	20	20
Экран крайней фазы	19,7	0,15
Экран средней фазы	8,66	0,6

Данные табл. 3 показывают весьма значительное, до двух порядков, снижение тепловыделения в экранах при их транспозиции, что и обеспечивает более низкую рабочую температуру кабельной линии в этом случае.

### Выводы

1. Максимально допустимый рабочий ток кабельной линии при двухстороннем заземлении экрана зависит не только от сечения жилы кабеля но

и толщины экрана. Увеличение сечения экранов приводит к возрастанию тепловыделения в них и снижению рабочего тока по причине возрастания рабочей температуры линии. При выборе рабочего тока кабельной линии следует учитывать данные производителя в части величины сечения экранов. Значения допустимых рабочих токов, приводимых производителем для указанных значений сечения экранов, являются корректными. Соблюдение рекомендаций производителя обеспечивает допустимый температурный режим работы линии.

2. При необходимости дополнительного снижения нагрева трехфазных кабельных линий эффективной мерой является одностороннее заземление экранов или их транспозиция.

### Литература

1. Современные решения в области силовых кабелей. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена среднего и высокого напряжения АВВ. М.: АББ Москабель.

2. Дмитриев М., Евдокунин Г. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ // Новости Электротехники. 2007. №2 (44).

## Рецензия

### на статью В.В. Титкова «К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля»

Представленная статья является одной из первых попыток рассчитать тепловой режим кабельной линии на основе решения связанной задачи электродинамики и теплопередачи применительно к конструкции на основе однофазных СПЭ-кабелей. Многочисленные случаи выхода из строя кабельных линий такого типа по причине нерасчетного повышения температуры делают задачу тщательного анализа теплового режима кабельных линий весьма актуальной.

В статье В.В. Титкова на примере трехфазной линии на 35 кВ, выполненной по рекомендации производителя кабеля (АВВ), произведен расчет теплового режима на предельно-допустимом по рекомендации изготовителя токе. Существенным является, что в рамках модели, основанной на дифференциальных уравнениях в частных производных для электромагнитного поля и теплопередачи, автору удалось описать два различных режима заземления экранов: двух- и одностороннее заземление (или транспозиция). При этом показано существенное снижение нагрева экранов при втором типе их соединения.

Интересным является вывод автора о том, что транспозиция или одностороннее заземление экранов не исключает полностью протекания токов в них, которые в этом случае полностью замыкаются в теле самого экрана. Вместе с тем показанное автором снижение плотности тока в экранах на порядок подтверждает пригодность для расчета тепловыделения применяемых в настоящее время моделей линии, основанных на теории электрических цепей.

Разработанная автором модель кабельной линии представляет собой удачную попытку наиболее глубокого анализа электромагнитных и тепловых процессов трехфазных кабельных линий в рабочих режимах. Несомненно, что в дальнейшем данная модель позволит анализировать конфигурации и режимы кабельных линий при их прокладке в различных условиях.

*Ф.Х. Халилов, главный научный сотрудник СПбГПУ,  
действительный член Академии  
электротехнических наук РФ,  
доктор технических наук, профессор*