

С началом массового внедрения линий электропередачи на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-кабелей) участились случаи их термической перегрузки, приводящей к деструкции и выходу из строя.

На тепловой режим эксплуатации кабелей, от которого в большой степени зависят и пропускная способность линии, и надежность электроснабжения потребителей, существенное воздействие оказывают различные способы прокладки кабельных линий.

Факторы, влияющие на основные характеристики кабельных линий, рассматривают в своем материале Сергей Михайлович Дудкин и Василий Васильевич Титков.



Василий Титков,
д.т.н., декан

Сергей Дудкин,
к.т.н., зам. декана

«Электромеханический факультет»
СПбГПУ,
г. Санкт-Петербург

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ 6-10 кВ И ВЫШЕ

Влияние способов прокладки на температурный режим

Кабельные линии (КЛ) большой длины, проложенные на относительно свободном пространстве, выполняются кабелями каждой фазы, расположенными в одной плоскости на существенном расстоянии друг от друга. В условиях стесненной городской застройке часто приходится использовать узкую траншею и в этом случае кабели приходится располагать треугольником. При преодолении препятствий, водных преград, дорог иногда используется горизонтальное бурение и прокладка кабелей в трубах.

Каждый из перечисленных выше способов прокладки задает разные условия охлаждения кабелей и, следовательно, разную пропускную способность кабельных линий.

Если в КЛ на напряжение 6-20 кВ основным фактором, ограничивающим пропускную способность, является конечная величина экономической плотности тока, то для более высоких классов доминирующим моментом является рабочая температура кабеля.

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ И ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Одной из основных причин выхода КЛ из строя является повышенное тепловыделение в проводящих экранах, внутри которых расположены токоведущие жилы. Токи, индуцируемые в таком экране токами соседних фаз, могут вызвать высокие джоулевы потери, приводящие к термической деструкции.

Хорошо известный прием транспозиции экранов в трехфазной КЛ позволяет снизить температуру кабельной линии на 20-30% [1, 2]. К аналогичному эффекту приводит одностороннее заземление экранов. Однако данное техническое решение применимо только в случае относительно коротких линий, для которых потенциал разземленного конца кабеля не достигает опасных величин.

При использовании на отдельных участках прокладки кабелей в трубах теплообмен кабеля с грунтом затрудняется вследствие воздушных зазоров в пределах сечения трубы. Если труба выполнена из проводящего материала, например из стали, то в ней индуцируются вихревые токи, вызывающие дополнительный нагрев, который наряду с плохим теплообменом кабелей с грунтом еще больше усугубляет ситуацию.

Таким образом, тепловой режим и пропускная способность КЛ среднего и высокого напряжения будут определяться:

- током линии;
- сечением жил и экранов;
- геометрией размещения жил;
- средой, в которой прокладывается линия;
- наличием внешних проводников и устройств, приводящих к ограничению теплообмена (проводящие или диэлектрические трубы для прокладки в области препятствий).

РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ

Применительно к описанным условиям ниже приводятся некоторые результаты расчетов электромагнитных и тепловых режимов трехфазных КЛ на напряжение 35 кВ в пофазном исполнении на основе модели, подробно описанной в [1] и основанной на конечно-элементном решении уравнений в частных производных для электромагнитного и связанного с ним теплового полей. При этом в рамках электромагнитного расчета находятся распределения плотности тока в экранах и внешних по отношению к линии проводниках, а в тепловом расчете учитываются тепловыделения, вызванные джоулевыми потерями в виде распределенных источников как в жилах кабеля, так и в сечениях экранов и внешних труб (табл. 1).

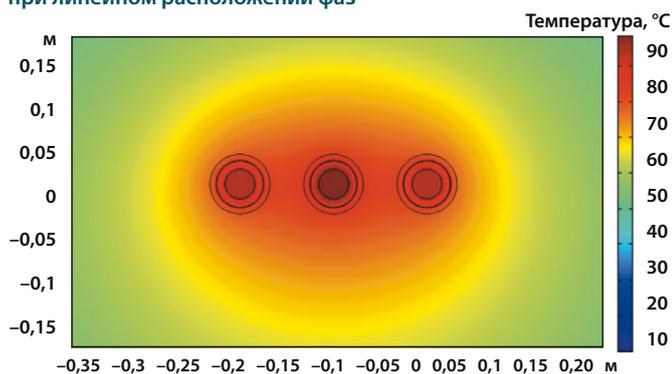
• Таблица 1 Характеристики теплового режима кабельной линии 35 кВ при различных способах прокладки

Прокладка	в грунте				в трубе стесненно				в трубе свободно			
	отсутствует				стальная	диэлектрическая		стальная	диэлектрическая			
Труба												
Расположение фаз												
Соединение* экранов	н	т	н	т	н	т	н	т	н	т	н	т
Максимальная температура, °С	99	69	86	74	166	144	159	131	138	120	135	110
Потери в экранах, Вт/м	50	0,9	19	2,3	15	1,8	19	1,84	15	1,8	19	2,3
Потери в жилах, Вт/м	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Потери в трубе, Вт/м	-	-	-	-	22	23	0	0	16	17	0	0
Суммарные потери, Вт/м	110	60,9	79	62,3	97	84,8	79	61,8	91	78,8	79	62,3

* н – соединение экранов без транспонирования (двухстороннее заземление); т - транспонированные экраны.

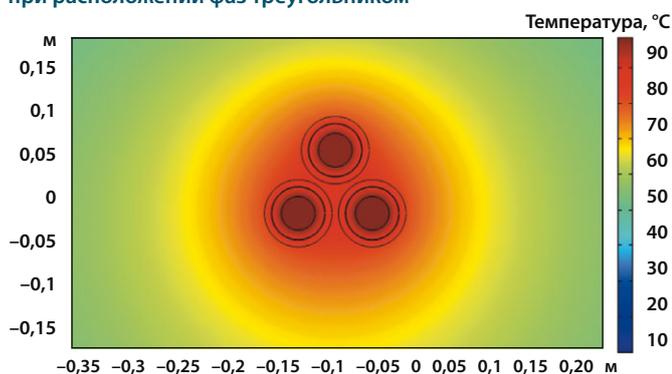
Поле температуры кабельной линии при линейном расположении фаз

Рис. 1 •



Поле температуры кабельной линии при расположении фаз треугольником

Рис. 2 •



ЛИНЕЙНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ

В качестве расчетного варианта рассматривается линейное расположение кабелей линии с рабочим напряжением 35 кВ непосредственно в грунте (рис. 1). Сечения жил кабеля составляют 800 мм^2 , диаметр проводящих медных экранов 50 мм при толщине стенки экрана 0,25 мм. Предельный режим при линейном расположении фаз на расстояниях, рекомендуемых производителем, и при двухстороннем заземлении экранов достигается при токе 900 А [3].

При этом максимальная температура жил кабеля составит 90°C . Транспонирование экранов соединительных муфт позволяет при указанном токе снизить температуру до 60°C . Данный эффект достигается за счет существенного снижения тепловыделения в экранах. Заметим также, что с точки зрения теплового расчета применение транспозиции или одностороннего заземления экранов абсолютно равноценно, поскольку обеспечивает один и тот же физический эффект – равенство нулю полного тока в сечении экрана.

РАСПОЛОЖЕНИЕ В ТРЕУГОЛЬНИК

В ряде случаев переход от линейного расположения сечений кабелей к более компактному треугольному (рис. 2) приводит к некоторому снижению тепловыделения в экранах вследствие снижения индуктированных в них токов. Однако затрудненный теплообмен с окружающим грунтом при таком расположении жил частично приводит к обратному эффекту, т.е. способствует росту температуры. Поэтому в общем случае анализ способов размещения жил целесообразно проводить для конкретных условий.

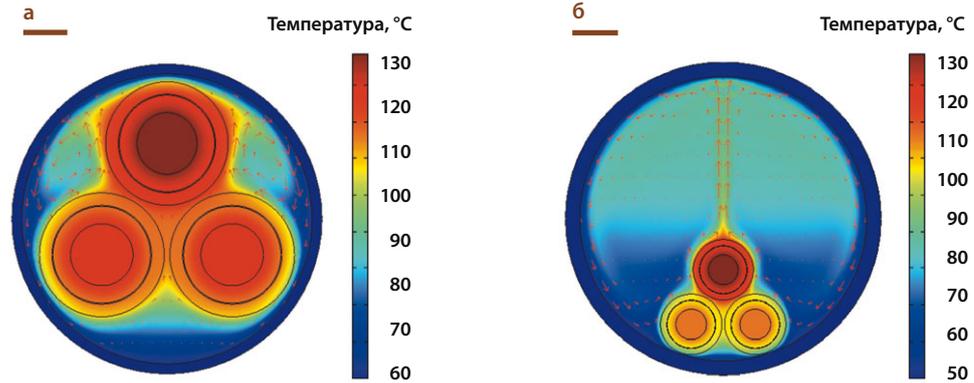
СРАВНЕНИЕ

В рассматриваемых в табл. 1 примерах расстояния между кабелями при их линейном расположении достаточно велики, что обеспечивает их хороший теплообмен с грунтом. Компактное расположение фаз в схеме треугольника и при отсутствии транспозиции обеспечивает достаточно существенное снижение тепловыделения в экранах. При этом максимальная температура жил кабеля составит 86°C . Использование транспонирующих муфт или одностороннее заземление экранов позволяет снизить максимальную температуру до значения близкого к случаю транспонированных экранов линейно расположенных жил – 74°C .

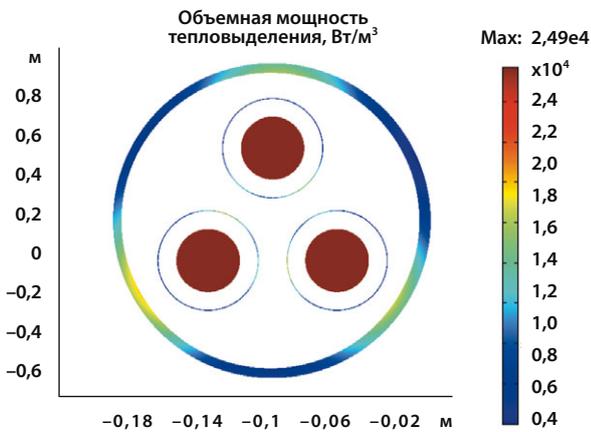
1/2

• Рис. 3

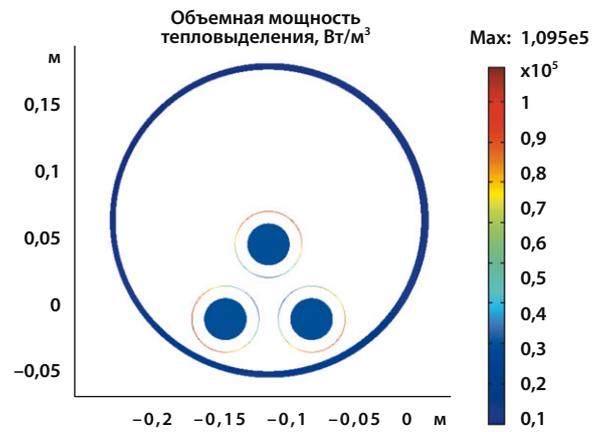
Распределение температуры и скорости воздушного потока (стрелки) при прокладке кабельной линии в трубах: а – при стесненном размещении; б – при свободном размещении.



• Рис. 4 Распределение объемной мощности тепловыделения в проводящих элементах линии при транспонированных экранах



• Рис. 5 Распределение объемной мощности тепловыделения в проводящих элементах линии при отсутствии транспозиции экранов



Сравнивая варианты линейного и треугольного расположения жил рассматриваемого кабеля, можно отметить, что без транспонирующих муфт целесообразна треугольная конфигурация расположения жил. Одностороннее заземление экранов относительно коротких линий обеспечивает эффект снижения нагрева полностью аналогичной случаю транспонированных экранов. При этом обеспечивается безопасный потенциал на разземленном конце экрана.

Более тяжелые тепловые режимы возникают при прокладке участка КЛ в трубе (рис. 3). Условия теплообмена несколько улучшаются, когда труба частично или полностью заполнена водой. Поэтому наиболее напряженный термический режим возникает в случае, если полость трубы заполнена воздухом.

Воздух обладает крайне низким коэффициентом теплопроводности, что затрудняет теплообмен. К некоторому улучшению последнего приводит естественная конвекция, которую следует учитывать при выполнении расчетов. Поскольку на режим конвекции существенное влияние оказывает размер воздушной области, в данной работе рассматриваются два варианта размещения кабелей в трубе: стесненное (рис. 3а) и свободное (рис. 3б).

Результаты расчетов теплового режима КЛ в трубах показывают существенное увеличением максимальной температуры, которая выходит за допустимые пределы (табл. 1) для всех вариантов использования трубы. При этом наибольший нагрев достигается в случае проводящей трубы малого диаметра и нетранспонированных экранов, поскольку в этом случае тепловыделение во всех проводящих элементах максимально (рис. 4, 5), а конвекция затруднена вследствие относительно малых размеров воздушных областей.

Наименьший нагрев при прокладке в трубе имеет место при использовании трубы большого диаметра из непроводящего материала (табл. 1).

Применение транспозиции экранов существенно снижает как интегральный вклад в тепловыделение (табл. 1), так и объемную плотность мощности (рис. 4, 5). При этом в нетранспонированных экранах плотность мощности тепловыделения существенно выше, чем в токоведущих жилах.

ВЫВОДЫ

Приведенные в табл. 1 максимальные значения температуры в сечении линии при различных способах прокладки показывают, что использование труб для прокладки существенно снижает пропускную способность линии из-за недопустимых перегревов. При этом наиболее сильным фактором выступает низкая теплопроводность воздушных слоев, образующихся внутри трубы. Так, в случае нетранспонированных экранов при размещении линии с треугольным расположением фаз в стальной трубе возрастание интегральной мощности тепловыделения не превосходит 10%. В тоже время максимальная температура возрастает почти в два раза.

Определение способа прокладки кабелей при выполнении кабельной линии следует производить с учетом минимизации стоимости мегаватта передаваемой мощности. При таком подходе к проектированию оптимальной является прокладка кабелей в одной плоскости и транспозиция экранов.

В том случае, когда малая длина кабельной линии не позволяет выполнить транспозицию внешних экранов, целесообразно использовать одностороннее заземление экранов. В ряде случаев, подобных рассмотренному в статье, дополнительного снижения нагрева можно добиться, располагая жилы треугольником. Прокладку кабелей в трубах следует выполнять в исключительных случаях, так как минимум одна строительная длина кабеля будет иметь существенно большее сечение токопроводящей жилы, что существенно удорожает линию и снижает ее надежность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // Кабель News. 2009. № 10.
2. Дмитриев М.В., Кияткина М.Р. Транспозиция экранов кабелей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 2.
3. Современные решения в области силовых кабелей. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена среднего и высокого напряжения АБВ. М.: АБВ Москабель.