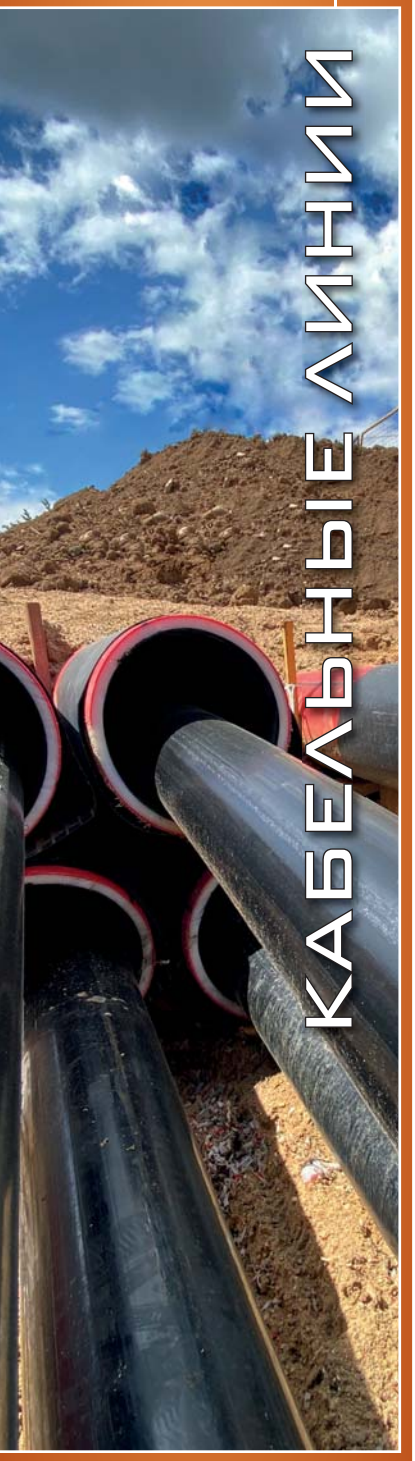


Допустимый ток кабельной линии при прокладке в трубах

За последние десятилетия в кабельных сетях произошли существенные изменения, связанные с появлением современных высокотехнологичных полимерных материалов. Так, в качестве основной изоляции кабелей высокого напряжения 6–500 кВ на смену бумаге, пропитанной маслом, пришла твердая изоляция из сшитого полиэтилена (СПЭ). Кроме того, при трубной прокладке кабелей вместо асбестовых и стальных труб появились трубы из полимерной композиции. Учитывая изложенное, необходимо обратить внимание на ряд существенных ошибок, связанных с неверным пониманием влияния новых труб на процессы в кабелях.

Успешный опыт применения полимерных материалов в кабельной отрасли привел к корректировке подходов к проектированию, строительству, эксплуатации кабельных линий (КЛ). В частности, одной из ключевых особенностей новых КЛ можно назвать увеличение числа участков трассы, на которых кабели проложены не в открытом грунте, а в грунте в полимерных трубах — уже известны КЛ, где в трубах находится до 90% всей трассы линии.

Полимерные трубы позволяют качественно проложить дорогостоящий кабель под землей. Они хорошо гнутся, не оказывают абразивного действия на кабели, не нагреваются вследствие влияния переменного магнитного поля проложенных в них кабелей. Данные трубы являются стойкими к механическим воздействиям, коррозии и агрессивной среде, надежно соединяются друг с другом при помощи стыковой сварки, позволяя тем самым образовывать протяженные герметичные трубные участки длиной до нескольких сотен метров, соответствующей расстоянию между соседними кабельными муфтами.

Полимерные трубы могут размещаться в грунте открытым способом (в траншеях) или же различными закрытыми способами, среди которых наиболее известна протяжка труб в подземных каналах, подготовленных методом горизонтально-направленного бурения (ГНБ). В указанных случаях трубы позволяют защитить кабель от внешних воздействий, снизить объем земляных работ при прокладке новых кабелей и последующем их ремонте или замене.

Требования к полимерным трубам для прокладки КЛ высокого напряжения описаны в различных отраслевых стандартах. Согласно этим требованиям, кабельные трубы должны обладать целым перечнем важных характеристик, среди которых, например:

- способность сохранять свойства на протяжении срока службы кабеля (термостойкость при длительном воздействии температуры проложенных кабелей, равной 90°С и более);
- стойкость внутреннего слоя к распространению открытого пламени (категория ПВ-0);
- возможность испытаний и определения мест повреждения (ОМП) проложенных кабелей (полимерные трубы должны быть токопоисковыми, то есть обладающими функцией ОМП).

Несмотря на то, что в нормативных документах грамотно отражены многие основные вопросы прокладки кабелей в современных полимерных трубах, там до сих пор нет верной информации о характере влияния труб на пропускную способность КЛ по току. Например, ошибочно полага-



а) б)

Рис. 1. Кабельная линия 6–35 кВ, проложенная в полимерных трубах: а) трехфазный кабель; б) три однофазных кабеля

ется, что прокладка кабелей в трубах снижает длительно допустимый ток жилы на 10% по сравнению с прокладкой кабелей без труб, то есть поправочный коэффициент на трубы составляет $K_Т$ = 0,9. Поясним, почему это не соответствует действительности.

ПРОКЛАДКА В ТРУБАХ КЛ 6–35 КВ

КЛ 6–35 кВ в трубах прокладываются таким образом, что все три фазы оказываются размещены в одной общей трубе — это показано на рисунке 1 на примере трехфазного кабеля (а) и трехфазной группы однофазных кабелей (б).

Переменный ток нагрузки, проходя по жиле кабеля, своим магнитным полем может вызвать переменный ток, наведенный в двусторонне заземленном экране (прежде всего это происходит для кабелей однофазной конструкции). Поэтому в общем случае у кабеля есть сразу два наиболее значимых источника тепловыделения — это потери активной мощности в жиле $P_Ж$ и экране $P_Э$. Тепло, выделившееся в кабеле, отводится в грунт, встречая на своем пути тепловые сопротивления изоляции $R_И$ и оболочки $R_О$ кабеля, воздуха в трубе $R_В$ и ее стенки $R_Т$, а также тепловое сопротивление самого грунта $R_Г$. Результирующая тепловая схема показана на рисунке 2а, где $T_Ж$, $T_Э$, $T_Г$ — это температуры жилы, экрана, грунта.

Потери мощности в жиле $P_Ж = I_Ж^2 \cdot R_Ж$ определяются током в жиле $I_Ж$ и ее активным сопротивлением $R_Ж$, зависящим от сечения жилы $F_Ж$ и материала жилы (медь, алюминий). С помощью тепловой схемы замещения по любому заданному сечению жилы $F_Ж$ (с учетом ее материала) можно определить ток жилы $I_Ж$, при котором температура жилы достигнет длительно допустимого для СПЭ-изоляции значения $T_Ж$ = 90°С. Найденный таким образом ток в жиле $I_Ж$ — длительно допустимый ток КЛ.

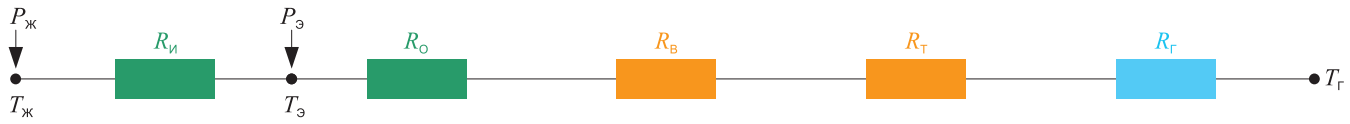
Очевидно, что если одну и ту же КЛ проложить в грунте в трубах или в грунте без труб, то из-за различных условий охлаждения кабелей в двух указанных случаях получатся разные длительно допустимые токи — соответственно, $I_{ДОП(Т)}$ и $I_{ДОП}$. Отношение таких токов называется поправочным коэффициентом на прокладку в трубах:

$$\frac{I_{ДОП(Т)}}{I_{ДОП}} = K_Т,$$

где $I_{ДОП(Т)}$ — допустимый ток КЛ в трубах (рисунок 2а); $I_{ДОП}$ — допустимый ток КЛ без труб (рисунок 2б).

При сравнении схемы рисунков 2а и 2б складывается впечатление, что трубы затрудняют процесс

а)



б)

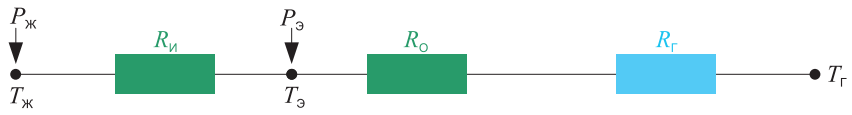


Рис. 2. Тепловая схема замещения КЛ: а) прокладка в грунте в трубах; б) прокладка в грунте без труб

охлаждения кабелей, так как в тепловой схеме при трубной прокладке появляются сразу два дополнительных тепловых сопротивления $R_В$ и $R_Т$. По этой причине считается, что длительно допустимые токи КЛ, отвечающие условию $T_Ж$ = 90°С, обязательно находятся в соотношении $I_{ДОП(Т)} < I_{ДОП}$, то есть всегда справедливо $K_Т < 1$. Причем в нормативных документах зачастую даже указывается конкретное универсальное значение $K_Т$ = 0,9.

Например, если при прокладке в грунте КЛ имела допустимый ток $I_{ДОП}$ = 1000 А, то в случае прокладки в трубах допустимый ток снизится до $I_{ДОП(Т)} = K_Т \cdot I_{ДОП}$ = 900 А. Таким образом, для обеспечения исходной пропускной способности 1000 А проектировщик будет вынужден искать способы снизить температуру кабелей и пойдет на увеличение сечения $F_Ж$, что вызовет удорожание КЛ. Приведенные рассуждения являются обычными для многих проектов, однако они базируются на ошибочном предположении, что справедливо $K_Т$ = 0,9. На самом деле влияние труб на длительно допустимый ток КЛ носит сложный характер, и в ряде случаев трубы не только не снижают допустимый ток, а даже, напротив, повышают его.

Отличие схемы рисунка 2а от схемы рисунка 2б заключается не только в наличии $R_В$ и $R_Т$, но также и в разной величине $R_Г$, так как в первом случае ($R_{Г(а)}$) с грунтом контактирует труба, а во втором случае ($R_{Г(б)}$) — сам кабель. На примере трехфазного кабеля в расчете на 1 м длины можно записать:

$$R_В = 3 \cdot \frac{\rho_В}{2\pi} \cdot ln\left(\frac{D_В}{d}\right),$$

$$R_Т = 3 \cdot \frac{\rho_Т}{2\pi} \cdot ln\left(\frac{D}{D_В}\right),$$

$$R_{Г(а)} = 3 \cdot \frac{\rho_Г}{2\pi} \cdot ln\left(\frac{4h_Г}{D}\right),$$

$$R_{Г(б)} = 3 \cdot \frac{\rho_Г}{2\pi} \cdot ln\left(\frac{4h_Г}{d}\right),$$

где $\rho_В$, $\rho_Т$, $\rho_Г$ — удельные тепловые сопротивления воздуха (с учетом его конвекции), трубы и грунта; d — наружный диаметр кабеля; D и $D_В$ — наружный и внутренний диаметры трубы; $h_Г$ — глубина кабелей в грунте (не менее 0,7 м для КЛ 6–20 кВ, не менее 1,0 м для КЛ 35 кВ).

В случае использования труб охлаждению кабелей мешает тепловое сопротивление $R_В + R_Т + R_{Г(а)}$, а в случае без труб — тепловое сопротивление $R_{Г(б)}$. Так как диаметры трубы D и кабеля d соотносятся как $D > d$, то согласно формулам всегда справедливо $R_{Г(а)} < R_{Г(б)}$, и тогда нет возможности заранее понять, каким должен быть знак неравенства $R_В + R_Т + R_{Г(а)} \lessgtr R_{Г(б)}$, то есть нет ясности, а в какой из схем (с трубами или без) суммарное тепловое сопротивление будет меньше и, следовательно, длительно допустимый ток КЛ — больше.

Если $R_В + R_Т + R_{Г(а)} > R_{Г(б)}$, то прокладка в трубах осложняет охлаждение кабелей (за счет влияния воздуха в трубе и ее стенки), и тогда $K_Т = I_{ДОП(Т)} / I_{ДОП} < 1$.

Если $R_В + R_Т + R_{Г(а)} < R_{Г(б)}$, то прокладка в трубах упрощает охлаждение кабелей (за счет большой площади контакта трубы с грунтом), и тогда $K_Т = I_{ДОП(Т)} / I_{ДОП} > 1$.

Очевидно, что влияние труб на допустимый ток КЛ определяется теми же факторами, что и величины тепловых сопротивлений $R_В$, $R_Т$, $R_{Г(а)}$, $R_{Г(б)}$. В частности, влияние труб будет зависеть от удельного теплового сопротивления грунта $\rho_Г$ и трубы $\rho_Т$, от глубины прокладки КЛ $h_Г$, от диаметров трубы D и $D_В$, от диаметра кабеля d.

Например, даже при стандартном значении $D_В / d$ = 1,5, характерном для прокладки кабелей в трубах, и удельном тепловом сопротивлении полимерных труб $\rho_Т$ = 2 (м·К) / Вт коэффициент $K_Т$ будет определяться свойствами грунта $\rho_Г$ и глубиной прокладки $h_Г$, то есть не может иметь одно и тоже постоянное значение $K_Т$ = 0,9, В частности, при повышенных $\rho_Г$ и $h_Г$, характерных при прокладке кабелей в трубах методом ГНБ, коэффициент $K_Т$ может достигать 1,0 и даже более.

ПРОКЛАДКА В ТРУБАХ КЛ 110–500 КВ

Для КЛ 110–500 кВ влияние труб на допустимый ток еще более сложно, поскольку в этих сетях применяются исключительно однофазные кабели, и каждая фаза располагается в своей собственной отдельной трубе (рисунок 3).

Однофазные кабели рекомендуется прокладывать сомкнутым треугольником, так как при этом обеспечивается высокая степень компенсация магнитных полей токов трех фаз, то есть уменьшается магнитное поле КЛ и его влияние на людей и соседние линии, благодаря чему повышается электробезопасность КЛ.

Если вместо прокладки сомкнутым треугольником три фазы решено расположить в трех трубах, то при определении длительно допустимого тока КЛ следует учесть не только достаточно сложное влияние труб, которое было рассмотрено ранее на примере КЛ 6–35 кВ, но и тот простой факт, что пофазная прокладка кабелей в трубах увеличивает расстояние между фазами (со значения $s = d$, отвечающего диаметру кабеля, до $s = D$, отвечающего диаметру трубы), улучшая охлаждение кабелей и обеспечивая рост допустимого тока КЛ.

Процесс учета труб для КЛ 110–500 кВ предполагает, что должны применяться сразу два поправочных коэффициента:

$$\frac{I_{ДОП(Т)}}{I_{ДОП}} = K_S \cdot K_Т,$$

где $K_S > 1$ — учитывает улучшение охлаждения кабелей при отказе от прокладки трех фаз сомкнутым треугольником $s = d$ в пользу разомкнутого треугольника $s = D$ (рисунок 3б); $K_Т \lessgtr 1$ — учитывает влияние самой трубы (как для КЛ 6–35 кВ).

Опыт моделирования процессов КЛ, полученный в специализированных программах, позволил установить, что у многих КЛ 110–500 кВ справедливо $K_S \cdot K_Т$ = 1,05 ÷ 1,15. Таким образом, пофазная про-



а) **б)**

Рис. 3. Кабельная линия 110–500 кВ, проложенная в полимерных трубах: а) однофазный кабель; б) три однофазных кабеля

кладка кабелей в полимерных трубах приводит к увеличению длительно допустимого тока КЛ на (5 ÷ 15)%, что означает $I_{доп(т)}$ = (1,05 ÷ 1,15) · $I_{доп}$.

ОТЛИЧИЯ СТАРОГО И НОВОГО ПОКОЛЕНИЙ КЛ

Поправочный коэффициент $K_Т$ = 0,9, учитывающий влияние труб на допустимый ток КЛ, впервые появился в нормативных документах в то время, когда у кабельных сетей были следующие особенности:

– в трубах размещались одновременно все фазы КЛ, а пофазная прокладка не применялась (в трубах, заполненных воздухом, прокладывались главным образом только КЛ 6–35 кВ трехфазной конструкции);
– трубы укладывались открытым способом на дно траншеи на глубине не более 1,5 м, так как другие способы были мало известны (в частности, не было закрытого способа ГНБ, для которого, как правило, характерно повышенное удельное тепловое сопротивление грунта $\rho_Г$ вокруг КЛ, связанное со значительной глубиной прокладки $h_Г$ вплоть до 20 м);
– трубы были преимущественно из асбеста, который по сути являлся теплоизолятором и обладал значительным удельным тепловым сопротивлением, достигающем величины $\rho_Т$ = 10 (м·К)/Вт, что в 5 раз больше сопротивления $\rho_Т$ = 2 (м·К)/Вт современных полимерных труб.

Коэффициент $K_Т$ = 0,9 вполне корректно описывал влияние труб на допустимый ток «старых» КЛ, однако указанный коэффициент совершенно не учитывает, что за последние 20 лет в кабельных сетях произошли существенные изменения — поменялась и конструкция кабелей, и способы их прокладки, и материалы трубной продукции. Не стоит удивляться, что коэффициент $K_Т$ = 0,9 больше не отражает истинных тепловых процессов КЛ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Размещение кабелей в трубах стало одним из распространенных способов прокладки КЛ всех классов напряжения. Влияние труб на длительно допустимый ток КЛ многообразно, и его невозможно описать введением универсального поправочного коэффициента $K_Т$ = 0,9. В целой серии случаев трубная прокладка не только не снижает допустимый ток КЛ, но даже, напротив, повышает его, что особенно заметно при пофазной прокладке кабелей в трубах.

Чтобы корректно учитывать влияние труб на допустимый ток и не завышать сечение жилы $F_Ж$ кабелей, следует проводить тепловые расчеты КЛ не через систему упрощенных поправочных коэффициентов, а с помощью точных научно-обоснованных методик, учитывающих все влияющие факторы и реализованных в различных специализированных компьютерных программах. Такие программные продукты использует инжиниринговый центр Энерготэк, выполняя на безвозмездной основе и тепловые расчеты, и многие другие, необходимые при проектировании современных КЛ. Р

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент