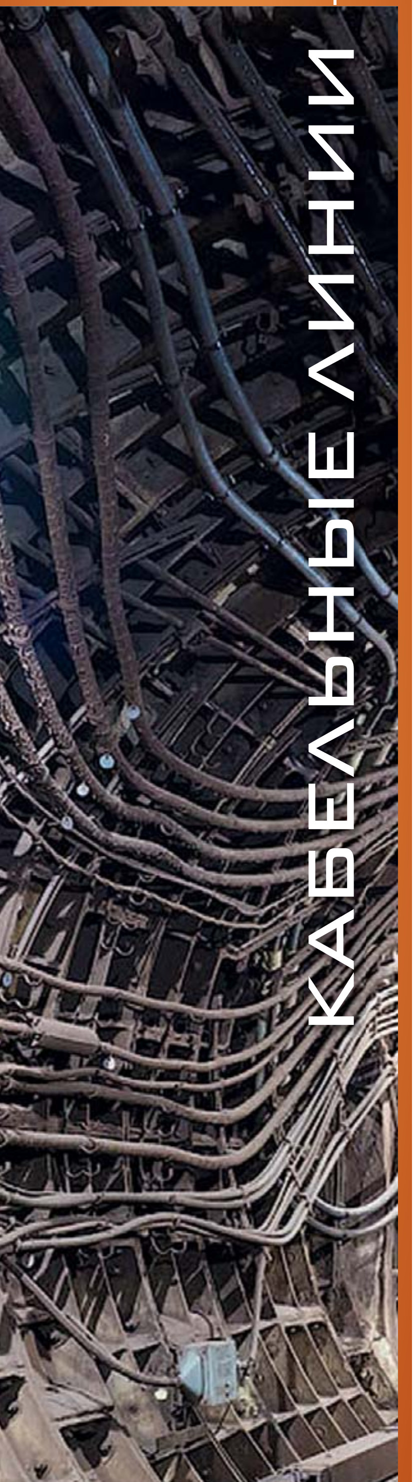

Расчет пропускной способности КЛ 6–35 кВ

DOI: УДК 621.315.21

При проектировании силовых кабельных линий (КЛ) одной из задач является тепловой расчет КЛ и выбор достаточного сечения жилы с учетом схемы заземления экранов и условий прокладки кабелей. Для КЛ высокого напряжения 110–500 кВ такой расчет проводится максимально ответственно, с применением компьютерных программ, тогда как для КЛ среднего напряжения 6–35 кВ в проекте зачастую ограничиваются упрощенным выбором сечения жилы, опираясь на каталожные значения допустимых токов и систему поправочных коэффициентов. В статье демонстрируется, что этот подход к выбору КЛ 6–35 кВ может приводить к заметным ошибкам.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»

Кабельные линии среднего напряжения 6–35 кВ могут быть выполнены как однофазными, так и трехфазными кабелями (рисунок 1). Хотя однофазные кабели имеют определенные преимущества перед трехфазными кабелями (например, при производстве и монтаже), для проектировщика применение однофазных кабелей означает, что необходимо дать ответы на дополнительные важные вопросы, среди которых:

– оптимальное расположение кабелей фаз A, B, C друг относительно друга;
– рациональный выбор числа труб в переходах (одна общая или три отдельных);
– обоснование наиболее выгодной схемы заземления экранов (с двух сторон, с одной стороны, транспозиция экранов).

Указанные вопросы усложняют выбор окончательного решения по обустройству КЛ 6–35 кВ и, в частности, увеличивают число вариантов, которые следует рассмотреть при выполнении теплового расчета КЛ и выборе сечения жилы.

Стандартом, регламентирующим тепловой расчет КЛ, является ГОСТ Р МЭК [1], содержащий необходимые формулы для расчета допустимого тока КЛ в зависимости от схемы заземления экранов и условий прокладки. К сожалению, документ является сложным для повседневного использования, так как содержит большое число формул и ко-

Рис. 1. Кабели 6–35 кВ однофазной и трехфазной конструкции

Ключевые слова:
кабельная линия, однофазный кабель, сшитый полиэтилен, тепловой расчет, выбор сечения жилы, заземление экранов, прокладка в трубах

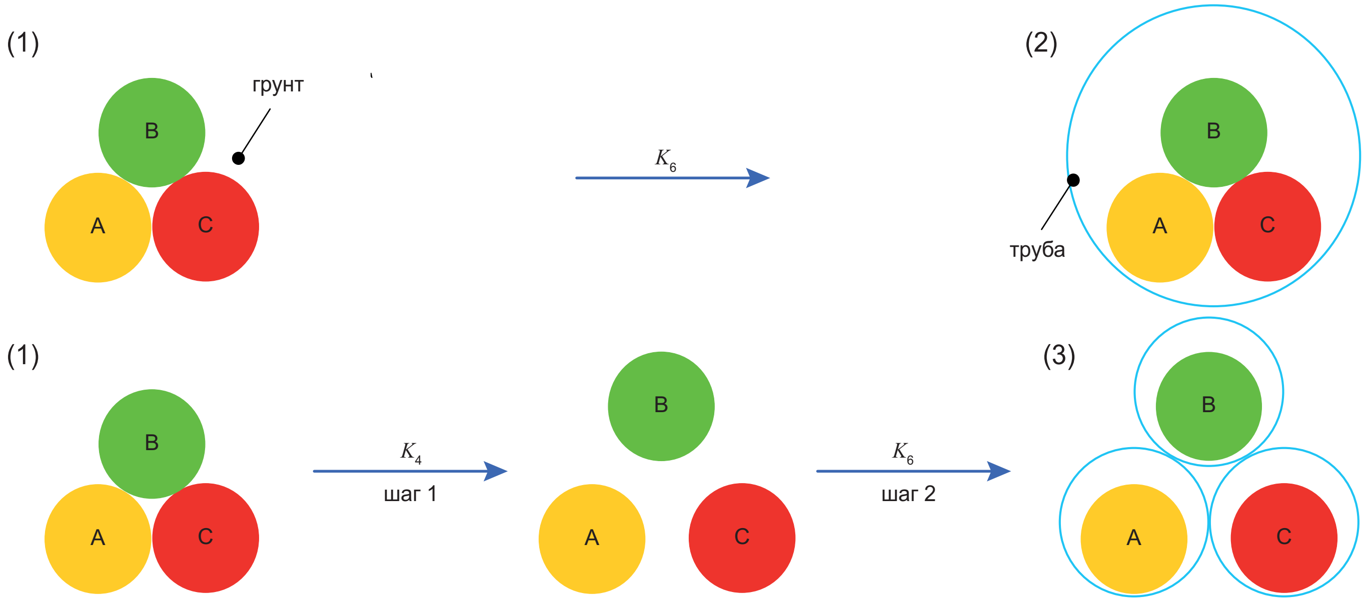

Рис. 2. Три основных способа прокладки КЛ 6–35 кВ в грунте

эффициентов, призванных учесть максимальное число влияющих факторов. Чтобы упростить применение [1], проектировщики стараются автоматизировать расчеты при помощи задания формул в EXCEL или же вовсе ориентируются на использование тех или иных платных компьютерных программ, опирающихся на методику [1].

Описанные подходы кажутся оправданными для проведения тепловых расчетов ответственных КЛ 110–500 кВ, тогда как для расчета многочисленных КЛ 6–35 кВ они применяются далеко не всегда, и вместо этого выбор кабелей выполняется с помощью системы поправочных коэффициентов. Остановимся на выборе КЛ 6–35 кВ подробнее и покажем нежелательность применения системы поправочных коэффициентов.

Допустимый ток жилы КЛ 6–35 кВ зачастую определяется по формуле вида [2], опирающейся на каталожные данные кабельных заводов (приведенные там таблицы):

$$I_{\text{ДОП}} = I_{\text{Б}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \ldots \cdot K_8,$$

где $I_{\text{Б}}$ — допустимый ток жилы КЛ при базовых условиях прокладки; $K_1 \div K_8$ — система поправочных коэффициентов, учитывающая отличие реальных условий прокладки КЛ от базовых.

Наибольшее число поправочных коэффициентов характерно при прокладке КЛ в грунте и использовании при этом однофазных кабелей: K_1 — на температуру грунта; K_2 — на глубину прокладки; K_3 — на тепловое сопротивление грунта; K_4 — на расстояние между фазами; K_5 — на число цепей; K_6 — на наличие труб; K_7 — на потери в экранах; K_8 — на график нагрузки.

Применение системы отдельных поправочных коэффициентов предполагает, что они не зависят друг от друга. Покажем, что это не так, для чего проведем подробные тепловые расчеты на примере одноцепной КЛ 35 кВ и затем — двухцепной.

ПОПРАВОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

В статье [3] было показано, что прокладка однофазных кабелей КЛ 6–35 кВ в ряд на расстоянии друг от друга (в плоскости) может вызвать значительный экономический ущерб, связанный с наличием потерь в экранах кабелей, необходимостью оплаты этих потерь, рисками перегрева кабелей и пожарами, особенно на трубных участках трассы. Поэтому сегодня рассмотрим размещение кабелей КЛ 6–35 кВ только треугольником, как это показано на рисунке 2:

1) фазы сомкнутым треугольником;
2) фазы сомкнутым треугольником в общей трубе;
3) фазы в отдельных трубах, уложенных пучком.

Тепловая схема замещения одной фазы КЛ показана на рисунке 3. Тепло, которое выделилось в результате прохождения тока в жиле и наведенного тока в экране, должно пройти цепочку из тепловых сопротивлений изоляции и наружной оболочки кабеля, воздуха в трубе и боковой стенки трубы (при наличии трубы), окружающего грунта. Роль каждого из элементов на фоне остальных может варьироваться по мере изменения параметров грунта (глубина, удельное тепловое сопротивление грунта и температура) и параметров труб (например, число труб или их диаметр). Поэтому, например, влияние трубы на допустимый ток КЛ оказывается различным на малой и на большой глубине прокладки, для хорошо проводящих и плохо проводящих грунтов и т.п. Иначе говоря, поправочные коэффициенты (на свойства грунта, на прокладку в трубах и пр.) тесно связаны друг с другом и не являются взаимонезависимыми. Покажем это расчетом.

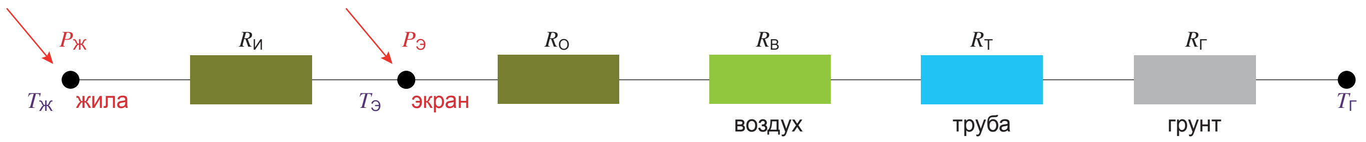

Рис. 3. Основные элементы тепловой схемы охлаждения кабеля

Табл. 1. Допустимый ток жилы (А) для одноцепной КЛ 35 кВ

Глубина, м	(1)	(2)		(3)	
	в грунте	1×110 мм	1×160 мм	3×110 мм	3×160 мм
	грунт 1,2 Км/Вт / грунт 2,0 Км/Вт				
0,5	608 / 491	518 / 448	540 / 471	610 / 518	641 / 550
0,7	585 / 471	504 / 433	524 / 453	587 / 494	615 / 522
1	**563 / 451**	**489 / 417**	**508 / 436**	**565 / 472**	**590 / 497**
1,5	540 / 432	475 / 402	492 / 418	543 / 451	565 / 472
2	526 / 420	465 / 392	481 / 407	529 / 437	549 / 456
3	507 / 404	452 / 379	467 / 393	510 / 420	529 / 437
5	487 / 386	438 / 365	451 / 377	490 / 400	506 / 415

ОДНОЦЕПНАЯ КЛ

Рассмотрим одноцепную КЛ 35 кВ, которая выполнена однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Положим следующие исходные данные:

- жила сечением 300 мм² из меди;
- экран сечением 50 мм² из меди;
- экраны кабелей не имеют потерь (выполнено одностороннее заземление экранов или их транспозиция);
- глубина прокладки в грунте — от 0,5 до 5,0 м;
- тепловое сопротивление грунта — 1,2 Км/Вт (или 2,0 Км/Вт);
- температура грунта — 20°С;
- полимерные трубы (при наличии) имеют наружный диаметр 110 мм или 160 мм (в обоих случаях толщина стенки — 5 мм).

Для трех способов прокладки кабелей КЛ, показанных на рисунке 2, в таблице 1 даны результаты подробного теплового расчета по [1]. В ячейках указаны значения тока для грунта 1,2 Км/Вт (до косой черты) и для грунта 2,0 Км/Вт (после). Далее на основе этой таблицы можно получить некоторые поправочные коэффициенты.

Поправка на глубину. Если в таблице 1 разделить токи, указанные в строках, на значения токов при глубине 1 м, то получится таблица 2, содержащая поправку на глубину прокладки (K_2). Из таблицы 2 видно, что коэффициент K_2 зависит не только от самой глубины, но еще:

- от наличия труб;
- от числа труб и их диаметра;
- от теплового сопротивления грунта.

Таблица 2 показывает, что в зависимости от перечисленных факторов, например, при глубине 5 м, коэффициент K_2 может быть от 0,84 до 0,90, и отличие двух значений достигает 7%. Вместе с тем кабельные каталоги всегда указывают одно конкретное K_2 для каждой конкретной глубины прокладки.

Поправка на трубы. Если в таблице 1 разделить токи (2) на значения токов (1), то получится поправка на прокладку в общей трубе (K_6). Если в таблице 1 разделить токи (3) на значения токов (1), то получится поправка на прокладку в трех отдельных трубах (K_4K_6), которая, согласно рисунку 2, учитывает сразу два обстоятельства: увеличение расстояния между фазами (K_4) и наличие труб (K_6).

Коэффициенты K_6 и K_4K_6 приведены в таблице 3 и позволяют оценить влияние труб на допустимый ток КЛ. Видно, что важен не только факт наличия труб, но также:

- глубина прокладки;
- число труб и их диаметр;
- тепловое сопротивление грунта.

Таблица 3 показывает, что в зависимости от перечисленных факторов, трубы могут как снизить допустимый ток до 0,85, так и повысить его до 1,12 — отличие двух указанных значений достигает 32%. Ясно, что утверждение кабельных каталогов и ряда норм, что прокладка в трубах снижает допустимый ток КЛ до уровня 0,9 от исходного, ошибочно.

ДВУХЦЕПНАЯ КЛ

Рассмотрим двухцепную КЛ 35 кВ, состоящую из двух одноцепных, описанных ранее. Пусть каждая из цепей размещена или в грунте (1), или в одной общей трубе (2) диаметром 160 мм (рисунок 2). Положим, что расстояние между центрами двух цепей

Табл. 2. Поправочный коэффициент на глубину (K_2)

Глубина, м	(1)	(2)		(3)	
	в грунте	1×110 мм	1×160 мм	3×110 мм	3×160 мм
	грунт 1,2 Км/Вт / грунт 2,0 Км/Вт				
0,5	1,08 / 1,09	1,06 / 1,07	1,06 / 1,08	1,08 / 1,10	1,09 / 1,11
0,7	1,04 / 1,04	1,03 / 1,04	1,03 / 1,04	1,04 / 1,05	1,04 / 1,05
1	**1,00 / 1,00**	**1,00 / 1,00**	**1,00 / 1,00**	**1,00 / 1,00**	**1,00 / 1,00**
1,5	0,96 / 0,96	0,97 / 0,96	0,97 / 0,96	0,96 / 0,96	0,96 / 0,95
2	0,93 / 0,93	0,95 / 0,94	0,95 / 0,93	0,94 / 0,93	0,93 / 0,92
3	0,90 / 0,90	0,92 / 0,91	0,92 / 0,90	0,90 / 0,89	0,90 / 0,88
5	0,87 / 0,86	0,90 / 0,88	0,89 / 0,86	0,87 / 0,85	0,86 / 0,84

Табл. 3. Поправочный коэффициент на трубы (K_6 или K_4K_6)

Глубина, м	(1)	(2) — K_6		(3) — K_4K_6	
	в грунте	1×110 мм	1×160 мм	3×110 мм	3×160 мм
	грунт 1,2 Км/Вт / грунт 2,0 Км/Вт				
0,5	**1,00 / 1,00**	0,85 / 0,91	0,89 / 0,96	1,00 / 1,05	1,05 / 1,12
0,7	**1,00 / 1,00**	0,86 / 0,92	0,90 / 0,96	1,00 / 1,05	1,05 / 1,11
1	**1,00 / 1,00**	0,87 / 0,92	0,90 / 0,97	1,00 / 1,05	1,05 / 1,10
1,5	**1,00 / 1,00**	0,88 / 0,93	0,91 / 0,97	1,01 / 1,04	1,05 / 1,09
2	**1,00 / 1,00**	0,88 / 0,93	0,91 / 0,97	1,01 / 1,04	1,04 / 1,09
3	**1,00 / 1,00**	0,89 / 0,94	0,92 / 0,97	1,01 / 1,04	1,04 / 1,08
5	**1,00 / 1,00**	0,90 / 0,95	0,93 / 0,98	1,01 / 1,04	1,04 / 1,08

составляет 0,3 м, а грунт всегда имеет тепловое сопротивление 1,2 Км/Вт.

В таблице 4 даны результаты подробного теплового расчета, выполненные по [1], причем здесь для удобства сравнения приведены одновременно и старые результаты для одноцепной КЛ (до косой черты) и новые результаты для двухцепной КЛ (после). Далее на основе таблицы можно получить некоторые поправочные коэффициенты.

Поправка на глубину. Если в таблице 4 разделить токи, указанные в строках, на значения токов при глубине 1 м, то получится таблица 5, содержащая поправку на глубину прокладки (K_2). Из таблицы 5 видно, что коэффициент K_2 зависит не только от самой глубины, но еще:

Табл. 4. Допустимый ток жилы (А) для одноцепной/двухцепной КЛ 35 кВ

Глубина, м	(1)	(2)
	в грунте	1×160 мм
	одна цепь / две цепи	
0,5	608 / 529	540 / 486
0,7	585 / 500	524 / 463
1	**563 / 473**	**508 / 442**
1,5	540 / 447	492 / 421
2	526 / 431	481 / 408
3	507 / 411	467 / 391
5	487 / 389	451 / 372

Табл. 5. Поправочный коэффициент на глубину прокладки (K_2)

Глубина, м	(1) в грунте	(2) 1×160 мм
	одна цепь / две цепи	
0,5	1,08 / 1,12	1,06 / 1,10
0,7	1,04 / 1,06	1,03 / 1,05
1	**1,00 / 1,00**	**1,00 / 1,00**
1,5	0,96 / 0,95	0,97 / 0,95
2	0,93 / 0,91	0,95 / 0,92
3	0,90 / 0,87	0,92 / 0,88
5	0,87 / 0,82	0,89 / 0,84

Табл. 6. Поправочные коэффициенты на трубы (K_6) и на число цепей (K_5)

Глубина, м	На трубы 1×160мм	На число цепей
	одна цепь / две цепи	в грунте / 1×160 мм
0,5	0,89 / 0,92	0,87 / 0,90
0,7	0,90 / 0,93	0,85 / 0,88
1	**0,90 / 0,93**	**0,84 / 0,87**
1,5	0,91 / 0,94	0,83 / 0,86
2	0,91 / 0,95	0,82 / 0,85
3	0,92 / 0,95	0,81 / 0,84
5	0,93 / 0,96	0,80 / 0,82

Табл. 7. Допустимый ток жилы (А) для вариантов одноцепной КЛ 35 кВ

Вариант		Потери в экранах КЛ	Допустимый ток А	Допустимый ток %
1	а	нет	473	100
	б	есть	452	96
2	а	нет	442	93
	б	есть	422	89
3	а	нет	472	100
	б	есть	399	84

– от наличия труб;
– от числа цепей (одна или две).

Таблица 5 показывает, что в зависимости от перечисленных факторов, например, при глубине 5 м, коэффициент K_2 может быть от 0,82 до 0,89, и отличие двух значений достигает 9%. Вместе с тем кабельные каталоги всегда указывают одно конкретное K_2 для каждой конкретной глубины прокладки.

Поправка на трубы. Если в таблице 4 разделить токи (2) на значения токов (1), то получится поправка на прокладку в общей трубе (K_6) — она приведена в среднем столбце таблицы 6: как для одноцепной КЛ (до косой черты), так и для двухцепной (после). Из среднего столбца таблицы 6 видно, что важен не только факт наличия труб, но также:
– глубина прокладки;
– число цепей (одна или две).

Таблица 6 показывает, что в зависимости от перечисленных факторов прокладка в трубах может как снизить допустимый ток и до уровня 0,89, так и до уровня 0,96 — отличие двух указанных значений достигает 8%. Ясно, что утверждение кабельных каталогов и ряда норм о том, что прокладка кабелей в трубах снижает допустимый ток КЛ до уровня 0,9 от исходного, ошибочно.

Поправка на число цепей. Если в таблице 4 разделить токи после косой черты на токи до косой черты, то получится поправка на две цепи (K_5) — она приведена в последнем столбце таблицы 6. В этом столбце таблицы 6 в ячейках указаны значения как для прокладки в грунте (до косой черты), так и для прокладки в трубах (после). Из последнего столбца таблицы 6 видно, что важен не только факт наличия двух цепей, но также:
– глубина прокладки;
– способ прокладки (грунт или трубы).

Последний столбец таблицы 6 показывает, что в зависимости от перечисленных факторов, появление второй цепи КЛ может снизить допустимый ток каждой цепи и до уровня 0,80 от одноцепной КЛ, и до уровня 0,90 — отличие двух указанных значений достигает 13%. Ясно, что влияние числа цепей на допустимый ток КЛ гораздо сложнее, чем это обычно следует из кабельных каталогов и ряда норм, где его пытаются учесть одним по-

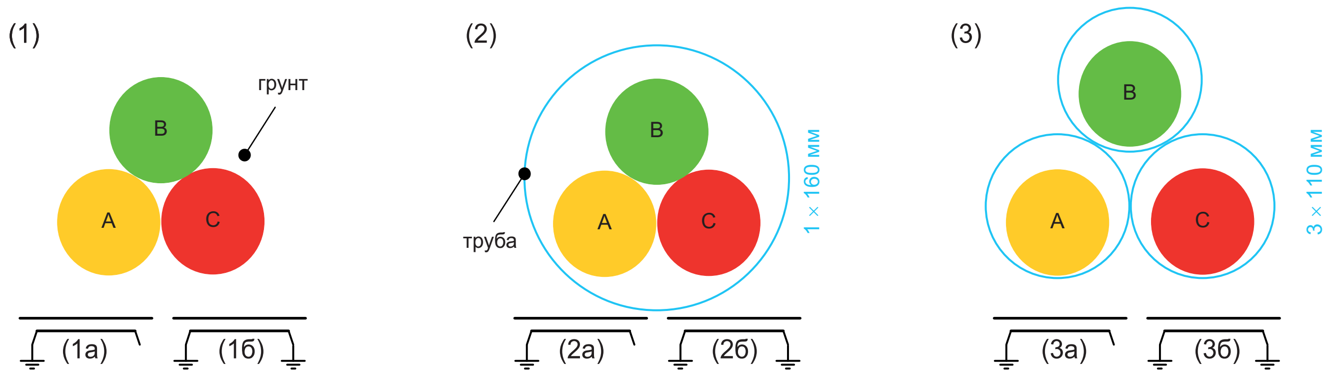

Рис. 4. Шесть вариантов КЛ 6–35 кВ в грунте, которые следует рассчитывать

стоянным значением коэффициента K_5, вне зависимости от глубины, способа прокладки и других факторов.

ПОЛНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КЛ

Приведенные выше примеры продемонстрировали, что выбор достаточного сечения жилы КЛ с помощью системы поправочных коэффициентов может приводить к заметным неточностям. Если каждый из коэффициентов, в зависимости от влияющих факторов, способен дать погрешность в 5–10% и более, то вся система многочисленных коэффициентов может привести к ошибке, достигающей 30–50%, что неприемлемо.

Ниже дадим пример того, как следует проводить расчет КЛ, если поправочные коэффициенты использовать не рекомендуется. Пусть рассмотренная ранее одноцепная КЛ 35 кВ проложена в грунте 1,2 Км/Вт, на глубине 1 м (до центра трех фаз). Выберем лучший из шести основных вариантов прокладки такой КЛ, показанных на рисунке 4. Ранее в статье расчеты выполнялись без потерь в экранах, что отвечает вариантам (а).

Результаты теплового расчета по методике [1] даны в таблице 7 и выражены как в амперах, так и в % по отношению к варианту (1а). Если поставлена задача обустроить КЛ с наибольшим возможным допустимым током, то из таблицы 7 видно, что варианты (1а) и (3а) без потерь в экранах являются наилучшими, а вариант (3б) наихудшим.

Если окончательный выбор варианта предполагает отсутствие наведенных токов и потерь мощности в экранах, то далее необходимо отдельно рассчитать, как именно этого добиться — путем одностороннего заземления экранов или путем транспозиции.

Согласно [3], вне зависимости от допустимого тока КЛ, следует проводить расчет стоимости потерь в мощности в двусторонне заземленных экранах (за год и за 30 лет). Обычно стоимость потерь значительна при любой попытке разместить три однофазных кабеля не сомкнутым треугольником, а на расстоянии друг друга. Поэтому вариант (3б) является наихудшим не только с точки зрения допустимого тока, но и стоимости потерь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выбор сечения жилы КЛ 6–35 кВ на основе системы поправочных коэффициентов не рекомендуется, поскольку может приводить к значительным ошибкам (до 50%).
2. Для выбора сечения жилы КЛ 6–35 кВ следует использовать методику ГОСТ Р МЭК [1] или любое программное обеспечение, в котором такая методика реализована.
3. При проведении тепловых расчетов и выборе сечения жилы КЛ 6–35 кВ обязательно следует учитывать процессы в экранах, для чего необходимо рассматривать разные схемы заземления экранов — с потерями в экранах или без таких потерь.
4. Выбор оптимальной реализации КЛ 6–35 кВ должен предполагать рассмотрение сразу нескольких вариантов, отличающихся друг от друга особенностями прокладки на трубных участках трассы, а также схемами заземления экранов.
5. При итоговом выборе варианта реализации КЛ 6–35 кВ важно уделять внимание не только допустимому току жилы, но также и стоимости потерь мощности в экранах. Даже если КЛ удовлетворяет заказчика по величине допустимого тока, то возможно она окажется неприемлема с точки зрения стоимости потерь мощности в экранах.
6. Сравнивая тепловые расчеты КЛ 6–35 кВ и КЛ 110–500 кВ, можно утверждать, что для КЛ 110–500 кВ такие расчеты проще, поскольку в сетях высокого напряжения требуется рассмотрение меньшего числа вариантов, ведь кабели всегда размещаются в трех отдельных трубах (не в одной общей), всегда проектируются без потерь мощности в экранах (двустороннее заземление экранов не применяется), как правило, имеют не более 2 цепей (тогда как кабели среднего напряжения могут иметь до 10–20 цепей).
7. При выполнении теплового расчета КЛ любого класса напряжения следует помнить, что прокладка в трубах позволяет увеличить расстояние между нагретым кабелем и окружающим грунтом, что снижает температуру грунта и уменьшает последствия такого негативного явления, как «высыхание грунта», то есть позволяет с большей долей уверенности утверждать, что в процессе эксплуатации КЛ удельное тепловое сопротивление грунта не увеличится по сравнению с ожидаемыми значениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200072879.
2. Дмитриев М.В. Система поправочных коэффициентов при выборе кабелей // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2017, № 4(43). С. 84–90.
3. Дмитриев М.В. Выбор взаимного расположения кабелей 6–35 кВ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2025, № 2(89). С. 62–66.

REFERENCES

1. GOST R IEC 60287-1-1-2009. Electrical cables. Calculation of the rated current load. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200072879.
2. Dmitriev M.V. System of correction factors when choosing cables. ELECTRIC POWER. Transmission and distribution, 2017, no. 4(43), pp. 84-90.
3. Dmitriev M.V. Optimal arrangement of 6-35 kV single-core cables. ELECTRIC POWER. Transmission and distribution, 2025, no. 2(89), pp. 62-66.