

Система поправочных коэффициентов при выборе кабелей

УДК 621.315.21

Вопросы выбора сечения жилы современных кабельных линий 6–500 кВ считаются уже достаточно проработанными, они отражены в каталогах ведущих кабельных заводов, в международных и российских стандартах. Тем не менее, есть основания полагать, что в ряде случаев обоснование достаточного сечения жилы делается со значительными ошибками.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

ВВЕДЕНИЕ

Современные кабельные сети, как правило, строятся однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Наиболее распространенные способы взаимного расположения фаз даны на рисунке 1. Важнейшими разделами проектной документации являются не только обоснование сечения жилы $F_{ж}$, но также и сечения экранов $F_{э}$, и схемы их заземления. Три перечисленных фактора равноправно влияют на тепловой режим кабельной линии (КЛ), их неверный учет может привести к перегреву изоляции и повреждению кабеля вдоль всей трассы линии.

Проверка корректности принятых в проекте решений выполняется путем так называемого «теплового расчета КЛ», который должен, в частности, показать, что в нормальном режиме работы отсутствует перегрев изоляции КЛ сверх допустимой температуры, составляющей для сшитого полиэтилена (СПЭ) величину 90 °С. В настоящее время тепловой расчет можно выполнить:

- при помощи системы таблиц, приведенных в Стандарте ПАО «ФСК ЕЭС» [1] или в каталогах производителей кабелей;
- при помощи специализированных компьютерных программ, в которых заложены или известные формулы ГОСТ Р МЭК [2], или же общие физические принципы и законы (при этом расчет ведется, например, «методом конечных элементов»);
- вручную по формулам ГОСТ Р МЭК [2].

Имея столь внушительный перечень известных способов расчета, полезным будет провести сравнительный анализ результатов их использования.

Ключевые слова:

кабельная линия, однофазный кабель, тепловой расчет, прокладка кабелей в трубах, допустимый ток кабеля, поправочные коэффициенты

Keywords:

power cable line, single-phase cable, thermal calculation, pipe-type cables placing, permissible current of cable, correction indexes

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ

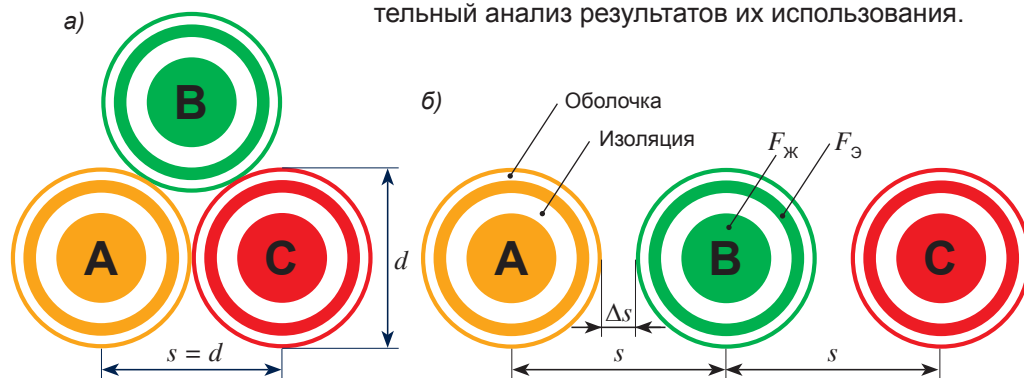


Рис. 1. Прокладка однофазных кабелей сомкнутым треугольником (а) или в ряд (б)

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Полноценный тепловой расчет кабельной линии требует наличия специальных компьютерных программ (весьма дорогих), а также навыков обращения с ними. Чтобы упростить работу проектировщиков, многие кабельные заводы провели подобные расчеты собственными силами, представив результаты в своих каталогах. Обычно речь идет об одной основной таблице, в которой для разных сечений жилы указаны длительно допустимые токи КЛ при неких «базовых» условиях прокладки, и еще о целой серии дополнительных таблиц с поправочными коэффициентами, позволяющими сделать корректировку «базовых» цифр к условиям проектируемой КЛ. Описанный подход реализован, например, в каталогах заводов АBB, NEXANS, «Севкабель», также он есть и в СТО ФСК [1]. Таким образом, допустимый ток $I_{\text{доп}}$ для КЛ определяется согласно выражению

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{б}} \cdot (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_7) / K_8$$

где $I_{\text{б}}$ — «базовый» ток, K_1, \dots, K_8 — поправочные коэффициенты.

Несмотря на подробные каталоги, заводы, при необходимости, дополнительно проверяют тепловой режим КЛ в компьютерных программах, отражая результаты в пояснительных записках, сопровождаемых цветными картинками теплового поля КЛ. Особый интерес подобные расчеты приобретают в сложных случаях, среди которых многоцепные КЛ или прокладка КЛ в трубах, где требуется учет конвекции воздуха в замкнутом объеме. В частности, компьютерное моделирование выполняют ведущие российские кабельные заводы «Таткабель», «Эстралин», «Севкабель».

Если говорить о «ручном» расчете, то методика ГОСТ Р МЭК [2] объемная, происхождение некоторых формул не вполне понятно, система обозначений сложна и непривычна. Поэтому здесь не будем делать расчеты по [2], а заменим их более простыми аналитическими вычислениями из [3], легко проверяемыми, но зато не позволяющими учесть ряд факторов (например, сразу несколько цепей КЛ).

Результатами и компьютерных, и «ручных» расчетов являются допустимые токи при тех или иных условиях прокладки КЛ. По аналогии с СТО ФСК [1] и каталогами будем представлять их в виде «базового» тока $I_{\text{б}}$ и набора поправочных коэффициентов K_1, \dots, K_8 , что даст возможность сопоставить все цифры, полученные различными способами.

«БАЗОВЫЙ» ТОК

В каталогах кабельных заводов «базовые» токи обычно указаны для четырех основных случаев, однако пример расчета приведем только для первого из них, как наиболее часто встречающегося на практике:

- прокладка фаз в грунте сомкнутым треугольником (рисунок 1а);
- прокладка фаз в грунте в ряд (рисунок 1б);
- прокладка фаз на воздухе сомкнутым треугольником;
- прокладка фаз на воздухе в ряд.

Подходы к тепловому расчету КЛ разных классов напряжения, выполненных однофазными кабелями, принципиально не отличаются друг от друга. В качестве примера рассмотрим КЛ 110 кВ с тремя однофазными кабелями, имеющими медную жилу 800 мм² и медный экран 185 мм². Пусть фазы уложены в грунте сомкнутым треугольником, экраны не имеют потерь (сделана транспозиция экранов [4] или их одностороннее заземление), удельное тепловое сопротивление грунта $p_{\text{г}} = 1 \text{ м} \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

«Базовые» токи $I_{\text{б}}$, полученные для данной КЛ 110 кВ из разных источников, были пересчитаны к температуре грунта $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и глубине прокладки $h = 1 \text{ м}$, а все результаты сведены в таблицу 1 в порядке возрастания тока.

Из таблицы 1 следует, что разброс между минимальным (960 А) и максимальным (1007 А) токами $I_{\text{б}}$ не превышает всего лишь 5%. Если говорить не о прокладке фаз сомкнутым треугольником (таблица 1), а о расположении в ряд, то разброс заметнее. Так, при расстоянии в свету Δs между краями фаз, равном диаметру кабеля d (около 70 мм), для грунта разные источники приводят следующие цифры:

- АBB дает 1035 А (это на 8% выше, чем ток 960 А, приведенный в таблице 1);

Табл. 1. Допустимые токи для жилы 800 мм² КЛ 110 кВ в «базовых» условиях при прокладке фаз сомкнутым треугольником в грунте

№	Источник	Ток $I_{\text{б}}$, А	Комментарии
1	Каталог АBB	960	В каталоге дан ток 960 А при $h = 1,0 \text{ м}$ и $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Пересчет не требуется.
2	Методика [3]	969	Согласно таблице 3 статьи ток при $h = 3 \text{ м}$ составляет 0,9 от тока при $h = 1 \text{ м}$. Коэффициент 0,9 будет использован далее в № 5 и 6.
3	Каталог «Севкабель»	976	В каталоге дан ток 968 А при $h = 1,5 \text{ м}$ и $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; для $h = 1 \text{ м}$ дан коэффициент 1,05; для $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ дан коэффициент 0,96. Получаем $968 \cdot 1,05 \cdot 0,96 = 976 \text{ А}$.
4	Каталог NEXANS	989	В каталоге дан ток 960 А при $h = 1,3 \text{ м}$ и $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; для $h = 1 \text{ м}$ дан коэффициент 1,03. Получаем $960 \cdot 1,03 = 989 \text{ А}$.
5	Расчет «Таткабель»	1001	В расчете дан ток 938 А при $h = 3 \text{ м}$ и $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; пересчет к $h = 1 \text{ м}$ сделаем через 0,9 (см. № 2); пересчет к $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ сделаем через 0,96 (см. № 3). Получаем $938/0,9 \cdot 0,96 = 1001 \text{ А}$.
6	Расчет «Эстралин»	1003	В расчете дан ток 903 А при $h = 3 \text{ м}$ и $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; пересчет к $h = 1 \text{ м}$ сделаем через 0,9 (см. № 2). Получаем $903/0,9 = 1003 \text{ А}$.
7	СТО ФСК [1]	1007	В стандарте дан ток 959 А при $h = 1,5 \text{ м}$ и $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; для $h = 1 \text{ м}$ дан коэффициент 1,04. Получаем $959 \cdot 1,04 = 1007 \text{ А}$.

Табл. 2. Поправочный коэффициент на температуру грунта (K_1)

Температура T , °С	СТО ФСК [1]	ABB	NEXANS	«Севкабель»	Метод [3]
10	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07
15	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04
20	1	1	1	1	1
25	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96
30	0,93	0,93	0,92	0,93	0,93
35	0,89	0,89	0,88	0,89	0,88
40	0,86	0,84	0,84	0,84	0,84

- «Севкабель» дает 1001 А (на 2,5% выше 976 А);
- NEXANS дает 1071 А (на 8% выше 989 А);
- СТО ФСК дает 1069 А (на 6% выше 1007 А).

Как видно, переход от сомкнутого треугольника к рядной прокладке дает рост допустимого тока на 6–8%, за исключением завода «Севкабель», который называет необычно малое значение в 2,5%. Все указанные величины справедливы только для случая отсутствия потерь в экранах, то есть для случая их транспозиции или заземления только с одной стороны [4]. Если же экраны заземлены с двух сторон, то прокладка в ряд приводит к росту площади экранных контуров, росту наведенных токов 50 Гц и вызванных ими потерь мощности, что в итоге может снизить допустимые токи КЛ в сравнении с прокладкой фаз сомкнутым треугольником.

ТЕМПЕРАТУРА ГРУНТА (K_1)

«Севкабель» в качестве «базовой» называет температуру 15 °С, а все остальные источники — при $T = 20$ °С. Для удобства сравнения коэффициенты «Севкабеля» были пересчитаны так, чтобы у этого завода $K_1 = 1,0$ отвечало не 15 °С, а $T = 20$ °С.

По мнению автора, допустимый ток для КЛ, проложенной в грунте, зависит не только от температуры грунта, но также и от температуры воздуха над грунтом, ведь охлаждение кабеля, в конечном счете, идет за счет того, что тепло поднимается на поверхность грунта и отводится в воздух. Тем не менее, большинство источников при прокладке в земле оперируют только понятием температуры грунта, не говоря про температуру воздуха.

В таблице 2 приведены поправочные коэффициенты K_1 на температуру грунта, видно, что у заводов они мало отличаются. Какие именно температуры грунта являются расчетными в тех или иных регионах, указано в Приложении М к стандарту [1].

ГЛУБИНА ПРОКЛАДКИ (K_2)

«Севкабель» и СТО ФСК в качестве «базовой» называют глубину $h = 1,5$ м, для NEXANS она 1,3 м, для ABB — 1,0 м. Для удобства сравнения коэффициенты «Севкабеля», СТО ФСК, NEXANS были пересчитаны так, чтобы $K_2 = 1,0$ отвечало не случаям $h = 1,5$ или 1,3 м, а глубине $h = 1,0$ м. Результаты даны в таблице 3 и показывают, что при больших глубинах, характерных для прокладки КЛ методом горизонтально

Табл. 3. Поправочный коэффициент на глубину прокладки (K_2)

Глубина h , м	СТО ФСК [1]	ABB	NEXANS	«Севкабель»	Метод [3]
1	1	1	1	1	1
1,5	0,96	0,95	0,95	0,95	0,96
2	0,93	в каталоге ABB нет глубины более 2 м	0,92	0,90	0,93
3			0,88	0,82	0,90
4			0,85	0,79	0,87
5			0,83	0,77	0,86
10		1,5 м	нет	0,75	0,81

направленного бурения (ГНБ), отличие коэффициентов K_2 , полученных от разных источников, может достигать 10% и более. Самое весомое снижение допустимого тока при больших глубинах демонстрирует «Севкабель».

ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТА (K_3)

Поправочные коэффициенты на удельное тепловое сопротивление грунта p_r даны в таблице 4, и видно, что у разных источников они хорошо совпадают. Важно отметить, что сопротивление грунта является фактором, который «катастрофически» сильно влияет на допустимый ток КЛ. Например, лишь небольшое его увеличение с 1 до 1,5 м·К/Вт уже приводит к снижению тока КЛ на 16% ($K_3 = 0,84$). Вместе с тем при проектировании КЛ указать достоверное значение сопротивления грунта сложно, ведь оно зависит не только от состава грунта, но еще и от его влажности, переменной в течение года. Важно и то, что влажность грунта также изменяется под действием тепла, выделяющегося в кабеле. В некоторой степени проблема решается путем засыпки трассы КЛ специальным грунтом с более или менее стабильными свойствами, но едва ли такое возможно при прокладке методом ГНБ. Поэтому при ГНБ следует проводить предварительные геологические изыскания для тщательного обоснования p_r , которое будет заложено в расчеты.

РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ФАЗАМИ (K_4)

Следует отметить, что прокладка однофазных кабелей на большом расстоянии друг друга приводит к возникновению вокруг КЛ повышенного магнитного поля и имеет ряд негативных последствий:

- для всех КЛ 6–500 кВ возрастает риск для персонала попасть под наведенное напряжение при работе

Табл. 4. Поправочный коэффициент на удельное тепловое сопротивление грунта (K_3)

Грунт p_r м·К/Вт	СТО ФСК [1]	ABB	NEXANS	«Севкабель»	Метод [3]
1	1	1	1	1	1
1,2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
1,5	0,85	0,84	0,85	0,84	0,84
2	0,76	0,74	0,74	0,74	0,74
3	0,63	0,61	нет	0,61	0,61

- на отключенных цепях многоцепных линий;
- для КЛ 6–35 кВ в сети с изолированной нейтралью возможна ложная работа защиты от замыканий на землю;
 - для КЛ 110–500 кВ с большими токами могут нарушаться санитарные нормы.

Поправочный коэффициент на расстояние между фазами в каталогах обычно дан только для случая прокладки кабелей в ряд (рисунок 1б). Если фазы и размещают в ряд, то чаще это делают так, что расстояние в свету равно диаметру кабеля $\Delta s = d$. Лишь завод АBB не стал привязываться к диаметру d , а принял в каталоге $\Delta s = 70$ мм.

Для сопоставления коэффициентов K_4 пришлось принять $d = 70$ мм (такой диаметр характерен, например, для КЛ 110 кВ с сечением жилы 630–800 мм²). Также пришлось перейти от Δs в свету к расстоянию между осями соседних фаз $s = \Delta s + d$. Итоговые зависимости $K_4(s)$ даны на рисунке 2 и основаны только на данных СТО ФСК [1] и АBB, поскольку в каталогах NEXANS и «Севкабель» варьирование расстояния между фазами не рассмотрено. Хотя СТО ФСК содержит данные лишь для весьма ограниченного диапазона расстояний между соседними фазами, но даже по нему видно хорошее совпадение с АBB.

К сожалению, все коэффициенты K_4 , приведенные на рисунке 2, относятся только к случаю изменения расстояния для рядной прокладки фаз (рисунок 1б). Вместе с тем не меньший интерес представляет не рассмотренный в каталогах случай, когда расстояние между фазами изменяется для треугольного расположения. Например, в последние годы все больше КЛ имеют протяженные участки, проложенные методом ГНБ. При этом расстояние s между осями кабелей отвечает уже не диаметру кабеля d (рисунок 1а), а диаметру трубы D (рисунок 3а).

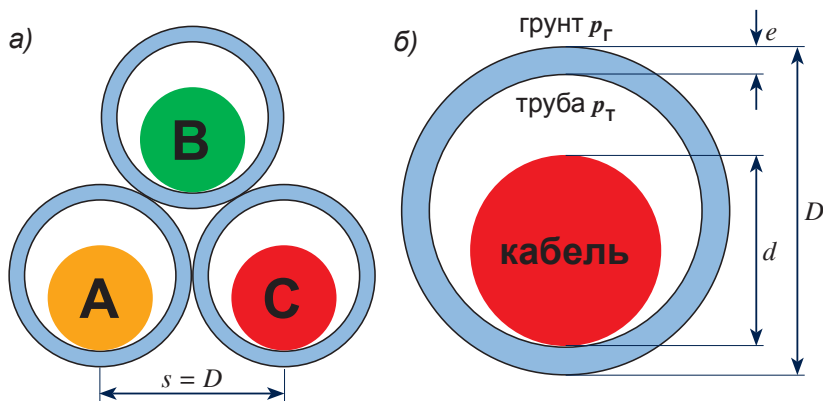


Рис. 3. Пофазная прокладка кабелей в трубах, проложенных пучком (а), и обозначения (б)

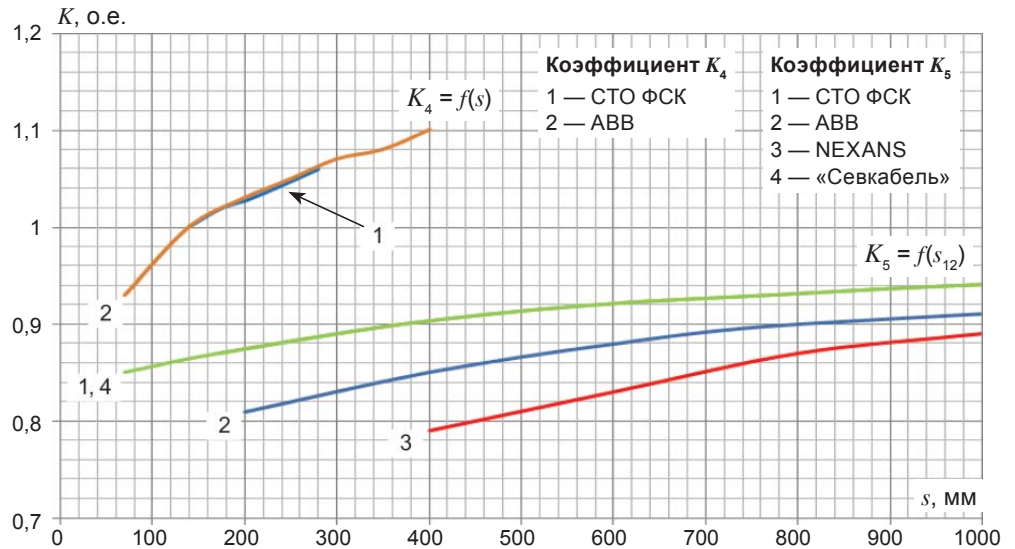


Рис. 2. Поправочный коэффициент на расстояние между фазами (K_4) и цепями (K_5)

ЧИСЛО ГРУПП КАБЕЛЕЙ (K_5)

Число параллельно проложенных групп кабелей (число цепей КЛ) может быть от 1–2 до 10 и более. В последнем случае речь идет о так называемой «блочной канализации». Тепловой расчет многоцепных КЛ представляет собой сложную задачу, решение которой под силу отнюдь не всем известным специализированным компьютерным программам. Здесь, в рамках статьи, остановимся только на самом распространенном случае, когда КЛ является двухцепной — именно для него на рисунке 2 дана зависимость поправочного коэффициента K_5 от расстояния s_{12} между центрами двух соседних цепей.

Идеальное совпадение K_5 у СТО ФСК [1] и «Севкабель», скорее всего, говорит о том, что цифры были заимствованы друг у друга. Что касается АBB и NEXANS, то у них K_5 заметно различаются. Например, при $s_{12} = 500$ мм:

- $K_5 = 0,92$ для СТО ФСК [1] и «Севкабель»;
- $K_5 = 0,87$ для АBB;
- $K_5 = 0,81$ для NEXANS.

Видно, что разброс коэффициентов значительный и достигает 10–15%. Однако это обстоятельство важно не всегда, ведь зачастую при проектировании двухцепных КЛ коэффициент K_5 применяться не должен. Дело в том, что расчетным при выборе сечения жилы у двухцепных КЛ является случай, когда одна из цепей повреждена, и вся мощность нагрузки идет по второй.

Таким образом, тепло выделяется только в одной цепи, а значит $K_5 = 1$. Вместе с тем, некоторые проектировщики ошибочно игнорируют этот факт и закладывают $K_5 < 1$, что в итоге приводит к неоправданному завышению сечения жилы КЛ.

НАЛИЧИЕ ТРУБ (K_6)

Практически во всех источниках сказано, что прокладка однофазных кабелей в трубах (рисунок 3) приводит к снижению пропускной способности КЛ, а поправочный коэффициент называется следующим:

- $K_6 = 0,94$ для трубных участков длиной менее 10 м;

- $K_6 = 0,9$ для участков длиной 10 м и более.

Указанные коэффициенты в общем случае являются неверными, поскольку влияние трубы на допустимый ток КЛ, очевидно, зависит от объема воздуха в трубе, определяемого отношением внутреннего диаметра трубы $(D - 2e)$ и внешнего диаметра кабеля d . Единственный источник, который учитывает этот фактор — СТО ФСК [1], где дается зависимость K_6 от отношения внутреннего диаметра трубы $(D - 2e)$ ко внешнему диаметру кабеля d :

- $K_6 = 0,90$ при отношении $(D - 2e)/d = 1,5$;
- $K_6 = 0,91$ при отношении 2,0;
- $K_6 = 0,92$ при отношении 2,5;
- $K_6 = 0,93$ при отношении 3,0;
- $K_6 = 0,94$ при отношении 3,5;
- $K_6 = 0,95$ при отношении 4,0.

Видно, что поправочный коэффициент на трубы $K_6 = 0,9$, содержащийся во всех без исключения каталогах, применим только при отношении $(D - 2e)/d = 1,5$, которое отвечает минимально разрешенному диаметру трубы [1], тогда как на практике чаще встречается отношение $(D - 2e)/d = 2,0 \div 2,5$, при котором K_6 уже выше.

Анализ проектной документации, где выбор кабелей происходит с помощью системы поправочных коэффициентов, показывает, что в большинстве случаев учет труб ограничивается всего лишь введением коэффициента K_6 , хотя на самом деле появление труб также влечет за собой и необходимость пересмотра K_4 .

Если фазы кабеля были уложены в грунте сомкнутым треугольником, то $K_4 = 1$, однако на трубных участках расстояние между осями фаз возрастает с $s = d$ до $s = D$, и, следовательно, улучшаются условия охлаждения КЛ, то есть $K_4 > 1$. Таким образом, для того, чтобы оценить эффект от прокладки КЛ в трубах, недостаточно исследовать только коэффициент K_6 , а важно проверить произведение $K_4 \cdot K_6$, в котором первый сомножитель $K_4 > 1$, а второй сомножитель $K_6 < 1$, и поэтому заранее нельзя сказать, приведет ли трубная прокладка КЛ к снижению допустимого тока или же, напротив, к его увеличению.

Поскольку в кабельных каталогах и в СТО ФСК [1] коэффициент K_4 приведен только для рядной прокладки (рисунок 1б), то все эти источники не позволяют делать корректные расчеты случаев КЛ в трубах, проложенных методом ГНБ (рисунок 3а). Как видно, при проектировании КЛ в трубах не обойтись без детального компьютерного моделирования или расчетов по методикам [2, 3]. Дадим пример.

Пусть КЛ 110 кВ с рассмотренными ранее кабелями 800/185 мм² без потерь в экранах уложена в трех трубах в грунте с температурой $T = 20$ °С на глубине, которая теперь равна $h = 3$ м (характерна для ГНБ). Пусть трубы

Табл. 5. Допустимый ток КЛ 110 кВ (поправочный коэффициент $K_4 \cdot K_6$ на прокладку в трубах) в зависимости от D трубы (SN 16 кН/м², $h = 1$ м)

Грунт p_T м·К/Вт	Ток $I_{\text{доп}}$ для КЛ в грунте, А (о.е.)	Диаметр трубы D , мм (отношение $(D - 2e)/d$, о.е.)				
		160 (1.9)	180 (2.1)	225 (2.6)	280 (3.3)	315 (3.7)
		Ток для КЛ в трубе, А (произведение $K_4 \cdot K_6$, о.е.)				
1	876 (1.00)	826 (0,94)	0,95	0,96	0,97	0,98
1,2	810 (1.00)	777 (0,96)	0,97	0,98	0,99	1,00
1,5	734 (1.00)	718 (0,98)	0,99	1,00	1,02	1,03
2	643 (1.00)	643 (1,00)	1,01	1,03	1,05	1,06
3	530 (1.00)	543,5 (1,03)	1,04	1,06	1,08	1,10

имеют типовые значения удельного теплового сопротивления стенки $p_T = 3$ м·К/Вт и кольцевой жесткости SN 16 кН/м². Результаты расчета $I_{\text{доп}}$ в зависимости от диаметра трубы D приведены в таблице 5.

Из таблицы 5 видно, что эффект перекладки фаз КЛ из сомкнутого треугольника в три трубы может дать как снижение допустимого тока ($K_4 \cdot K_6 = 0,94$), так и его рост ($K_4 \cdot K_6 = 1,10$). Наиболее значительное повышение длительно допустимого тока КЛ (до 10%) достигается для труб большого диаметра D в грунтах с высоким удельным сопротивлением p_T . При этом если о влиянии диаметра трубы было известно и ранее (см. СТО ФСК [1]), то влияние сопротивления грунта p_T не описано.

Таблица 5 показывает, что трубная прокладка КЛ сложным образом влияет на допустимый ток, ведь, с одной стороны, воздух, заполняющий трубы, мешает фазам отводить тепло, а с другой стороны, трубы заметно увеличивают площадь контакта трехфазной КЛ с грунтом, помогая КЛ лучше охлаждаться, что особенно полезно, когда грунт имеет большое удельное сопротивление p_T .

В тепловой схеме замещения КЛ, проложенной в трубах, важную роль играет воздух в трубе и грунт за ее пределами. Сама же стенка трубы почти не оказывает сопротивления теплу, которое необходимо отвести от кабеля. В качестве примера в условиях таблицы 5 для трубы $D = 160$ мм было выполнено варьирование SN , а его результаты сведены в таблице 6. Из таблицы 6 видно, что переход от самой толстостенной трубы SN 64 к самой тонкостенной SN 4 повышает ток КЛ не более чем на 0,5% (для грунта $p_T = 1$ м·К/Вт рост составил с 823 А до 827 А).

Если почти трехкратное снижение толщины стенки трубы (с 13,6 мм до 5,7) не повлияло на до-

Табл. 6. Допустимый ток КЛ 110 кВ (поправочный коэффициент $K_4 \cdot K_6$ на прокладку в трубах) в зависимости от SN трубы ($D = 160$ мм, $h = 1$ м)

Грунт p_T м·К/Вт	Ток $I_{\text{доп}}$ для КЛ в грунте, А (о.е.)	SN трубы, кН/м ² (толщина стенки, мм)		
		64 (13,6 мм)	16 (8,9 мм)	4 (5,7 мм)
		Ток для КЛ в трубе, А (произведение $K_4 \cdot K_6$, о.е.)		
1	876 (1.00)	823	826 (0,94)	827
1,2	810 (1.00)	775	777 (0,96)	778
1,5	734 (1.00)	716	718 (0,98)	719
2	643 (1.00)	642	643 (1,00)	644
3	530 (1.00)	543	543,5 (1,03)	544

пустимый ток КЛ, то также ничего не может случиться и при замене материала стенки трубы с одного на какой-то другой. Чтобы проверить этот факт, ведущие кабельные заводы «Таткабель» и «Эстралин» в компьютерных программах выполнили и официально передали расчеты рассмотренной ранее одноцепной КЛ 110 кВ 800 мм²/185 мм² без потерь в экранах, проложенной на характерной для ГНБ глубине $h = 3$ м, но не в трубах $D = 160$ мм ($SN\ 16$ кН/м², $e = 15,5$ мм), а уже в трубах $D = 280$ мм (такой диаметр стал не более чем следствием стечения обстоятельств). В исследованиях варьировались удельные тепловые сопротивления как стенки трубы p_T , так и грунта p_G . В частности, для труб были рассмотрены следующие p_T :

- 3 м·К/Вт (черные полиэтиленовые трубы ПЭ систем холодного водоснабжения, трубы «Электропайп», трубы «Энергопайп», трубы «Эколайн» и другие трубы из обычного полиэтилена ПЭ, окрашенные в черный, красный или иные цвета);
- 2 м·К/Вт (специальные негорючие полимерные термостойкие кабельные трубы «Протекторфлекс»);
- 1 м·К/Вт (теоретический предел для специальных полимерных материалов).

Результаты, полученные заводами «Таткабель» и «Эстралин», сведены в таблице 7. Также в таблице 7 добавлены расчеты по методике [3] и расчеты, которые предоставил «НИИ Севкабель» (организация, отдельная от завода «Севкабель»).

Из таблицы 7 видно, что заводы «Таткабель» и «Эстралин» хорошо совпадают друг с другом, тогда как методика [3] дала значения в среднем на 10% ниже. Однако, в целом, все источники («Таткабель», «Эстралин», [3]) схожи в том, что при любом заданном тепловом сопротивлении грунта переход от трубы $p_T = 3$ м·К/Вт к трубе $p_T = 1$ увеличивает допустимый ток КЛ не более чем на 0,5–0,7%.

Единственный источник, у которого иные результаты — это «НИИ Севкабель», где при самом распространенном сопротивлении грунта $p_G = 1$ м·К/Вт замена труб с $p_T = 3$ м·К/Вт на $p_T = 1$ обеспечила рост допустимого тока с 1050 А до 1125 А, то есть на 7%. Корректность подобных расчетов можно оценить, если вычислить по методике [3] полное тепловое сопротивление элементов КЛ (в расчете на 1 м длины):

- изоляция кабеля $R_{И} = 0,369$ К/Вт;
- оболочка кабеля $R_{О} = 0,096$ К/Вт;
- воздух с учетом конвекции $R_{В} = 0,732$ К/Вт;
- труба $R_T = 0,054$ К/Вт (для трубы 3 м·К/Вт) или 0,018 К/Вт (для трубы 1 м·К/Вт);
- грунт $R_G = 1,794$ К/Вт.

Суммарное сопротивление составляет $R_{Сум} = 3,045$ К/Вт для трубы $p_T = 3$ м·К/Вт и $R_{Сум} = 3,009$ К/Вт для трубы $p_T = 1$ м·К/Вт. Таким образом, переход от одной трубы на другую вызвал снижение сопротивления $R_{Сум}$ всего лишь на 1%. Очевидно, что это никак не могло обеспечить рост допустимого тока КЛ сразу на 7%, то есть цифры

«НИИ», к сожалению, получены с какой-то досадной ошибкой, возможно связанной с некорректной работой используемой компьютерной программы Elcut, где учет конвекции воздуха происходит не напрямую, а косвенными методами.

Итак, в отличие от диаметра трубы D , удельное тепловое сопротивление ее материала p_T и толщина ее стенки в пределах погрешности расчетов не влияют на длительно допустимый ток жилы. Следовательно, для повышения допустимого тока основное внимание должно уделяться рациональному выбору диаметра трубы, тогда как разработка полимерных труб, которые обладали бы величиной p_T менее типовых стандартных значений 2–3 К·м/Вт, лишена смысла.

ПОТЕРИ В ЭКРАНАХ (K_7)

Согласно [4] у однофазных кабелей при двустороннем заземлении экранов в них возникают потери активной мощности, особенно опасные, если:

- кабели имеют сечение экрана $F_Э$ более 50–70 мм²;
- кабели проложены на расстоянии друг от друга, а не сомкнутым треугольником.

Потери мощности в экранах приводят к дополнительному нагреву изоляции КЛ и должны быть учтены при проведении тепловых расчетов КЛ. Например, учет можно сделать с помощью предложенного в [4] коэффициента $K_{И}$ использования пропускной способности КЛ по току ($K_7 = K_{И}$):

$$K_7 = \frac{1}{\sqrt{1 + P_Э / P_Ж}} \leq 1,$$

где $P_Э / P_Ж$ — отношение потерь в экране и в жиле, вычисляемое по [4].

Для борьбы с потерями в экранах, там где они опасны, приходится применять или одностороннее заземление экранов, или их транспозицию. Оба эти технические решения дают $P_Э / P_Ж \approx 0$ и $K_7 = K_{И} = 1$.

ГРАФИК НАГРУЗКИ (K_8)

В нашей стране КЛ чаще всего выбирают так, чтобы она была рассчитана на длительное (в течение всего срока службы 30–40 лет) прохождение тока, который отвечает максимуму графика нагрузки (рисунк 4). Вместе с тем известно, что процессы на-

Табл. 7. Допустимый ток КЛ 110 кВ в трубах диаметром $D = 280$ м ($SN\ 16$ кН/м², $h = 3$ м)

Грунт p_G	Труба p_T	Допустимый $I_{доп}$ для КЛ в грунте, А			
		«Таткабель»	«Эстралин»	Методика [3]	«НИИ»
1	1	963	962	857	1125
	2	960	958	854	1080
	3	956	955	852	1050
2	1	746	749	676	975
	2	744	748	675	940
	3	742	746	674	915
3	1	629	635	575	870
	2	628	634	574	850
	3	627	633	573	835

грева КЛ и окружающего грунта являются достаточными инерционными и могут занимать до нескольких часов или даже суток. По этой причине КЛ, которая была выбрана на кратковременный максимум тока нагрузки, за время его действия не будет успевать нагреваться до температуры 90 °С, то есть можно утверждать, что дорогостоящий кабель в таком случае используется неэффективно. Для учета характера нагрузки во всем мире используют «коэффициент нагрузки» K_8 .

Чтобы повысить эффективность КЛ, не допуская при этом перегрева изоляции сверх 90 °С, достаточно выбирать КЛ не на максимум тока нагрузки, а на его среднее в течение суток значение, в качестве которого теоретически можно рассматривать или простое среднее, или же среднеквадратичное. Поскольку необходимо усреднить тепловыделение в кабеле, пропорциональное квадрату тока в жиле, то корректнее использовать среднеквадратичное. Тогда

$$K_8 = \frac{\int_0^{24 \text{ часа}} i_H^2(t) dt}{I_H^2} \leq 1,$$

где $i_H(t)$ — мгновенное значение тока нагрузки в соответствии с графиком (рисунок 4); I_H — максимальное значение тока за сутки.

Конкретное значение K_8 зависит от характера нагрузки. Например, когда КЛ питает непрерывный технологический процесс, то график на рисунке 4 не будет содержать заметных изменений тока, и поэтому $K_8 \approx 1$. Однако, как следует из ряда источников, самым типовым все же является $K_8 = 0,8$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время наиболее корректный выбор сечения жилы КЛ происходит, если расчеты делаются в специализированных компьютерных программах. Среди таких программ известны Сутсар, Comsol, Ansys и другие, в целом дающие близкие результаты. Отличие выявлено лишь у программы Elcut и только для тех случаев, когда КЛ проложена в трубах, где нужен учет конвекции воздуха. Поскольку пакет Elcut имеет мощную команду разработчиков и непрерывно совершенствуется, то модель конвекции будет перепроверена и, при необходимости, скорректирована.

При отсутствии программ выбор КЛ можно проводить упрощенно с помощью системы «базовых»

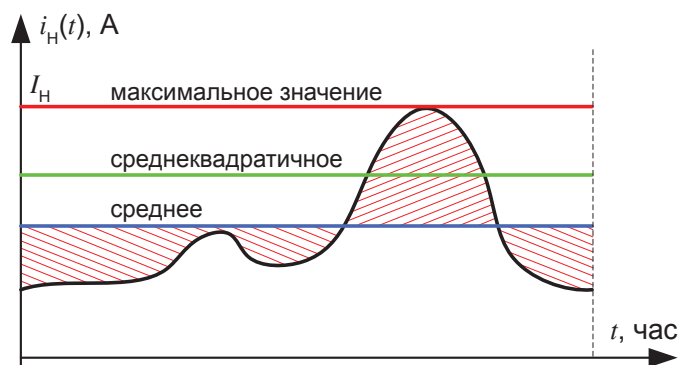


Рис. 4. Пример суточного изменения величины тока в жиле КЛ

токов и поправочных коэффициентов, приведенных в СТО ФСК [1] и в каталогах заводов-изготовителей. Однако следует помнить, что практически все известные системы коэффициентов неверно учитывают влияние труб, ошибочно полагая, что появление труб снижает допустимый ток КЛ на 10% ($K_6 = 0,9$), тогда как на самом деле ток КЛ, напротив, может возрасти на 5–10% ($K_4 \cdot K_6 = 1,05–1,10$).

Также, вне зависимости от используемой программы (каталога, стандарта), важно помнить:

- в двухцепных КЛ расчетным зачастую является случай, когда в работе находится только одна цепь, а вторая отключена, то есть $K_5 = 1,0$, а вовсе не 0,8–0,9;
- суточный график нагрузки такой, что обычно $K_8 = 0,8$, а вовсе не 1,0.

Если тепловой расчет КЛ проведен с неверным учетом влияния труб (K_4 и K_6), числа работающих цепей (K_5), графика нагрузки (K_8), то суммарная ошибка может достигать 50%. Это означает, что будет проложена КЛ, у которой сечение жилы существенно больше, чем было бы достаточно. В условиях экономии денежных средств сетевыми компаниями отмеченное положение дел, сложившееся при выборе КЛ, не может не обращать на себя внимание.

Утверждения о важном влиянии теплового сопротивления (теплопроводности) материала трубы на длительно допустимый ток КЛ являются недостоверными. При проектировании трубных участков КЛ 6–500 кВ внимание следует обращать лишь на диаметр трубы и на ее термостойкость.

Автор выражает благодарность заводу «Таткабель» за существенную помощь в проведении расчетов и анализе их результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования. М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2011.
2. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Утв. и введ. 26.06.2009 г. М.: Стандартинформ, 2009.
3. Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полимерных трубах 6–500 кВ. Тепловой расчет // Ново-

сти Электротехники, 2015, № 5(95). С. 32–34.

4. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с.

REFERENCES

1. STO 56947007-29.060.20.071-2011. 110-500 kV power cable lines. Design environment. Standards and specifications Moscow, "FGC UES" PJSC Publ., 2011. 125 p. (in Russian)

2. State Standard IEC 60287-1-1:2009. Electric cables. Calculation of the current rating. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 35 p. (in Russian)
3. Dmitriev M.V. 6-500 kV cable lines laying in polymeric tubes. Thermal calculation. Novosti Elektrotekhnik [Electrical engineering news], 2015, no. 5(95), pp. 32–34. (in Russian)
4. Dmitriev M.V. Zazemlenie ekranov odnofaznykh silovykh kabeley 6–500 kV [Grounding of 6-500 kV single-phase power cable screens]. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2010. 152 p.