

Если рассмотреть действующие электрические сети, то в них встречаются и перегруженные, и недогруженные кабельные линии, но последние – гораздо чаще. В условиях жесткой экономии денежных средств сетевыми компаниями неполное использование пропускной способности кабельных линий выглядит расточительством.

Статья Михаила Викторовича Дмитриева содержит анализ возможных причин сложившейся ситуации и предложения по ее исправлению.

## КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ 110–500 кВ

### Выбор параметров загрузки

При проектировании кабельных линий (КЛ) 6–500 кВ в настоящее время обычно используют однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, для которой допустима температура 90 °С. При выборе конкретных параметров таких КЛ необходимо иметь следующие исходные данные:

1. Расчеты различных вариантов схем электрической сети и конкретные значения токов нагрузки  $I_n$  с указанием режимов, в которых они получены.
2. Каталоги кабельного завода с таблицами допустимых токов  $I_{доп}$  для кабелей с разными сечениями жилы.

Рассмотрим способы получения токов  $I_n$  и  $I_{доп}$ , а также возможные причины, по которым КЛ, выбранные проектировщиками исходя из условия  $I_{доп} > I_n$ , в эксплуатации недогружены настолько, что их изоляция вместо 90 °С, по сути, остается «холодной». Такое положение дел нельзя признать нормальным, ведь стоимость каждого километра линии 110 кВ иногда достигает 100 млн. рублей и нет смысла вкладывать подобные средства в недоиспользуемый кабель.

#### РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СЕТИ И ТОКОВ НАГРУЗКИ $I_n$

Расчет тока нагрузки  $I_n$  кабельной линии зависит от схемы сети. Проще всего в тех случаях, когда КЛ работает в блоке с трансформатором или воздушной линией (ВЛ). Тогда рабочий ток КЛ оказывается неразрывно связан с током проводов ВЛ или известной мощностью трансформатора (рис. 1).

#### Расчеты по току ВЛ

Если КЛ является продолжением ВЛ (рис. 1), то их пропускная способность должна быть согласована друг с другом. Иными словами, длительно допустимый ток для жил кабельного участка должен соответствовать таковому для проводов воздушного участка.

Допустимые токи для сталеалюминиевых проводов ВЛ указаны, например, в приложениях к стандарту СТО 56947007-29.240.55.143-2013 «Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий», который размещен на сайте ФСК ЕЭС. Согласно этому документу допустимые токи проводов зависят от ряда факторов, в частности от температуры окружающего воздуха и наличия солнечной радиации (ее наличие подогревает фазные провода). Значения этих токов указаны в приложениях к СТО для трех температур воздуха: –20 °С, 0 °С, +20 °С.

Поскольку кабель не должен ограничивать возможности проводов ВЛ, то при выборе сечения жилы кабеля надо ориентироваться на максимальную пропускную способность проводов ВЛ: она будет таковой в холодную и пасмурную погоду (без солнечной радиации), например при температуре –20 °С.

К сожалению, проектировщики чаще определяют допустимый для кабеля ток при температуре +15 или +20 °С, а вовсе не при температуре –20 °С. Отчасти из-за того, что в каталогах кабельных заводов нет данных о допустимых токах  $I_{доп}$  при отрицательных температурах (например, в [1] не упоминаются температуры ниже +10 °С). Всё это приводит к недоучету охлаждения кабеля и выбору завышенного сечения жилы в сравнении с тем, которое было бы достаточно для прохождения тока ВЛ (тока нагрузки  $I_n$  при температуре –20 °С).

По оценкам автора, пропускная способность КЛ при температуре воздуха –20 °С может быть на 5–25% выше, чем при +20 °С, причем даже тогда, когда кабель проложен в грунте и не имеет прямого контакта с воздухом.

#### Расчеты по мощности трансформатора

Если КЛ работает в блоке с силовым трансформатором (Т), то ее пропускная способность должна соответствовать мощности трансформатора.

При известном номинальном напряжении  $U_{НОМ}$  фазный ток трансформатора в нормальном режиме зависит не только от его номинальной мощности  $S_{НОМ}$ , но и от коэффициента  $K_3$  его загрузки (обычно  $K_3 = 0,7$ ):

$$I_T = K_3 \cdot \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}}$$

Поскольку в случае аварийной ситуации ремонт кабеля может занять значительное время, то каждая из цепей кабельной линии должна быть способна длительно выдерживать прохождение тока сразу двух трансформаторов. Например, на рис. 1 мощность трансформаторов Т1 и Т2 идет лишь по одной кабельной линии КЛ1, пока КЛ2 находится в ремонте. Таким образом, каждая из двух КЛ должна быть рассчитана на ток нагрузки  $I_n = 2I_T$  или:

$$I_n = 2K_3 \cdot \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}}$$

В каталогах кабельных заводов при определении допустимых токов  $I_{доп}$  есть поправочный коэффициент  $K_{ц}$  на число параллельно работающих цепей. В каталоге [1] у двухцепной линии с расстоянием между цепями 0,4 м он составляет  $K_{ц} = 0,85$ , т.е. пропускная способность каждой из цепей на 15% меньше, чем была бы для линии в одноцепном исполнении. Для компенсации указанного снижения тока обычно приходится применять кабели с повышенным сечением жилы.

Вместе с тем для схемы рис. 1 при выборе сечения жилы коэффициент  $K_{ц}$  применять не следует, поскольку, хотя КЛ и является двухцепной, расчетным признан тот режим, при котором в работе находится одна цепь, несущая удвоенную нагрузку. Отказ от использования  $K_{ц}$  означает, что для прохождения тока нагрузки  $I_n$  вполне достаточно использовать кабель с меньшим сечением жилы, а он дешевле.

#### Расчеты в общем случае

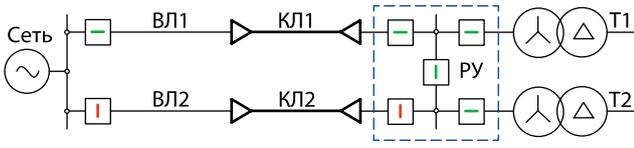
Выбор рабочего тока  $I_n$  кабеля относительно прост, если он осуществляется по току проводов ВЛ или по мощности силовых трансформаторов. Однако в схемах вида рис. 2 приходится прибегать к расчетам различных режимов работы сети, выполняемых в специализированных компьютерных программах. Так, на рис. 2 показан режим, когда КЛ3 в ремонте, из-за чего КЛ1 и КЛ2 загружены больше, чем в нормальном режиме работы сети, однако насколько именно – сложно сказать, не прибегая к помощи компьютера.

Различают режимы летних и зимних минимумов и максимумов нагрузки. Минимальные режимы интересны с точки зрения уровней напряжения в узлах сети и обеспечения баланса реактивной мощности, но они не имеют отношения к выбору сечения жилы кабельных линий.

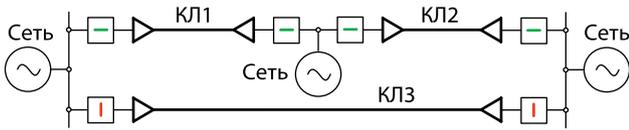


**Михаил Дмитриев,**  
к.т.н., заместитель генерального  
директора по научной работе  
ПКБ «РосЭнергоМонтаж»,  
г. Санкт-Петербург

**Простая схема электроснабжения трансформаторной подстанции** Рис. 1 •



**Сложная многоузловая схема сети, требующая расчета режимов** Рис. 2 •



При выборе кабеля важны именно максимальные режимы. Токи в КЛ, отвечающие летнему и зимнему максимуму, должны быть основой для выбора КЛ. Летом нагрузка меньше, но и условия охлаждения кабелей хуже. Поэтому нельзя заранее утверждать, какой из этих двух максимальных режимов (летний или зимний) станет определяющим для выбора сечения жилы, и проводить расчеты надо дважды.

Кроме того, расчет токов в режимах зимнего и летнего максимумов производят не только в обычных нормальных схемах сети, но и в различных послеаварийных и ремонтных схемах. Если в этих режимах в работе были не все цепи многоцепной КЛ, то очень важно, чтобы это было учтено при выборе кабеля за счет верного задания  $K_{ц}$ .

Также следует отметить, что токи в КЛ с годами, скорее всего, будут возрастать в связи с ростом нагрузки в электрических сетях. Поэтому расчет режимов следует производить на перспективу. К сожалению, никто не может поручиться, что нагрузки увеличатся, и тем более никто не может утверждать, что знает, насколько они увеличатся.

Верить или не верить планам развития энергосистемы – вопрос, который каждая сетевая организация должна решить для себя сама, но хочется задать очевидный вопрос: стоит ли зарывать в землю кабели с завышенным сечением жилы и соответственно увеличенной на миллионы рублей стоимостью, если воспользоваться пропускной способностью этих кабелей можно будет не раньше чем через 10–30 лет, а может быть, и вовсе никогда?

### РАСЧЕТ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ $I_{доп}$

Допустимый для кабеля ток в жиле  $I_{доп}$  определяется в ходе так называемого «теплового расчета» с учетом основных влияющих факторов, сказывающихся на выделении тепла в кабеле и его отводе в окружающее пространство. Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена допустимым считается ток, при котором температура примыкающей к жиле изоляции не превосходит 90 °С.

#### Тепловыделение

В однофазном кабеле тепловыделение происходит в жиле (потери  $P_{ж}$ ) и в экране (потери  $P_{э}$ ) и зависит от следующих факторов, описанных в [2]:

- сечение и материал жилы;
- сечение и материал экрана;
- схема заземления экранов;
- взаимное расположение фаз.

Из четырех перечисленных факторов первый влияет на потери в жиле  $P_{ж}$ , а три остальных – на потери в экранах  $P_{э}$ .

#### Охлаждение

Охлаждение кабеля происходит за счет отвода тепла от жилы и экрана через изоляцию и оболочку в окружающую среду (как правило, это грунт). Оно зависит от следующих факторов, указанных в МЭК 60287 или, например, в [3]:

- тепловое сопротивление грунта;
- глубина прокладки;
- температура грунта и воздуха над грунтом;

- взаимное расположение фаз;
- наличие соседних цепей или теплотрасс;
- наличие участков трассы в трубах.

Понимая сложность расчета по МЭК 60287 или в специальных программах, тепловой расчет КЛ чаще всего производят в упрощенном порядке с помощью данных, приводимых в каталогах кабельных заводов.

Проведя серию тепловых расчетов для разных сечений жилы, производители кабелей составляют каталоги (см. [1]), где в табличной форме приводят зависимость допустимого тока от сечения жилы кабеля, верную при неких базовых условиях (глубина прокладки, температура и сопротивление грунта и т.п.). В случаях, когда условия работы линии отличаются от базовых, предлагается использовать систему поправочных коэффициентов, величина которых также есть в каталогах.

Как правило, одним из базовых условий называется полное отсутствие потерь мощности в экранах ( $P_{\Sigma} = 0$ ), которое характерно при отказе от простого заземления экранов с двух сторон и применении вместо него одностороннего заземления экранов (короткие кабели) или транспозиции экранов (длинные кабели) [2]. Для этого случая допустимый ток будем называть идеальным и обозначать  $I_{\text{доп.ид.}}$ .

Реальная пропускная способность кабельной линии (допустимый ток  $I_{\text{доп}}$ ) может быть оценена на основе идеальной  $I_{\text{доп.ид.}}$ , полученной в случае без потерь в экранах, путем корректировки при помощи серии поправочных коэффициентов:

$$I_{\text{доп}} = K_{\text{и}} \cdot K_{\text{ц}} \cdot K_{\text{г}} \cdot K_{\text{с}} \cdot K_{\text{т}} \cdot I_{\text{доп.ид.}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{и}}$  – коэффициент использования пропускной способности кабеля, связанный с наличием потерь в экранах и дополнительным нагревом изоляции;

$K_{\text{ц}}$  – поправка на число цепей;

$K_{\text{г}}$  – поправка на глубину прокладки;

$K_{\text{с}}$  – поправка на удельное тепловое сопротивление грунта;

$K_{\text{т}}$  – поправка на прокладку в трубах.

В формулу (1) вошли не все коэффициенты, а лишь те, которые потребуются для выполнения примеров расчета, приведенных в конце статьи. Например, в (1) нет поправочного коэффициента на температуру среды (грунта, воздуха). Также нет и поправки на расстояние между фазами жилы, в случае, если оно больше или меньше того базового значения, при котором получен ток  $I_{\text{доп.ид.}}$ . Более полный перечень коэффициентов есть в [1].

Из всей системы поправочных коэффициентов лишь  $K_{\text{и}}$  имеет аналитическое выражение.  $K_{\text{и}}$  зависит от соотношения потерь в экране и жиле  $P_{\Sigma} / P_{\text{ж}}$  и может быть найден по [2] как:

$$K_{\text{и}} = \frac{1}{\sqrt{1 + P_{\Sigma} / P_{\text{ж}}}}. \quad (2)$$

Соотношение  $P_{\Sigma} / P_{\text{ж}}$  легко найти по формулам из [2] или приведенным там же обобщающим зависимостям. При отсутствии потерь в экранах  $P_{\Sigma} / P_{\text{ж}} = 0$  и  $K_{\text{и}} = 1$ .

### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ $I_{\text{доп}} > I_{\text{н}}$

И жила, и экран, и схема соединения экранов, и взаимное расположение фаз кабелей влияют на температуру изоляции КЛ. Одновременный поиск всех перечисленных факторов затруднен, и поэтому выбор кабеля было бы удобно разбить на отдельные последовательные этапы. Выбор сечения жилы, которая является основным элементом кабеля, на самом деле осуществляется на последнем этапе.

#### Выбор сечения экрана

Методика выбора сечения экрана на основе данных о токах КЗ и времени их протекания описана в [4]. В зависимости от способа заземления нейтрали сети при выборе сечения экрана расчетными будут разные виды повреждений изоляции – однофазное или двойное КЗ.

#### Выбор взаимного расположения фаз

По мнению автора, прокладка фазных кабелей предпочтительна сомкнутым треугольником, поскольку это обеспечивает минимальные токи и потери мощности в экранах (при двустороннем заземлении), минимальные напряжения на экранах (при одностороннем заземлении экранов или же их

транспозиции), а также позволяет обеспечить безопасность ремонтных работ на многоцепных КЛ, добиться симметрии параметров линии по фазам, повысить культуру строительства.

Однако, кроме сомкнутого треугольника, возможны и другие способы взаимного расположения, которые, как я считаю, в основном должны быть вынужденными, связанными с размещением трех фаз кабельной линии в трех отдельных полиэтиленовых трубах, уложенных в грунт методом горизонтально-направленного бурения (ГНБ), когда даже при желании обеспечить сомкнутый треугольник фазных кабелей уже не получится.

Таким образом, выбор взаимного расположения фаз друг относительно друга заранее определен особенностями трассы и условиями прокладки:

- если линия в открытом грунте, то по названным выше причинам всегда лучше прокладывать фазные кабели сомкнутым треугольником;
- если линия в трубах (ГНБ-прокол или другие обстоятельства), то их лучше располагать треугольником, чтобы фазные кабели при этом оказались тоже расположенными треугольником, хотя, увы, и не сомкнутым.

#### Выбор схемы заземления экранов

В [2] было показано, что для всех КЛ с однофазными кабелями применение простого двустороннего заземления экранов не рекомендуется, поскольку это приводит к необходимости оплаты паразитных потерь мощности в экранах (от 50 тыс. до 1 млн рублей ежегодно) и недоиспользованию пропускной способности ( $K_{\text{и}} = 0,5-0,95$ ). Поэтому при выборе схемы заземления определить, по сути, придется лишь то, какой способ борьбы с токами и потерями в экранах применить: заземление экранов с одной стороны (для коротких линий) или же транспозицию экранов с тем или иным числом циклов. Какой бы из способов борьбы ни был принят, для выбора сечения жилы по формуле (1) важно лишь одно, что  $K_{\text{и}} = 1,0$ .

#### Выбор сечения жилы

Выбрав сечение экрана, взаимное расположение фазных кабелей и схему заземления экранов, а также зная условия, при которых получен ток нагрузки на кабельную линию  $I_{\text{н}}$ , можно приступить к тепловому расчету и поиску сечения жилы, при котором температура изоляции из сшитого полиэтилена будет меньше  $90^{\circ}\text{C}$ , т.е. допустимый ток кабельной линии  $I_{\text{доп}}$  будет отвечать условию  $I_{\text{доп}} > I_{\text{н}}$ .

#### ПРИМЕР ДЛЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ 110 кВ

В качестве примера в табл. 1 даны допустимые токи  $I_{\text{доп.ид}}$  для КЛ 110 кВ, выполненной однофазными кабелями с медной жилой и изоляцией из сшитого полиэтилена. Данные заимствованы из [1] и справедливы в идеальном случае, когда отсутствуют токи  $I_{\Sigma}$  и потери  $P_{\Sigma}$  в экранах (применено одностороннее заземление экранов или транспозиция). Базовые условия прокладки фаз в грунте были следующие: глубина  $h = 1$  м, удельное тепловое сопротивление грунта  $\rho_{\text{г}} = 1$  К·м/Вт, температура  $20^{\circ}\text{C}$ , одна цепь.

Пользуясь табл. 1 и другими данными [1], выберем двухцепную КЛ 110 кВ, по которой будет осуществляться электропитание подстанции с двумя трансформаторами 110/10 кВ мощностью 80 МВА каждый (рис. 1).

На основе расчета токов КЗ сети сечение экранов принято равным  $240 \text{ мм}^2$  (методика [4]), фазы кабеля предполагается проложить сомкнутым треугольником в открытом грунте с тепловым сопротивлением  $\rho_{\text{г}} = 2$  К·м/Вт ( $K_{\text{с}} = 0,74$  по [1]) на глубине  $h = 1,5$  м ( $K_{\text{г}} = 0,95$  по [1]). Схема заземления экранов – без токов и потерь мощности в экранах ( $K_{\text{и}} = 1$  по формуле (2)).

При коэффициенте загрузки  $K_{\Sigma} = 0,7$  фазный ток трансформатора на стороне 110 кВ составит  $I_{\text{т}} = 0,7 \cdot (80 \cdot 10^6) / (\sqrt{3} \times 110 \cdot 10^3) = 294$  А. Поскольку одна из двух цепей КЛ может длительно находиться в ремонте, то оставшаяся в работе цепь должна быть рассчитана на прохождение тока сразу двух трансформаторов, т.е. расчетный ток нагрузки на каждую цепь составит  $I_{\text{н}} = 2I_{\text{т}} = 588$  А.

Нагрузка  $I_{\text{н}} = 588$  А получена в предположении, что в работе находится только одна цепь, т.е. при проведении теплового расчета КЛ и выборе кабеля поправочный коэффициент на число параллельных цепей вводить не нужно,  $K_{\text{ц}} = 1$ .

В соответствии с формулой (2) получим:

$$I_{\text{доп}} = K_{\text{И}} \cdot K_{\text{Ц}} \cdot K_{\text{Г}} \cdot K_{\text{С}} \cdot K_{\text{Т}} \cdot I_{\text{доп.ид}} = 1 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 0,74 \cdot 1 \cdot I_{\text{доп.ид}} \approx 0,7 \cdot I_{\text{доп.ид}}$$

Из табл. 1 видно, что сечение жилы  $F_{\text{ж}} = 630 \text{ мм}^2$  будет достаточно, поскольку оно обеспечит  $I_{\text{доп.ид}} = 865 \text{ А}$ ,  $I_{\text{доп}} = 0,7 \times I_{\text{доп.ид}} = 605 \text{ А}$ , т.е. верно условие  $I_{\text{доп}} > I_{\text{н}}$ .

Положим, что расчет режима сети и выбор кабеля не были согласованы и проектировщик посчитал, что ток  $I_{\text{н}} = 588 \text{ А}$  проходит не в одной, а в каждой из двух цепей кабельной передачи. При расстоянии между цепями  $0,4 \text{ м}$  согласно [1] будет  $K_{\text{Ц}} = 0,85$ . Тогда в соответствии с (1) получим  $I_{\text{доп}} = 0,6 \cdot I_{\text{доп.ид}}$ , а по табл. 1 определим, что достаточным будет сечение жилы  $F_{\text{ж}} = 1000 \text{ мм}^2$ , поскольку оно обеспечит  $I_{\text{доп.ид}} = 1050 \text{ А}$ ,  $I_{\text{доп}} = 0,6 \cdot I_{\text{доп.ид}} = 630 \text{ А}$ , что больше тока  $I_{\text{н}} = 588 \text{ А}$ , т.е. выполняется условие  $I_{\text{доп}} > I_{\text{н}}$ .

Итак, несогласованность расчетов режима сети и теплового расчета КЛ могла привести к тому, что вместо кабеля с жилой  $630 \text{ мм}^2$  применили бы кабель с жилой  $1000 \text{ мм}^2$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные рассуждения показывают, что незагруженные КЛ появляются вследствие чрезмерных запасов, которые закладываются на двух этапах проектирования КЛ:

1. При выборе тока нагрузки  $I_{\text{н}}$  используют такие режимы, вероятность которых минимальна. Например, действительно ли возможна предельная нагрузка ВЛ, учитывая коррозию стальных сердечников проводов (ведь в аварии на ПС «Чагино» выяснилось, что провода таких ВЛ при повышении токов даже в допустимых пределах на самом деле сильно провисают, вызывая короткие замыкания на землю)? Или, например, насколько реально, чтобы при выводе в ремонт одной из цепей многоцепной КЛ оказалось, что именно в это время нагрузка питаемой подстанции вышла на некий максимальный проектный уровень 2030-го года (предсказанный еще в 2000-м, да и то лишь при условии устойчиво прогрессирующей экономики страны)?

2. Условия получения токов  $I_{\text{н}}$ , которые проектируемая КЛ должна выдерживать, зачастую упускаются теми специалистами, которые занимаются тепловым расчетом, выбором сечения жилы и других параметров кабелей. Прежде всего речь идет о несогласованности расчетов по температуре среды и по числу находящихся в работе цепей многоцепных КЛ. В результате в расчеты попадают заведомо невозможные и крайне неблагоприятные условия охлаждения кабелей – плюсовая температура воздуха на момент зимнего максимума нагрузки и проч., что приводит к недооценке пропускной способности кабеля и завышению сечения жилы.

По результатам запасов, которые закладываются согласно пунктам 1 и 2, получается, что в нормальном режиме КЛ эксплуатируются с нагрузкой, в разы меньшей их пропускной способности. Даже если допустить, что случится ремонтный или послеаварийный режим и нагрузка на кабель значительно возрастет, то всё равно температура изоляции КЛ будет меньше  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Недоиспользование возможностей изоляции расточительно, ведь стоимость КЛ составляет десятки миллионов рублей за каждый километр трассы. Поэтому следует навести порядок в деле выбора КЛ, причем на всех этапах – от выработки требований к пропускной способности линии (поиск тока  $I_{\text{н}}$ ) до выбора кабеля (поиск жилы, обеспечивающей  $I_{\text{доп}} > I_{\text{н}}$ ).

С целью исправления сложившейся ситуации пристальное внимание следует уделить системе поправочных коэффициентов, используемых при выборе кабелей по каталогам, величинам этих коэффициентов и условиям их применения.

В частности, считается, что КЛ, проложенные в полиэтиленовых трубах, имеют сниженную пропускную способность в сравнении с прокладкой в открытом грунте из-за наличия в трубе воздушного зазора между кабелем и трубой. На практике же многие трубы с кабелями заполнены грунтовыми водами и селью и никакого воздуха в них нет. Следовательно, при высоком уровне грунтовых вод, в формуле (1) имеет смысл заменить поправочный коэффициент  $K_{\text{Т}} \approx 0,9$  на  $K_{\text{Т}} \approx 1$ , выиграв тем самым примерно 10% пропускной способности. Также целесообразно рассмотреть вопрос о принудительном заполнении полиэтиленовых труб чистой водой, что не только улучшит условия охлаждения кабеля и повысит пропускную способность, но и упростит его извлечение из трубы в случае такой необходимости.

**Допустимый ток  $I_{\text{доп.ид}}$  для проложенной в грунте трехфазной группы однофазных кабелей 110 кВ с медной жилой в случае, когда нет токов и потеря мощности в экранах**

Таблица 1 •

$F_{\text{ж}}, \text{ мм}^2$	$I_{\text{доп.ид}}, \text{ А}$	
	В треугольник*	В ряд**
300	600	625
400	680	715
500	770	815
630	865	925
800	960	1035
1000	1050	1140
1200	1215	1295
1400	1300	1390
1600	1375	1475
2000	1490	1610

\* Фазы кабеля проложены сомкнутым треугольником.

\*\* Расстояние в свету между соседними фазами, проложенными в ряд, было принято  $0,07 \text{ м}$  ( $70 \text{ мм}$ ).

Еще одним моментом, который желательно учитывать в формуле (1) и ей подобных, является способность линий к перегрузкам. Так, согласно стандарту СТО 56947007-29.060.20.072-2011 «Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования», размещенному на сайте ФСК ЕЭС, допускается перегрев изоляции до  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ .

По оценкам автора статьи, кратковременная перегрузка кабеля и рост температуры изоляции от  $90$  до  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  повысят его пропускную способность на  $10$ – $15\%$ , т.е. новый повышающий поправочный коэффициент перегрузки  $K_{\text{П}}$  в формуле (1) будет равен  $1,1$ – $1,15$  о.е., что существенно.

Хочется обратить внимание и еще на одну особенность КЛ: из табл. 1 видно, что снижение требований к допустимому току кабеля сопровождается ощутимым уменьшением сечения жилы. Например, если ток  $1215 \text{ А}$  допустим для кабеля с жилой  $1200 \text{ мм}^2$ , то при уменьшении тока в  $1,25$  раза до  $960 \text{ А}$  достаточное сечение жилы снижается до  $800 \text{ мм}^2$  – в  $1,5$  раза! Следовательно, при тех же самых токах нагрузки  $I_{\text{н}}$  ввод в формулу (1) корректных поправочных коэффициентов на прокладку в трубах и на перегрузку позволит, не нарушая условия  $I_{\text{доп}} > I_{\text{н}}$ , применять кабели с меньшим сечением жилы, причем не только на 1 ступень по шкале типовых сечений сечения, а порой на 2–3 ступени.

Уменьшение сечения жилы позволяет экономить на меди для кабеля, на дорогой полиэтиленовой изоляции, объем которой при известной толщине изоляционного слоя зависит от сечения жилы. Также происходит снижение веса и уменьшение диаметра фазы кабеля, диаметра полиэтиленовых труб для ГНБ-проколов, увеличивается максимальная строительная длина, снижается число муфт по трассе.

Полагаю, что корректировка системы поправочных коэффициентов и поиск разумных алгоритмов проектирования КЛ позволят эффективнее использовать замечательные свойства полиэтиленовой изоляции, рассчитанной на длительную работу при температуре  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  и перегрузки до  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ . В масштабах страны это даст огромный эффект за счет экономии на сечении жилы кабеля и объеме его полиэтиленовой изоляции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Компания АВВ. Руководство пользователя «Кабельные системы с изоляцией из сшитого полиэтилена» // www.abb.ru
2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.
3. Титков В.В., Косоруков А.В. Тепловой расчет кабельных линий // Новости ЭлектроТехники. 2014. № 3(87).
4. Дмитриев М.В. Экраны однофазных кабелей 6–500 кВ. Выбор сечения с учетом аперийодической составляющей тока КЗ // Новости ЭлектроТехники. 2014. № 4(88).