

Напряжения, наведенные на кабельные линии 6–500 кВ

УДК 621.3.051

Вопросы безопасности проведения работ на отключенных воздушных линиях, находящихся под наведенным напряжением, достаточно хорошо изучены. Однако, к сожалению, этого нельзя сказать про кабельные линии 6–500 кВ, где, как показывает опыт, наведенное напряжение оказывается полной неожиданностью. Приведем ряд примеров, поясняющих механизмы наводок на отключенную кабельную линию от расположенной рядом работающей кабельной или воздушной линии.

Дмитриев М.В.,

к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

Ключевые слова:

воздушная линия, кабельная линия, однофазный кабель, магнитное поле, наведенное напряжение, безопасность персонала

Keywords:

overhead line, cable line, single-phase cable, magnetic field, induced voltage, the safety of personnel

НАПРЯЖЕНИЕ НА КЛ, НАВЕДЕННОЕ ОТ СОСЕДНЕЙ КЛ

Современные кабельные линии (КЛ) класса напряжения 6–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена выполняются на выбор:

- трехфазными кабелями;
- трехфазными группами однофазных кабелей.

Обе конструкции кабелей имеют в своем составе металлические экраны, один или несколько. Такие экраны накладываются поверх изоляции кабеля и чаще всего изготовлены из проволок меди, хотя известны варианты с проволоками алюминия или с алюминиевой фольгой. Главное назначение металлических экранов:

- выравнивание напряженности электрического поля в изоляции кабеля;
- устранение электрического поля за пределами кабеля.

Чтобы экраны кабеля выполняли перечисленные функции, они должны быть заземлены, по меньшей мере, в одной точке (например, в начале и/или конце КЛ). Отсутствие электрического поля за пределами кабелей 6–500 кВ затрудняет влияние соседних КЛ друг на друга за счет данного поля. Поэтому, рассматривая взаимные наводки КЛ, основное внимание сосредоточим на влиянии через магнитное поле.

Магнитное поле, создаваемое токами жил и экранов КЛ, имеется как внутри кабеля, так и за его пределами, однако подробнее остановимся лишь на магнитном поле вне кабеля, поскольку именно оно определяет степень влияния соседних КЛ друг на друга. Следует различать магнитное поле КЛ:

- в симметричном режиме работы (нормальный режим или прохождение по жилам КЛ тока трехфазного короткого замыкания (КЗ));
- в несимметричном режиме работы (прохождение по жилам КЛ, например, тока однофазного или двухфазного КЗ).

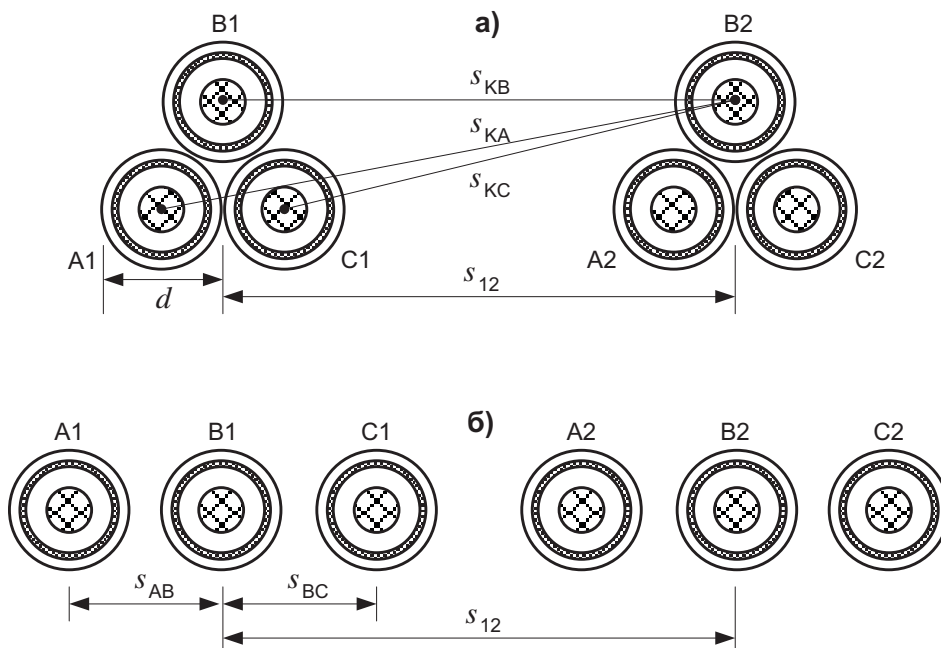


Рис. 1. Двухцепная кабельная линия с расположением фаз треугольником (а) или в ряд (б)

Наводки в симметричном режиме

Если КЛ выполнена трехфазным кабелем, то в симметричном режиме работы вне КЛ магнитное поле практически отсутствует. Данный факт объясняется тем, что магнитные поля трех фаз суммируются и компенсируют друг друга. Точно такая же ситуация возникает и если КЛ выполнена трехфазной группой однофазных кабелей, проложенных сомкнутым треугольником (рисунок 1а). В случаях же, когда однофазные кабели расположены на расстоянии друг от друга (рисунок 1б), поля трех фаз не так хорошо компенсируют друг друга, и поэтому поле вне КЛ может оказаться весьма значительным, способным вызывать соответствующие наводки на соседние КЛ.

Две кабельные линии КЛ-1 и КЛ-2 через свои магнитные поля влияют друг на друга как в случае, когда обе находятся в работе, так и в случае, когда в работе лишь одна, а вторая отключена. С практической точки зрения интереснее случай наводок на отключенную цепь, поскольку он напрямую связан с безопасностью проведения монтажей и ремонтов.

Для отключенной КЛ наведенное напряжение может возникать как на экранах, так и на жилах. Здесь рассмотрим лишь напряжение, наведенное на экраны. Интерес к наводкам на экраны неслучаен, а обусловлен близостью экранов к поверхности кабеля, то есть экраны являются той частью кабеля, прикосновение к которой вероятнее всего. Например, при

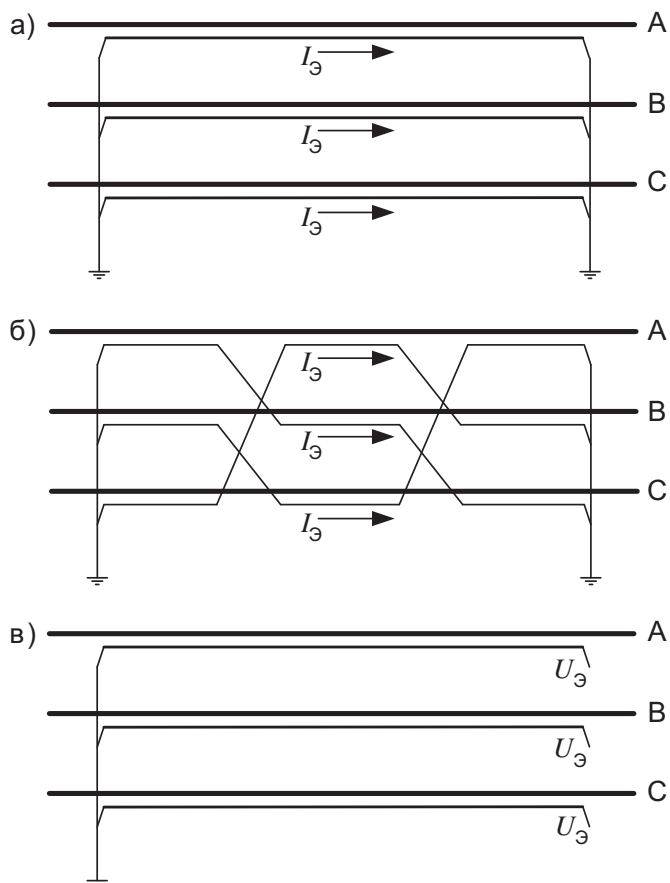


Рис. 2. Основные схемы заземления экранов КЛ с однофазными кабелями: двустороннее (а), двустороннее с транспозицией экранов (б), одностороннее (в)

выполнении достаточно распространенных работ по ремонту оболочки отключенной КЛ персонал легко может прикоснуться к экрану, и для него будет неожиданностью наличие на экране переменного напряжения частоты 50 Гц, наведенного от расположенной рядом кабельной линии.

Магнитное поле находящейся под током КЛ-1 приводит к возникновению наведенной электродвижущей силы (ЭДС) в экранах отключенной КЛ-2. Если экраны КЛ-2 имеют двустороннее заземление (рисунок 2а) или же двустороннее заземление с транспозицией (рисунок 2б), то под действием наведенной ЭДС в экранах КЛ-2 пойдут токи $I_{\text{Э}} > 0$ частоты 50 Гц, а напряжение $U_{\text{Э}} \approx 0$ на экранах будет отсутствовать. Если же экраны КЛ-2 односторонне заземлены (рисунок 2в), то будет, напротив, $I_{\text{Э}} \approx 0$, $U_{\text{Э}} > 0$.

Хотя существует несколько различных схем соединения и заземления экранов КЛ-2, рассматривать будем лишь одностороннее заземление (рисунок 2в), поскольку напряжение $U_{\text{Э}}$ здесь в точности равно величине наведенной ЭДС и, поэтому, именно в схеме на рисунке 2в удобно изучать степень влияния работающей КЛ на отключенную.

Величины напряжений $U_{\text{Э}}$, полученные в схеме на рисунке 2в, на самом деле дадут представление и об опасности в нерассмотренных здесь схемах на рисунках 2а и 2б. Например, персонал должен поставить соединительную муфту в каком-то из мест КЛ с двусторонним заземлением экранов. Для того, чтобы добраться до жилы КЛ, он должен прежде разрезать экран кабеля и развести его концы в сторону. Именно в этом месте между «левой» и «правой» частями экрана и возникнет напряжение $U_{\text{Э}}$, под действием которого еще до начала монтажа муфты в двусторонне заземленном экране шел ток $I_{\text{Э}}$. Данное напряжение будет в точности отвечать напряжению $U_{\text{Э}}$ в схеме на рисунке 2в.

Итак, положим, что есть две параллельно расположенных линии КЛ-1 и КЛ-2, каждая из которых имеет одностороннее заземление экранов. Рассмотрим наводки от находящейся в работе под током КЛ-1 на экраны отключенной КЛ-2. Величина $U_{\text{Э}}$ наведенного напряжения будет несколько отличаться в зависимости от того, о каком из трех экранов КЛ-2 идет речь (А, В, С). Для удобства рассмотрим экран средней фазы «В», поскольку в условиях рисунка 1 расстояние S_{12} между цепями КЛ-1 и КЛ-2 как раз отвечает расстоянию между фазами «В» этих цепей.

Пусть транспозиция фаз (рисунок 3) отсутствует.

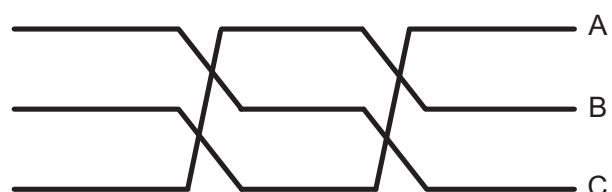


Рис. 3. Транспозиции самих однофазных кабелей в составе КЛ (или транспозиция проводов ВЛ)

Напряжение $U_{\text{э}}$ экрана «В» КЛ-2 является переменным напряжением частоты 50 Гц, его можно найти комплексным методом на основе токов I_A, I_B, I_C жил КЛ-1:

$$\dot{U}_{\text{э}} = jX_{\text{КА}} \cdot \dot{I}_A + jX_{\text{КВ}} \cdot \dot{I}_B + jX_{\text{КС}} \cdot \dot{I}_C, \quad (1)$$

где $X_{\text{КА}} = \omega \cdot M_{\text{КА}}, X_{\text{КВ}} = \omega \cdot M_{\text{КВ}}, X_{\text{КС}} = \omega \cdot M_{\text{КС}}$ — взаимные индуктивные сопротивления экрана «В» КЛ-2 с жилами «А, В, С» КЛ-1, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, $f = 50$ Гц, $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Как и в [1], взаимные индуктивности $M_{\text{КА}}, M_{\text{КВ}}, M_{\text{КС}}$ могут быть найдены:

$$\begin{aligned} M_{\text{КА}} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot l_{\text{К}} \cdot \ln \frac{D_3}{S_{\text{КА}}}, \\ M_{\text{КВ}} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot l_{\text{К}} \cdot \ln \frac{D_3}{S_{\text{КВ}}}, \\ M_{\text{КС}} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot l_{\text{К}} \cdot \ln \frac{D_3}{S_{\text{КС}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная вакуума; $l_{\text{К}}$ — длина участка, где КЛ-1 и КЛ-2 проходят параллельно друг другу, м; $S_{\text{КА}}, S_{\text{КВ}}, S_{\text{КС}}$ — расстояния, показанные на рисунке 1, м; D_3 — глубина проникновения магнитного поля в грунт, м:

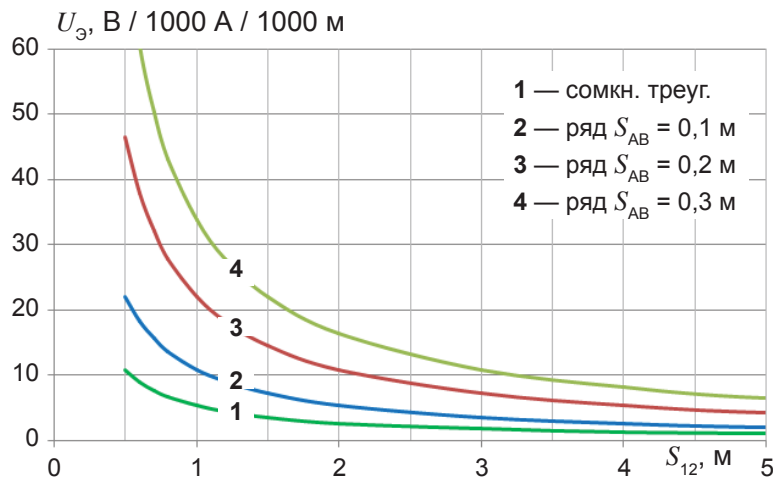


Рис. 4. Напряжение, наведенное в симметричном режиме на экран отключенной КЛ за счет действия магнитного поля работающей КЛ (см. рисунок 1)

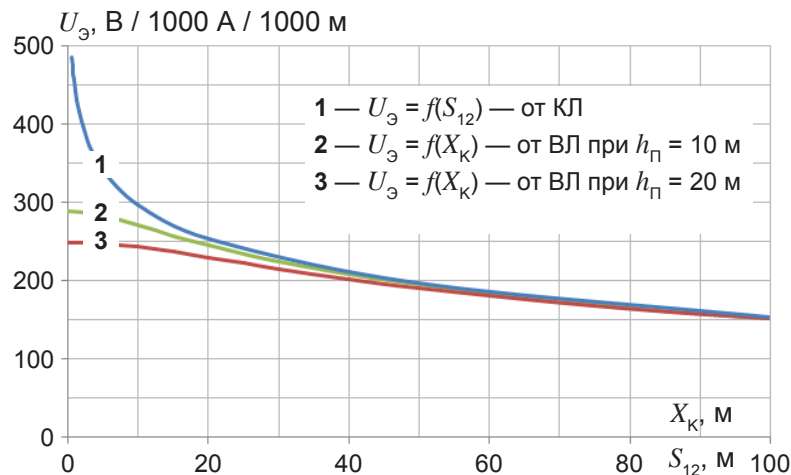


Рис. 5. Напряжение, наведенное при однофазном КЗ на экран отключенной КЛ за счет действия магнитного поля работающей КЛ (кривая 1) или работающей ВЛ (кривые 2, 3)

$$D_3 = 2,24 \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{\mu_0 \cdot \omega}} \quad (3)$$

В качестве токов жил КЛ-1 в симметричном режиме (нормальный режим или режим, когда по жилам проходят токи трехфазного КЗ) можно принять следующие токи, образующие тройку прямой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= I_{\text{ж}}, \\ \dot{I}_B &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I_{\text{ж}}, \\ \dot{I}_C &= \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I_{\text{ж}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $I_{\text{ж}}$ — действующее значение тока в жиле (А).

Вычисления (1)-(4) удобно проводить при токе жилы $I_{\text{ж}} = 1000$ А и длине участка параллельного следования $l_{\text{К}} = 1000$ м. Полученная таким образом величина напряжения $U_{\text{э}} = |\dot{U}_{\text{э}}|$ представлена на рисунке 4 и дана для двух основных случаев:

- фазы КЛ проложены сомкнутым треугольником (рисунок 1а);
- фазы КЛ проложены в ряд с тем или иным расстоянием $S_{\text{AB}} = S_{\text{BC}}$ (рисунок 1б).

Пересчет на другие $I_{\text{ж}}$ и $l_{\text{К}}$ можно выполнить по формуле:

$$U_{\text{э}} = U_{\text{э}}^{\text{рис}} \cdot \frac{I_{\text{ж}}}{1000} \cdot \frac{l_{\text{К}}}{1000} \quad (5)$$

Согласно рисунку 4 при типовом расстоянии между цепями $S_{12} = 0,7$ м наведенное напряжение $U_{\text{э}}$ в зависимости от взаимного расположения фаз составит от 6 до 50 В на каждые 1000 А и 1000 м.

Например, если двухцепная КЛ (любого класса напряжения) имеет рядное расположение фаз $S_{12} = 0,7$ м, $S_{\text{AB}} = S_{\text{BC}} = 0,2$ м, длину $l_{\text{К}} = 3000$ м, ток жилы $I_{\text{ж}} = 500$ А (на период времени, когда из двух цепей в работе осталась только одна), то тогда наведенное на экраны отключенной цепи напряжение частоты 50 Гц составит

$$U_{\text{э}} = 30 \cdot \frac{500}{1000} \cdot \frac{3000}{1000} = 45 \text{ В,}$$

представляя реальную опасность для персонала, у которого окажется «в руках». Однако, если однофазные кабели каждой из двух КЛ-1 и КЛ-2 уложены сомкнутым треугольником, то наведенное напряжение существенно снижается:

$$U_{\text{э}} = 6 \cdot \frac{500}{1000} \cdot \frac{3000}{1000} = 9 \text{ В,}$$

Как видно, вопросы безопасности работ на многоцепных КЛ требуют, чтобы однофазные кабели прокладывались преимущественно сомкнутым треугольником, а расстояние между цепями было возможно больше.

Бывает, что по каким-то причинам (например, для повышения допустимого

тока жилы КЛ) фазы КЛ лучше разместить не треугольником, а в ряд на расстоянии друг от друга. В этом случае для обеспечения безопасности работ рекомендуется предусмотреть транспозицию самих однофазных кабелей — см. схему на рисунке 3. Хотя это достаточно сложное и неудобное техническое решение, но в ряде случаев оно стоит внедрения. Транспозицию фаз необходимо выполнить для каждой из параллельно следующих КЛ, ведь в роли отключенной линии может оказаться любая из них.

Наводки в несимметричном режиме

Несимметричные режимы (прежде всего КЗ) хотя обычно и кратковременны, но могут сопровождаться прохождением в отдельных фазах КЛ значительных токов. Поскольку эти токи есть не во всех трех фазах, то о компенсации магнитных полей фаз говорить не приходится, и у КЛ появляется значительное поле, приводящее к соразмерным наводкам на соседние КЛ.

Если в роли несимметричного режима выступает, например, прохождение по кабелю тока однофазного КЗ, то магнитное поле КЛ не будет зависеть от того, лежат ли фазы в ряд или собраны сомкнутым треугольником. Единственный влияющий фактор — это расстояние от фазы КЛ-1, где проходит ток КЗ, до фазы отключенной КЛ-2, куда наводится напряжение.

Для расчетов наведенных напряжений при однофазных КЗ достаточно взять формулы (1)–(4) и подставить в них $I_A \approx 0$, $I_B = I_{ж}$, $I_C \approx 0$. Выбор фазы «В» КЛ-1 в качестве особой удобен тем, что расстояние от фазы «В» работающей КЛ-1 до фазы «В» отключенной КЛ-2 в точности отвечает расстоянию между осями кабелей S_{12} .

На рисунке 5 (кривая 1) приведены результаты расчета по (1)–(4) наведенного напряжения $U_{\varnothing} = |U_{\varnothing}|$ при однофазном КЗ. Видно, например, что даже при большом расстоянии между КЛ-1 и КЛ-2, равном $S_{12} = 50$ м, наводка составляет около 200 В, а при малых расстояниях — достигает 500 В. Например, если при КЗ ток в жиле КЛ-1 составляет всего

$I_{ж} = 10$ кА, то при $l_{к} = 3000$ м наведенное напряжение будет:

$$U_{\varnothing} = 500 \cdot \frac{10\,000}{1000} \cdot \frac{3000}{1000} = 15\,000 \text{ В.}$$

НАПРЯЖЕНИЕ НА КЛ, НАВЕДЕННОЕ ОТ СОСЕДНЕЙ ВЛ

Рассмотрим варианты параллельного следования одноцепной КЛ совместно с воздушной линией (ВЛ) — одноцепной (рисунок 6) или же двухцепной (рисунок 7). Например, такое следование может возникнуть на подходах к распределительному устройству электрической станции или подстанции, где часть присоединенных линий имеет воздушное исполнение, а часть — кабельное. Другим примером может быть случай, когда где-то на трассе несколько параллельно следующих ВЛ поэтапно переводятся в КЛ, и на каком-то из этапов получилось, что часть линий пока еще по-прежнему воздушные, а часть — уже переведены в кабельное исполнение.

ВЛ, в отличие от экранированной КЛ, обладает не только магнитным полем, но и электрическим, а значит механизм влияния ВЛ на соседние КЛ в общем случае оказывается сложнее, чем было рассмотрено для двух цепей КЛ на рисунке 1. Несмотря на это при изучении влияния ВЛ на КЛ достаточно рассмотреть лишь магнитное поле. Дело в том, что КЛ чаще всего прокладываются в грунте на глубине до 1,5 м и более, а поверхность грунта, как известно, принято считать поверхностью нулевого потенциала. Таким образом, электрическое поле ВЛ не может влиять на КЛ по той причине, что КЛ экранирована грунтом. Следовательно, для расчетов наведенного от ВЛ на КЛ напряжения достаточно воспользоваться формулами (1)–(4).правки формул потребуются лишь в случае, если ВЛ двухцепная — тогда в (1)–(4) следует вместо трех слагаемых записать шесть.

Наводки в симметричном режиме

Напряжения $U_{\varnothing} = |U_{\varnothing}|$, наведенные от ВЛ на КЛ, были рассчитаны по (1)–(4), а полученные цифры приведены:

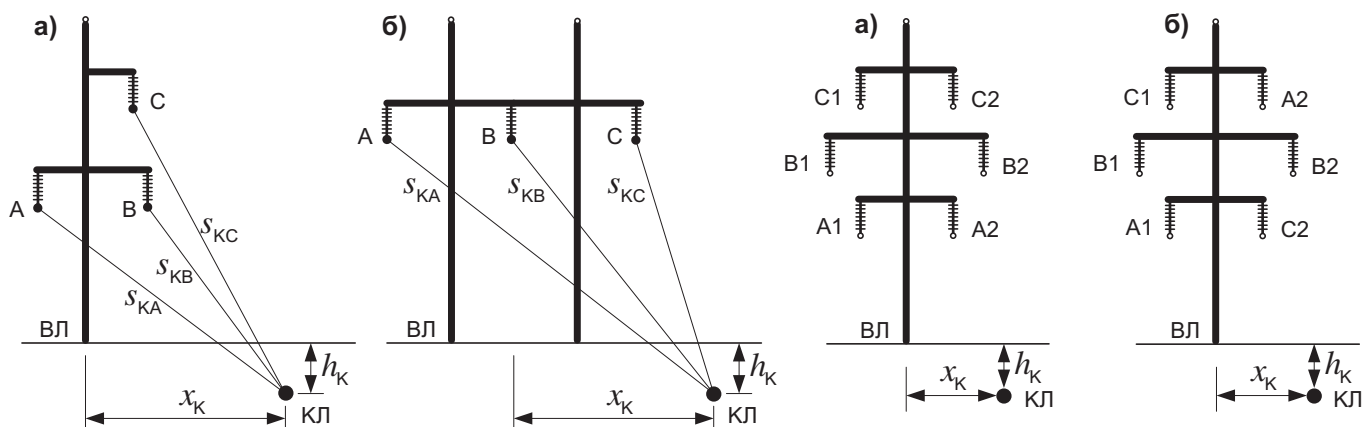


Рис. 6. Параллельное следование одноцепной КЛ и одноцепной ВЛ с треугольным расположением фазных проводов (а) или с горизонтальным (б)

Рис. 7. Параллельное следование одноцепной КЛ и двухцепной ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов (а) или с обратным вертикальным (б)

- для одноцепных ВЛ на рисунке 8;
- для двухцепных ВЛ на рисунке 9.

При расчете напряжений $U_{\text{э}}$ конструкция ВЛ предполагалась типовой для своего класса напряжения (высота опоры, расстояние между фазами). Что касается КЛ, то глубина ее расположения в грунте всегда принималась равной $h_{\text{к}} = 1,5$ м. Также отметим, что для двухцепных ВЛ полагалось, что токи цепей одинаковы.

Сравнивая рисунки 8 и 9 и полученный ранее рисунок 5, видно, что в целом в обеих задачах наведенные напряжения оказываются близки друг другу, составляя десятки вольт на каждые 1000 А и 1000 м.

Определенный интерес представляет влияние конструкции ВЛ на создаваемые наводки. Так, наименьшие наводки на экраны КЛ характерны для ВЛ с треугольным расположением проводов, а наибольшие — для ВЛ с горизонтальным. Также важно, что наводки возрастают по мере роста класса напряжения ВЛ, поскольку при этом увеличиваются расстояния между фазами, и их магнитные поля хуже компенсируют друг друга.

Следует отметить, что наводки на КЛ не зависят от того, каким образом лежат ее однофазные кабели — в ряд или сомкнутым треугольником. Наводки будут почти одинаковы для экранов каждой из фаз КЛ и определяются в основном конструкцией ВЛ и расстоянием $X_{\text{к}}$ до нее. Таким образом, если в случае двух КЛ прокладка фаз треугольником позволяла снизить наводки в ситуации, если какая-то из двух цепей будет отключена, то здесь, в случае ВЛ и КЛ, никаких возможностей для снижения наводок на КЛ не существует. Поэтому, к сожалению, при работах на КЛ, рядом с которыми проходят ВЛ, персоналу всегда следует помнить об опасности попасть под наведенное напряжение.

Например, при обслуживании отключенной одноцепной КЛ 330 кВ, недавно построенной в Санкт-Петербурге, персонал случайно обнаружил на экранах кабелей наведенное напряжение, источником которого была проходящая рядом ВЛ 330 кВ. Объект построен, и исправить ситуацию невозможно, разве что впредь проводить обслуживание КЛ в часы минимальной загрузки ВЛ.

Строго говоря, некоторые способы снижения наводок от ВЛ на КЛ все же имеются. В частности, влияние двухцепной ВЛ можно минимизировать, если на ней организовать встречную фазировку проводов цепей по схеме, представленной на рисунке 7б. Однако едва ли кто-то пойдет на то, чтобы в угоду снижению наводок на КЛ изменять порядок следования фаз ВЛ.

Теоретическим вариантом снижения наводок от ВЛ на КЛ можно считать так называемую транспозицию фазных проводов ВЛ (рисунок 3). Однако данное решение сложное, и его применяют в основном на длинных линиях, то есть расстоянии по трассе между соседними транспозиционными опорами

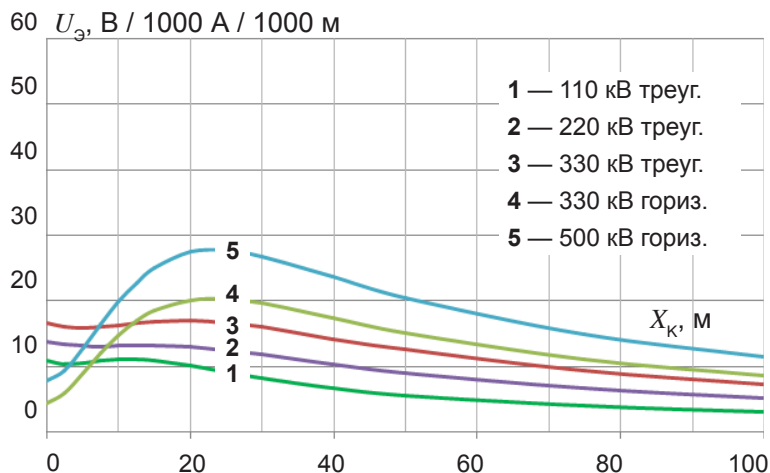


Рис. 8. Напряжение, наведенное в симметричном режиме на экран отключенной КЛ за счет действия магнитного поля работающей одноцепной ВЛ (см. рисунок 6)

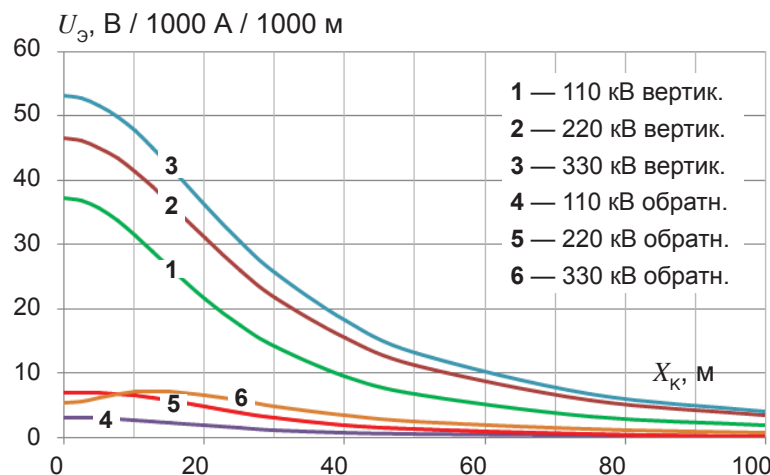


Рис. 9. Напряжение, наведенное в симметричном режиме на экран отключенной КЛ за счет действия магнитного поля работающей двухцепной ВЛ (см. рисунок 7)

ВЛ обычно составляет десятки и даже сотни километров. Поскольку длина КЛ заведомо меньше названных цифр, а участок параллельного следования КЛ и ВЛ может быть и вовсе протяженностью десятки метров, то применение транспозиции проводов ВЛ на этом участке по сути исключено.

Наводки от ВЛ в несимметричном режиме

Как и ранее, если в роли несимметричного режима рассмотреть прохождение по проводу ВЛ тока однофазного КЗ, то наводка на КЛ будет определяться только лишь расстоянием S_{12} от фазы ВЛ с током КЗ до интересующей фазы КЛ.

Величина S_{12} зависит от расстояния $X_{\text{к}}$ по горизонтали между ВЛ и КЛ, а также от высоты подвеса фазного провода $h_{\text{п}}$ и глубины расположения кабеля $h_{\text{к}}$. Формула для вычисления S_{12} такова:

$$S_{12} = \sqrt{X_{\text{к}}^2 + (h_{\text{п}} + h_{\text{к}})^2}. \quad (6)$$

Результаты расчета наводок $U_{\text{э}} = |\dot{U}_{\text{э}}|$ от ВЛ на КЛ в зависимости от высоты фазного провода $h_{\text{п}}$ (10 или 20 м) представлены на рисунке 5 (кривые 2 и 3). Наведенное напряжение близко к ситуации, когда источником наводок выступает КЛ (кривая 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ


Приведенные в статье простые оценки показали, что жилы и экраны отключенной КЛ могут находиться под переменным напряжением 50 Гц, наведенным проходящими параллельно с ней соседними КЛ или ВЛ. Данное напряжение может представлять опасность для персонала при выполнении им монтажных или ремонтных работ, например, при испытаниях оболочки КЛ или поиске места ее повреждения.

В случае двух параллельных КЛ наведенные напряжения возникают, прежде всего, если линии выполнены не трехфазными, а однофазными кабелями. Снизить до безопасного уровня наводки с одной КЛ на другую можно, если фазы каждой из КЛ расположить сомкнутым треугольником. В случае рядной прокладки фаз КЛ для снижения наводок рекомендуется выполнять транспозицию фазных кабелей.

В случае параллельных КЛ и ВЛ снизить наводки на КЛ едва ли возможно, а значит не рекомендуется строительство КЛ в коридорах действующих ВЛ даже при большом расстоянии между КЛ и ВЛ, достигающем 50–100 м.

Во всех ситуациях опасными будут наводки на КЛ от токов КЗ, проходящих по жилам соседних КЛ или проводам соседних ВЛ. Поэтому следует избегать работ на отключенных КЛ в часы повышенного риска возникновения в сети коротких за-

мыканий — например, при грозе, при производстве в сети плановых переключений, испытаний оборудования и т.п.

К сожалению, в нашей стране пока нет нормативного документа, где были бы рассмотрены вопросы безопасности работ на кабельных линиях в условиях, когда они находятся под наведенным напряжением. На этом фоне очень полезным стал бы перевод на русский язык, например, австралийского стандарта [2], где рассмотрены способы обеспечения защиты персонала от наведенных напряжений при монтаже кабельных линий, их испытаниях и ремонте. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. —152 с.
2. Safe Work Practices on High Voltage Cables // TransGrid work instruction № D2005/01698 // Australia, 2015.

REFERENCES

1. 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.
2. Safe Work Practices on High Voltage Cables // TransGrid work instruction № D2005/01698 // Australia, 2015.




КАБЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛОЛОТКИ

Комплексное решение для трасс повышенной сложности

- Широкий ассортимент
- Огнестойкость, сейсмостойкость
- Испытания на безопасную рабочую нагрузку
- Быстрый и удобный монтаж
- Программное обеспечение
- Проектная поддержка

ОБОРУДОВАНИЕ
СЕРТИФИЦИРОВАНО



ГАЗПРОМСЕРТ

www.iek.ru

Произведено в России