

Эквипотенциальная шина вдоль КЛ 110–500 кВ. Назначение и расчет

DOI:

УДК 621.315.21

При проектировании силовых кабельных линий высокого напряжения 110–500 кВ относительно небольшой длины, не превышающей сотен метров, можно встретить случаи, где вдоль кабелей прокладывается так называемая эквипотенциальная шина. Эта шина в ряде случаев может выполняться в виде проводника из меди или алюминия сечением до 500 мм², покрытого черной полимерной оболочкой. Стоимость подобного технического решения может быть значительной, и поэтому хотелось бы пояснить назначение такой шины и предложить простой метод ее расчета.

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

В сетях высокого напряжения классов 110–500 кВ кабельные линии (КЛ) обычно выполняются при помощи однофазных кабелей. Для трехфазной КЛ переменного тока необходимо использовать сразу три таких однофазных кабеля. Однако на практике для КЛ встречаются случаи, когда можно видеть не три, а четыре кабеля, проложенные параллельно друг другу, и это требует пояснения.

Если все четыре кабеля КЛ имеют одинаковый наружный диаметр, то в таком случае, скорее всего, речь идет о том, что параллельно трем основным фазам А, В, С проложена четвертая фаза, выполняющая роль резервной (пример показан на рисунке 1).

Если один из кабелей имеет диаметр меньше, чем три других, то в таком случае, скорее всего, речь идет о том, что параллельно трем основным фазам А, В, С проложена так называемая «эквипотенциальная шина» (такой случай показан на рисунке 2) или, возможно, это кабель связи.

Эквипотенциальная шина, заземленная с двух сторон, может решать следующие задачи:

– снижение напряжения, наведенного на односторонне заземленные экраны кабелей;



Рис. 1. Резервная фаза вдоль КЛ

Ключевые слова:
кабельная линия, однофазный кабель, сшитый полиэтилен, заземление экранов, напряжение на экране, эквипотенциальная шина, наведенный ток, тепловой расчет

– соединение друг с другом двух контуров заземления, расположенных по концам КЛ, что бывает актуально, например, если на одном из концов имеется переходной пункт кабельно-воздушной линии, выполненный на опоре воздушной линии и имеющий недостаточно низкое сопротивление заземления.

Эквипотенциальная шина представляет собой проводник (например, из меди или алюминия), покрытый наружной оболочкой, что внешне делает его похожим на кабель, хотя на самом деле напряжения на таком проводнике нет, поскольку он заземляется с двух сторон. Необходимость покрытия проводника оболочкой обусловлена, прежде всего, желанием скрыть дорогостоящие медь/алюминий от глаз охотников за цветными металлами. Однако если КЛ проходит где-то на охраняемой территории предприятия или станции/подстанции, то в таком случае вполне можно отказаться от наружной оболочки (пример подобного случая дан на рисунке 3).

Эквипотенциальна шина без оболочки в дополнение к перечисленным выше задачам, выполняемым шиной в оболочке, может обеспечивать заземление элементов, размещенных вдоль трассы КЛ (где обычно нет заземляющих устройств с достаточно малым сопротивлением заземления):

– узлов транспозиции с размещенными там коробками транспозиции;
– металлических конструкций, на которых проложены кабели (случай рисунка 3), причем вне зависимости от схемы заземления экранов кабелей.

Шина упомянута в документах [1–3], но ее расчеты малоизучены. Постараемся это исправить.

«НЕУДОБНАЯ» ДЛИНА КЛ

Приведенные рассуждения показывают, что шина может быть использована для КЛ с различными схемами заземления экранов, среди которых известны [1–5]:

– двустороннее заземление экранов;
– одностороннее заземление экранов (рисунок 4а);
– транспозиция экранов (рисунок 4б).

Двустороннее заземление экранов почти не используется в сетях 110–500 кВ по причине значительных токов, наведенных в экранах за счет действия магнитных полей переменных токов жил кабелей, и значительных потерь активной мощности в экранах, обусловленных такими наведенными токами. Другие два способа (одностороннее заземление и транспозиция) дают один и тот же эффект — отсутствие наведенных токов и связанных с ними потерь, однако у них характерно наличие на экранах переменного наведенного напряжения $U_Э$, которое зависит от способа заземления экранов и пропорционально длине КЛ. Область применения этих двух способов заземления экранов в сетях 110–500 кВ, как правило, следующая:

– одностороннее заземление экранов характерно для линий длиной менее 500–600 м;
– транспозиция экранов характерна для линий длиной более 1000–1200 м.

Указанные длины являются ориентировочными, а их конкретные значения для каждого проекта определяются расчетами наведенных напряжений $U_Э$ с учетом:



Рис. 2. Эквипотенциальная шина, выполненная проводником в оболочке



Рис. 3. Эквипотенциальная шина, выполненная проводником без оболочки

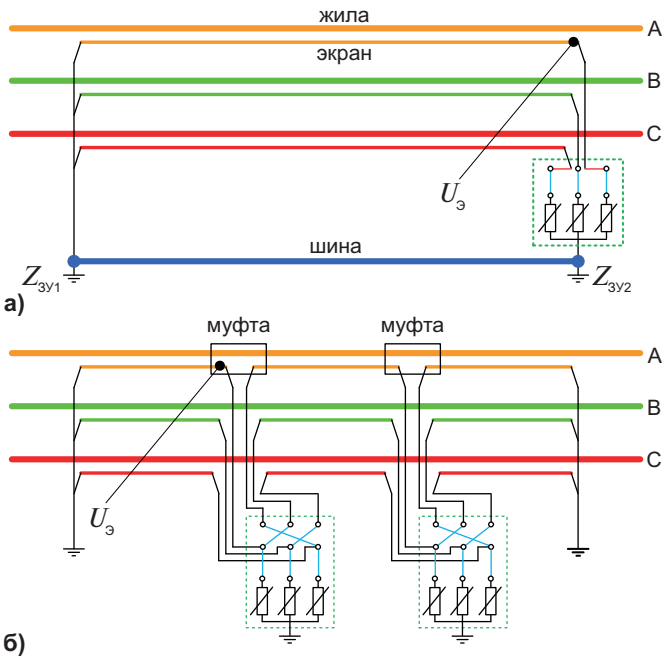


Рис. 4. Схемы без потерь в экранах кабелей: а) одностороннее заземление экранов; б) транспозиция экранов

– расстояния между фазами А, В, С;
– величин токов нормального режима;
– величин токов короткого замыкания (КЗ);
– уровней напряжения на экранах, которые сетевая компания считает допустимыми.

Методы расчета схем заземления экранов однофазных кабелей хорошо известны и описаны в стандартах [1, 4] и книге [5]. Не вдаваясь в детали, видно, что при выборе схемы заземления экранов имеется диапазон длин КЛ 110–500 кВ (условно от 600 до 1200 м), когда затруднительно выбрать какую-то конкретную схему. Можно сказать, что указанный диапазон длин линий является «неудобным», и этому есть два следующих пояснения:

1. При длинах КЛ более 500–600 м, если использовано одностороннее заземление экранов (рисунок 4а), — наведенные напряжения $U_Э$ обычно уже более допустимых уровней (расчетным является режим однофазного КЗ, случившегося в сети вне КЛ).

2. При длинах КЛ менее 1000–1200 м при типовых строительных длинах кабелей (обычно 500–600 м) — для строительства КЛ достаточно иметь всего две строительных длины (одна соединительная муфта), однако если использована транспозиция экранов, то число участков между муфтами должно быть не два, а три (две соединительные муфты, рисунок 4б).

В случаях, когда одностороннее заземление экранов опасно по причине $U_Э$, а для транспозиции экранов еще не хватает числа строительных длин, инженерам приходится прибегать к нестандартным решениям — одним из них является прокладка шины вдоль КЛ. На самом деле для применения шины могут быть различные причины (описаны в начале статьи), но наиболее интересным является применение шины для решения проблемы «неудобной» длины КЛ, и такая шина должна быть в оболочке.

Если у КЛ имеется одностороннее заземление экранов, и вдоль КЛ проложена заземленная с обеих концов шина, то (при корректном выборе материала шины и ее поперечного сечения) наведенное на экраны напряжение $U_Э$, согласно расчетам [5], можно снизить до двух раз. Это означает, что если без прокладки шины одностороннее заземление экранов было едва ли возможно для КЛ длиной более 500–600 м, то при прокладке шины эта предельная длина КЛ может быть увеличена до 2 раз, то есть до 1000–1200 м, и это уже целиком закроет проблемный диапазон «неудобных» длин КЛ.

Для принятия обоснованного решения о том, а выгодно ли применять шину (и если применять, то какую именно и как расположенную), необходимо:
– оценить возможный эффект от шины, для чего рассчитать напряжение $U_Э$ на экранах при КЗ в сети вне КЛ, для случая без шины и случая с ней (в нормальном режиме напряжение на экранах от шины не зависит, и на вопросы необходимости шины оно влияния не оказывает); в рамках расчета $U_Э$ необходимости рассмотреть различные варианты расположения шины, ее материала и поперечного сечения;
– оценить ток, наведенный в шине в нормальном режиме, и связанные с ним потери активной мощности в шине; в рамках расчетов оптимизировать расположение шины так, чтобы обеспечить в ней минимальные наведенные токи и потери мощности;
– оценить влияние шины, имеющей ток и потери мощности, на температуру кабелей, и убедиться, что это влияние не представляет опасности.

Рассмотрим далее три этих вопроса подробнее.

НАПРЯЖЕНИЕ НА ЭКРАНЕ ПРИ КЗ

Переменное напряжение $U_Э$ наводится на односторонне заземленные экраны КЛ благодаря магнитному полю токов, проходящих по жилам кабелей. В роли тока может выступать:
– ток нормального режима;
– ток трехфазного КЗ, возникшего в сети (за КЛ);
– ток однофазного КЗ, возникшего в сети (за КЛ).

Наибольшие наведенные напряжения на экранах возникают при однофазном КЗ, так как при этом значительное магнитное поле тока аварийной фазы не компенсируется магнитными полями двух других фаз (они не имеют повреждений). Для ограничения напряжения $U_Э$ при однофазном КЗ как раз и рекомендуется применять шину, и поэтому далее сосредоточим внимание на расчете именно этого случая (в начале определим $U_Э$ без шины, а затем — уже с учетом влияния шины).

Расчет установившегося переменного напряжения $U_Э$ на экране при однофазном КЗ, внешнем по отношению к КЛ, ведется с помощью теории комплексных чисел. Для расчета предварительно надо определить параметры земли и взаимные сопротивления.

Параметры земли. Эквивалентное активное сопротивление земли, согласно [5]:

$$R_З = \pi/4 \cdot \mu_0 \cdot f \cdot l_{КЛ},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — абсолютная магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; f — частота напряжений и токов сети, Гц, f = 50 Гц; $l_{КЛ}$ — длина КЛ, м.

Эквивалентная глубина переменного тока в земле, согласно [5]:

$$D_З = 1{,}85\sqrt{\frac{\rho_З}{\omega \cdot \mu_0}},$$

где 1,85 — коэффициент (иногда встречается значение 2,24); $\rho_З$ — удельное активное сопротивление грунта, Ом·м; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота напряжений и токов сети, рад/с, f = 50 Гц.

Взаимное сопротивление. Взаимная индуктивность между жилой и экраном, согласно [5]:

$$M_{ЖЭ} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot ln\left(\frac{D_З}{r_2}\right) \cdot l_{КЛ},$$

где $r_2 = d_Э / 2$ — радиус экрана, составляющий половину его диаметра $d_Э$.

Диаметр экрана $d_Э$ может быть оценен на основе каталожного значения диаметра кабеля d и толщины наружной полимерной оболочки $\Delta_{ОБ}$ (обычно около 5 мм):

$$d_Э = d - 2\Delta_{ОБ}.$$

Комплексное взаимное сопротивление:

$$\dot{Z}_{ЖЭ} = R_З + j\omega M_{ЖЭ},$$

где $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Напряжение на экране. Положим, что однофазное КЗ случилось где-то в сети вне КЛ и сопровождается

прохождением тока КЗ в жиле фазы А. Согласно [5], напряжение, наведенное на экране:

$$\dot{U}_{ЖА} = \dot{Z}_{ЖЭ} \cdot \dot{I}_{ЖА}, \quad (1)$$

где $\dot{I}_{ЖА}$ — комплексное значение тока в жиле аварийной фазы (здесь фазы А).

Напряжения, наведенные на экранах фаз В и С, будут менее напряжения фазы А, по жиле которой проходит ток КЗ. Поэтому нет смысла рассматривать $\dot{U}_{ЖВ}$ и $\dot{U}_{ЖС}$.

Не фокусируя внимание на том, в какой именно фазе было КЗ (фаза А, В или С), напряжение (1) можно обозначать просто как $U_Э$.

Напряжение $U_Э$, в расчете на 1000 м длины линии и 1000 А тока в жиле аварийной фазы, найдено по (1) и приведено на рисунке 5 в зависимости от диаметра $d_Э$ и глубины $D_З$. Пересчет на другой ток жилы $I_Ж$ и длину КЛ $l_{КЛ}$ проводится по формуле:

$$U_Э = U_Э^{рис} \cdot \frac{I_Ж}{1000} \cdot \frac{l_{КЛ}}{1000}.$$

Например, для КЛ класса 110 кВ у однофазного кабеля с медной жилой 1000 мм² и медным экраном 185 мм² по каталогу наружный диаметр d = 80 мм. При стандартной толщине оболочки $\Delta_{ОБ}$ = 5 мм диаметр экрана:

$$d_Э = d - 2\Delta_{ОБ} = 70 \text{ мм}.$$

Для такого кабеля, согласно рисунку 5, при типовом грунте $\rho_З$ = 100 Ом·м получаем наводку $U_Э^{рис} \approx 640$ В на каждые 1000 А тока жилы КЛ и 1000 м длины КЛ. Например, если при внешнем однофазном КЗ по жиле кабеля проходит ток $I_Ж$ = 30 кА, а длина составляет $l_{КЛ}$ = 500 м, то получим наведенное напряжение на экране:

$$U_Э = 640 \cdot \frac{30000}{1000} \cdot \frac{500}{1000} = 9600 \text{ В},$$

что примерно в 2 раза превышает значение 5000 В, которое считается предельно допустимым для экрана (наружной оболочки кабелей) на время КЗ [4, 5]. Как видно, расчеты показывают, что одностороннее заземление здесь применять нельзя.

Покажем, как решить проблему опасного наведенного напряжения с помощью эквипотенциальной шины, проложенной вдоль КЛ и заземленной с двух сторон.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ШИНЫ

Напряжение $U_Э$, наведенное на экран кабеля за счет магнитного поля тока КЗ, проходящего по жиле кабеля аварийной фазы сети, определяется площадью контура «экран-земля». Для КЛ площадь этого контура значительна, так как она определяется глубиной тока в земле $D_З$, составляющей сотни метров (на частоте 50 Гц). Если вдоль КЛ проложить шину, заземленную с двух сторон и поэтому имеющую потенциал земли, то площадь контура «экран-земля» снижается в десятки раз, так как определяется уже не глубиной $D_З$, а расстоянием от шины до кабелей КЛ.

При наличии шины (покрытой оболочкой) расчет напряжения на экране удобно вести по методике [5]. Для расчета предварительно надо определить параметры шины и взаимные сопротивления.

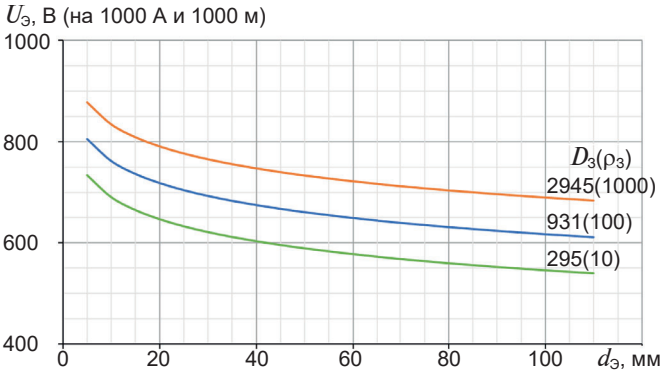


Рис. 5. Напряжение на экране аварийной фазы при наличии в сети однофазного КЗ (схема рисунка 4а без учета шины вдоль КЛ)

Параметры шины. Активное сопротивление шины, согласно [5]:

$$R_Ш = \rho_Ш \cdot \frac{1}{F_Ш} \cdot l_{КЛ},$$

где $\rho_Ш$ — удельное активное сопротивление материала шины (Ом·м); $F_Ш$ — поперечное сечение шины.

Собственная индуктивность шины, согласно [5]:

$$L_Ш = \left(\frac{\mu_0}{8\pi} + \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot ln\left(\frac{D_З}{r_Ш}\right)\right) \cdot l_{КЛ},$$

где $\mu_0 / 8\pi$ — внутренняя индуктивность шины; $r_Ш$ — наружный радиус проводника шины.

Комплексное сопротивление шины, согласно [5]:

$$\dot{Z}_Ш = R_З + R_Ш + j\omega L_Ш,$$

где $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Взаимное сопротивление. Взаимная индуктивность между кабелем аварийной фазы (пусть фазы А) и шиной:

$$M_{ША} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot ln\left(\frac{D_З}{S_{ША}}\right) \cdot l_{КЛ},$$

$S_{ША}$ — расстояние между осями шины и кабеля аварийной фазы А.

Комплексное взаимное сопротивление, согласно [5]:

$$\dot{Z}_{ША} = R_З + j\omega M_{ША}.$$

Если шина изменяет свое положение вдоль трассы КЛ, то сопротивление $\dot{Z}_{ША}$ будет представлять из себя сумму сопротивлений на отдельных участках трассы КЛ

$$\dot{Z}_{ША} = \dot{Z}_{ША_1} + \dot{Z}_{ША_2} + ... + \dot{Z}_{ША_n},$$

где n — число вариантов расположения шины вдоль трассы КЛ; $\dot{Z}_{ША_i}$ — взаимное сопротивление на i-й секции КЛ, определяемое через расстояние $S_{ША_i}$, соблюдаемое в рамках i-й секции, и длину секции $l_{КЛ_i}$.

Напряжение на экране. Положим, что однофазное КЗ случилось где-то в сети вне КЛ и сопровождается прохождением тока КЗ в жиле фазы А. Тогда напряжение, наведенное на экране, при наличии шины, согласно [5], может быть определено по формуле:

$$\dot{U}_{ША} = \left(\dot{Z}_{ЖЭ} - \dot{Z}_{ША} \cdot \frac{\dot{Z}_{ША} + \dot{Z}_{ЗУ_1}}{\dot{Z}_Ш + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}}\right) \cdot \dot{I}_{ЖА}, \quad (2)$$

где $\dot{I}_{ЖА}$ — комплексное значение тока в жиле аварийной фазы (здесь — фазы А); $Z_{ЗУ_1}$ и $Z_{ЗУ_2}$ — сопротивления заземляющих устройств по концам КЛ (рисунок 4а).

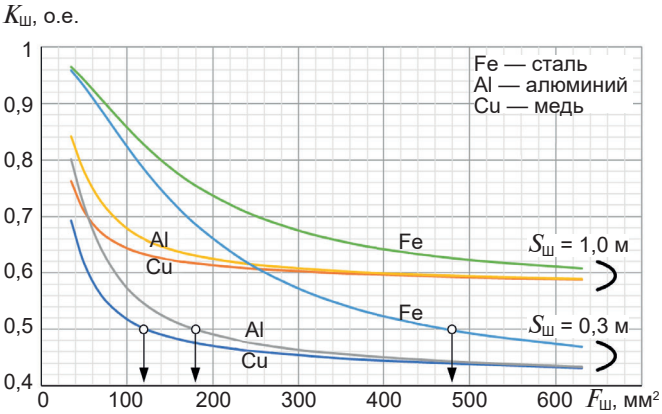


Рис. 6. Эффект от использования шины в схеме рисунка 4а

Коэффициенты шины. Оценка влияния шины на наведенное напряжение может быть выполнена путем сравнения расчетов по формулам (1) и (2). Разделив (2) на (1), получим коэффициент, характеризующий эффективность шины:

$$\dot{K}_{ША} = \frac{U'_{ЭА}}{U''_{ЭА}} = 1 - \frac{\dot{Z}_{ША}}{\dot{Z}_{ЖЭ}} \cdot \frac{\dot{Z}_{ША} + Z_{ЗУ1}}{\dot{Z}_{Ш} + Z_{ЗУ1} + Z_{ЗУ2}},$$

где $U'_{ЭА}$ — напряжение на экране аварийной фазы А при наличии шины; $U''_{ЭА}$ — напряжение на экране аварийной фазы А при отсутствии шины.

Предположим, что заземляющие контуры идеальны $Z_{ЗУ1} \to 0$, $Z_{ЗУ2} \to 0$, и тогда приведенное выше выражение можно упростить, что позволяет получить:

$$\dot{K}_{ША} = 1 - \frac{(\dot{Z}_{ША})^2}{\dot{Z}_{ЖЭ} \cdot \dot{Z}_{Ш}}. \qquad (3)$$

При отсутствии шины справедливо $\dot{Z}_{Ш} \to \infty$, и тогда из выражения можно найти $K_{ША} = 1$, то есть снижения наведенного в экранах напряжения $U_{ЭА}$ не происходит. Если же шина все же проложена, то в таком случае коэффициент $K_{ША} < 1$, и чем он меньше, тем эффективнее шина снижает напряжение, наведенное в экранах (при однофазном КЗ вне КЛ).

На практике положение шины относительно кабелей фаз А, В, С периодически изменяют таким образом, чтобы добиться выполнения условия $S_{ША} \approx S_{ШВ} \approx S_{ШС}$, то есть равноудаленности шины от любой из трех фаз (в таком случае эффект от шины будет одинаковым вне зависимости от того, в какой из фаз в сети было однофазное КЗ). Это позволяет в дальнейшем не фокусировать внимание на том, в какой именно фазе было КЗ (фаза А, В или С) и для какой именно из трех фаз определяется коэффициент по (3), что, в свою очередь, позволяет обозначать коэффициент просто как $K_Ш$.

Результаты расчетов (3) коэффициента $K_Ш$ приведены на рисунке 6 в зависимости от сечения шины $F_Ш$, ее материала (Cu, Al, Fe), среднего расстояния $S_Ш$ до аварийной фазы. Эти расчеты выполнены для типового сопротивления грунта $\rho_З$ = 100 Ом·м, что на частоте f = 50 Гц отвечает глубине тока $D_З$ = 931 м.

В условиях рассмотренного выше примера КЛ 110 кВ длиной 500 м наведенное напряжение без шины было $U''_Э$ = 9600 В, что в два раза больше допустимого уровня 5000 В (положим, что шина обеспечила $U'_Э$ = 5000 В). Таким образом, для обеспечения возможности безопасного применения одностороннего заземления экранов КЛ следует иметь коэффициент $K_Ш = U'_Э / U''_Э \approx 0{,}5$, что согласно рисунку 6, может быть достигнуто в случае применения любой из трех шин:

– шина сечением 120 мм² из меди;
– шина сечением 185 мм² из алюминия;
– шина сечением 480 мм² из стали.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКА В ШИНЕ

Наведенный ток частоты 50 Гц появляется в шине не только при КЗ (благодаря чему шина и снижает напряжение $U_Э$), но также и в нормальном режиме. Иначе говоря, в шине на протяжении всего срока нормальной эксплуатации КЛ может проходить ток частоты 50 Гц, и с этим приходиться считаться.

Как отмечалось ранее, необходимо обеспечить равноудаленность шины от трех фаз А, В, С. Для этого приходится периодически изменять положение шины (рисунки 7б и 7в) или даже применять две шины (рисунки 7г и 7д). Рассмотрим далее расчеты тока в шине (шинах) для нормального режима работы, когда токи $\dot{I}_{ЖА}$, $\dot{I}_{ЖВ}$, $\dot{I}_{ЖС}$ в жилах трех фаз А, В, С представляют собой тройку токов прямой последовательности.

Расчеты наведенного тока в шине можно выполнить как по формулам, так и с помощью известной программы ATP/EMTP (пример схемы дан на рисунке 8). Данная программа является простым и удобным способом проверки корректности матема-

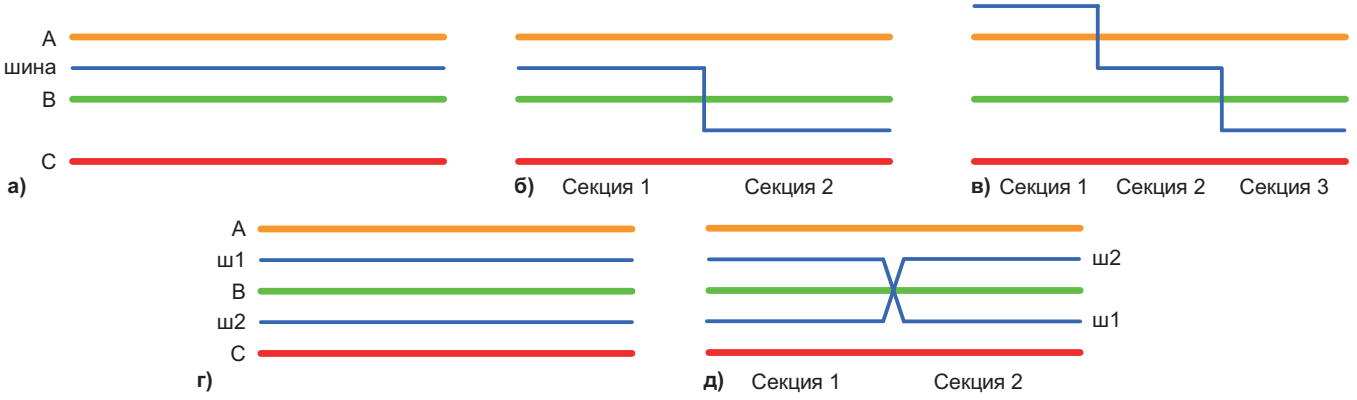


Рис. 7. Варианты расположения шины вдоль КЛ: а-в) одна шина; г-д) две шины; а, г) одна секция; б, д) две секции; в) три секции

тических выражений для расчета тока в шине, предлагаемых в данной статье. Как показывают исследования, формулы дают результаты, отличающиеся от расчетов в программе не более чем на 1%, что вполне достаточно. Рассмотрим далее эти формулы для случаев одной шины или сразу двух, для вариантов без транспозиции шины и с ней.

Одна шина. Для варианта рисунка 7а, согласно [5], падение напряжения на шине составляет:

$$\Delta\dot{U}_{Ш} = (\dot{Z}_{Ш} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш} + \\ + (\dot{Z}_{ША} \cdot \dot{I}_{ЖА} + \dot{Z}_{ШВ} \cdot \dot{I}_{ЖВ} + \dot{Z}_{ШС} \cdot \dot{I}_{ЖС}) = 0,$$

откуда ток в шине

$$\dot{I}_{Ш} = -\frac{\dot{Z}_{ША} \cdot \dot{I}_{ЖА} + \dot{Z}_{ШВ} \cdot \dot{I}_{ЖВ} + \dot{Z}_{ШС} \cdot \dot{I}_{ЖС}}{\dot{Z}_{Ш} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}}. \quad (4)$$

Для варианта рисунка 7б ток в шине определяется как:

$$\dot{I}_{Ш} = -\frac{(\dot{Z}_{ША_1} + \dot{Z}_{ША_2}) \cdot \dot{I}_{ЖА} + (\dot{Z}_{ШВ_1} + \dot{Z}_{ШВ_2}) \cdot \dot{I}_{ЖВ} + (\dot{Z}_{ШС_1} + \dot{Z}_{ШС_2}) \cdot \dot{I}_{ЖС}}{2 \cdot (\dot{Z}_{Ш} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2})}. \quad (5)$$

Для варианта рисунка 7в ток в шине определяется как:

$$\dot{I}_{Ш} = -\frac{(\dot{Z}_{ША_1} + \dot{Z}_{ША_2} + \dot{Z}_{ША_3}) \cdot \dot{I}_{ЖА} + (\dot{Z}_{ШВ_1} + ..) \cdot \dot{I}_{ЖВ} + (\dot{Z}_{ШС_1} + ..) \cdot \dot{I}_{ЖС}}{3 \cdot (\dot{Z}_{Ш} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}).}. \quad (6)$$

Согласно опыту эксплуатации, шина из меди, в отличие от шины из алюминия или стали, оказывается более стойкой к коррозии в условиях постоянного наличия тока в шине и проникновения в нее влаги, и поэтому далее, приводя пример расчета для конкретной КЛ 110 кВ, основное внимание сосредоточим на шине из меди, а алюминий или сталь рассматривать не будем.

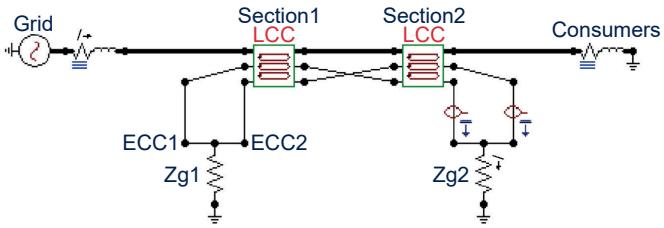


Рис. 8. Пример расчетной схемы в программе ATP/EMTP

Итак, рассмотрим пример расчета тока шины по формулам (4)–(6) для КЛ 110 кВ, представляющей собой три однофазных кабеля с медной жилой 1000 мм² и медным экраном 185 мм², которые проложены в ряд с расстоянием между осями, равным 0,2 м. Кабели имеют заземление экранов с одной стороны (схема рисунка 4а), а токи в жилах А, В, С полагаются равными 1000 А. Пусть применена медная шина сечением 185 мм². Выполним расчеты для следующих возможных положений шины:

– рисунки 7а и 7б — шина лежит посередине между соседними кабелями, в одной плоскости с ними;
– рисунок 7в — шина треть трассы лежит над кабелем фазы А (на расстоянии по вертикали, равном 0,1 м, между осями шины и фазы), затем треть трассы над кабелем фазы В, затем треть трассы над кабелем фазы С.

Результаты расчетов по формулам (4)–(6) представлены далее на рисунке 9, где видно, что оптимизация расположения шины (транспозиция шины)

МОДУЛЬ

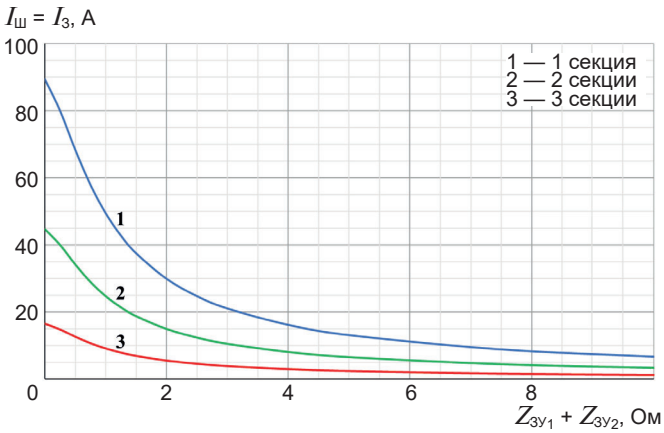


Рис. 9. Ток в шине (в земле) в нормальном режиме для вариантов рисунков 7а, 7б и 7в

позволяет снизить ток шины, наведенный в нормальном режиме. Это важно, так как такой ток вызывает:

– потери активной мощности в шине, нагревающие ее и требующие оплаты;
– шаговые напряжения контуров заземления по концам линии, а также их коррозию.

Две шины. Расчет случая двух шин требует ввода взаимной индуктивности между шинами и соответствующего взаимного сопротивления:

$$M_{Ш12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot ln\left(\frac{D_З}{S_{Ш12}}\right) \cdot l_{КЛ},$$
$$\dot{Z}_{Ш12} = R_З + j\omega M_{Ш12},$$

где $S_{Ш12}$ — взаимное расстояние между осями шин.

Для варианта рисунка 7г падение напряжения на шинах 1 и 2 определяется как:

$$\Delta\dot{U}_{Ш1} = (\dot{Z}_{Ш1} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш1} + (\dot{Z}_{Ш12} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш2} + (\dot{Z}_{Ш1A}\dot{I}_{ЖA} + \dot{Z}_{Ш1B}\dot{I}_{ЖB} + \dot{Z}_{Ш1C}\dot{I}_{ЖC}) = 0,$$
$$\Delta\dot{U}_{Ш2} = (\dot{Z}_{Ш12} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш1} + (\dot{Z}_{Ш2} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш2} + (\dot{Z}_{Ш2A}\dot{I}_{ЖA} + \dot{Z}_{Ш2B}\dot{I}_{ЖB} + \dot{Z}_{Ш2C}\dot{I}_{ЖC}) = 0,$$

где $\dot{I}_{Ш1}$, $\dot{I}_{Ш2}$ — искомые токи в шинах 1 и 2, наведенные там токами кабелей.

После преобразований получим уравнения:

$$(\dot{Z}_{Ш1} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш1} + (\dot{Z}_{Ш12} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш2} = \dot{E}_{Ш1},$$
$$(\dot{Z}_{Ш12} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш1} + (\dot{Z}_{Ш2} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2}) \cdot \dot{I}_{Ш2} = \dot{E}_{Ш2},$$

где $\dot{E}_{Ш1}$, $\dot{E}_{Ш2}$ — обозначения ЭДС, наведенных в шинах токами кабелей:

$$\dot{E}_{Ш1} = -(\dot{Z}_{Ш1A}\dot{I}_{ЖA} + \dot{Z}_{Ш1B}\dot{I}_{ЖB} + \dot{Z}_{Ш1C}\dot{I}_{ЖC}),$$
$$\dot{E}_{Ш2} = -(\dot{Z}_{Ш2A}\dot{I}_{ЖA} + \dot{Z}_{Ш2B}\dot{I}_{ЖB} + \dot{Z}_{Ш2C}\dot{I}_{ЖC}).$$

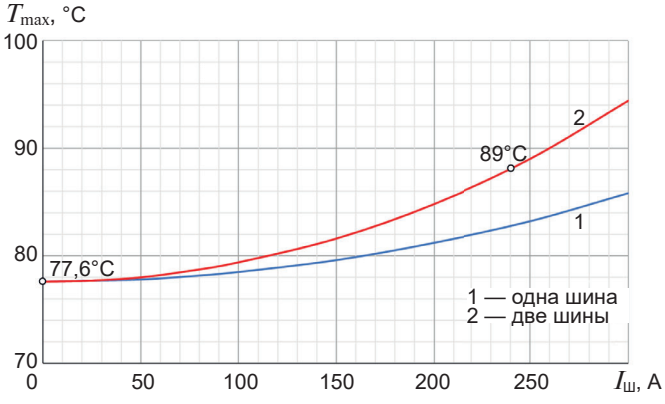


Рис. 11. Максимальная температура КЛ в зависимости от тока шины (шин)

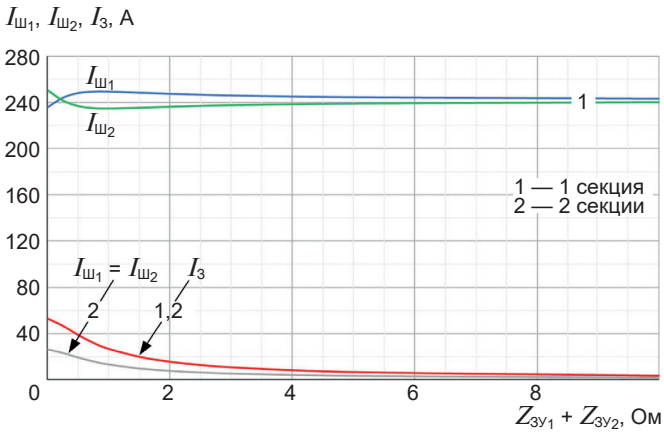


Рис. 10. Токи в шинах и земле в нормальном режиме для вариантов рисунков 7г и 7д

Итак, для рисунка 7г имеем матричное уравнение $\boldsymbol{Z} \cdot \boldsymbol{I} = \boldsymbol{E}$ и решение для токов $\boldsymbol{I}$:

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{Z}^{-1} \cdot \boldsymbol{E},$$
$$\boldsymbol{I} = \begin{vmatrix} \dot{I}_{Ш1} \\ \dot{I}_{Ш2} \end{vmatrix}, \qquad \boldsymbol{E} = \begin{vmatrix} \dot{E}_{Ш1} \\ \dot{E}_{Ш2} \end{vmatrix},$$
$$\boldsymbol{Z} = \begin{vmatrix} \dot{Z}_{Ш1} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2} & \dot{Z}_{Ш12} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2} \\ \dot{Z}_{Ш12} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2} & \dot{Z}_{Ш2} + \dot{Z}_{ЗУ_1} + \dot{Z}_{ЗУ_2} \end{vmatrix}, \qquad (7)$$

где Z — матрица собственных и взаимных сопротивлений шин; I — вектор-столбец искомых токов шин; E — вектор-столбец ЭДС, наведенных в шинах.

Для варианта рисунка 7д формулы аналогичны (7), за исключением вектора ЭДС:

$$\boldsymbol{E} = \begin{vmatrix} \dot{E}_{Ш1} / 2 + \dot{E}_{Ш2} / 2 \\ \dot{E}_{Ш2} / 2 + \dot{E}_{Ш1} / 2) \end{vmatrix}. \qquad (8)$$

Расчет для двух медных шин сечением 185 мм² каждая приведен на рисунке 10. При этом предполагалось, что шины 1 и 2 уложены посередине между соседними кабелями (фазами). Из рисунка следует, что имеется два разных типа контуров и токов в них:

– контур «шина 1 — шина 2», где замыкается значительный ток, который почти не зависит от суммарного сопротивления заземления $Z_{ЗУ_1} + Z_{ЗУ_2}$ в начале и конце КЛ;
– контур «две шины — земля», ток в котором $I_З$ значительно меньше и ограничивается суммарным сопротивлением заземления $Z_{ЗУ_1} + Z_{ЗУ_2}$.

Также видно, что ток в шинах зависит от их транспозиции — меняются ли две шины местами («2 секции», рисунок 7д) или не меняются («1 секция», рисунок 7г). При этом ток в контуре «шины-земля» остается независящим от наличия транспозиции шин.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЛИНИИ С ШИНОЙ

Расчеты показали, что хотя шина приносит пользу при КЗ, в нормальном режиме, напротив, она может создать проблемы, связанные с наличием наведенного тока. Чтобы оценить последствия наличия тока в шине в нормальном режиме, для рассмотренной КЛ 110 кВ выполнена серия тепловых расчетов, результаты которых даны на рисунке 11.

Из графика рисунка видно, как в нормальном режиме наведенный ток в шине (в каждой из шин, если их две) повышает температуру наиболее нагретой из трех фаз А, В, С. Видно, что нагрев менее 1°С характерен только в случае, когда ток в шине не превосхо-

дит 50 А. Таким образом, ясно, что с целью минимизации влияния шины на нормальный режим, выбор оптимального расположения шины (шин) и схемы транспозиции шины (шин) является важным вопросом при проектировании КЛ.

Например, для случая двух шин с током каждой 240 А температурное поле дано на рисунке 12. Видно, что температура наиболее нагретой фазы КЛ составляет 89°С против 77,6°С в случае, когда в шинах тока нет (указанные температуры помечены на рисунке 11).

Следует отметить, что тепловые расчеты КЛ, учитывающие влияние шины на температуру кабелей КЛ, отсутствуют в ключевом отраслевом документе [6], что при определении сечений жил кабелей может приводить к ошибкам, особенно заметным при неоптимальном выборе расположения шины и схемы ее транспозиции.

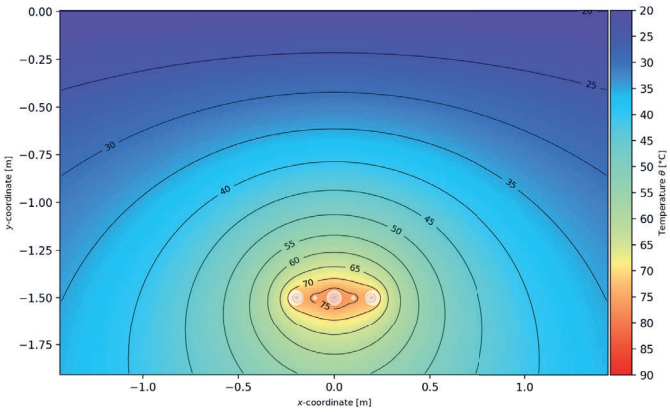


Рис. 12. Тепловой расчет КЛ с двумя шинами по 240 А (температура КЛ до 89°С)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены причины, по которым вдоль КЛ может быть проложен дополнительный проводник, покрытый наружной оболочкой (или без нее), называемый «эквипотенциальной шиной». В мировой практике такой проводник широко известен как Earth Continuity Conductor (ECC), и его можно встретить на некоторых КЛ классов 110–500 кВ, преимущественно небольшой длины до 1000–1200 м, где он позволяет снизить до безопасного уровня напряжение на односторонне заземленных экранах.

Интересно, что в ряде стран данный проводник (шина, ECC) встречается редко, и отчасти это обстоятельство, наверное, можно объяснить недостаточным пониманием тех функций, которые мог бы выполнять такой проводник, а также отсутствием простой методики выбора его оптимальных параметров. Поэтому в будущем описание функций проводника и методов расчета, предложенных в статье, было бы полезно добавить в обновленную версию документов [1–4] и [6].

В странах СНГ на КЛ 110–500 кВ длиной от 500–600 м до 1000–1200 м практика такова, что для снижения напряжения на экранах до допустимых уровней линию обычно делят на две секции, для каждой из которых выполняют одностороннее заземление экранов. Решение требует обустройства узла сопряжения двух соседних секций КЛ, размещения в нем электромонтажных коробок с ограничителями перенапряжений (ОПН), а также организации контура заземления — однако все это было бы не нужно, если бы снижение наведенного напряжения на экранах выполнялось не за счет роста числа односторонне заземленных секций, а за счет прокладки шины, рассмотренной в статье.

При использовании шины важно уделять внимание выбору:
- оптимального числа шин (1, 2);
- материала шины;
- сечения шины;
- расположения шины относительно кабелей фаз А, В, С;
- схемы транспозиции шины.

Оптимальный выбор перечисленных факторов должен обеспечить достаточное снижение наводок на экраны при несимметричных КЗ и в то же время минимальный ток в шине в нормальном режиме. При этом последовательность проектирования может быть рекомендована следующей:

1) определить наводки на экран, что позволит выбрать материал и сечение шины;

2) уточнить положение шины относительно кабелей А, В, С и схему ее транспозиции, чтобы добиться минимальных токов в шине в нормальном режиме — расчеты можно сделать как по формулам статьи, так и в программе EMTP;

3) выполнить подробный тепловой расчет КЛ в нормальном режиме ее работы и с его помощью убедиться, что шина с учетом тока и потерь мощности в ней не оказывает опасного влияния на температуру КЛ.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCE

1. IEEE Std 575-2014. Guide for bonding shields and sheaths of single-conductor power cables rated 5 kV through 500 kV.
2. CIGRE TB 797. Sheath bonding systems of ac transmission cables – design, testing, and maintenance. March 2020.
3. CIGRE TB 889. Installation of underground HV cable systems. January 2023.
4. СТО 56947007-29.060.20.103-2011. Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена / STO 56947007-29.060.20.103-2011 "Power cables with XLPE insulation of 110-500 kV voltage classes. Methodology for calculating of screen bonding and grounding", 2011. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200088441
5. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб.: Изд-во Политех-ПРЕСС, 2021. 688 с. / Mikhail Dmitriev "High voltage cable lines". – St. Petersburg: "Polytech PRESS" Publishing House, 2021. – 688 p.
6. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки / IEC 60287 "Electrical cables. Calculation of the current rating". URL: https://docs.cntd.ru/document/1200072879.