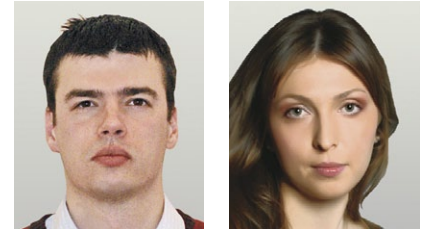


В медных экранах кабельных линий 6–500 кВ, состоящих из однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, наводятся токи и напряжения, величины которых зависят от схемы соединения и заземления экранов. В длинных кабельных линиях обычно применяется двустороннее заземление экранов или их транспозиция. В коротких кабельных линиях используют простое одностороннее заземление. Для снижения напряжений на односторонне заземленных экранах и возможности использования этого типа заземления в линиях большой длины параллельно кабельной линии можно проложить двусторонне заземленную шину. Например, такая шина установлена в Москве совместно с кабелем 500 кВ NEXANS, во Владивостоке – совместно с кабелем 110 кВ TAIHAN.

В статье петербургских авторов исследована эффективность подобного решения.



**Михаил Дмитриев,**  
к.т.н., начальник  
отдела НТИ  
ЗАО «Завод  
энергозащитных  
устройств»

**Маргарита  
Кияткина,**  
аспирант  
СПбГПУ,

г. Санкт-Петербург.

## МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ШИНА

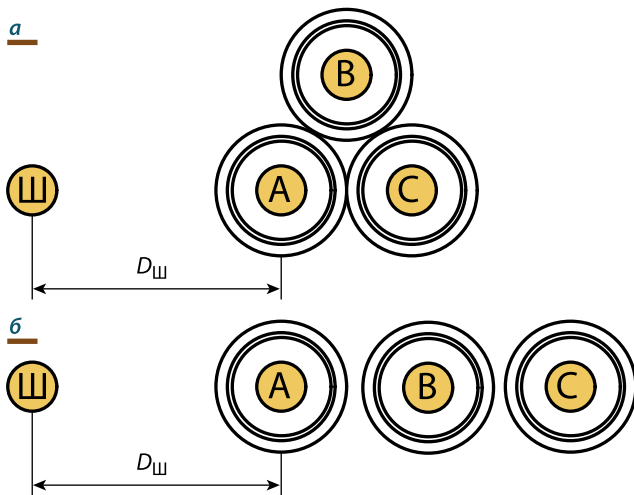
### Эффективность при параллельной прокладке с однофазными кабелями

#### СИСТЕМА «КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ – ШИНА»

Рассмотрим кабельную линию (КЛ), состоящую из однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, параллельно которой проложена проводящая шина, как это показано на рис. 1. Пусть экран заземлен в одном из концов, а шина – в обоих концах (рис. 2).

Запишем уравнения установившегося режима для падений напряжения вдоль экранов и шины с учетом сопротивлений их заземляющих устройств:

• Рис. 1. Взаимное расположение кабелей линии и шины  
а) при прокладке кабелей в треугольник,  
б) при прокладке кабелей в ряд.



• Рис. 2. Схема заземления экранов кабелей и шины



$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ЭА}} &= Z_{\text{Э}} I_{\text{ЭА}} + Z_{\text{ЖЭ}} I_{\text{ЖА}} + Z_{\text{АВ}} (I_{\text{ЖВ}} + I_{\text{ЭВ}}) + \\ &+ Z_{\text{АС}} (I_{\text{ЖС}} + I_{\text{ЭС}}) + (Z_{\text{ША}} + Z_{\text{ЗУ1}}) \cdot I_{\text{Ш}}, \\ \Delta U_{\text{ЭВ}} &= Z_{\text{Э}} I_{\text{ЭВ}} + Z_{\text{ЖЭ}} I_{\text{ЖВ}} + Z_{\text{ВС}} (I_{\text{ЖС}} + I_{\text{ЭС}}) + \\ &+ Z_{\text{АВ}} (I_{\text{ЖА}} + I_{\text{ЭА}}) + (Z_{\text{ШВ}} + Z_{\text{ЗУ1}}) \cdot I_{\text{Ш}}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ЭС}} &= Z_{\text{Э}} I_{\text{ЭС}} + Z_{\text{ЖЭ}} I_{\text{ЖС}} + Z_{\text{АС}} (I_{\text{ЖА}} + I_{\text{ЭА}}) + \\ &+ Z_{\text{ВС}} (I_{\text{ЖВ}} + I_{\text{ЭВ}}) + (Z_{\text{ШС}} + Z_{\text{ЗУ1}}) \cdot I_{\text{Ш}}, \\ \Delta U_{\text{Ш}} &= (Z_{\text{Ш}} + Z_{\text{ЗУ1}} + Z_{\text{ЗУ2}}) I_{\text{Ш}} + Z_{\text{ША}} (I_{\text{ЖА}} + I_{\text{ЭА}}) + \\ &+ Z_{\text{ШВ}} (I_{\text{ЖВ}} + I_{\text{ЭВ}}) + Z_{\text{ШС}} (I_{\text{ЖС}} + I_{\text{ЭС}}), \end{aligned}$$

где  $Z_{\text{Э}}$  – собственное сопротивление экрана;

$Z_{\text{ЖЭ}}$  – взаимное сопротивление между жилой и экраном одного и того же кабеля;

$Z_{\text{АВ}}, Z_{\text{ВС}}, Z_{\text{АС}}$  – взаимные сопротивления жил (экранов) кабелей фаз А и В, В и С, С и А соответственно;

$Z_{\text{ША}}, Z_{\text{ШВ}}, Z_{\text{ШС}}$  – взаимные сопротивления шины и жил (экранов) фаз А, В и С кабеля;

$Z_{\text{ЗУ1}}$  – сопротивление общего заземляющего устройства экрана и шины;

$Z_{\text{ЗУ2}}$  – сопротивление заземляющего устройства шины;

$Z_{\text{Ш}}$  – собственное сопротивление шины;

$I_{\text{ЭА}}, I_{\text{ЭВ}}, I_{\text{ЭС}}$  – токи в экранах кабелей;

$I_{\text{ЖА}}, I_{\text{ЖВ}}, I_{\text{ЖС}}$  – токи в жилах кабелей;

$I_{\text{Ш}}$  – ток шины.

Выражения для вычисления сопротивлений приведены в [1, 2].

Для системы (1), с учетом рис. 2, можно записать следующие условия:

$$\begin{aligned} I_{\text{ЭА}} &= 0, \\ I_{\text{ЭВ}} &= 0, \\ I_{\text{ЭС}} &= 0, \\ \Delta U_{\text{Ш}} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для оценки необходимости использования проводящей шины исследуем ее влияние в нормальном режиме и при различных видах КЗ. Согласно [2], при выборе схемы заземления экранов рассматривают короткие замыкания в сети вне кабеля (внешние КЗ).

#### Нормальный режим и трехфазное короткое замыкание

В симметричных режимах, к которым относятся нормальный режим и трехфазное КЗ, токи в жилах кабелей линии образуют тройку токов прямой последовательности:

$$I_{\text{ЖА}} + I_{\text{ЖВ}} + I_{\text{ЖС}} = 0.$$

Из системы уравнений (1) с учетом (2) следует, что ток шины:

$$I_{\text{Ш}} = \frac{Z_{\text{ША}} I_{\text{ЖА}} + Z_{\text{ШВ}} I_{\text{ЖВ}} + Z_{\text{ШС}} I_{\text{ЖС}}}{Z_{\text{Ш}} + Z_{\text{ЗУ1}} + Z_{\text{ЗУ2}}}. \quad (3)$$

Если расстояние от КЛ до шины  $D_{\text{Ш}}$  много больше расстояния между фазами, то  $\dot{Z}_{\text{ША}} \approx \dot{Z}_{\text{ШВ}} \approx \dot{Z}_{\text{ШС}}$ , и тогда  $\dot{I}_{\text{Ш}} \approx 0$ . В силу отсутствия тока в шине в симметричных режимах она не будет оказывать влияния на процессы в кабельной линии.

### Однофазное короткое замыкание

В сетях 6–35 кВ (с изолированной, компенсированной или резистивно-заземленной нейтралью) токи однофазного замыкания на землю малы и для расчетов заземления экранов используют трехфазное КЗ, внешнее по отношению к кабелю [2]. Как было показано выше, при таком виде КЗ шина не оказывает влияния на процессы в кабельной линии, т.е. применение шины в сетях 6–35 кВ нецелесообразно.

В сетях 110–500 кВ (с эффективно- или глухозаземленной нейтралью) однофазное КЗ является расчетным. Рассмотрим однофазное КЗ фазы А вне кабеля, при этом токами в неповрежденных фазах КЛ можно пренебречь по сравнению с током аварийной фазы, т.е. считать  $\dot{I}_{\text{ЖВ}} \approx 0$  и  $\dot{I}_{\text{ЖС}} \approx 0$ .

Из системы уравнений (1) с учетом (2) следует:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}'_{\text{ЭА}} &= \left( \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} - \frac{\dot{Z}_{\text{ША}}^2 + \dot{Z}_{\text{ША}} \dot{Z}_{\text{ЗУ1}}}{\dot{Z}_{\text{Ш}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ1}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ2}}} \right) \dot{I}_{\text{ЖА}}, \\ \Delta \dot{U}'_{\text{ЭВ}} &= \left( \dot{Z}_{\text{АВ}} - \frac{\dot{Z}_{\text{ША}} \dot{Z}_{\text{ШВ}} + \dot{Z}_{\text{ША}} \dot{Z}_{\text{ЗУ1}}}{\dot{Z}_{\text{Ш}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ1}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ2}}} \right) \dot{I}_{\text{ЖА}}, \\ \Delta \dot{U}'_{\text{ЭС}} &= \left( \dot{Z}_{\text{АС}} - \frac{\dot{Z}_{\text{ША}} \dot{Z}_{\text{ШС}} + \dot{Z}_{\text{ША}} \dot{Z}_{\text{ЗУ1}}}{\dot{Z}_{\text{Ш}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ1}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ2}}} \right) \dot{I}_{\text{ЖА}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнения (3) следует:

$$\dot{I}_{\text{Ш}} = \frac{\dot{Z}_{\text{ША}} \dot{I}_{\text{ЖА}}}{\dot{Z}_{\text{Ш}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ1}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ2}}}. \quad (5)$$

При отсутствии шины уравнения (4) для наведенных на экраны кабелей напряжений упрощаются, и для случая однофазного КЗ примут вид:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}'_{\text{ЭА}} &= \dot{Z}_{\text{ЖЭ}} \dot{I}_{\text{ЖА}}, \\ \Delta \dot{U}'_{\text{ЭВ}} &= \dot{Z}_{\text{АВ}} \dot{I}_{\text{ЖА}}, \\ \Delta \dot{U}'_{\text{ЭС}} &= \dot{Z}_{\text{АС}} \dot{I}_{\text{ЖА}}. \end{aligned}$$

Из (4) следует, что шина снижает наведенное на экранах напряжение. Для оценки степени снижения наведенных напряжений введем коэффициент эффективности:

$$K_{\text{ЭФФ}} = \frac{\Delta U'_{\text{Э}}}{\Delta U''_{\text{Э}}},$$

где  $\Delta U'_{\text{Э}}$  – падение напряжения на экране кабеля в случае, когда заземляющей шины нет;

$\Delta U''_{\text{Э}}$  – в случае, когда шина есть.

Наибольшее напряжение на экране будет на той фазе кабеля, на которой в сети имеет место однофазное КЗ. Коэффициент эффективности для аварийной фазы (фазы А):

$$K_{\text{ЭФФ}} = \frac{1}{1 - \frac{\dot{Z}_{\text{ША}}^2 + \dot{Z}_{\text{ША}} \dot{Z}_{\text{ЗУ1}}}{(\dot{Z}_{\text{Ш}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ1}} + \dot{Z}_{\text{ЗУ2}}) \dot{Z}_{\text{ЖЭ}}}}. \quad (6)$$

Следует отметить, что параметры кабельной линии, входящие в выражения (4)–(6), зависят от величины  $D_3$  – эквивалентной глубины залегания обратного провода в земле. В случае, если бы линия проходила за городом и длина ее составляла десятки километров, параметры обратного провода определялись бы только свойствами грунта (удельным сопротивлением грунта  $\rho_3$ ), и эквивалентная глубина могла быть найдена как:

$$D_3 = 2,24 \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \mu_0}}.$$

Обыкновенно же кабельные линии имеют длину не более нескольких километров и прокладываются в городской черте или на территории распределительных устройств станций и подстанций, где в земле находится множество металлоконструкций. В этих условиях эквивалентную глубину  $D_3$  следует принимать равной единицам или десяткам метров вне зависимости от параметров грунта.

Напряжение промышленной частоты на экране относительно земли в начале кабеля  $\dot{U}_{\text{ЭН}}$  равно падению напряжения, которое создает ток шины, стекая с нее в землю через общее с экраном заземляющее устройство (рис. 2):

• **Таблица 1.** Напряжение на экране аварийной фазы и коэффициент эффективности шины при различных сечениях шины ( $D_{Ш} = 0,5$  м,  $Z_{ЗУ1} = 0,5$  Ом,  $Z_{ЗУ2} = 0,5$  Ом).

Сечение шины $F_{Ш}$ , мм <sup>2</sup>	Нет шины	50	100	300	500	
$\Delta U_{ЭА}$ , кВ	$D_3 = 1130$ м	6,69	4,59	4,29	4,04	3,98
	$D_3 = 1$ м	2,31	2,14	2,12	2,10	2,10
$K_{эффА}$ , о.е.	$D_3 = 1130$ м	—	1,46	1,56	1,66	1,68
	$D_3 = 1$ м	—	1,08	1,09	1,10	1,10

• **Таблица 2.** Напряжение на экране аварийной фазы и коэффициент эффективности шины при различных расстояниях от шины до КЛ ( $F_{Ш} = 300$  мм<sup>2</sup>,  $Z_{ЗУ1} = 0,5$  Ом,  $Z_{ЗУ2} = 0,5$  Ом).

Расстояние $D_{Ш}$ до шины, м	0,2	0,5	1,0	
$\Delta U_{ЭА}$ , кВ	$D_3 = 1130$ м	3,63	4,04	4,35
	$D_3 = 1$ м	1,80	2,10	2,33
$K_{эффА}$ , о.е.	$D_3 = 1130$ м	1,84	1,66	1,54
	$D_3 = 1$ м	1,28	1,10	1,00

• **Таблица 3.** Напряжение на экране аварийной фазы и коэффициент эффективности шины при различных сопротивлениях общего заземления экрана и шины ( $D_{Ш} = 0,5$  м,  $F_{Ш} = 300$  мм<sup>2</sup>,  $Z_{ЗУ2} = 0,5$  Ом).

Сопротивление заземления шины $Z_{ЗУ1}$ , Ом	0,001	0,5	1,0	2,0	5,0	
$\Delta U_{ЭА}$ , кВ	$D_3 = 1130$ м	4,79	4,04	3,51	2,93	2,35
	$D_3 = 1$ м	2,25	2,10	2,03	1,95	1,88
$K_{эффА}$ , о.е.	$D_3 = 1130$ м	1,40	1,66	1,91	2,28	2,85
	$D_3 = 1$ м	1,03	1,10	1,14	1,18	1,23

• **Таблица 4.** Напряжение на экране аварийной фазы и коэффициент эффективности шины при различных сопротивлениях заземления шины ( $D_{Ш} = 0,5$  м,  $F_{Ш} = 300$  мм<sup>2</sup>,  $Z_{ЗУ1} = 0,5$  Ом).

Сопротивление заземления шины $Z_{ЗУ2}$ , Ом	0,001	0,5	1,0	2,0	5,0	
$\Delta U_{ЭА}$ , кВ	$D_3 = 1130$ м	3,08	4,04	4,78	5,52	6,17
	$D_3 = 1$ м	2,07	2,10	2,15	2,20	2,26
$K_{эффА}$ , о.е.	$D_3 = 1130$ м	2,17	1,66	1,40	1,21	1,09
	$D_3 = 1$ м	1,12	1,10	1,07	1,05	1,02

►  $U_{ЭН} = I_{Ш} Z_{ЗУ1}$ ,  
а если шина не установлена, то  $U_{ЭН} = 0$ .  
Напряжение промышленной частоты на экране относительно земли в конце кабеля  $U_{ЭК}$  равно падению напряжения на этом экране:  
 $U_{ЭК} = \Delta U_{Э}$ .

**РАСЧЕТ НАПЯЖЕНИЯ**

Произведем расчет напряжения промышленной частоты в конце кабеля (оно всегда больше, чем в начале) при однофазном КЗ для линии с кабелями 500/95 мм<sup>2</sup> (медная жила / медный экран) в зависимости от:

- сечения  $F_{Ш}$  шины (материал шины – медь);
- расстояния  $D_{Ш}$  от шины до КЛ;
- сопротивлений заземлителей  $Z_{ЗУ1}$  и  $Z_{ЗУ2}$ .

Вследствие пренебрежения влиянием неповрежденных фаз способ прокладки кабелей (в треугольник или в ряд) и расположение шины (слева/справа от КЛ или над/под КЛ) незначительно сказываются на величинах напряжений и коэффициента  $K_{эфф}$ .

Результаты расчетов по (4) и (6) для линии длиной  $L_{К} = 1000$  м при токе однофазного КЗ  $I_{ЖА} = 10$  кА приведены в табл. 1–4. При других длине и токе КЗ напряжения могут быть пересчитаны с учетом прямой зависимости от этих величин.

Наибольшие величины напряжений (4) были получены на экране аварийной фазы (фазы А); в табл. 1–4 приведены данные именно для этой фазы.

Расчеты выполнены для  $D_3 = 1130$  м (найдена по удельному сопротивлению грунта  $\rho_3 = 100$  Ом·м) и  $D_3 = 1$  м (городской кабель).

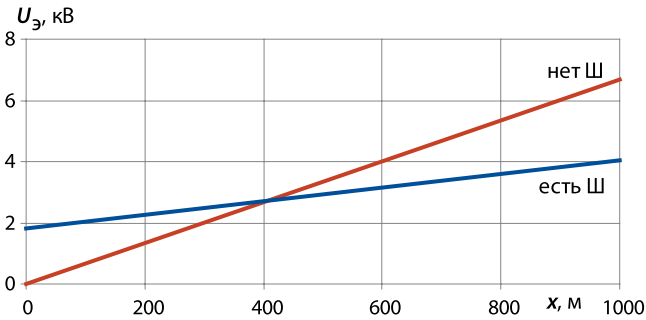
В качестве примера на рис. 3 дана эпюра распределения напряжения на экране относительно земли для аварийной фазы А рассматриваемого кабеля, проходящего за городом. Рассмотрен случай отсутствия шины и случай наличия шины сечением  $F_{Ш} = 300$  мм<sup>2</sup> ( $D_{Ш} = 0,5$  м,  $Z_{ЗУ1} = 0,5$  Ом,  $Z_{ЗУ2} = 0,5$  Ом). Видно, что в любой точке экрана есть напряжение промышленной частоты относительно земли, а наличие шины позволяет снизить его наибольшее значение, которое достигается на конце кабеля, с уровня  $|U_{ЭК}| = \Delta U_{ЭА} = 6,7$  кВ до 4 кВ (см. табл. 1).

В условиях рис. 3 при наличии шины напряжение на экране относительно земли в начале кабеля составляет  $|U_{ЭН}| = 1,8$  кВ. Поскольку это напряжение экрана равно напряжению соединенной с ним шины (см. рис. 2) и представляет опасность для людей и животных, то проводящая шина должна быть помещена в оболочку, требования к электрической прочности которой идентичны к прочности оболочки однофазных кабелей.

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШИНЫ**

Как следует из табл. 1–4, в протяженных загородных линиях при наличии шины можно добиться двукратного снижения напряжений, наводимых при однофазном КЗ на экраны кабелей. В городской черте или на территории распределительных устройств станций и подстанций, при большой плотности кабелей и металлических предметов в земле, использование

• **Рис. 3.** Распределение напряжения на экране относительно земли без шины и при наличии шины  $F_{Ш} = 300 \text{ мм}^2$  ( $D_{Ш} = 0,5 \text{ м}$ ,  $Z_{3У1} = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $Z_{3У2} = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $L_{К} = 1000 \text{ м}$ ,  $I_{ЖА} = 10 \text{ кА}$ )



заземляющей шины нецелесообразно, поскольку ее роль уже выполняют эти проводники.

Следует отметить слабую зависимость эффективности шины от ее сечения (табл. 1). Таким образом, при выборе сечения шины следует руководствоваться ее механической прочностью и вопросами ее нагрева замыкающимися по ней токами несимметричных коротких замыканий сети.

Как видно из табл. 3 и 4, напряжения на экранах напрямую зависят от сопротивления заземления шины и обратно зависят от общего сопротивления заземления экрана и шины (рис. 2). Это необходимо учитывать при проектировании для повышения эффективности шины.

Серия расчетов для кабельных линий с различными сечениями жилы и экрана, отличными от рассмотренных в табл. 1–4, показала, что напряжения, наводимые на экраны кабелей, слабо зависят от сечений жилы и экрана кабеля.

Также отметим, что расчет по формулам (4)–(6) совпадает с результатами компьютерного моделирования в программе EMTP (Electromagnetic Transient Program), что говорит об их применимости для оценки наведенных напряжений и эффективности шины.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двусторонне заземленная проводящая шина, проложенная параллельно однофазным кабелям, теоретически позволит снизить напряжение на конце односторонне заземленных экранов и тем самым увеличить максимальную длину КЛ, при которой еще допустим такой простой и недорогой способ заземления экранов. Следует учитывать, что:

- шина влияет на схему заземления экранов только в сетях с заземленной нейтралью 110 кВ и выше;
- шина должна быть помещена в оболочку, электрическая прочность которой не должна быть хуже, чем у оболочки силового однофазного кабеля;
- напряжение на экране слабо снижается с увеличением сечения шины, поэтому выбор сечения шины должен быть произведен по ее механической и термической стойкости;
- чем ближе проложена шина к защищаемой линии, тем эффективнее снижается напряжение на экранах; в рассмотренных примерах шина эффективна даже при расстоянии до линии 1 м ( $K_{эффА} > 1,5$ ), при этом положение шины относительно защищаемой линии особого значения не имеет;
- напряжения на экранах уменьшаются при увеличении общего сопротивления заземления экрана и шины, а также при снижении сопротивления заземления шины (рис. 2); при неудачном сочетании сопротивлений заземлителей использование шины не будет эффективно;
- при большом количестве металлоконструкций и кабельных линий в земле (особенно на промышленных предприятиях, станциях и подстанциях) использование шины для снижения напряжений на экранах неэффективно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2007. № 2(44).
2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с. ■