



Заземление экранов кабельных линий однофазного исполнения

Матвеев Даниил Анатольевич

кафедра техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) МЭИ

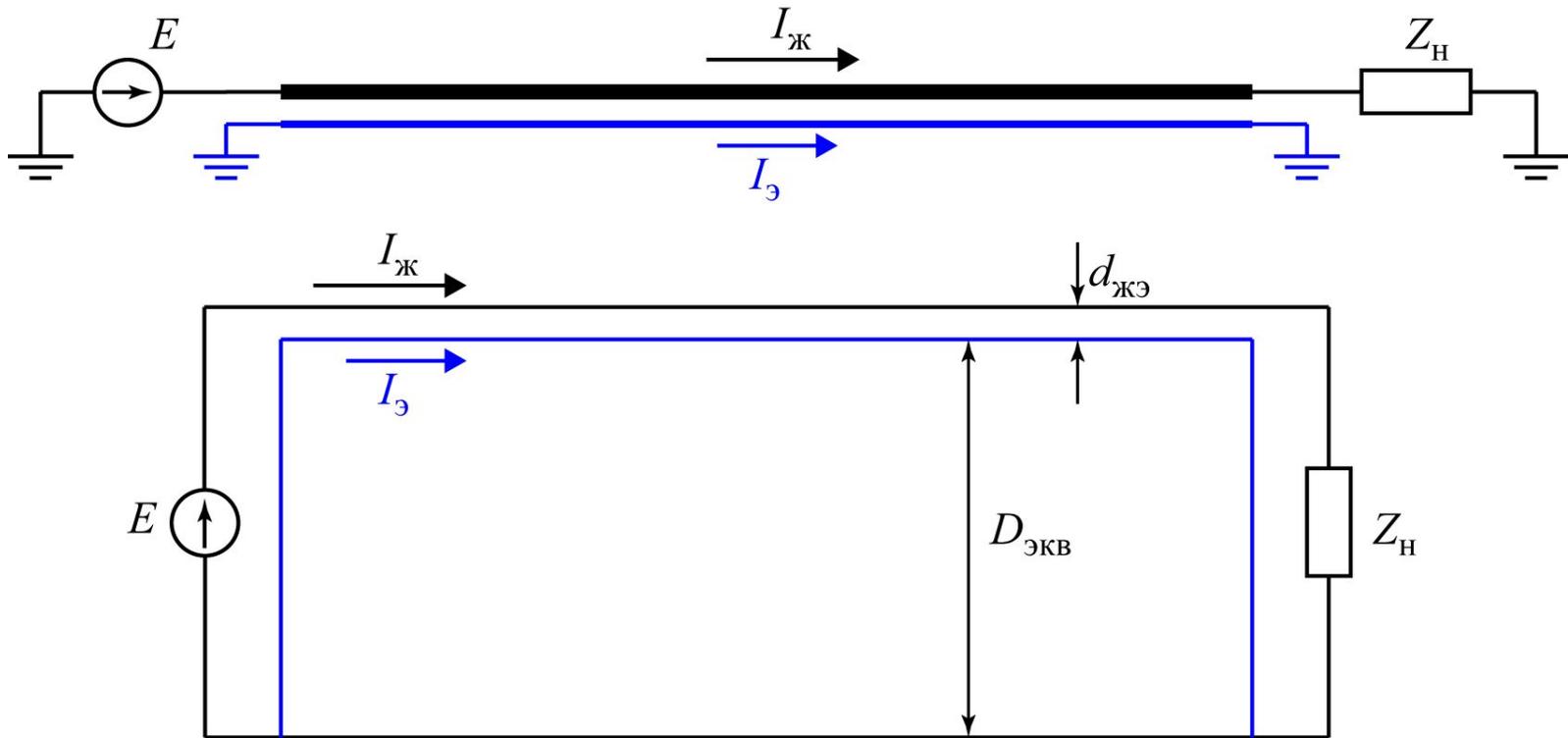
dmatveev@tvn-moscow.ru

Однофазный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена

XLPE – Cross linked polyethylene



Физический механизм возникновения тока в экране

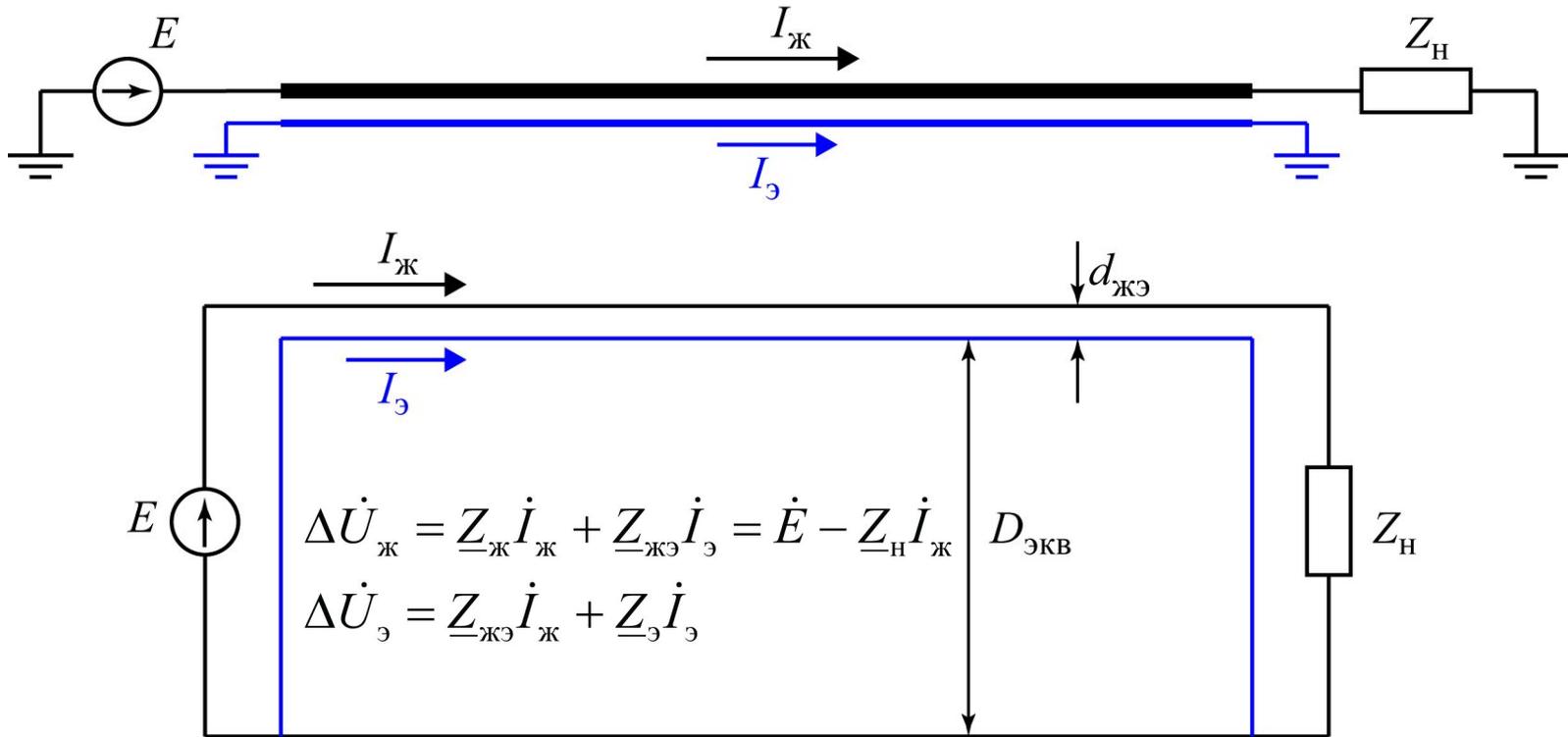


Эквивалентная глубина протекания тока в земле:

$$D_{\text{экв}} = 2,24 \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \mu_0}}$$

На промышленной частоте при сопротивлении грунта $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $D_{\text{экв}} = 1127 \text{ м}$

Физический механизм возникновения тока в экране

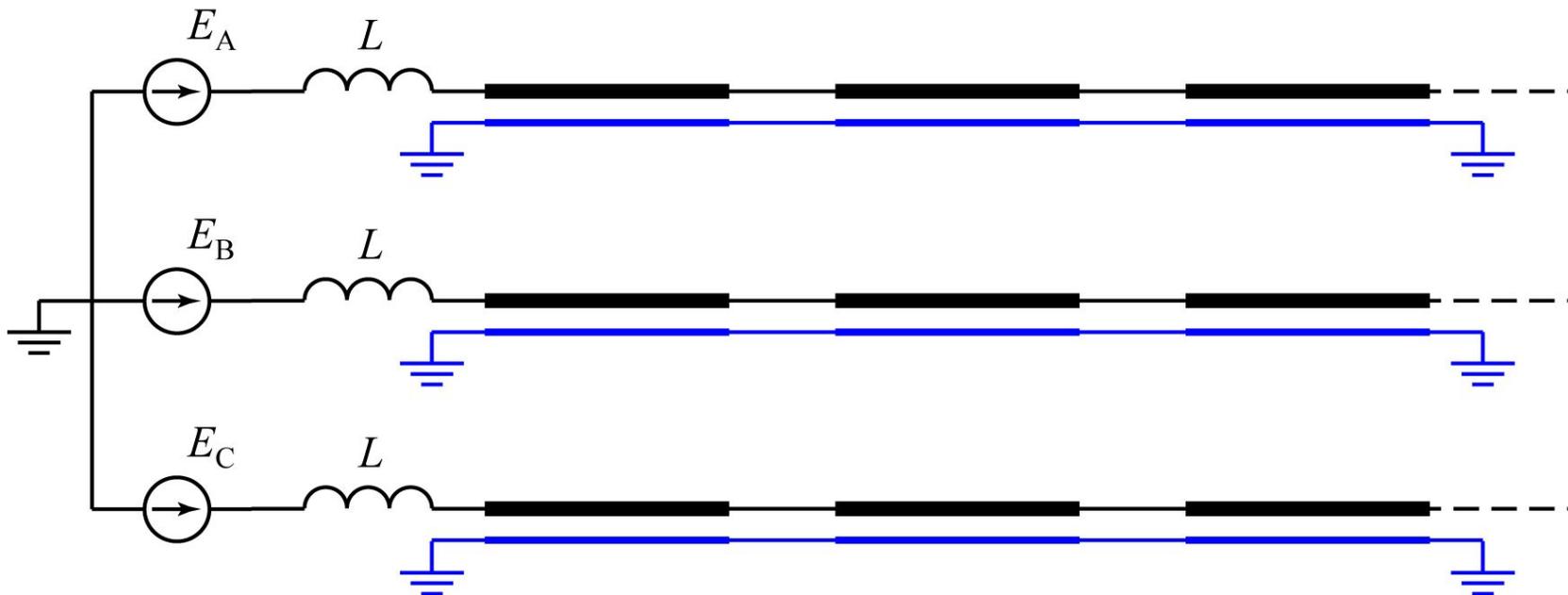


Если экран заземлен с обеих сторон, то $\Delta \dot{U}_{\text{э}} = \underline{Z}_{\text{жэ}} \dot{I}_{\text{ж}} + \underline{Z}_{\text{э}} \dot{I}_{\text{э}} = 0 \Rightarrow \dot{I}_{\text{э}} = -\frac{\underline{Z}_{\text{жэ}}}{\underline{Z}_{\text{э}}} \dot{I}_{\text{ж}}$

$$\frac{\dot{I}_{\text{э}}}{\dot{I}_{\text{ж}}} = -\frac{\underline{Z}_{\text{жэ}}}{\underline{Z}_{\text{э}}} = -\frac{R_3 + j\omega L_{\text{жэ}}}{R_3 + R_3 + j\omega L_3}$$

Если R_3 мало, то $I_{\text{э}} \rightarrow I_{\text{ж}}!$

Трёхфазный случай



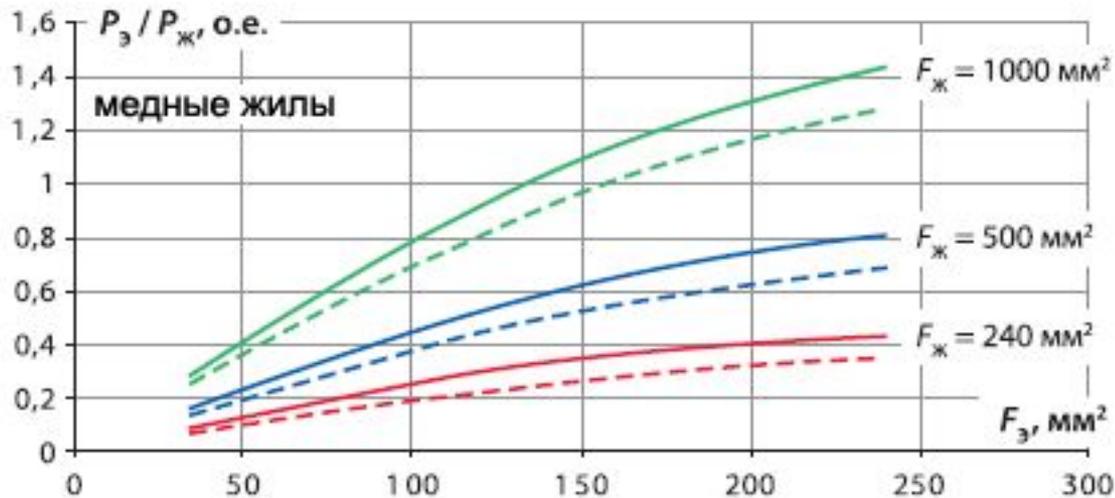
$$\Delta \dot{U}_{\text{ж}А} = \underline{Z}_{\text{ж}Э} \dot{I}_{\text{ж}А} + \underline{Z}_{\text{ж}Э} \dot{I}_{\text{э}А} + \underline{Z}_{\text{к}} (\dot{I}_{\text{ж}В} + \dot{I}_{\text{э}В}) + \underline{Z}_{\text{к}} (\dot{I}_{\text{ж}С} + \dot{I}_{\text{э}С})$$

$$\Delta \dot{U}_{\text{э}А} = \underline{Z}_{\text{ж}Э} \dot{I}_{\text{ж}А} + \underline{Z}_{\text{э}} \dot{I}_{\text{э}А} + \underline{Z}_{\text{к}} (\dot{I}_{\text{ж}В} + \dot{I}_{\text{э}В}) + \underline{Z}_{\text{к}} (\dot{I}_{\text{ж}С} + \dot{I}_{\text{э}С})$$

Для хорошо проводящих экранов $I_{\text{э}В} \approx -I_{\text{ж}В}$ и $I_{\text{э}С} \approx -I_{\text{ж}С}$,

поэтому токи соседних фаз не могут сильно повлиять на $I_{\text{э}А}$

Соотношение потерь для заземленных по концам кабелей 6 – 500 кВ проложенных сомкнутым треугольником



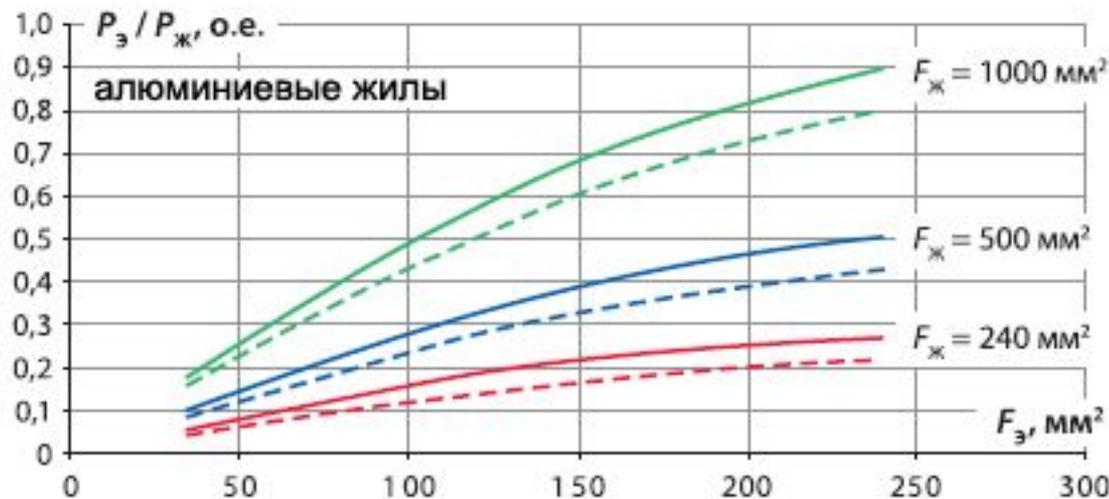
сплошная линия – 10 кВ
пунктирная линия – 110 кВ

$$\frac{P_3}{P_{ж}} = \frac{R_3 I_3^2}{R_{ж} I_{ж}^2}$$

Формула МЭК:

$$\frac{P_3}{P_{ж}} = \frac{R_3 / R_{ж}}{1 + \left(\frac{R_3}{X} \right)^2}$$

МЭК 60287-1-1 (2006 г.).
Кабели электрические.
Расчет номинального тока.
Часть 1-1. Уравнения номинальных токовых нагрузок (при 100%- ном коэффициенте нагрузок) и расчет потерь. Общие положения.

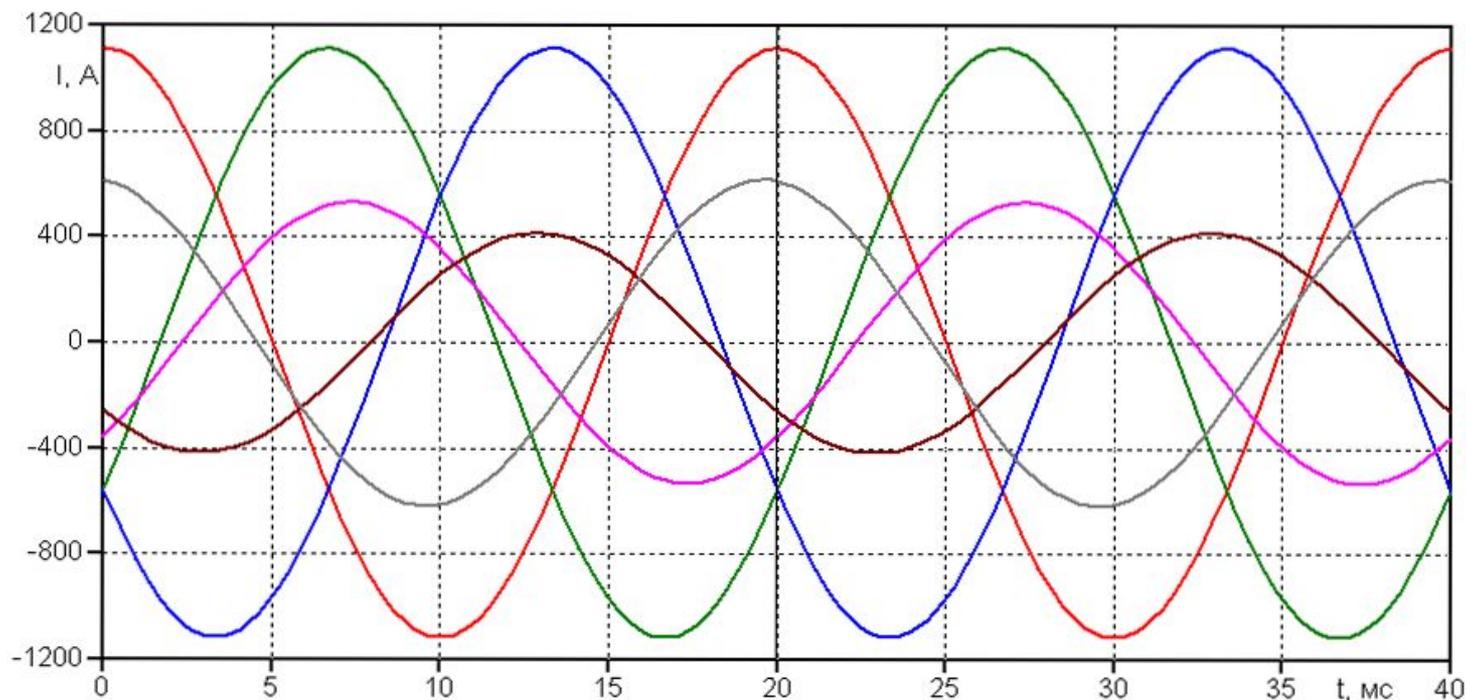


Рисунки по публикации: М.В. Дмитриев. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ.
Потери в экранах и эффективность транспозиции // Новости электротехники, №1, 2009.

Результаты расчета для случая горизонтальной прокладки

Три однофазных кабеля 110 кВ, $F_{\text{ж}} = 1000 \text{ мм}^2$ (медь), $F_{\text{э}} = 95 \text{ мм}^2$ (медь)

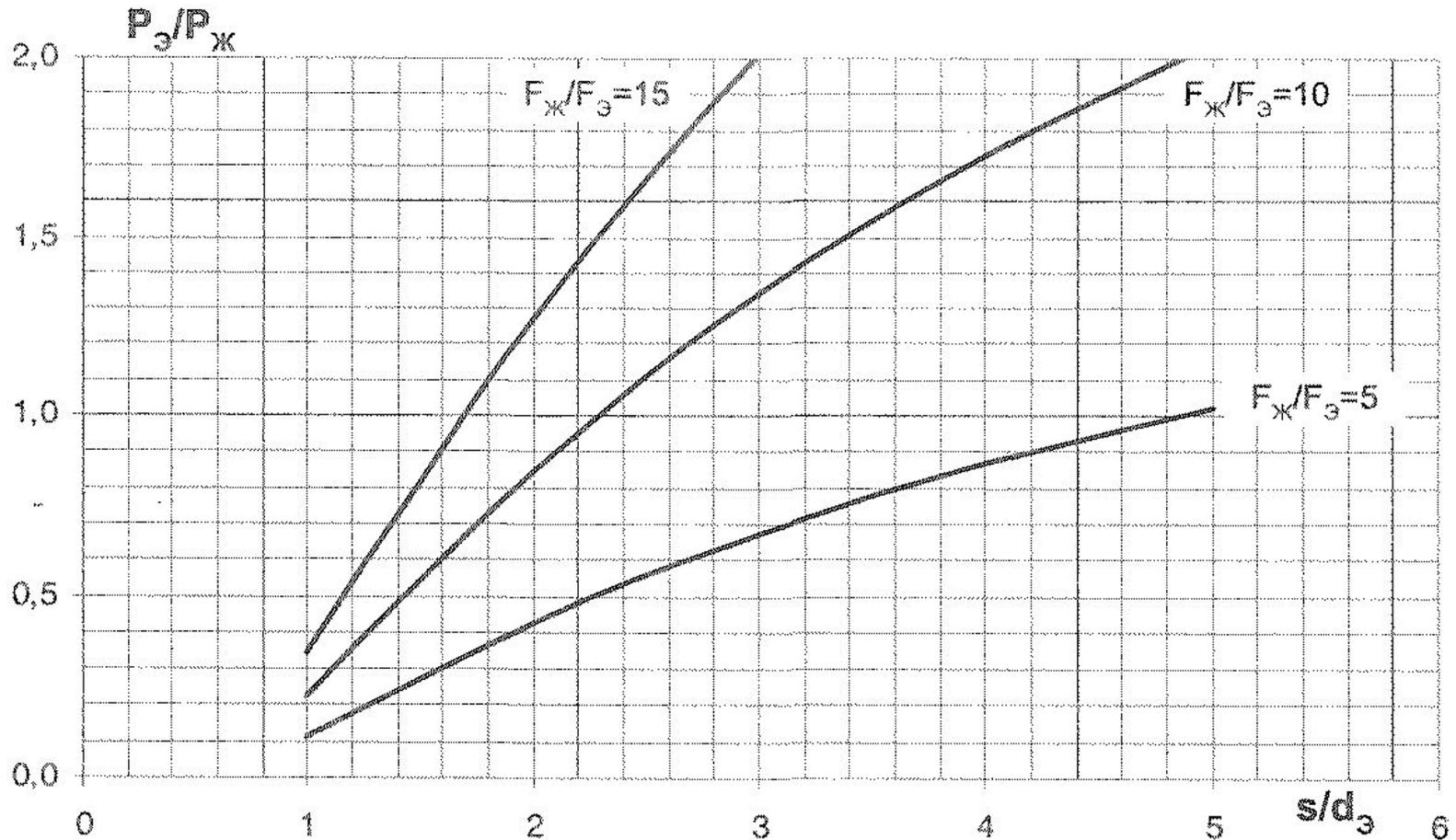
Расстояние между кабелями в свету равно диаметру одного кабеля



Расчетные токи в жилах: 790 А. Расчетные токи в экранах: 437 А, 375 А, 295 А

Расчетные соотношения мощностей потерь: 3, 2.3 и 1.4

Соотношение потерь для кабелей с экранами сечением 70 мм²



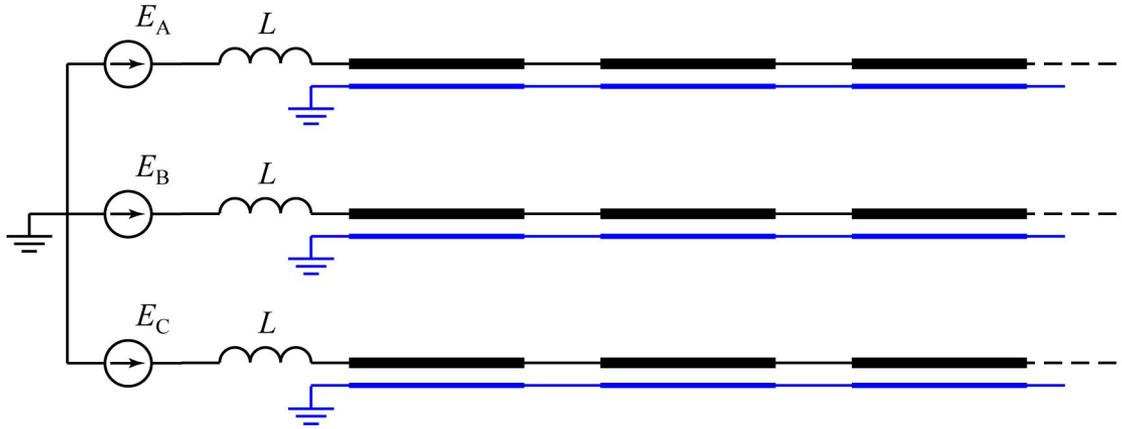
s – эквивалентное расстояние между осями кабелей

$d_{э}$ – диаметр одного кабеля

Способы подавления токов в экранах

- применение кабелей трехфазного исполнения
- частичное разземление экранов
- транспозиция экранов

Частичное разземление экранов



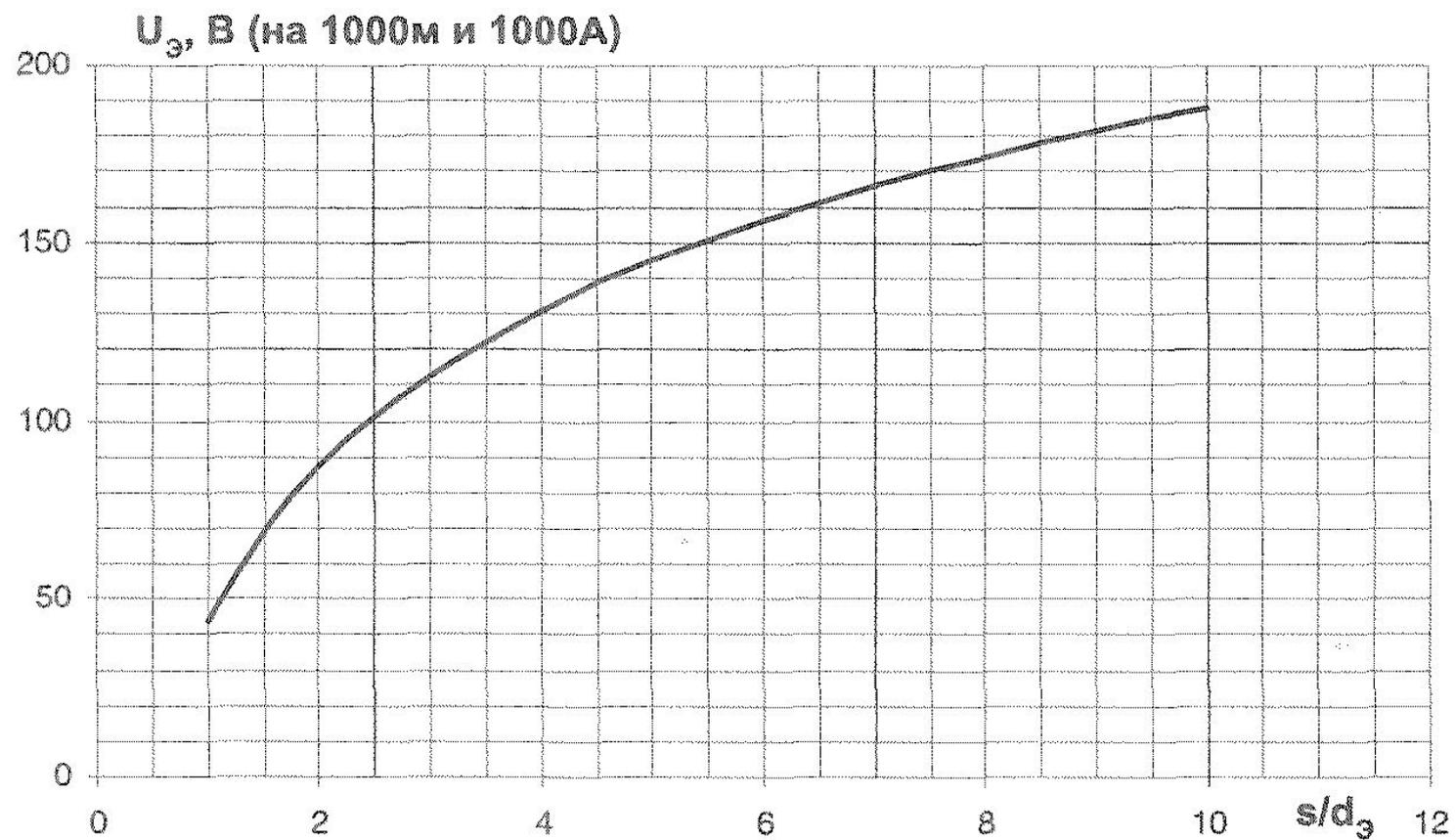
$$\Delta \dot{U}_9 = \underline{Z}_{\text{жэ}} \dot{I}_{\text{ж}} + \underline{Z}_9 \dot{I}_9 \quad \dot{I}_9 = 0 \Rightarrow \Delta \dot{U}_9 = \underline{Z}_{\text{жэ}} \dot{I}_{\text{ж}}$$

Напряжение на незаземленном конце пропорционально длине кабеля и достигает наибольших значений при коротких замыканиях

По условию электрической прочности изоляции $U_9 < 5 \text{ кВ}$

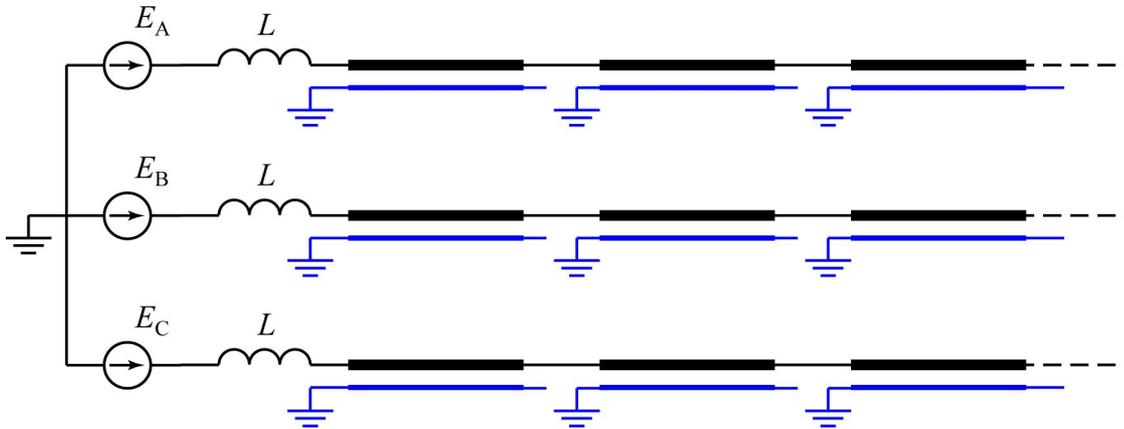
По условию безопасности персонала $U_9 < 24 \text{ В}$

Оценка напряжения на экране

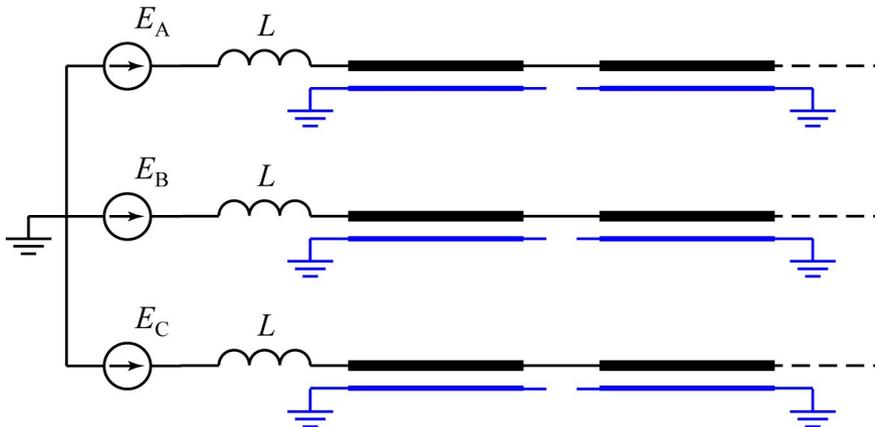


Частичное разземление экранов

Если напряжения в кабеле превышают допустимые, то возможны иные схемы:

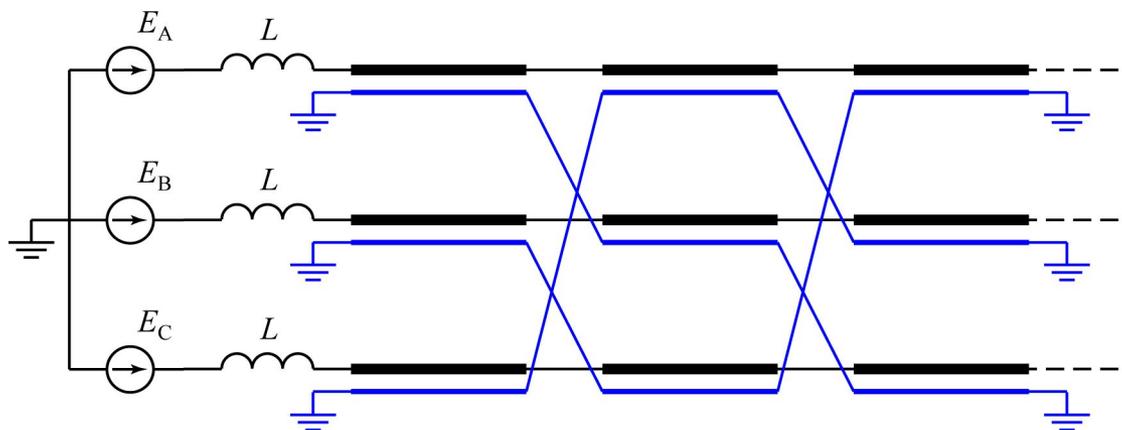


Выбор числа секций N осуществляется по условию $U_{\text{э}}/N < U_{\text{доп}}$



В этой схеме не требуются промежуточные заземлители, но необходимо согласование с производителем муфты

Транспозиция экранов



Для радикального снижения токов в экранах достаточно одного цикла транспозиции.

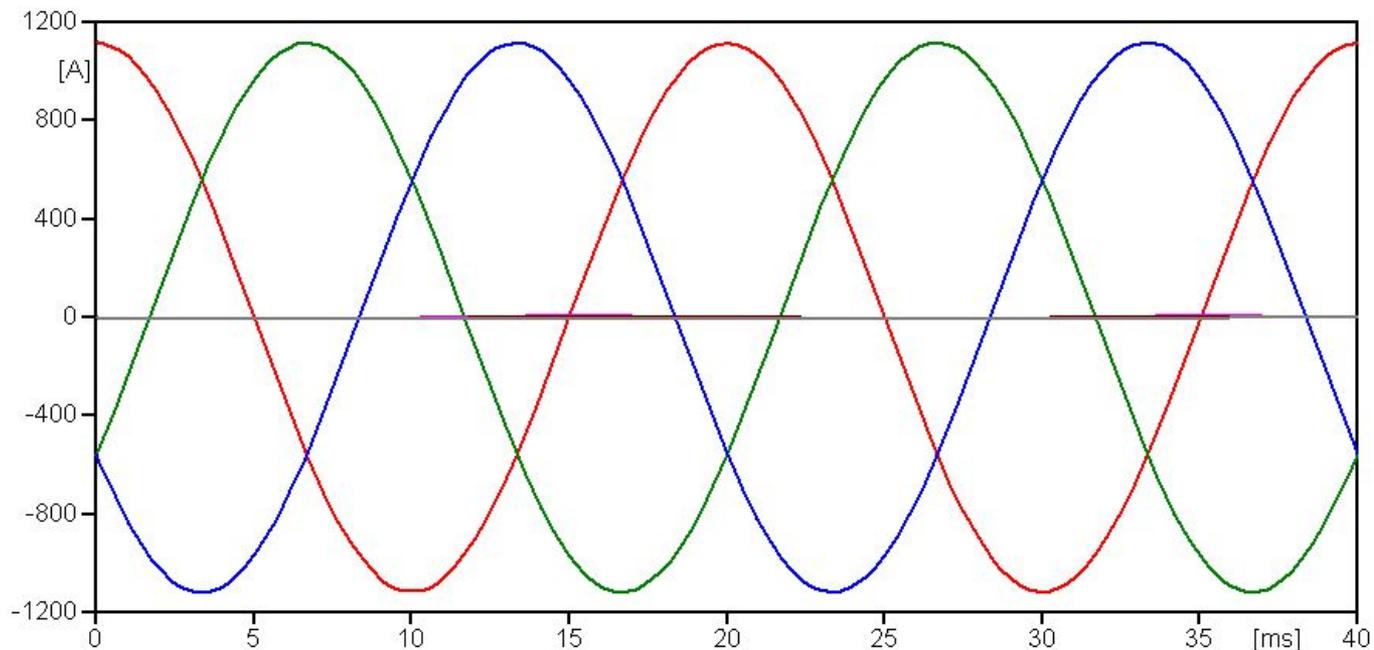
По условию ограничения напряжений в узлах транспозиции может понадобиться несколько циклов

Для сетей с заземленной нейтралью целесообразно заземлять экран вблизи менее мощной системы по условию снижения токов КЗ

Результаты расчета для случая горизонтальной прокладки

Три однофазных кабеля 110 кВ, $F_{\text{ж}} = 1000 \text{ мм}^2$ (медь), $F_{\text{э}} = 95 \text{ мм}^2$ (медь)

Расстояние между кабелями в свету равно диаметру одного кабеля



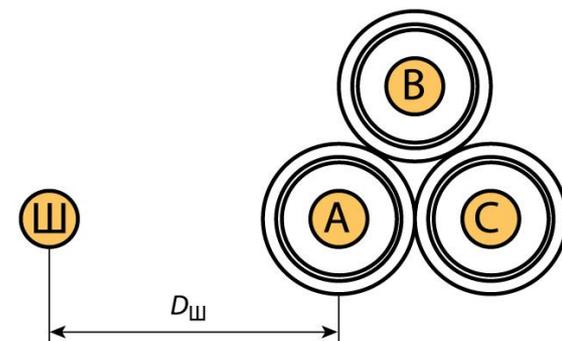
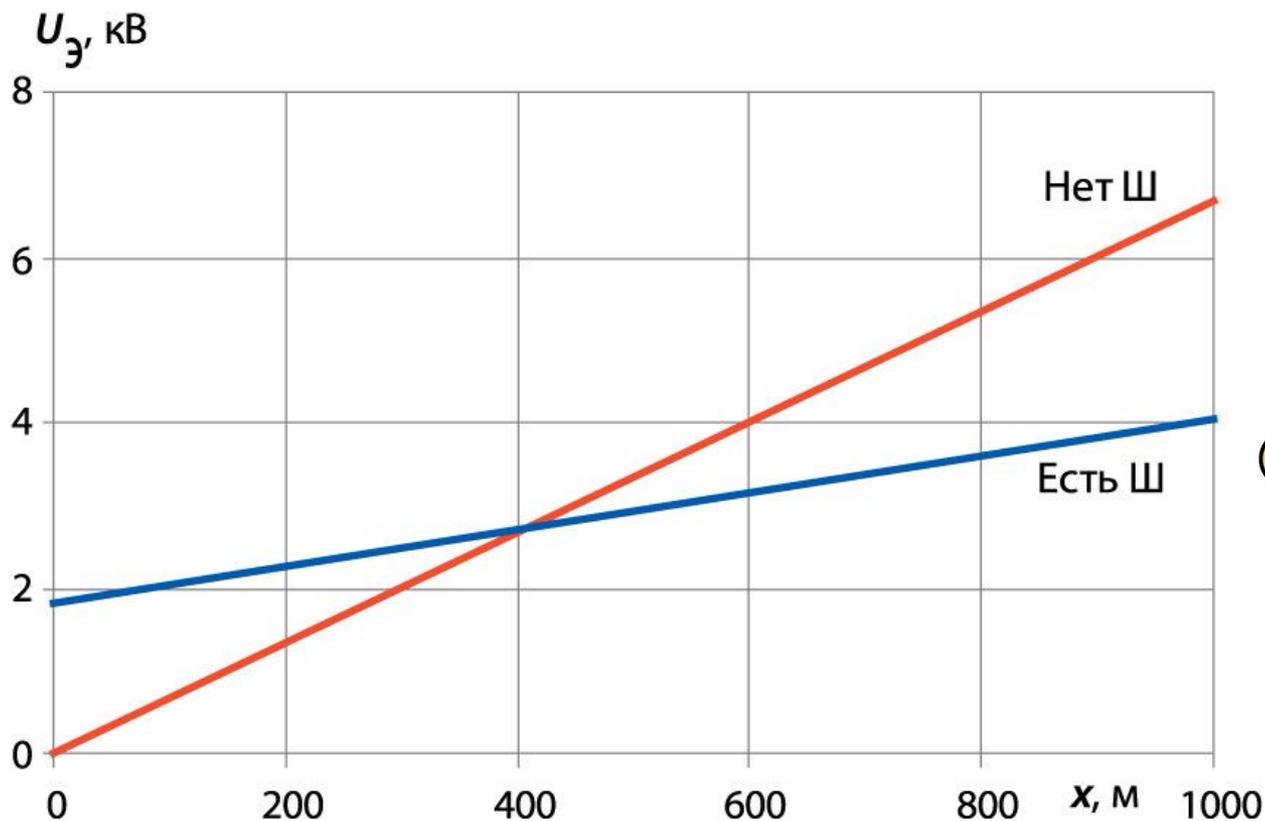
Расчетные токи в жилах: 790 А. Расчетные токи в экранах: 6.3 А, 5.3 А, 5.1 А

Длительно допустимый ток для одножильных кабелей АВВ

Номинальное напряжение 110-500 кВ, медная жила – сечение экрана 95 мм², сегментная жила сечением 1200 мм² и больше

Площадь сечения жилы	Кабели, проложенные в земле								Кабели, проложенные в воздухе							
	в плоскости ●●●				треугольником ●●●				в плоскости ●●●				треугольником ●●●			
	Транспозиция экранов		Заземление с двух сторон		Транспозиция экранов		Заземление с двух сторон		Транспозиция экранов		Заземление с двух сторон		Транспозиция экранов		Заземление с двух сторон	
мм ²	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C
300	520	625	440	540	495	600	475	580	585	785	505	690	515	700	505	685
400	595	715	480	590	560	680	535	650	680	915	560	775	595	810	575	785
500	675	815	525	645	635	770	595	725	785	1060	620	860	680	930	650	890
630	760	925	565	700	710	865	655	805	910	1230	680	950	780	1070	730	1010
800	850	1035	600	745	790	960	715	880	1035	1410	740	1040	875	1210	810	1130
1000	935	1140	635	790	855	1050	765	945	1160	1590	790	1115	970	1345	885	1240
1200	1070	1295	675	840	995	1215	820	1015	1365	1850	875	1235	1155	1590	990	1390
1400	1145	1390	695	870	1060	1300	855	1065	1480	2010	915	1295	1245	1720	1050	1480
1600	1210	1475	715	900	1120	1375	885	1110	1605	2185	950	1350	1340	1850	1110	1570
2000	1310	1610	740	930	1210	1490	930	1165	1780	2435	995	1425	1465	2040	1185	1685
2500	1415	1745	770	970	1300	1605	970	1225	2010	2760	1055	1515	1625	2270	1275	1825
3000	1490	1840	790	995	1365	1695	1000	1265	2175	2995	1095	1575	1735	2435	1340	1925

Распределение напряжения на экране без шины и при наличии шины сечением 300 мм^2 (длина кабеля 1 км, ток жилы 10 кВ)



Рисунки по публикации: М. Дмитриев, М. Кияткина. Заземленная металлическая шина. Эффективность при параллельной прокладке с однофазными кабелями // Новости электротехники, №5, 2011.

Характеристика «допустимое напряжения – время» современных ОПН

Длительность T приложения повышенного напряжения, с	Допустимая кратность K превышения напряжения на ОПН, не менее
0,1	1,50 / 1,40
1	1,43 / 1,35
10	1,37 / 1,30
100	1,31 / 1,23
1200	1,23 / 1,15
3600	1,19 / 1,1

$$U_{\text{НРО}} = U_{\text{доп}} / K$$