



РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
17-19 МАЯ 2016 г.

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ  
малых форм предприятий в научно-технической сфере



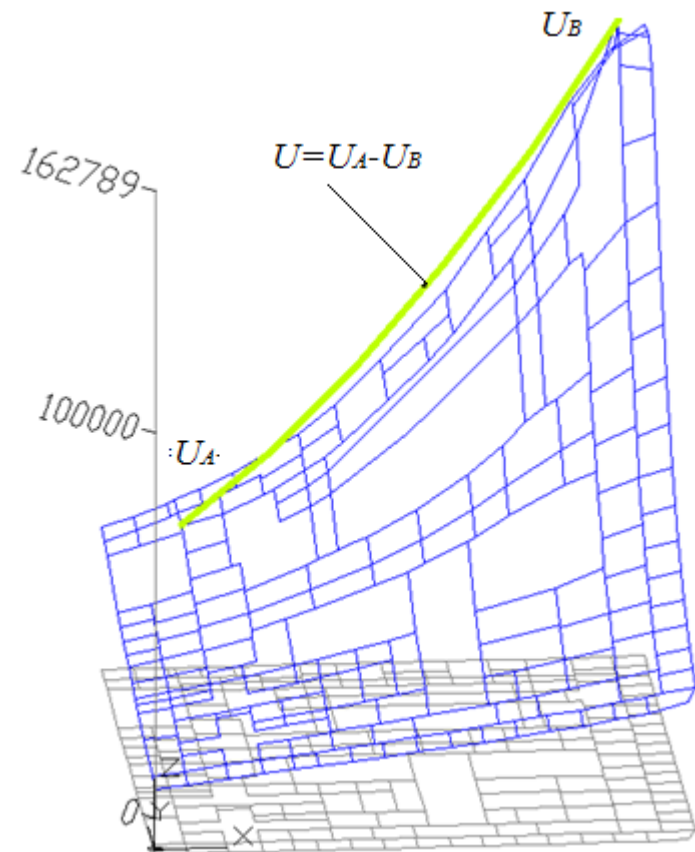
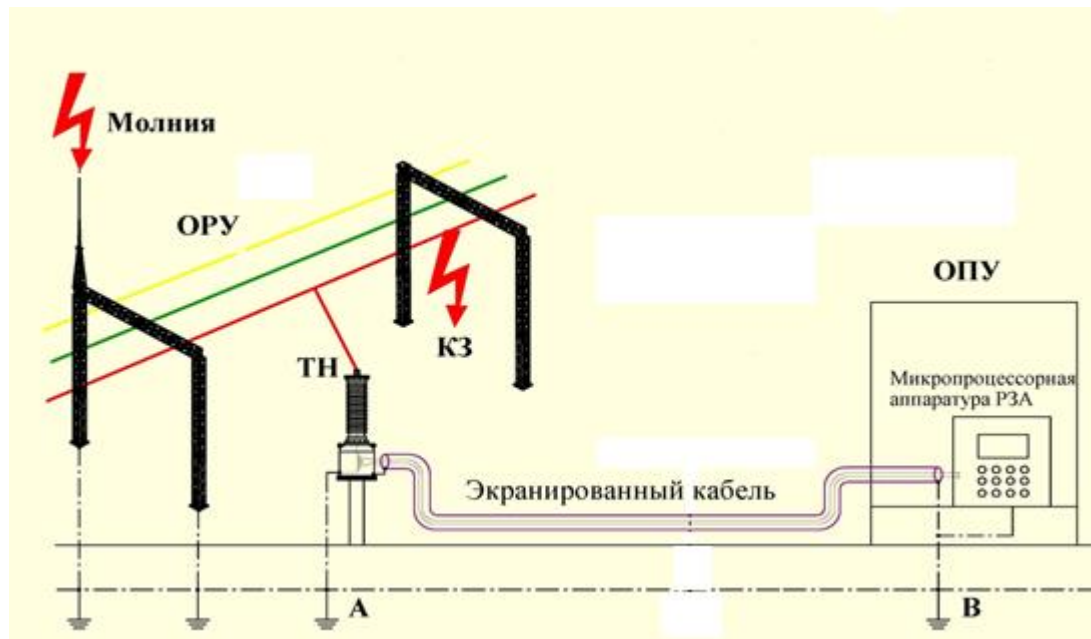
# РАСЧЕТ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ И НАГРЕВА ЭКРАНА КОНТРОЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Шишигин С.Л., Черепанов А.В, Шишигин Д.С.  
ctod28@yandex.ru

Вологодский государственный университет

ООО «ЗУМ»

# Задачи расчета кондуктивных помех



**Удар молнии** – основной источник кондуктивных и электромагнитных помех

**Проблема:** возможный сбой в работе микропроцессорной аппаратуры

**Защита от кондуктивных помех:** двустороннее заземление экрана контрольного кабеля

Потенциал ЗУ  
при токе 100 кА, 10/350 мкс

# Методики расчета кондуктивных помех

**1. По напряжению и коэффициенту экранирования  $k$  [СТО 56947007-29.240.044-2010]**

$$U_k = U / k, \quad k=6-10.$$

**Недостаток:**  $k$  зависит от ЗУ, наличия ШУП, трассы прокладки кабеля, точки ввода тока, длины кабеля, частоты или длительности фронта импульса.

**2. По току и передаточному сопротивлению жила-экран  $Z_t$**

$$U_k = Z_t l \cdot I$$

**Цель работы:** Исследовать этот способ

# Модели расчета кондуктивных помех

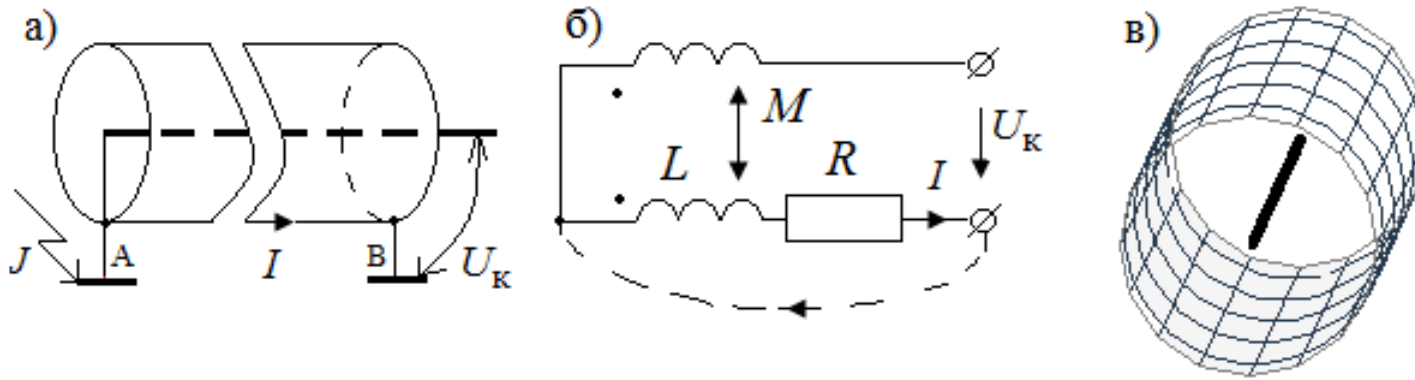


Рис.1. Кабель: Физическая модель (а),  $RL$ -схема замещения (б), 3D-модель (в)

## $RL$ -схема замещения кабеля

Напряжение помехи

$$U_k = RI + j\omega(L - M) = Z_t l \cdot I, \quad Z_t = R_0 \frac{(1 + j)d / \delta}{sh[(1 + j)d / \delta]}, \quad \text{где } \delta - \text{толщина скин-слоя}$$

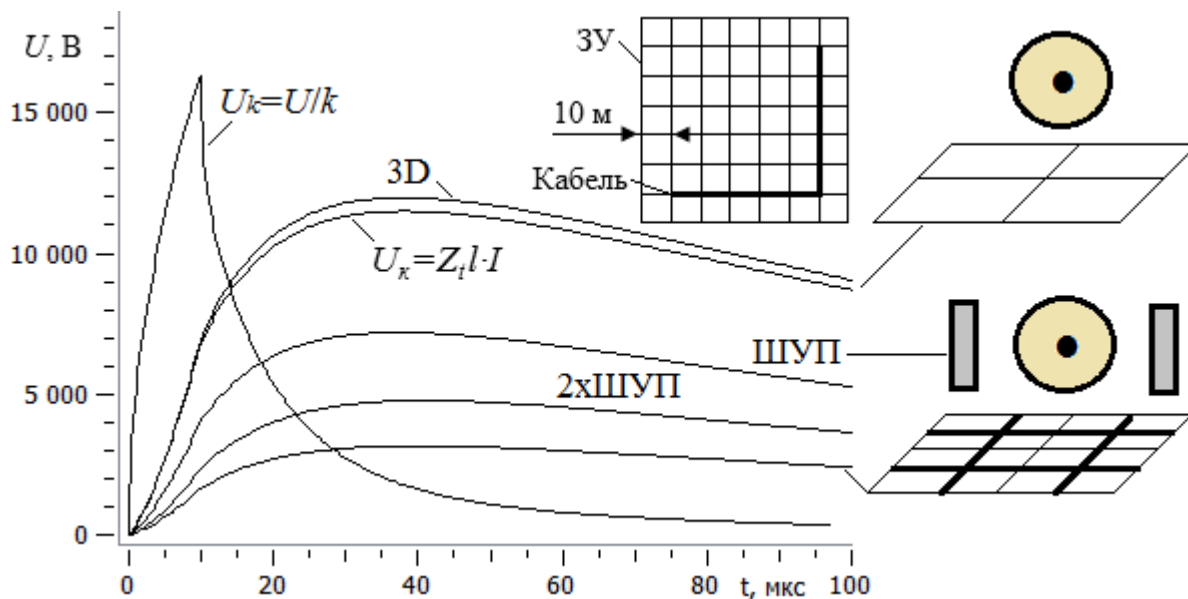
Для первого импульса тока молнии ( $f=25$  кГц,  $d_{Cu}=0.06$  мм,  $d / \delta \ll 1$ ):  $U_k = R_0 l \cdot I$ ,  
где  $Z_t = R_0 = 17.8$  мОм/м при сечении экрана  $1 \text{ мм}^2$  по меди.

## 3D-модель кабеля

Для второго импульса тока молнии ( $f=1$  МГц,  $d / \delta < 1$ , т.е.  $Z_t = R_0$ , но) необходимо учитывать емкость экран-ЗУ и индуктивность контакта экран-ЗУ.

# Способы снижения кондуктивных помех

**Задача.** Найдем помеху жила-экран на выходе контрольного кабеля с диаметром экрана 10 мм, длиной 100 м, погонным сопротивлением  $R_0=0.018$  Ом/м, расположенного на высоте 0.5 м над поверхностью земли, при вводе импульса тока молнии 100 кА с линейным фронтом длительностью 10 мкс в начало кабеля. Сетка ЗУ состоит из стальных стержней диаметром 20 мм и расположена на глубине 0.5 м в грунте с удельным сопротивлением  $\rho=100$  Ом·м. Стальная шина сечением 50x5 мм (ШУП), проложенная на расстоянии 0.1 м от кабеля.



**Результат.** Кардинальное снижение тока экрана и помех (в 4 раза) и незначительное выравнивание потенциала (20%).

**Вывод.** Прокладка параллельных проводников – основное средство снижения помех.

# Нагрев экрана контрольного кабеля

**Проблема.** Двустороннее заземление экрана приводит к нагреву экрана в режиме КЗ

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА

**1. Расчет нагрева по току экрана ГОСТ 28895-91 в предположении  $I=\text{const}$**

$$\theta_f = (\theta_i + \beta) \cdot \exp\left(\frac{I^2 \tau}{\varepsilon(\tau)^2 S^2 K^2}\right) - \beta, \quad K^2 = \frac{\sigma(\beta + 20)}{\rho_{20}}$$

**Недостаток:** Грубое допущение  $I=\text{const}$ , завышенный нагрев

**2. Расчет нагрева по напряжению экрана в предположении  $U=\text{const}$**

С.В. Нестеров

$$\theta_f = \sqrt{(\theta_i + \beta)^2 + \frac{2U^2 \tau \cdot (\beta + 20)}{\varepsilon(\tau)^2 L^2 \sigma \cdot \rho_{20}}} - \beta$$

СТО 56947007-29.130.15.114-2012

$$\Delta\theta = 7(U / L)^{1.5} \sqrt{\tau}$$

О.В Таламанов:

По методу электротепловой аналогии неадиабатический коэффициент  $\varepsilon$  завышен, процесс скорее адиабатический, поэтому упрощенная формула СТО-2012 некорректна.

**Вывод.** Формула ГОСТ 28895-91 неточна, а расчет нагрева по напряжению экрана не учитывает магнитных связи кабеля (с проводниками ЗУ, ШУП, соседними кабелями).

# Расчет нагрева экрана контрольного кабеля

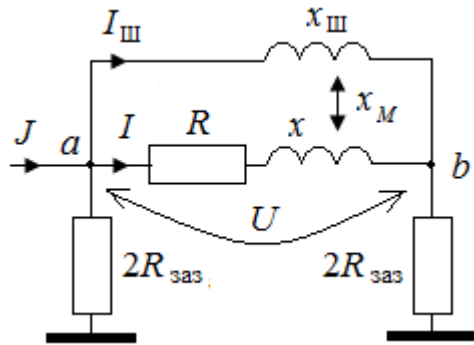


Схема замещения кабеля с двусторонним заземлением экрана и шиной

Напряжение экрана зависит не только от собственного сопротивления, но и вносимого сопротивления экрана  $\Delta z$ , обусловленного токами соседних проводников

$$U = RI + jxI + jx_M I_{III} \approx (R + jx_M I_{III} / I)I = (R + \Delta z)I, \quad \Delta z = \Delta R + j\Delta x$$

Вносимое сопротивление  $\Delta z$  рассчитывается численно при известной активном сопротивлении экрана  $R$

$$\Delta z = U / I - R = \Delta R + j\Delta x$$

**Вывод.** Вносимое сопротивление  $\Delta z$  приводит к снижению тока и нагрева экрана.

Для увеличения  $\Delta z$  следует снижать сопротивление параллельных проводников и усиливать магнитную связь.

# Шаговый алгоритм расчета нагрева экрана

**Идея.** Реализовать формулу ГОСТ 28895-91 на малом временном шаге так, что ток экрана в пределах шага можно принять постоянным

Температура нагрева в конце  $n$ -го шага

$$\theta_{n+1} = (\theta_n + \beta) \cdot \exp\left[\frac{I_n^2 \cdot h}{(\varepsilon_{n+1} S \cdot K)^2}\right] - \beta, \quad \theta_0 = 20^\circ\text{C}$$

Изменение активного сопротивления проводника с изменением температуры

$$R(\theta) = R_0 \left(1 + \frac{\theta}{\beta}\right) = R_{20} \frac{\beta}{\beta + 20} \left(1 + \frac{\theta}{\beta}\right) = R_{20} \frac{\beta + \theta}{\beta + 20}$$

Ток экрана кабеля  $n+1$ -го шага с учетом магнитных связей

$$I_{n+1} = \frac{z_n}{z_{n+1}} I_n = \frac{\left| R_{20} \frac{\beta + \theta_n}{\beta + 20} + \Delta z \right|}{\left| R_{20} \frac{\beta + \theta_{n+1}}{\beta + 20} + \Delta z \right|} I_n, \quad I_0 = I(0)$$

**Частный случай.** Ток экрана уединенного кабеля  $n+1$ -го шага ( $\Delta z=0$ )

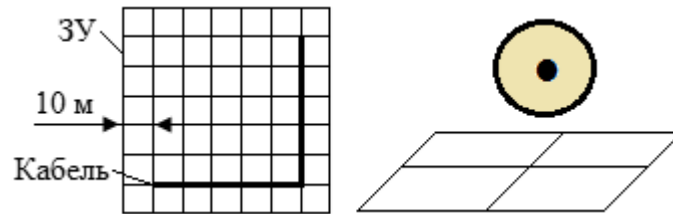
$$I_{n+1} = \frac{\beta + \theta_n}{\beta + \theta_{n+1}} I_n$$

**Вывод.** Предложен простой алгоритм расчета нагрева по току экрана с учетом вносимого сопротивления экрана



# Пример расчета нагрева экрана контрольного кабеля

**Задача.** Кабель КВВГЭ с медным экраном сечением  $1 \text{ мм}^2$  ( $R_{20}=1.78 \text{ Ом}$ ), длиной  $100 \text{ м}$ , погонным сопротивлением  $R_0=0.018 \text{ Ом/м}$ , расположен на высоте  $0.5 \text{ м}$  над поверхностью земли. Сетка ЗУ состоит из стальных стержней диаметром  $20 \text{ мм}$  и расположена на глубине  $0.5 \text{ м}$  в грунте с удельным сопротивлением  $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Процесс **адиабатический** ( $\epsilon=1$ ). Время КЗ равно  $1 \text{ сек}$ .



**Вариант №1.** Расчет нагрева экрана уединенного кабеля без учета магнитных связей.

При начальном токе экрана  $I=250 \text{ А}$ , напряжение экрана  $U=R_{20}I=445 \text{ В}$  (принимается постоянным в течение КЗ). Время КЗ –  $1 \text{ сек}$ .

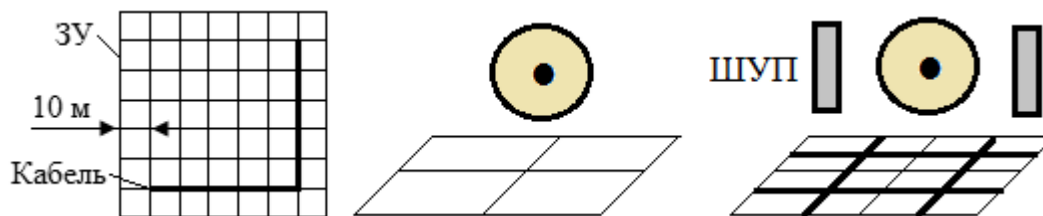
Шаговый алгоритм:  $\Theta=244^\circ\text{C}$

Формула С.В.Нестерова:  $\Theta=244^\circ\text{C}$

**Вывод:** Шаговый алгоритм реализации формулы ГОСТ 28895-91 дает одинаковые результаты с формулой С.В.Нестерова (здесь и в других задачах)

# Пример расчета нагрева экрана контрольного кабеля

**Вариант №2.** Расчет нагрева экрана кабеля с учетом магнитных связей.  
 Кабель проложен по ЗУ (рис.4), ток КЗ вводится в точку заземления экрана кабеля и равен 20 кА, длительность КЗ равна 1 сек.



№	Вариант (рис.4)	U, В /фаза	I, А /фаза	R <sub>20</sub> , Ом	Δz, Ом	Температура нагрева, °С	
						Нестеров	ША
1	Кабель, ЗУ	551 /52°	271 /45°	1.78	0.24+j0.25	<b>328</b>	<b>291</b>
2	Кабель, ЗУ, ШУП	454 /55°	189 /41°	1.78	0.55+ j0.58	<b>251</b>	<b>181</b>
3	Кабель, ЗУ, два ШУП	400 /58°	144 /39°	1.78	0.85+j0.9	<b>210</b>	<b>122</b>
4	Кабель, ЗУ, два ШУП, размер ячейки ЗУ 5 м (вместо 10 м)	293 /59°	98 /38°	1.78	1.01+ j1.07	<b>134</b>	<b>69</b>

**Вывод.** Учет магнитных связей кабеля снижает температуру нагрева, поэтому существующие формулы завышают температуру нагрева

## **ВЫВОДЫ:**

- Расчет нагрева экрана контрольного кабеля в режиме КЗ следует производить с учетом магнитных связей кабеля с другими проводниками.
- Для расчета нагрева разработан шаговый алгоритм на основе формулы ГОСТ 28895-91, позволяющий учесть уменьшение тока в процессе нагрева и магнитные связи кабеля.
- Для снижения нагрева экрана контрольного кабеля следует снижать ток экрана, что достигается прокладкой параллельных проводников ЗУ, ШУП или прокладкой кабеля в металлических лотках, трубах и т.п. Эти технические решения не всегда удается обосновать расчетным путем, если критерием является снижение (выравнивание) потенциала ЗУ согласно действующим стандартам.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**