



РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
17-19 МАЯ 2016 г.

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ
малых форм предприятий в научно-технической сфере



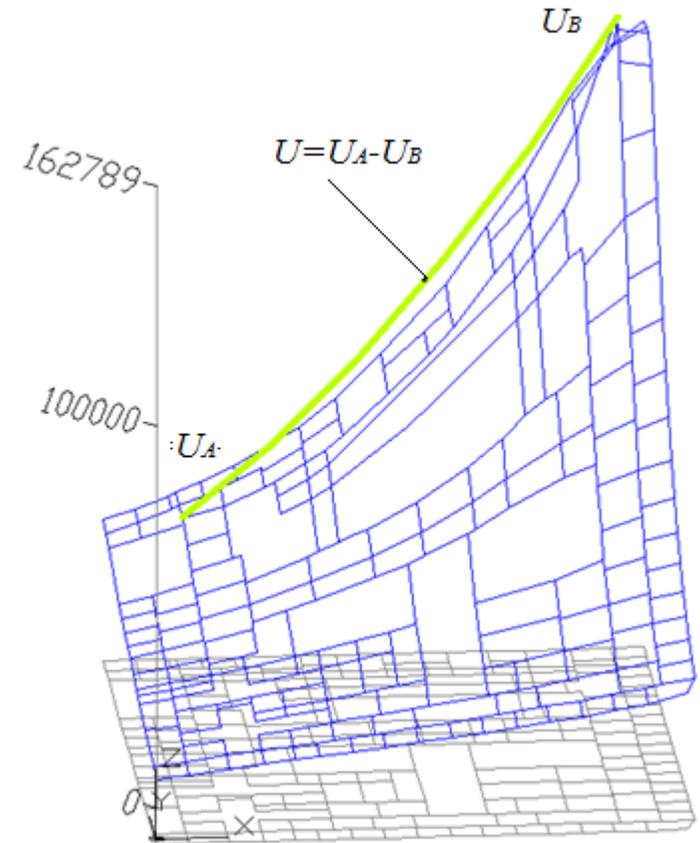
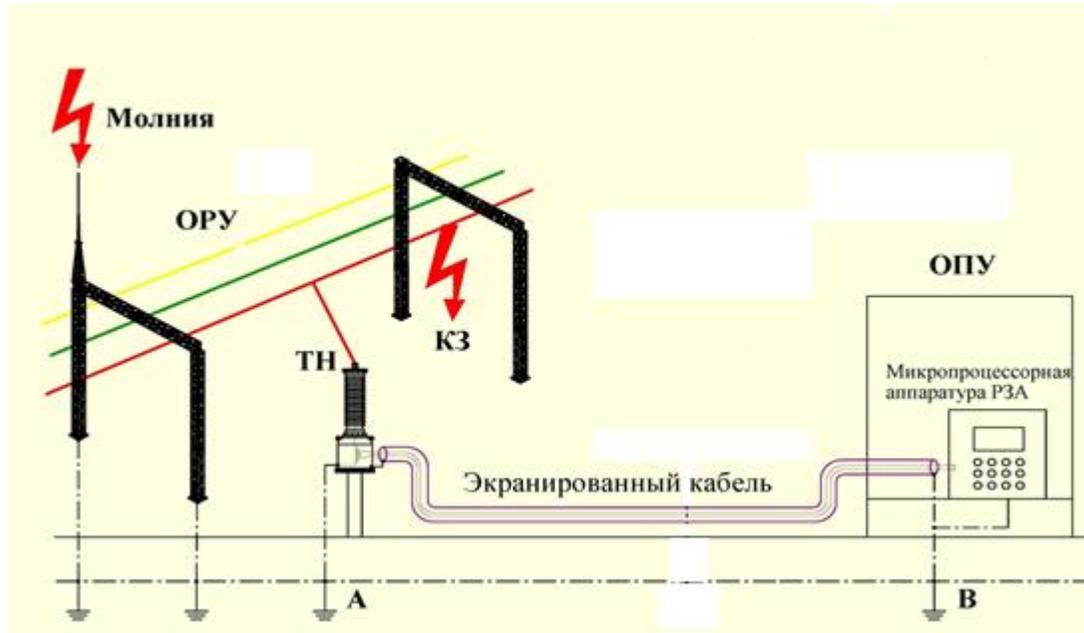
РАСЧЕТ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ И НАГРЕВА ЭКРАНА КОНТРОЛЬНОГО КАБЕЛЯ

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

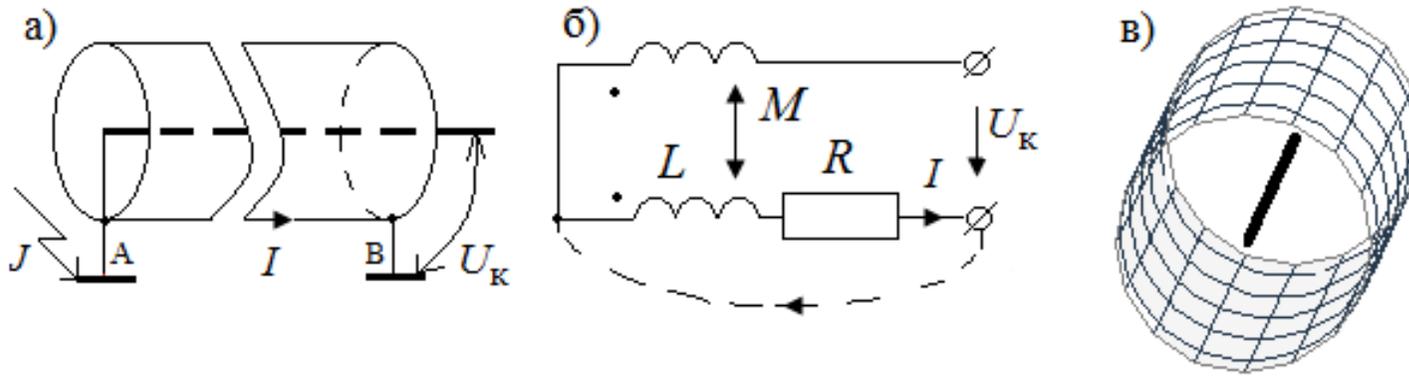


Рис.1. Кабель: Физическая модель (а), RL -схема замещения (б), 3D-модель (в)

RL -схема замещения кабеля

Напряжение помехи

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

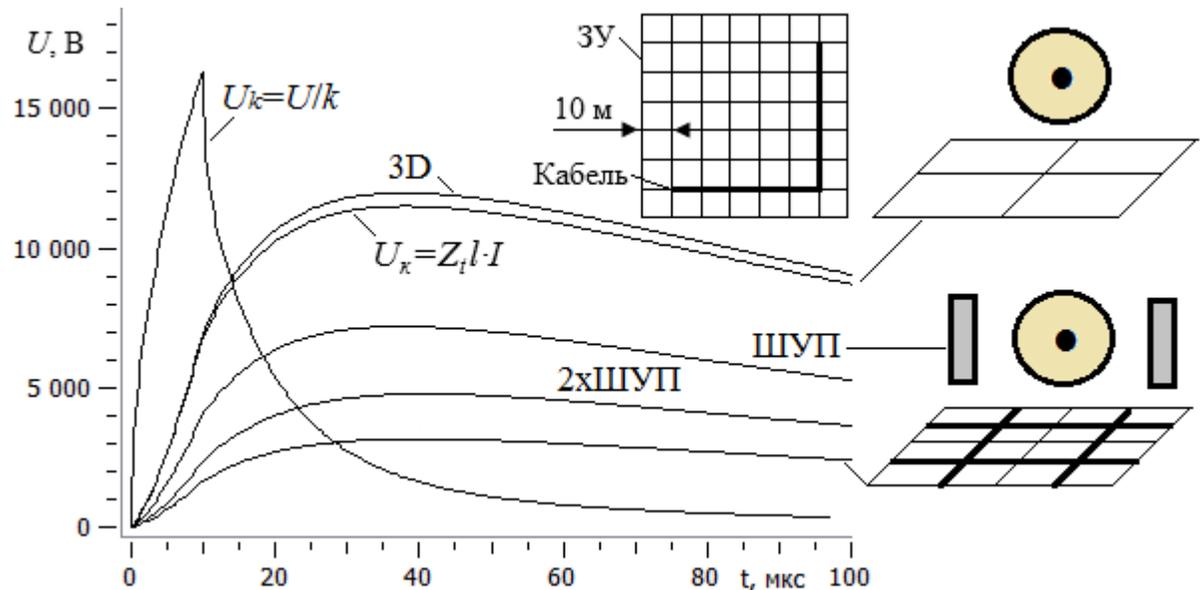
Для первого импульса тока молнии ($f=25$ кГц, $d_{Cu}=0.06$ мм, $d / \delta \ll 1$): $U_k = R_0 l \cdot I$,
где $Z_t = R_0 = 17.8$ мОм/м при сечении экрана 1 мм^2 по меди.

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 $R_0=0.018 \text{ Ом/м}$, 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 $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. 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 ε 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

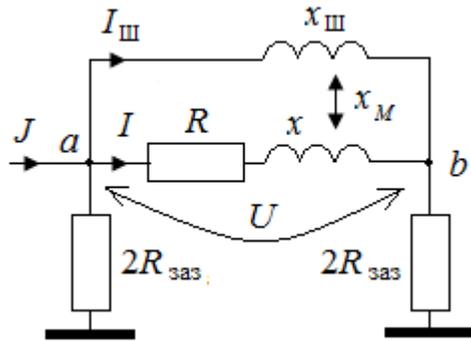


Схема замещения кабеля с двусторонним заземлением экрана и шиной

Напряжение экрана зависит не только от собственного сопротивления, но и вносимого сопротивления экрана Δz , 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 Δz рассчитывается численно при известной активном сопротивлении экрана R

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

Вывод. Вносимое сопротивление Δz приводит к снижению тока и нагрева экрана.

Для увеличения Δz следует снижать сопротивление параллельных проводников и усиливать магнитную связь.

Шаговый алгоритма расчет 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

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

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

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

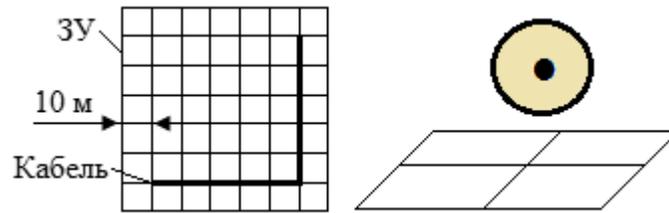
Частный случай. Ток экрана уединенного кабеля $n+1$ -го шага ($\Delta z=0$)

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

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

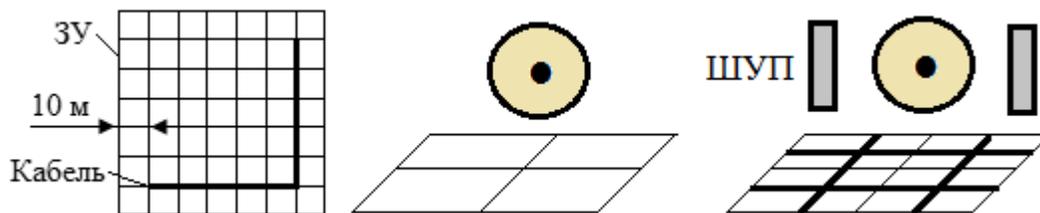
Шаговый алгоритм: $\Theta=244^\circ\text{C}$

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 ₂₀ , Ом	Δz, Ом	Температура нагрева, °С	
						Нестеров	ША
1	Кабель, ЗУ	551 /52°	271 /45°	1.78	0.24+j0.25	328	291
2	Кабель, ЗУ, ШУП	454 /55°	189 /41°	1.78	0.55+ j0.58	251	181
3	Кабель, ЗУ, два ШУП	400 /58°	144 /39°	1.78	0.85+j0.9	210	122
4	Кабель, ЗУ, два ШУП, размер ячейки ЗУ 5 м (вместо 10 м)	293 /59°	98 /38°	1.78	1.01+ j1.07	134	69

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