

Черепанов А.В., Шишигин С.Л.
ФГБОУ ВО «ВоГУ», г. Вологда, Россия
Тел.: +79517389907, E-mail: alex1234_91@mail.ru

НАГРЕВ ЭКРАНА КОНТРОЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Разряды молнии, короткие замыкания (КЗ), коммутации высоковольтного оборудования являются источниками электромагнитных и кондуктивных помех, которые могут привести к отказу, повреждению или ложному срабатыванию микропроцессорной аппаратуры в системах защиты и управления электрических подстанций [1].

Двустороннее заземление экрана контрольного кабеля приводит к существенному снижению кондуктивных высокочастотных и импульсных помех общего типа (жила-экран) поступающих на вход микропроцессорной аппаратуры. Проблема состоит в том, что в режиме КЗ на землю по экрану контрольного кабеля протекает ток. Если тепловой импульс от тока превышает термическую стойкость экрана, то это ведет к повреждению кабеля и отказу микропроцессорной аппаратуры в системах защиты и управления электрических подстанций.

Таким образом, двустороннее заземление экрана контрольного кабеля ставит перед проектировщиком задачу – расчета нагрева экрана в режиме КЗ.

Традиционная методика расчета нагрева экрана кабеля установлена в ГОСТ 28895-91:

$$\theta_f = (\theta_i + \beta) \cdot \exp\left(\frac{I^2 \tau}{\varepsilon(\tau)^2 S^2 K^2}\right) - \beta, \quad K^2 = \frac{\sigma(\beta + 20)}{\rho_{20}}, \quad (1)$$

где θ_i, θ_f – начальная и конечная температура, β – величина, обратная температурному коэффициенту сопротивления проводника при 0°C , I – ток КЗ; τ – длительность КЗ, $\varepsilon(\tau)$ – коэффициент, учитывающий отвод тепла в соседние элементы, S – площадь поперечного сечения экрана, σ – удельная объемная теплоемкость экрана при 20°C , ρ_{20} – удельное сопротивление экрана при 20°C .

Формула (1) получена в предположении постоянства тока в течение КЗ, поэтому приводит к завышенному нагреву экрана, поскольку в действительности ток экрана уменьшается из-за увеличения его сопротивления с увеличением температуры. Этот недостаток устранен в [2], где при выводе формулы нагрева условие постоянства тока заменено более реалистичным условием постоянства напряжения экрана

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

где U – напряжение между точками заземления экрана, L – длина кабеля.

Упрощенный вариант формулы (3) вошел в стандарт [3]

$$\Delta\theta = 7(U/L)^{1.5} \sqrt{\tau}. \quad (3)$$

Идея замены тока на напряжение экрана нашла отражение и в работе [4], где расчет нагрева экрана выполнен методом электротепловой аналогии. Там показано, что для контрольных кабелей, проложенных в лотках, отвод тепла в окружающую среду за время КЗ незначителен, поэтому нагрев экрана можно считать адиабатическим процессом, либо коэффициент $\varepsilon(\tau)$ следует существенно уменьшить по сравнению с ГОСТ 28895-91. По этой причине замена (2) на (3), где исключена вариация $\varepsilon(\tau)$, не обоснована.

Таким образом, современный подход к расчету нагрева экрана контрольного кабеля, закрепленный в нормативных документах, базируется на напряжении экрана вместо тока. Казалось бы, замена тока на напряжение в расчетных выражениях не принципиальна и даже имеет преимущества. Однако, это справедливо только для уединенного кабеля, без учета магнитных связей с проводниками ЗУ, шинами уравнивания потенциала (ШУП), соседними кабелями. Учесть эти факторы проще, используя токи, а не напряжения экранов в качестве расчетных параметров.

Снизить нагрев экрана контрольного кабеля – типовая задача проектировщика. Но если отождествлять ее с задачей снижения напряжения экрана (следуя расчетным выражениям), то далеко не всегда можно найти оптимальные технические решения. Например, согласно [5] для снижения нагрева кабель рекомендуется прокладывать в трубе, но при условии, что эффективность данного решения будет подтверждена расчетом. Поскольку труба незначительно уменьшает напряжение эк-

рана кабеля при плотной сетке ЗУ, то это правильное техническое решение, способное существенно снизить ток и нагрев экрана, не будет реализовано.

Исследовать пути расчета нагрева экрана контрольного кабеля с использованием тока экрана в качестве расчетного параметра – цель настоящей работы.

Рассмотрим схему замещения кабеля с двусторонним заземлением экрана, параллельно которому проложена стальная шина (рис. 1).

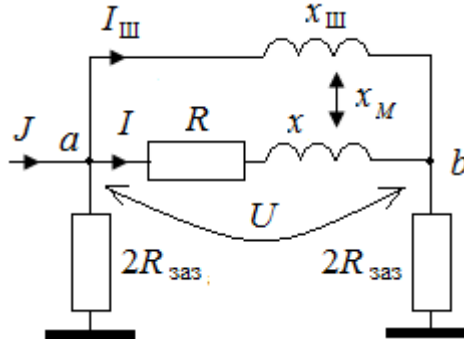


Рис. 1. Схема замещения кабеля с двусторонним заземлением экрана и шиной

Напряжению экрана равно

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

где I и $I_{ш}$ – токи экрана и шины, R и x – активное и реактивное сопротивление экрана ($R \gg x$), x_M – взаимное индуктивное сопротивление между экраном и шиной, Δz – вносимое сопротивление экрана. В частном случае, при $\varphi_b = 0$, $x = 0$ (рис. 1) ток шины отстает по фазе от тока экрана на $\pi/2$, тогда вносимое сопротивление чисто активное $\Delta z = \Delta R$, $\Delta x = 0$.

В общем случае вносимое сопротивление сложным образом зависит от всех продольных и стекающих токов ЗУ, поэтому может быть определено только численно

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

где U, I – напряжение и ток кабеля (комплексные величины).

Таким образом, увеличение сопротивления экрана на величину вносимого сопротивления приводит к снижению тока и нагрева экрана. Для увеличения вносимого сопротивления следует снижать сопротивление параллельных проводников (за счет увеличения сечения или числа шин) и усиливать магнитную связь (за счет сближения проводников и кабеля или прокладки кабеля в трубе).

При расчете нагрева экрана кабеля с учетом магнитных связей с другими проводниками следует оперировать токами, как в формуле (1). Покажем, что погрешность этой формулы, связанную с грубым допущением о постоянстве тока в процессе КЗ, можно устранить, если реализовать ее в шаговом алгоритме.

Разобьем временной интервал на n равных шагов длиной h так, что в пределах шага ток можно принять постоянной величиной. Теперь применение (1) обоснованно. Тогда температура нагрева в конце n -го шага равна

$$\theta_{n+1} = (\theta_n + \beta) \cdot \exp \left[\frac{I_n^2 \cdot h}{(\varepsilon_{n+1} S \cdot K)^2} \right] - \beta, \theta_0 = 20^\circ \text{C}, \quad (4a)$$

где все переменные описаны в (1), $\varepsilon_{n+1} = \varepsilon(t_{n+1})$.

Учтем изменение активного сопротивления проводника с изменением температуры

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

где R_0, R_{20} – сопротивление при 0 и 20°C , $\beta = 234,5^\circ \text{C}$ для меди. Примем допущение, что вносимое сопротивление от температуры не зависит.

Тогда, из условия равенства напряжения экрана n и $n+1$ -ого шага ток $n+1$ -го шага равен

$$I_{n+1} = \frac{z_n}{z_{n+1}} I_n = \frac{\left| R_{20} \frac{\beta + \theta_n}{\beta + 20} + \Delta z \right|}{\left| R_{20} \frac{\beta + \theta_{n+1}}{\beta + 20} + \Delta z \right|} I_n, I_0 = I(0). \quad (4б)$$

Для уединенного кабеля ($\Delta z = 0$)

$$I_{n+1} = \frac{\beta + \theta_n}{\beta + \theta_{n+1}} I_n. \quad (4в)$$

В качестве примера выполним расчет нагрева кабеля КВВГЭ с медным экраном сечением 1 мм^2 ($R_{20} = 1,78 \text{ Ом}$) при начальном токе $I = 250 \text{ А}$, длиной 100 м , погонным сопротивлением $R_0 = 0.018 \text{ Ом/м}$, расположенного на высоте $0,5 \text{ м}$ над поверхностью земли. Сетка ЗУ (рис.2) состоит из стальных стержней диаметром 20 мм и расположена на глубине $0,5 \text{ м}$ в грунте с удельным сопротивлением $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Процесс адиабатический ($\varepsilon = 1$). Напряжение экрана $U = R_{20}I = 445 \text{ В}$ принимается постоянным в течение КЗ. При расчете по шаговому алгоритму (4а,в) экран нагревается до 244°C за 1 с , что полностью совпадает с расчетом по формуле (2) здесь и в других вариантах. Таким образом, решение по (4) достоверно.

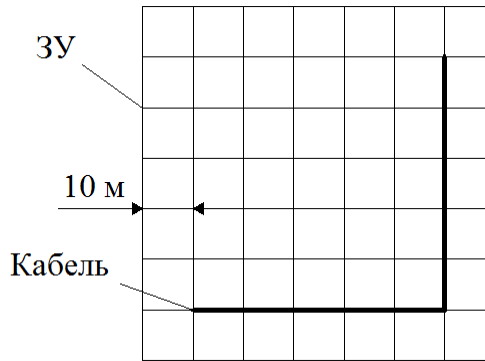


Рис. 2. Схема ЗУ

Теперь выполним расчет нагрева экрана с учетом магнитных связей кабеля. Пусть кабель проложен по ЗУ, ток КЗ вводится в точку заземления экрана кабеля и равен 20 кА , длительность КЗ равна 1 с . Рассмотрим 4 варианта: вначале кабель взаимодействует с проводниками ЗУ, затем добавляем ШУП, затем еще один ШУП, затем вдвое уменьшаем размер ячейки ЗУ (рис. 2). Для каждого варианта рассчитаем ток, напряжение и температуру нагрева экрана кабеля (см. табл.).

Расчет температуры нагрева кабеля

№	Вариант (рис. 2)	U, В /фаза	I, А /фаза	R ₂₀ , Ом	Δz, Ом	Температура нагрева, °C	
						по (2)	по (4)
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

При анализе результатов видим, что формула (2), полученная для уединенного кабеля, с учетом только собственного сопротивления экрана, дает завышенный нагрев. В действительности сопротивление экрана больше на величину вносимого сопротивления Δz , поэтому ток экрана и нагрев меньше. Результаты расчетов по (2) и (4) различаются тем больше, чем больше параллельных проводников (см. табл.).

Таким образом, все существующие расчетные выражения, полученные для уединенного кабеля, в той или иной мере завышают нагрев экрана.

Выводы.

1. Расчет нагрева экрана контрольного кабеля в режиме КЗ следует производить с учетом магнитных связей кабеля с другими проводниками.

2. Для расчета нагрева разработан шаговый алгоритм (4) на основе формулы (1) ГОСТ 28895-91, позволяющий учесть уменьшение тока в процессе нагрева и магнитные связи кабеля.
3. 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 удастся обосновать расчетным путем, если критерием является снижение (выравнивание) потенциала ЗУ согласно действующим стандартам.

Литература

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К. и др.; под ред. А.Ф. Дьякова.– М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
2. Нестеров С.В., Прохоренко С.В. Расчетная оценка термической стойкости экранов контрольных кабелей. Третья Российская конф. по заземляющим устройствам. – Сб. докл., Новосибирск: Сибир. энергет. академия, 2008. С.45–54.
3. СТО 56947007-29.130.15.114-2012. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ. Стандарт Организации ОАО «ФСК ЕЭС». М. 2012.
4. Таламанов О.В, Селезнев А.С. Контрольные кабели. Расчетная оценка нагрева экранов. – Новости электротехники. – 2012. – №6(78).