

РАСЧЕТ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ И НАГРЕВА ЭКРАНА КОНТРОЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Разряды молнии являются основными источниками 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) на выходе кабеля. Величина кондуктивной помехи определяется напряжением между точками заземления экрана U , уменьшенным в k раз [2]

$$U_k = U / k, \quad (1)$$

где k – коэффициент экранирования (ослабления).

Проблема (1) в том, что коэффициент k зависит не только от параметров самого экрана, но и точки ввода тока, точек заземления экрана, характеристик заземляющего устройства (ЗУ), трассы прокладки кабеля, наличия параллельных проводников [1, стр.330]. Он зависит от длины кабеля [3], а также является функцией частоты или функцией времени при импульсных процессах. По этим причинам использование (1) при нормативных значениях $k=6-10$ [2] сопряжено с погрешностью, а проектные решения по снижению кондуктивных помех на основе (1) могут быть не достаточно обоснованы.

Двустороннее заземление экрана контрольного кабеля ставит перед проектировщиком вторую задачу – расчета нагрева экрана в режиме КЗ. Традиционная методика расчета нагрева экрана кабеля установлена в ГОСТ 28895–91

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

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, $\epsilon(\tau)$ – 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 (2) 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 [4], где при выводе формулы нагрева условие постоянства тока заменено более реалистичным условием постоянства напряжения экрана

$$\theta_f = \sqrt{\left(\theta_i + \beta\right)^2 + \frac{2U^2 \tau \cdot (\beta + 20)}{\epsilon(\tau)^2 L^2 \sigma \cdot \rho_{20}}} - \beta, \quad (3)$$

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

Упрощенный вариант формулы (3) вошел в стандарт [5]

$$\Delta\theta = 7(U / L)^{1.5} \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

Идея замены тока на напряжение экрана нашла отражение и в работе [6], 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 (3) на (4), где исключена вариация $\varepsilon(\tau)$, не обоснована.

Таким образом, современный подход к расчету кондуктивных помех и 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 одногненного 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 кондуктивные помехи и нагрев — 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 экрана кабеля при плотной сетке ЗУ, то это правильное техническое решение, способное существенно снизить ток и нагрев экрана, не будет реализовано.

Исследовать пути расчета кондуктивных помех при ударах молнии и нагрева экрана контрольного кабеля при КЗ с использованием тока экрана в качестве расчетного параметра — цель настоящей работы.

1. Кондуктивные помехи контрольного кабеля

Ввод импульса тока (в точке А) приводит к резкому возрастанию потенциала ЗУ по сравнению с потенциалом удаленной от источника точки В (рис. 1а). Без заземления экрана кондуктивная помеха $U = U_A - U_B$ будет приложена к входу микропроцессорного устройства и может превысить допустимое значение. Двустороннее заземление экрана приводит к протеканию по экрану тока I , который фактически и обеспечивает снижение помехи до величины U_K , т. е. в $k = U / U_K$ раз.

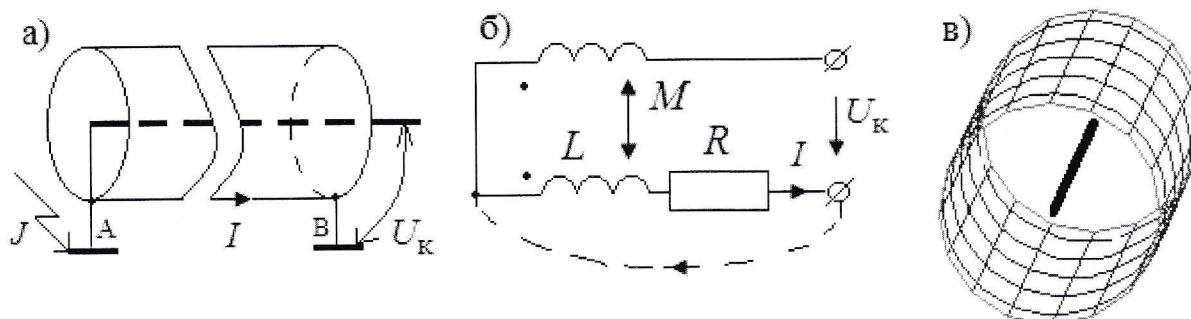


Рис.1. Контрольный кабель:
Физическая модель (а), RL-схема замещения (б), 3D-модель (в)

В важном частном случае, при первом импульсе тока молнии (эквивалентная частота 25 кГц) емкостными связями можно пренебречь и воспользоваться RL-схемой (рис. 1б) для расчета кондуктивных помех.

Тогда напряжение жила-экрана на выходе кабеля равно

$$U_K = RI + j\omega(L - M)I = Z_t l \cdot I,$$

где I — ток экрана, R — активное сопротивление экрана, L — индуктивность экрана, M — взаимная индуктивность между жилой и экраном, Z_t — передаточное сопротивление кабеля, l — длина кабеля.

В первом приближении $M=L$, тогда

$$U_K = R_0 l \cdot I, \quad (5)$$

где $R_0=0.018 \text{ Ом}/\text{м}$ – погонное сопротивление медного экрана типового кабеля КВВГЭ при установленном в [5] эквивалентном сечении экрана $S=1 \text{ мм}^2$. Это значение R_0 согласуется с измерениями для кабелей диаметром 10–15 мм [4].

Таким образом, для расчета кондуктивной помехи при первом импульсе тока молнии достаточно найти ток экрана кабеля. Для этого подходит модель экрана в виде тонкостенной трубы и даже стержня с диаметром, равным диаметру экрана кабеля, и погонным сопротивлением R_0 , что позволяет проводить расчеты кондуктивных помех в любой программе расчета ЗУ.

Для расчета кондуктивных помех при втором и последующих импульсах тока молнии (с фронтом импульса 0.25 мкс) или при воздействии высокочастотной составляющей тока КЗ (на частотах 1 МГц и выше) необходимо учитывать емкостные связи между экраном и проводниками ЗУ, экраном и жилой. Для этого подходит сеточная 3D– модель кабеля (рис. 1в), которая также позволяет проводить расчеты кондуктивных помех по программам расчета ЗУ. Здесь есть трудности вычислительного характера (из-за малости размеров по-перечного сечения кабеля по сравнению с его длиной, что требует существенного увеличения числа расчетных элементов), но они не принципиальны, как показывает практика применения программы ЗУМ [7].

В качестве примера найдем помеху жила-экран на выходе контрольного кабеля с диаметром экрана 10 мм, длиной 100 м, погонным сопротивлением $R_0=0.018 \text{ Ом}/\text{м}$, 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 (рис. 2). Сетка ЗУ состоит из стальных стержней диаметром 20 мм и расположена на глубине 0.5 м в грунте с удельным сопротивлением $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Расчет с использованием 3D-модели кабеля считаем точным (рис. 2, график 1). Кабель ведет себя как активно-индуктивная цепь, сглаживая высшие гармоники тока экрана, который согласно (5) определяет кондуктивную помеху. График 2 (рис. 2), рассчитанный по (1), существенно отличается по форме от Графика 1, причем в большей части временного интервала помеха занижена. Фактический коэффициент ослабления, определяемый в точке максимума, равен $k=13$, что превышает типовые значения ($k=6–10$) из-за влияния ЗУ и точки ввода тока (в начало кабеля). Изменение точки ввода тока, нерационально выполненное ЗУ или неправильная трассировка кабеля снижают этот коэффициент. Результаты изменятся и при другой проводимости грунта и длине кабеля. Как уже отмечалось, значение коэффициента k трудно обобщить.

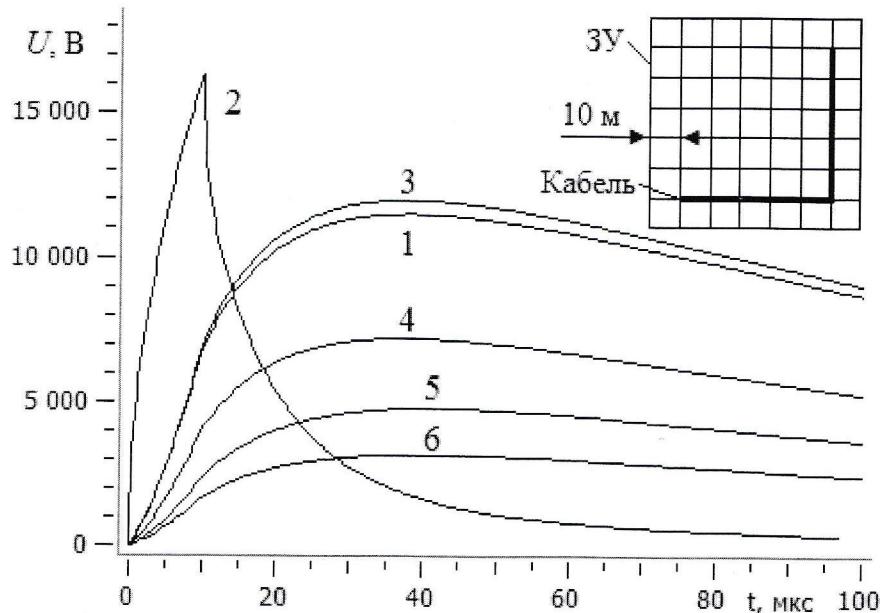


Рис. 2. Кондуктивная помеха:
1 – по 3D модели кабеля, 2 – по формуле (1) при $k = 10$, 3 – по формуле (5);
с дополнительными проводниками: 4 – ШУП на расстоянии 0.1 м от кабеля,
5 – двойной ШУП, 6 – двойной ШУП и ЗУ с шагом 5 м (вместо 10 м)

Результаты расчетов по формуле (5) (рис. 2, график 3) практически совпадают с точным решением в этой и других задачах. Формулу (5) можно рекомендовать для расчета помех при воздействии первого импульса тока молнии.

Будем снижать помеху. Стальная шина сечением 50х5 мм (ШУП), проложенная на расстоянии 0.1 м от кабеля, шунтируя ток экрана (через гальванические и магнитные связи), снижает помеху в 1.6 раза (рис. 2, график 4). Вторая шина (с противоположной стороны от кабеля) снижает помеху еще в 1.5 раза (рис. 2, график 5). Таким образом, использование ШУП – эффективное средство ограничения кондуктивных помех. Аналогично действуют контрольные кабели, проложенные рядом друг с другом в кабельном канале. Заметим, что численные значения изменятся при изменении расстояния и положения ШУП относительно кабеля. Повторим, что каждый расчет индивидуален, их результаты сложно обобщить.

Продолжим снижать помеху. Усилим ЗУ, уменьшив шаг сетки вдвое, что приводит к дополнительному снижению помехи в 1.5 раза. При этом входное сопротивление ЗУ (импульсное) уменьшилось лишь в 1.16 раза (с 1.86 до 1.6 Ом), поэтому снижение помехи вновь в большей мере обусловлено шунтирующим действием проводников ЗУ.

Теперь решим задачу по действующей методике (1). Введение двух ШУП снижает напряжение экрана только на 1.5 %, усиление ЗУ снижает его еще на 16 %, т. е. напряжение экрана в (1) меняется мало. Снижение помехи здесь обусловлено увеличением коэффициента ослабления из-за введения ШУП. Но мы уже обсуждали, что этот коэффициент индивидуален для каждой задачи, его трудно установить априорно с достаточной точностью.

Таким образом, формула (5) дает более точное решение по сравнению с (1) для расчета кондуктивных помех, возникающих при первом импульсе тока молнии.

2. Нагрев экрана контрольного кабеля

2.1. Вносимое сопротивление экрана

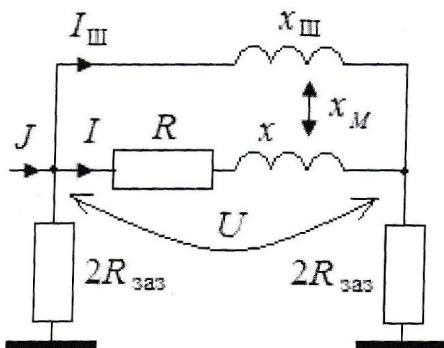


Рис. 3. Схема замещения кабеля с двусторонним заземлением экрана и шиной

Рассмотрим схему замещения кабеля с двусторонним заземлением экрана, параллельно которому проложена стальная шина (рис. 3).

Напряжение экрана равно

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

где I и $I_{\text{ш}}$ – токи экрана и шины, R и x – активное и реактивное сопротивление экрана ($R \gg x$), x_M – взаимное индуктивное сопротивление между экраном и шиной, $\Delta z = \Delta R + j\Delta x$ – вносимое сопротивление экрана.

В общем случае вносимое сопротивление сложным образом зависит от всех продольных и стекающихся 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).

2.2. Шаговый алгоритм расчета нагрева

Для расчета нагрева экрана с учетом магнитных связей с другими проводниками следует оперировать токами, как в формуле (2). Покажем, что погрешность этой формулы, свя-

занную 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 (2) обоснованно. Тогда температура нагрева в конце n -го шага равна

$$\theta_{n+1} = (\theta_n + \beta) \cdot \exp \left[\frac{I_n^2 \cdot h}{(\varepsilon_{n+1} S \cdot K)^2} \right] - \beta, \quad \theta_0 = 20^\circ\text{C}, \quad (6a)$$

где все переменные описаны в (2), $\varepsilon_{n+1} = \varepsilon(t_{n+1})$.

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

$$I_{n+1} = \frac{z_n}{z_{n+1}} I_n = \frac{\left| \frac{R_{20} \frac{\beta + \theta_n}{\beta + 20} + \Delta z}{R_{20} \frac{\beta + \theta_{n+1}}{\beta + 20} + \Delta z} \right| I_n, I_0 = I(0). \quad (6b)$$

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

$$I_{n+1} = \frac{\beta + \theta_n}{\beta + \theta_{n+1}} I_n. \quad (6b)$$

В качестве примера выполним расчет нагрева кабеля КВВГЭ длиной 100 м с медным экраном сечением 1 мм^2 ($R_{20} = 1.78 \Omega$) при начальном токе $I = 250 \text{ A}$. Процесс адиабатический ($\varepsilon = 1$). Напряжение экрана $U = R_{20} I = 445 \text{ В}$ принимается постоянным в течение КЗ. При расчете по шаговому алгоритму (6a, b) экран нагревается до 244°C за 1 сек, что полностью совпадает с расчетом по формуле (3) здесь и в других вариантах. Таким образом, решение по (6) достоверно.

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

Таблица

Расчет температуры нагрева экрана кабеля

№	Вариант (рис. 2)	$U, \text{ В}$ /фаза	$I, \text{ А}$ /фаза	R_{20}, Ω	$\Delta z, \Omega$	Temperatura нагрева, $^\circ\text{C}$	
						по (3)	по (6)
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

размер ячейки ЗУ аналогично задаче (рис. 2). Для каждого варианта рассчитаем ток, напряжение и температуру нагрева экрана кабеля (Таблица).

При анализе результатов видим (Таблица), что формула (3), 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 (3) и (6) различаются тем больше, чем больше параллельных проводников (Таблица).

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

Выводы

1. Расчет кондуктивных помех при ударе молнии и нагрева экрана контрольного кабеля в режиме КЗ следует производить с учетом магнитных связей кабеля с другими проводниками.

2. Для расчета кондуктивных помех при первом импульсе тока молнии рекомендуется формула (5), в общем случае – использование 3D модели кабеля.

3. Для расчета нагрева разработан шаговый алгоритм (6) на основе формулы (2) ГОСТ 28895–91, позволяющий учесть уменьшение тока в процессе нагрева и магнитные связи кабеля.

4. Для снижения кондуктивных помех и 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.

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. СТО 56947007–29.240.044–2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. Стандарт Организации ОАО «ФСК ЕЭС». М. 2010.
3. Матвеев М., Кузнецов М., Березовский В., Косарев И. Экранирующие кабельные конструкции. Средство экономичного решения проблем ЭМС. Новости электротехники. 2013. № 1(79). [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2013/79/09.php>
4. 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.
5. 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.
6. Таламанов О.В. Селезнев А. С. Контрольные кабели. Расчетная оценка нагрева экранов. Новости Электротехники. 2012. № 6(78). [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/78/08.php>
7. Шишигин Д. С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики. Автоматизация в промышленности, 2014. № 9. С. 28–32.