

## ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

### Влияние электромагнитного поля молнии на работу устройств защитного отключения

Стремовский А. Н., канд. техн. наук

Обосновано индукционное влияние электромагнитного поля молнии на устойчивость функционирования устройств защитного отключения (УЗО). Определены напряжения помех на вторичной обмотке трансформатора дифференциального тока в зависимости от электромагнитных параметров грозовых разрядов. Рекомендовано экранировать УЗО в загородных и сельских постройках.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле молнии, атмосферные помехи, устройство защитного отключения, ложные отключения, коэффициент экранирования.

Последнее десятилетие характеризуется повышением уровня электрификации сельских районов, особенно вблизи крупных городов (что обусловлено значительным ростом строительства коттеджей, дачных поселков, торговых центров, складских терминалов и т. п.). Кроме того, увеличивается электропотребление в общественно-административных и жилых зданиях городов. В связи с этим возрастают требования к обеспечению надежности электроснабжения указанных объектов. Наиболее значащим фактором, определяющим надежность работы сетей электроснабжения, является ее устойчивость к воздействию грозовых разрядов.

Как показывает отечественная и зарубежная практика, около 30 % аварийных отключений воздушных линий практически всех классов напряжений (выше 6 кВ) происходит при грозах [1]. Помехи в сетях электроснабжения вследствие влияния грозовых разрядов приводят к ложным срабатываниям или отказу систем сигнализации и связи, видеонаблюдения, пожаротушения. Электромагнитное поле, образующееся в канале молнии, может также вызывать неоправданные или ложные срабатывания УЗО во время грозы вследствие значительного увеличения тока утечки в зоне защиты в результате высокочастотных перенапряжений в линиях электропередачи и индуктирования ЭДС электромагнитным полем молнии во вторичной обмотке трансформатора дифференциального тока (ТДТ).

Перенапряжения в электрических сетях, обусловленные грозовыми разрядами, достаточно хорошо изучены. В ПУЭ, ГОСТ Р МЭК

62305-1–2010, СО-153-34.21.122–2003 регламентируются надежные меры и средства защиты как от прямых ударов молнии, так и от грозовых перенапряжений. В общем случае для защиты от грозовых разрядов в распределительных сетях, зданиях и сооружениях используются молниеотводы, нелинейные ограничители перенапряжений, длинноискровые разрядники, заземление, экранирование проводов и кабелей. Однако для защиты электронного оборудования от воздействия индукционных помех эти методы неэффективны.

Согласно уравнению Фарадея – Максвелла

$$\operatorname{rot} E = -\partial B / \partial t, \quad (1)$$

выражающему связь между изменением электрического поля  $E$  и магнитной индукцией  $B$  во времени ( $\partial B / \partial t$ ), для любой точки движущейся электромагнитной волны, вызванной грозовым разрядом, существует следующее соотношение:

$$E_0 = \mu_0 \nu H_0 = \nu B_0, \quad (2)$$

где  $H_0$ ,  $B_0$  — напряженность и индукция магнитного поля;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость среды;  $\nu = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость распространения электромагнитных волн.

Известно, что при прохождении электромагнитного поля через любой замкнутый контур в нем наводится ЭДС [2]

$$e = \oint E \partial l_k = -(\partial B / \partial t) S_k, \quad (3)$$

где  $l_k$  и  $S_k$  — длина и площадь рассматриваемого контура.

Таким образом, в случае грозы электромагнитное поле молнии создает в тороидальном магнитопроводе ТДТ магнитный поток  $\Phi_n$  (рис. 1), а в обмотках трансформатора — ЭДС. В результате на входе усилителя  $A$  возникает напряжение помехи  $U_n$ , которое при определенных условиях может привести к срабатыванию УЗО. Трансформаторы тороидальной конструкции обладают значительной помехоустойчивостью, так как создаваемые внешним полем магнитные потоки в каждой половине сердечника должны взаимно компенсироваться. Вместе с тем практика показывает, что даже при хорошей симметрии обмоток внешние электромагнитные и электростатические поля оказывают существенное воздействие на работу ТДТ. Это в первую очередь объясняется тем, что в точках пространства между осями обмоток внешнее поле неоднородно, поскольку металлический крепеж, соединительные клеммы УЗО и прочие элементы с высокой магнитной проницаемостью резко изменяют его величину и направление, образуя некое мультиполе. Пренебрегая собственными помехами трансформатора (так называемыми электрическими и магнитными шумами магнитопровода), определим напряжение помехи ТДТ при воздействии на УЗО электромагнитного поля молнии по следующему приближенному выражению [3]:

$$U_n \approx \pi B_0 f_0 \omega_2 S_c k_n n b / l_0, \quad (4)$$

где  $f_0$  — частота помехонесущего поля;  $\omega_2 = 600$  — количество витков вторичной обмотки ТДТ;  $S_c = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  — площадь сечения магнитопровода;  $k_n = 3$  — коэффициент, учитывающий искажение помехонесущего поля внесением в него трансформатора;  $n = 4$  — повышающий коэффициент для трансформатора в неоднородном магнитном поле;  $b = 15 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — диаметр средней линии окружности магнитопровода;  $l_0$  — расстояние до источника помех, м.

Учитывая соотношение (2), преобразуем выражение (4) в простую формулу для расчета напряжения помехи ТДТ в зависимости от напряженности, частоты и удаленности электромагнитного поля молнии:

$$U_n \approx 5,65 B_0 f_0 \cdot 10^{-10} / l_0 \text{ В.} \quad (5)$$

Как показывают натурные исследования, средние значения напряженности электромаг-

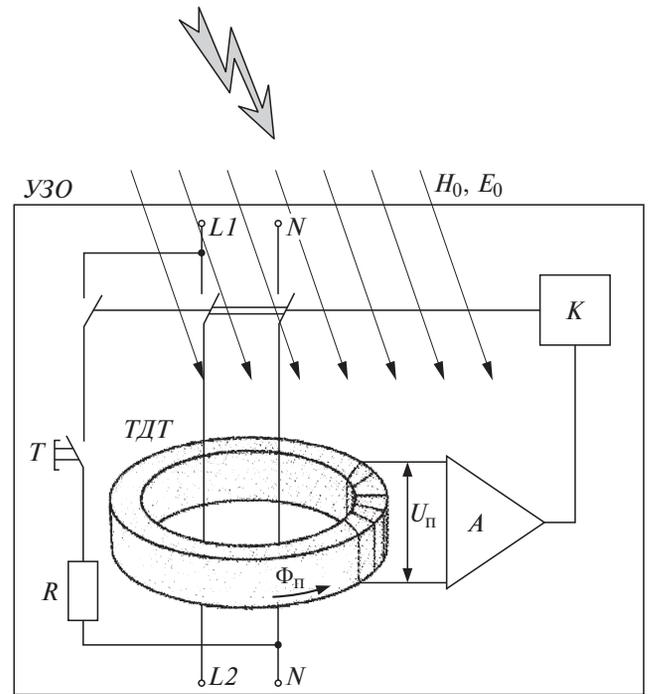


Рис. 1. УЗО в зоне электромагнитного поля молнии:

$A$  — электронный усилитель;  $K$  — коммутационное реле;  $R$  — ограничительный резистор;  $T$  — кнопка “Тест”

нитного поля в активной зоне составляют  $(1 \div 2) \cdot 10^5 \text{ В/м}$  [4], а экстремальные значения могут достигать  $1 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ . Наиболее вероятный частотный диапазон помех, создаваемый грозовыми разрядами, лежит в диапазоне  $1 \text{ кГц} — 5 \text{ МГц}$ .

В общем случае для размыкания электрической цепи существующих модификаций УЗО необходимо и достаточно, чтобы выходное напряжение во вторичной обмотке ТДТ было более  $5 \text{ мВ}$ , а время его действия  $t_p$  — не менее  $4 — 5 \text{ мс}$ . Время  $t_p$  определим как минимальную длительность сигнала, “когда команда на размыкание становится необратимой” (п. 3.4.10 ГОСТ Р51327.1–2010 [5]).

Исследования реальных грозовых разрядов [6] показывают, что длительность воздействия на УЗО грозовых помех будет, очевидно, больше  $t_p = 5 \text{ мс}$  (рис. 2). Число повторных импульсов в грозовом разряде может быть  $10$  и более, при этом продолжительность помех достигает  $1 — 1,5 \text{ с}$ .

При определении влияния на УЗО электромагнитных помех следует учитывать их значительное ослабление при прохождении через среду, имеющую высокую магнитную проницаемость. Такой средой следует считать стальные электрощитки, в которых устанавливается аппаратура защиты и управления. Количественной оценкой эффективности эк-

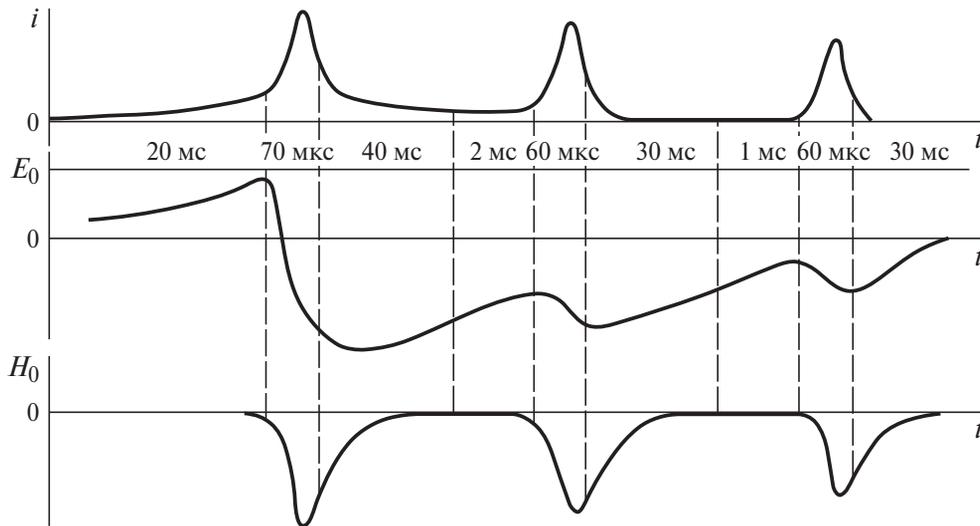


Рис. 2. Стилизованные осциллограммы изменения напряженности электрического и магнитного полей у поверхности земли во время грозового разряда на расстоянии 1 км от канала отрицательной молнии

ранирования является коэффициент экранирования

$$K_э = U_{п.э} / U_{п.э}, \quad (6)$$

где  $U_{п.э}$  — напряжение помехи при нахождении УЗО внутри экрана (электрощитка).

В теории электромагнитного экранирования достаточно точно определяются коэффициенты экранирования в простейших случаях: характер помехи — детерминированный; экран — правильной сферической или цилиндрической формы; известно точное расположение экранируемого объекта внутри экрана и т. п. В рассматриваемом случае, учитывая, что грозовой разряд является стохастическим событием с нестационарными переменными, при расчетах реальные процессы в большей или меньшей степени идеализируются.

Коэффициент экранирования для ферромагнитных сплавов определяют по формуле [7]

$$\ln K_э = p + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1 + pR}{2 + 3\mu d} \right)^2 + \left( \frac{1 - \mu d}{2 - 3pR} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где переменные имеют следующие реальные значения:  $p = d_э \sqrt{\pi f_0 \gamma \mu_0}$ ;  $d_э = 0,8 \cdot 10^{-3}$  м — толщина экрана;  $\gamma = 8 \cdot 10^6$  1/(Ом · м) — удельная проводимость материала экрана;  $\mu = 100$  — относительная магнитная проницаемость стали;  $R = 15 \cdot 10^{-2}$  м — радиус экрана (определяем как радиус эквивалентной сферы исходя из равенства объемов относительно реального экрана).

На основе расчетов с использованием выражений (5), (6) и формулы (7) составлена сводная таблица расчетных значений напряжений помех на вторичной обмотке ТДТ (при распространении грозового электромагнитного поля на открытом пространстве) в зависимости от частоты помехонесущего поля и расстояния от места разряда при  $E_0 = 2 \cdot 10^5$  В/м.

Очевидно, помехоустойчивость УЗО будет значительно ниже при его установке вне металлического экрана либо в пластмассовом электрощитке, что часто можно встретить в коттеджном или дачном строительстве. В этом случае согласно расчетам грозовой разряд может вызвать ложное отключение УЗО на расстоянии меньше 1 км от канала молнии, если частота помех выше 40–50 кГц. При размещении УЗО в стальном электрощитке вероятность его отключения во время грозы незначительна, а при частотах помех  $f_0 > 1$  МГц коэффициент экранирования возрастает настолько, что полностью нейтрализует индукционное влияние грозового электромагнитного поля, по крайней мере, в рассматриваемом диапазоне расстояний от источника.

Напряженность электромагнитного поля, распространяющегося вблизи земли на открытом пространстве, обратно пропорциональна расстоянию от источника. Для плотно застроенных городских территорий ослабление поля достигает  $1/l_0^3$  [8]. Следовательно, при прочих равных условиях напряжения  $U_{п.э}$ , указанные в таблице, для городских строений будут значительно меньше. Кроме того,

$f_0$ , кГц	$U_{п.}$ , мВ		$K_3$	$U_{п.э.}$ , мВ	
	$l_0 = 1$ км	$l_0 = 0,5$ км		$l_0 = 1$ км	$l_0 = 0,5$ км
1,0	0,1	0,2	—	—	—
10	1,0	2,0	—	—	—
40	4,5	9,0	2,5	1,8	3,6
50	5,7	11,4	2,7	2,1	4,2
$1 \cdot 10^2$	10	20	4,5	2,2	4,4
$1 \cdot 10^3$	100	200	$2 \cdot 10^2$	0,5	1,0
$1 \cdot 10^4$	103	203	$12 \cdot 10^6$	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$

УЗО, установленные в кирпичных или панельных зданиях, с точки зрения экранирования находятся в многослойном экране: крыша, этажные перекрытия, стены, стальной электрощиток. Таким образом, в условиях городской застройки индукционная составляющая грозовых перенапряжений практически не влияет на устойчивость работы УЗО.

В сельской местности опасность ложных отключений УЗО во время гроз значительно выше вследствие прокладки электрических сетей, как правило, воздушным способом. Поэтому в сельских постройках, при дачном и коттеджном строительстве электронное оборудование, включая УЗО, необходимо устанавливать в заземленных стальных шкафах (электрощитках).

### Выводы

1. Электромагнитное поле молнии создает на выходе вторичной обмотки ТДТ напряжение помехи, которое при превышении определенного порогового значения может привести к ложному отключению УЗО.

2. Экранирование УЗО значительно снижает вероятность ложных отключений при возникновении атмосферных помех.

3. В городских зданиях и сооружениях при установке электрооборудования в металлических электрощитках влияние индуктивной составляющей помех грозовых разрядов на устойчивость функционирования УЗО не-

значительно и практически не приводит к ложным отключениям.

4. В загородных и сельских постройках, в дачных домах и коттеджах для увеличения электромагнитной помехозащищенности УЗО необходимо размещать в заземленных стальных шкафах, изготовленных без вырезов и щелей.

### Список литературы

1. Гиндуллин Ф. А., Горбатенко В. П. Исследование региональных распределений интенсивности грозовой деятельности. — В кн.: Сб. науч. тр. / ЭНИИ им. Г. М. Кржижановского. М., 1989.
2. Круг К. А. Основы электротехники. Т. 1. Физические основы электротехники. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1946.
3. Русин Ю. С. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. — Л.: Энергия, 1973.
4. Машуков Х. Х. Исследование электромагнитных полей в грозовых облаках ракетным зондом: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 2002.
5. ГОСТ Р 51327.1–2010. Выключатели автоматические, управляемые дифференциальным током, бытового и аналогичного назначения со встроенной защитой от сверхтоков.
6. Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. — М.: Радио и связь, 1991.
7. Русин Ю. С., Гликман И. Я., Горский А. Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1991.
8. Уильямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок / Пер. с англ. — М.: Издательский Дом "Технологии", 2004.

uran1946@rambler.ru