

УДК 621.315.1

И.А. Ефремов, А.А. Кузьмин

## Роль грозозащитных тросов в процессах короткого замыкания

Рассматриваются переходные процессы при коротких замыканиях на воздушных линиях с учетом влияния процессов в грозозащитных тросах. Исследуется возможность перекрытия изолирующей подвески тросов, при котором образуется контур «трос – земля».

**Ключевые слова:** короткое замыкание, грозозащитный трос, изолирующая подвеска, высоковольтные воздушные линии.

Короткое замыкание (к.з.) на высоковольтной воздушной линии (ВЛ) с грозозащитными тросами вызывает переходный процесс во всей многопроводной системе, образованной фазными проводами и тросами [1]. Необходимость детального анализа процессов в схеме грозозащитных тросов продиктована серьезными проблемами, возникающими в практике эксплуатации и связанными с растеканием токов, с повреждениями тросов и их изолирующей подвески (ИП).

При грозовом поражении линии с перекрытием фазной изоляции возникает аварийный режим работы ВЛ, характеризующийся дуговым замыканием ИП грозозащитных тросов в месте удара молнии и горением дуги к.з. на одной из фаз ВЛ. Аналогичная ситуация может возникнуть вследствие перекрытия увлажненной и загрязненной изоляции какой-либо фазы ВЛ в нормальном режиме ее работы, если наведенное на ИП тросов напряжение окажется достаточным для ее перекрытия.

Уровень перенапряжений на грозозащитных тросах при однофазном к.з. в первом приближении можно оценить с помощью простого соотношения

$$U_T = U_{\text{Л}} \cdot \frac{Z_{\text{фТ}}}{Z_{\text{ф}}},$$

где  $U_{\text{Л}}$  – напряжение на фазном проводе в момент замыкания;  $Z_{\text{фТ}}$  – взаимное волновое сопротивление между фазой и тросом;  $Z_{\text{ф}}$  – собственное волновое сопротивление фазного провода.

Приведенное соотношение справедливо для оценки перенапряжений в первый момент времени после возникновения к.з. до прихода отраженных волн. Поскольку отношение  $Z_{\text{фТ}}/Z_{\text{ф}}$  для воздушных линий имеет значения 0,25–0,30, перенапряжения на тросе достигают больших величин. Перекрытие стандартной ИП грозозащитных тросов ВЛ класса 220 кВ и выше при к.з. в момент, когда напряжение на фазе достигает максимума, происходит с большой вероятностью.

Перенапряжения на грозозащитных тросах, обусловленные наложением волн в переходном процессе, могут достигать существенно больших значений.

Анализируя перенапряжения на грозозащитных тросах ВЛ, необходимо принимать во внимание возможность перекрытия изолирующей подвески тросов не только в точке к.з., но и в точках, удаленных от места замыкания на значительные расстояния. Определение условий работы изоляции тросов ВЛ большой протяженности подразумевает исследование процессов в длинной линии с учетом реальных схем выполнения грозозащитных тросов и особенностей переходного процесса, вызванного коротким замыканием.

Наиболее распространенной в настоящее время является схема изолированных от опоры тросов, разделенных на относительно короткие участки (несколько километров) и заземленных лишь с одного конца для снижения электрических потерь. Применительно к такой схеме анализ перенапряжений на тросах целесообразно разделить на два этапа – оценку искажения волны, вызванной однофазным коротким замыканием, при движении ее по линии и расчет наведенных перенапряжений на тросе, определяемых этой волной.

Переходный процесс при внезапном коротком замыкании может быть представлен как наложение предшествовавшего замыканию синусоидального режима и переходного процесса, вызванного

включением в точке к.з. синусоидальной ЭДС равной по величине и противоположной по знаку напряжению в данной точке до короткого замыкания. Поскольку в нормальном режиме токи в тросах отсутствуют, а напряжения на них пренебрежимо малы, достаточно рассмотреть лишь вторую составляющую – процесс при включении источника ЭДС, который и определяет перенапряжения на тросах.

Анализ частотного спектра переходных процессов в схемах грозозащитных тросов ВЛ показывает, что значительные перенапряжения на тросах могут быть вызваны свободными составляющими процесса с частотами порядка  $10^4$  Гц. Из-за быстрого затухания колебаний столь высокой частоты можно ограничиться рассмотрением переходного процесса до прихода отраженных волн от шин подстанций, питающих линию. Малая длительность расчетного временного интервала исследуемого процесса позволяет представить источник синусоидальной ЭДС промышленной частоты, включаемый в момент достижения максимума как источник постоянной ЭДС.

Распространение изначально прямоугольной волны напряжения и тока по линии в обе стороны от места к.з. сопровождается ее деформацией и затуханием, что обусловлено потерями энергии и процессами растекания тока в земле.

При отсутствии отражения по концам линии и пренебрежении вторичным влиянием токов в тросах на волну, движущуюся по фазе ВЛ, искажение этой волны полностью определяется процессами в системе «фазный провод – земля». Погрешность, вносимая неучетом вторичного влияния тока в тросе, в первом приближении оценивается как

$$d \approx \frac{Z_{\text{фг2}}}{Z_{\text{ф}} \cdot Z_{\text{т}}},$$

что составляет 3–4%. Действительная величина погрешности будет еще меньше из-за большого активного сопротивления стального троса, которое при частотах 10–100 кГц составляет примерно 20–100 Ом/км.

Изменение формы единичной прямоугольной волны на участке линии длиной  $l$  характеризуется переходной функцией участка, которая определяется с помощью интегрального преобразования Фурье на основании частотной зависимости коэффициента искажения волнового канала  $gS(j\omega)$  [2]:

$$g(t) = g(j\omega) = \frac{\exp(gS(j\omega)l)}{j\omega}.$$

Для количественной оценки искажения волны при движении ее по линии можно воспользоваться понятием эквивалентной длины фронта. Под эквивалентной длиной подразумевается длина косого фронта волны  $t_{\text{фэ}}$ , имеющего крутизну, равную максимальной крутизне переходной функции заданного участка линии.

Расчеты перенапряжений на тросе проводились в системе «провод – трос – земля» с распределенными параметрами для участков троса протяженностью 10 км. Волна, набегающая по фазному проводу, принималась косого фронта, соответствующей удаленности участка от места к.з. Параметры системы задавались отвечающими частоте  $\omega = 1/t_{\text{фэ}}$ .

В качестве иллюстрации ниже приводятся расчетные осциллограммы перенапряжений на грозозащитных тросах в различных точках ВЛ 500 кВ. Данные рис. 1 и 2 относятся к случаю, когда замыкание возникает на крайней фазе линии, и соответствуют ближнему к аварийной фазе тросу.

Рисунок 1 иллюстрирует процессы вблизи места к.з. В расчете принято, что однофазное короткое замыкание происходит на опоре, где выполнено заземление изолированного участка троса («нулевая» опора). Рассматриваются перенапряжения в узлах изолирующей подвески тросов на ближайших опорах, которые пронумерованы в порядке их удаления. Расчетная модель включает в себя разрядные промежутки между тросом и землей на каждой опоре. Поскольку волна вблизи места замыкания имеет малую длину фронта, разрядное напряжение промежутков в соответствии с вольт-секундной характеристикой принято повышенным – 80 вместо 50 кВ, отвечающих стандартной волне грозового импульса.

Из рис. 1 видно, что перенапряжения не превышают электрическую прочность изолирующей подвески троса лишь на двух опорах – Оп. 1 и Оп. 2, ближайших к месту заземления тросов. На всех последующих опорах рассматриваемого участка наблюдаются перекрытия ИП тросовой подвески. (Перекрытие ИП опоры Оп. 3 в данном случае происходит с запаздыванием под воздействием переходного процесса, вызванного перекрытием ИП опоры Оп. 4).

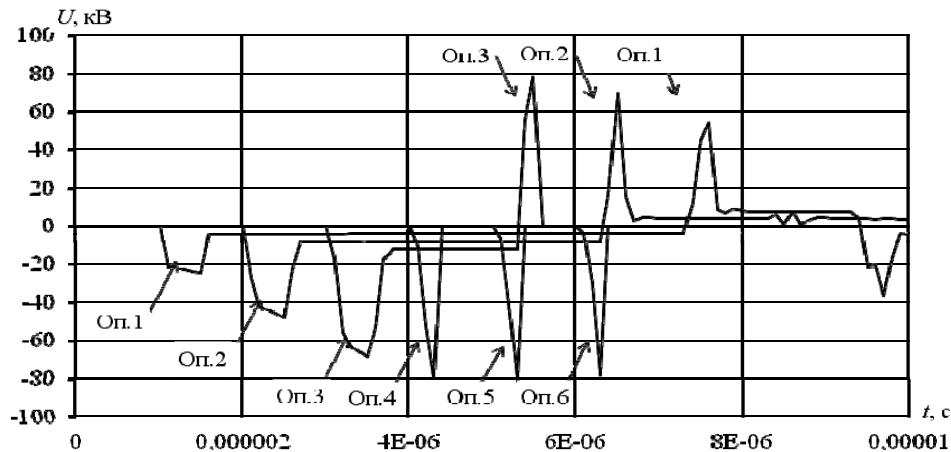


Рис. 1. Перенапряжения на грозозащитном тросе ВЛ 500 кВ вблизи места к.з.

Быстрое нарастание напряжения на тросе по мере удаления от места его заземления обусловлено двумя факторами – большими запаздыванием и затуханием волны в контуре «трос – земля» по сравнению с волной в контуре «провод – земля». Различие фазовых скоростей, например, для ВЛ 500 кВ при  $r_3 = 100$  Ом·м в диапазоне частот 10–100 кГц, составляет 4–6%. Активное сопротивление в контуре «провод – земля» определяется в основном сопротивлением протеканию тока в земле, в то время как в контуре «трос – земля» активное сопротивление стального троса в 3–4 раза превышает сопротивление земли.

На участках тросов, удаленных от места к.з., из-за удлинения фронта волны множественные перекрытия ИП не наблюдаются. Однако изолирующая подвеска разомкнутого конца участка троса перекрывается и на значительном удалении от места замыкания.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета перенапряжений на участке троса ВЛ 500 кВ, отстоящем от точки к.з. на 150 км. Кривые напряжения получены для четырех точек участка, обозначенных на рис. 2 координатой, соответствующей относительному расстоянию от расчетной точки до места заземления участка троса. Из рис. 2 видно, что разрядное напряжение ИП, принятое в данном случае равным 50 кВ, превышает лишь на разомкнутом конце участка, поскольку после пробоя ИП перенапряжения в других точках быстро снижаются.

На втором тросе ВЛ 500 кВ, дальнем относительно аварийной фазы, имеет место практически та же картина, что и в рассмотренном случае. Несмотря на меньшее (на 40%) взаимное волновое сопротивление  $Z_{фг}$ , перенапряжения на дальнем тросе намного превышают электрическую прочность ИП, и ее перекрытия происходят так же, как и на ближнем тросе, лишь с некоторым запаздыванием.

Приведенные данные дают общее представление о процессах, типичных для ВЛ с грозозащитными тросами. Как и в схемах тросов ВЛ 500 кВ при к.з. на верхнем проводе ВЛ 220 кВ перекрытие ИП тросовой подвески происходит на всех участках, удаленных от места замыкания на расстояние, по меньшей мере, до 150 км. В случае к.з. на нижнем проводе двухцепной ВЛ 220 кВ зона перекрытия ИП тросов сокращается до 60–70 км, что объясняется меньшей величиной наведенных перенапряжений.

Независимо от класса напряжения ВЛ и удаленности от места к.з., ориентация участка троса, заземленного с одной стороны, то есть взаимное положение заземленного и разомкнутого концов участка относительно направления движения волны, не оказывает принципиального влияния на уровень максимальных перенапряжений.

Расчеты, выполненные для ВЛ 110 кВ, показывают, что при однофазных к.з. вызванных перекрытием увлажненной и загрязненной изоляции, на линиях этого класса перенапряжения на изолирующей подвеске грозозащитных тросов не превосходят 50 кВ.

Помимо рассмотренной выше схемы, содержащей короткие участки грозозащитных тросов, иногда используются специальные схемы, например для организации дополнительных каналов высокочастотной связи по тросам значительной протяженности. Расчеты показывают, что в этих случаях перенапряжения могут превышать электрическую прочность ИП даже при подвеске тросов на нескольких изоляторах.

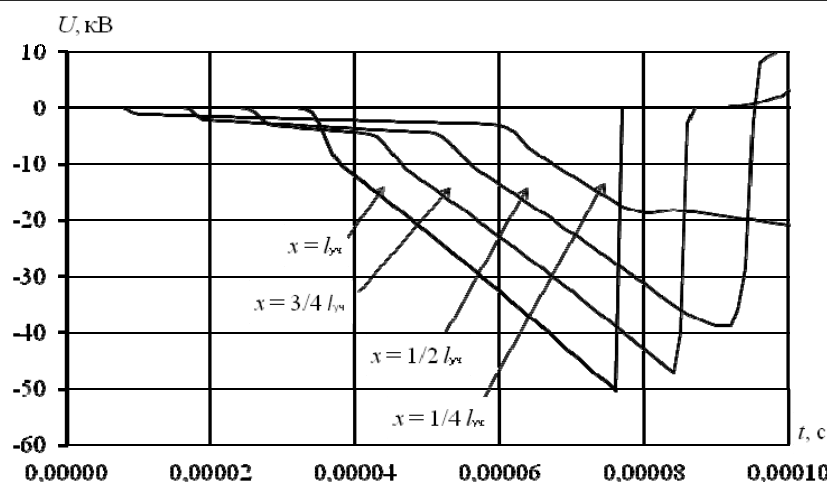


Рис. 2. Перенапряжения на изоляции троса ВЛ 500 кВ вдали от места к.з.

### Заключение

При коротких замыканиях на ВЛ класса 220 кВ и выше перекрытие изолирующей подвески грозозащитных тросов происходит с большой вероятностью независимо от схемы выполнения тросов и места замыкания. Грозозащитные тросы, не имеющие двустороннего заземления, в режиме к.з. могут образовать контур для протекания тока.

Вблизи места к.з. возможны множественные перекрытия ИП тросов. Указанные обстоятельства в значительной мере влияют на величину тока к.з. в сети, определяют картину растекания тока через заземлители опор ВЛ.

Электрические пробои и горение открытой дуги в узлах подвески грозозащитных тросов, помимо непосредственной опасности динамических и термических воздействий на механическую часть и изоляцию тросов, могут оказать негативное влияние на работу каналов высокочастотной связи по ВЛ и аппаратуры, чувствительной к помехам.

### Литература

1. Ефремов И.А. Моделирование электромагнитных переходных процессов в многопроводных несимметричных линиях электропередачи // Научный вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. – 1998. – № 2(5). – С. 101–108.
2. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения / М.В. Костенко, К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн, И.А. Ефремов. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.

### Ефремов Игорь Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)

Тел.: 8 (383) 346-11-79

Эл. почта: efremov-ia@ngs.ru

### Кузьмин Алексей Александрович

Магистрант каф. техники и электрофизики высоких напряжений НГТУ

Тел.: 8 (383) 262-30-44

Эл. почта: kuzmin\_a\_a@211.ru

Efremov I.A., Kuzmin A.A.

### The role of the ground wire in the process of fault

The paper considers transient short-circuit on routes with the influence of processes in the ground wire. The possibility of overlap of insulating suspension ropes, which yields a loop «the cable – the land».

**Keywords:** short circuit, ground wire, insulating suspension, high-voltage overhead lines.