

Требования к креплению грозозащитных тросов и местам их заземления на ВЛ 35–750 кВ отражены в нескольких нормативных документах и зависят от многих факторов, в том числе от класса напряжения ВЛ, схемы плавки гололеда, наличия встроенного в тросы оптоволокна, удаленности от распределительных устройств.

По мнению наших петербургских авторов, многообразие положений, разбросанных по разным стандартам, мешает созданию целостного представления о принципах обустройства грозотросов. Кроме того, они считают, что некоторые нормы нуждаются в пересмотре.

## ГРОЗОЗАЩИТНЫЕ ТРОСЫ ВЛ 35–750 кВ Выбор мест заземления

На воздушных линиях (ВЛ) 35–750 кВ основным назначением грозозащитных тросов является защита фазных проводов от прямых разрядов молнии, способных приводить к перекрытию изоляции и возникновению коротких замыканий (КЗ). В мире известны случаи, когда тросы устанавливаются не только на ВЛ 35–750 кВ, но и на ВЛ 6–20 кВ. В таких случаях они служат не для защиты от прямых разрядов молнии в провода, а для снижения на них уровня индуктированных перенапряжений при близких к ВЛ разрядах молнии.

Как правило, количество тросов ВЛ 35–750 кВ составляет 1 или 2. Конкретное число зависит от класса напряжения ВЛ и типа ее опор, от интенсивности грозовой деятельности и требований к надежности электроснабжения потребителей.

Обычно грозозащитные тросы располагаются над фазными проводами, но есть ситуации, когда дополнительный трос подвешивается ниже фазных проводов – это делается для снижения риска обратных перекрытий с тела опоры на фазные провода при разрядах молнии в основные (верхние) тросы.

Дополнительным назначением тросов является повышение защищенности от грозовых перенапряжений оборудования конечных распределительных устройств (РУ). Для этих целей на участках ВЛ 35–750 кВ длиной до нескольких километров, примыкающих к РУ, обязательно устанавливаются и хорошо заземляются 1–2 троса вне зависимости от того, есть ли тросы (и сколько) на остальной части трассы ВЛ. Такие участки называются защищенными тросовыми подходами.

Еще одним дополнительным функционалом троса ВЛ 35–750 кВ может быть размещение в нем оптического кабеля, при этом он называется ОКГТ.

Появление на ВЛ тросов требует решения многих вопросов, среди которых:

- выбор арматуры для крепления троса к опоре;
- выбор мест заземления троса;
- расчет термической стойкости к токам молнии и токам КЗ сети;
- расчет достаточной длины защищенного тросового подхода;
- организация плавки гололеда.

Многие решения отражены в ПУЭ и стандартах ПАО «ФСК ЕЭС», но данные нормативные документы разрабатывались или очень давно, или лишь узким кругом специалистов, а значит их обсуждение и корректировка отнюдь не бессмысленны.

### АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ПУЭ

Согласно п. 2.5.122 ПУЭ [1] грозозащитные тросы к опорам ВЛ следует присоединять через изоляторы, которые затем шунтируются (или нет) специальными металлическими перемычками. Выбор мест заземления зависит от класса напряжения ВЛ, близости конкретного участка к конечным РУ, наличия плавки гололеда или высокочастотной (ВЧ) связи.

Чтобы лучше разобраться в положениях п. 2.5.122, рассмотрим их по частям.

1. «Крепление тросов на всех опорах ВЛ 220–750 кВ должно быть выполнено при помощи изоляторов, шунтированных ИП размером не менее 40 мм. На каждом анкерном участке длиной до 10 км тросы должны быть заземлены в одной

точке путем устройства специальных перемычек на анкерной опоре».

Эта фраза означает, что для ВЛ 220–750 кВ следует выполнить деление троса на участки, каждый из которых заземлен в одной точке. Данное решение позволяет уйти от прохождения в тросах тока промышленной частоты 50 Гц, наведенного магнитным полем фазных проводов (рис. 1), а значит – снизить потери активной мощности в линии. Разумеется, возникает вопрос, почему только для ВЛ 220–750 кВ, а не для всех ВЛ от 35 до 750 кВ?

В случае деления троса на секции, каждая из которых заземлена лишь один раз (рис. 2), на конце каждой секции будет наводиться напряжение промышленной частоты, пропорциональное длине участка и току в проводах. В нормальном режиме это напряжение не представляет никакой опасности, а при КЗ, когда по проводам проходят токи КЗ, напряжение может вызвать перекрытие изолятора троса и возникновение дуги.

Если КЗ было на самой ВЛ, то после отключения ВЛ дуга на тросе погаснет. Если же КЗ по отношению к ВЛ было внешним, то после его отключения ВЛ будет в работе, и дуга троса может сохраниться, существуя за счет тока, который наводится в тросовом контуре магнитным полем фазных проводов ВЛ. Желание снизить риск возникновения дуги и приводит к необходимости ограничить величиной 10 км длину участка с односторонним заземлением тросов. Однако для каких уровней токов КЗ названа длина 10 км?

В современных сетях токи КЗ возросли по сравнению с теми, которые были в середине 20-го века, когда разрабатывались ПУЭ. В частности, по причине роста токов КЗ на ряде эксплуатируемых ВЛ приходится заменять грозозащитные тросы на новые, так как старые уже не проходят по термической стойкости [2].

2. «На подходах ВЛ 220–330 кВ к подстанциям на длине 1–3 км и на подходах ВЛ 500–750 кВ на длине 3–5 км, если тросы не используются для емкостного отбора, плавки гололеда или связи, их следует заземлять на каждой опоре».

Обустройство тросов на подходах ВЛ к конечным РУ влияет на защищенность оборудования РУ от грозовых перенапряжений, однако тут возникает ряд вопросов. Во-первых, по какой причине в ПУЭ говорится лишь о подстанциях и опущены электрические станции? Во-вторых, почему упомянуты только классы 220–750 кВ, и не сказано про РУ 35–150 кВ – разве принципы построения схем грозозащиты на эти классы напряжения чем-то отличаются? В-третьих, как уже было показано многими исследованиями (например в [3]), разряды молнии в ВЛ дальше 0,5–1,5 км от входа РУ уже не способны создавать опасные грозовые перенапряжения, т. е. нет никакого смысла в организации подходов длиной до 3–5 км.

Наличие заземления тросов на каждой опоре, выполненное на подходах ВЛ к РУ, согласно рис. 1 будет означать появление в тросах токов 50 Гц. Следствием этих токов являются не только потери активной мощности в тросах, но и коррозия опор и фундаментов, по которым токи постоянно стекают в землю.

Никогда не приходилось встречать публикации, из которых бы следовало, что грозоупорность ВЛ (или конечных РУ) на участках с односторонним заземлением тросов или вовсе без

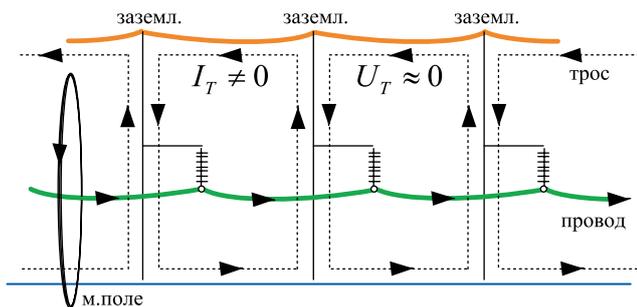
Михаил Дмитриев,  
к.т.н., доцент

Сергей Родчихин,  
магистрант

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

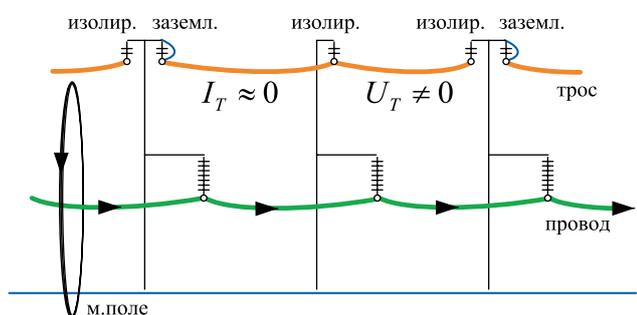
### Причины возникновения тока в многократно заземленном тросе ВЛ 35-750 кВ

Рис. 1 •



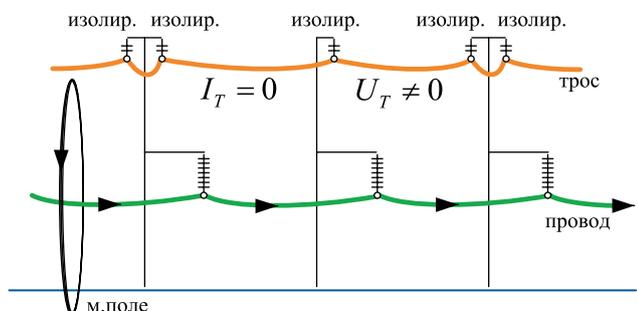
### Пример деления тросов ВЛ 35-750 кВ на односторонне заземленные секции

Рис. 2 •



### Пример изолированного крепления тросов ВЛ 35-750 кВ без заземления (схема используется для плавки гололеда или ВЧ-связи)

Рис. 3 •



заземления (когда плавят гололед, рис. 3) оказывается ниже, чем на участках с многократным заземлением. Поэтому так ли важно на подходах ВЛ к РУ заземлять трос на каждой опоре? Уверены, что на подходах ВЛ к РУ можно, как и на всей трассе ВЛ, использовать одностороннее заземление тросов.

3. «На ВЛ 150 кВ и ниже, если не предусмотрена плавка гололеда или организация каналов высокочастотной связи на тросе, изолированное крепление троса следует выполнять только на металлических и железобетонных анкерных опорах. На участках ВЛ с неизолированным креплением троса и током КЗ на землю, превышающим 15 кА, а также на подходах к подстанциям заземление троса должно быть выполнено с установкой перемычки, шунтирующей зажим».

Во-первых, достаточно сложно однозначно трактовать указанные положения. Например, изолированное крепление троса требуется для всех анкерных опор ВЛ 35-150 кВ (металлических и железобетонных) или же только для железобетонных? Известны трассы ВЛ, где каждая опора является анкерной – получается, что на таких ВЛ 35-150 кВ заземление троса не требуется вовсе? Если изолированное крепление только на анкерных, то значит на всех остальных опорах трос надо заземлять?

Во-вторых, повторимся, не ясно, почему ВЛ 35, 110, 150 кВ, имеющие близкие к 220 кВ конструкции опор, вдруг выделены в группу, отдельную от 220–750 кВ?

4. «При использовании тросов для устройства каналов высокочастотной связи они изолируются от опор на всем протяжении каналов высокочастотной связи и заземляются на подстанциях и усилительных пунктах через высокочастотные зарядители. Если на тросах ВЛ предусмотрена плавка гололеда, то изолированное крепление тросов выполняется по всему участку плавки. В одной точке участка плавки тросы заземляются с помощью специальных перемычек».

Как видно, в случаях ВЧ-связи или плавки гололеда ПУЭ разрешают не делать заземление троса. При этом не говорится о каком-либо «ухудшении грозоупорности» самой ВЛ или конечных РУ, не требуется никаких мероприятий, которые позволили бы компенсировать «ухудшение грозоупорности» ВЛ или конечных РУ, например, за счет установки дополнительных ограничителей перенапряжений (ОПН) на входе в РУ или на сборные шины РУ.

В целом отсутствие рекомендаций по внедрению этих мероприятий ожидаемо, так как при разрядах молнии в трос его изолирующая подвеска «мгновенно» будет перекрыта, и трос окажется присоединен к телу опоры, участвуя в процессах точно также, как это бывает на ВЛ с заземленным тросом. После завершения импульсных процессов в месте перекрытия подвески перестанет проходить импульсных ток, но останется ток 50 Гц из-за магнитного поля проводов. Обоснованный выбор длины искровых промежутков, шунтирующих подвеску троса, обеспечит самостоятельное гашение дуги этого тока 50 Гц и переход троса в исходное изолированное от опоры состояние.

Если согласно одним положениям ПУЭ схема заземления тросов не влияет на грозоупорность ВЛ и РУ, то вновь и вновь возникает вопрос: с какой целью другие положения ПУЭ так упорно требуют на подходах к РУ предусматривать особую схему заземления, отличную от остальной трассы ВЛ?

#### АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ПАО «ФСК ЕЭС»

Еще одним документом, в котором затронуты вопросы крепления грозозащитных тросов, является стандарт [4]. Пункт 4.13.1.7 этого стандарта [4], разработанного в 2014 г., во многом дублирует п. 2.5.190 ПУЭ, однако мы сознательно ссылаемся на более современный документ.

Согласно п. 4.13.1.7 «Проектирование подвеса ОКГТ на ВЛ 110 кВ и выше должно проводиться с заземлением ОКГТ на каждой опоре. По требованию заказчика (либо эксплуатирующей организации) крепление ОКГТ может быть выполнено через изолятор и с заземлением через шунтирующий проводник. Возможно использование следующей схемы: в анкерном пролете на одной анкерной опоре с заземлением, на второй анкерной опоре и на всех промежуточных – с изолированным креплением ОКГТ и заземлением через искровые промежутки; при плавке гололеда на ВЛ – с изолированным креплением ОКГТ».

Во-первых, здесь, в отличие от п. 2.5.122 ПУЭ, вопросы заземления тросов ВЛ 110–150 кВ ничем не отличаются от таковых для ВЛ класса 220–750 кВ, что на наш взгляд совершенно справедливо. Во-вторых, важно, что нет различия в обустройстве троса на трассе ВЛ и вблизи от конечных РУ.

В-третьих, после внимательного прочтения п. 4.13.1.7, создается впечатление, что для ОКГТ допускается вообще любая схема: и заземление на каждой опоре, и одностороннее заземление, и полное разземление. При этом выбор схемы должен сделать сам заказчик или эксплуатирующая организация, опираясь на расчеты или накопленный опыт – такой подход, в отличие от жестких однозначных требований ПУЭ, представляется более рациональным.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА ТОКОВ И ПОТЕРЬ В ТРОСЕ

В качестве объекта исследований выберем ВЛ трех соседних классов 35, 110, 220 кВ, чтобы дополнительно показать, что нет каких-то оснований для выделения вопросов заземления тросов ВЛ 35–150 кВ в группу, отдельную от ВЛ 220–750 кВ.

Положим, что три указанные ВЛ 35–220 кВ выполнены на одноцепных опорах с треугольным расположением проводов типа ПЗ5-1т, ПБ110-1, П220-3. Будем считать, что каждая ВЛ в нормальном режиме имеет ток в фазных проводах, равный 500 А. Марку троса примем МЗ-11,0-В-ОЖ-Н-Р, при темпе-

ратуре 20 °С его активное сопротивление постоянному току равно 1,74 Ом/км.

Согласно расчетам, сделанным в известной компьютерной программе ЕМТР, ток, наведенный в заземленных тросах магнитным полем проводов, составляет:

- 8,9 А для ВЛ 35 кВ;
- 10,3 А для ВЛ 110 кВ;
- 10,4 А для ВЛ 220 кВ.

Приняв для сетей 35–220 кВ стоимость потерь активной мощности на уровне 1 руб./кВтч, получим, что для каждой из ВЛ годовой экономический ущерб от токов в тросе составляет около 160 тыс. руб. на 100 км длины. Как видно, классы 35, 110, 220 кВ не имеют отличий с точки зрения уровня потерь в тросах. Непонятно, почему ПУЭ вдруг разделили все ВЛ на группы 35–150 кВ и 220–750 кВ.

Если в среднем за год ток в проводе ВЛ будет не 500 А, а например в два раза меньше (250 А), то ток в тросе также уменьшится в 2 раза, а годовые потери в нем – в 4 раза до уровня 40 тыс. руб. на 100 км длины. Фазные токи 250 и 500 А встречаются и на ВЛ 35–150 кВ, и на ВЛ 220–750 кВ, а значит снова возникает все тот же вопрос – зачем ПУЭ разделили классы напряжения?

Интересно отметить, что для ВЛ с горизонтальным расположением проводов ток в тросе и потери в нем оказываются заметно выше, чем приведенные здесь цифры для ВЛ с треугольным расположением. Не стоит также забывать, что на ВЛ с горизонтальным расположением проводов обычно не один, а сразу два троса, и тем самым рассчитанные потери, и без того повышенные, следует еще и удвоить. Чаще всего горизонтально провода подвешивают на ВЛ 330–750 кВ, и если и делить ВЛ на группы, то не так, как это сделано в ПУЭ, а на 35–220 кВ и 330–750 кВ.

#### ОПТИМАЛЬНАЯ СХЕМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ ТРОСОВ

Выбор оптимальной схемы заземления тросов зависит от многих требующих учета факторов, но, как нам кажется, не должен зависеть от того, рассматривается ли средняя часть трассы ВЛ или ее участки, примыкающие к конечным РУ. Иными словами, схема должна быть одинаковой на протяжении всей трассы ВЛ.

Для ВЛ 35–750 кВ существует три основных схемы обустройства тросов:

1. заземление на каждой опоре (рис. 1);
2. деление на односторонне заземленные секции (рис. 2);
3. изолированное крепление без заземления (рис. 3).

Схема № 1 приводит к появлению в тросах токов 50 Гц и потерь активной мощности, величина которых может быть существенной не только для ВЛ 220–750 кВ, но и для ВЛ 35–150 кВ. Следовательно, по нашему мнению, для ВЛ всех классов напряжения данную схему желательно не использовать.

Схема № 2 показана на рис. 2 весьма упрощенно: каждые два пролета троса образуют секцию, заземленную только на одном из концов. На практике же при строительстве ВЛ секция обычно соответствует участку трассы между анкерными опорами, достигающему нескольких км.

Схема № 2 лишена потерь в тросах и должна применяться как можно чаще. Хотя здесь нет тока в тросе, связанного с магнитным полем проводов, трос не лишен емкостного тока, связанного с их электрическим полем. Этот емкостный ток в силу малости не способен вызвать заметной потерь, однако он может дать коррозию опор и фундаментов, стекая с троса в землю. Для того, чтобы избежать таких последствий, протяженность каждой секции желательно лимитировать.

Кроме того, в схеме № 2 проверке подлежит напряжение 50 Гц в незаземленных концах секции, которое наводится токами, проходящими по проводам при КЗ или на самой ВЛ, или в сети вне ВЛ. Величина напряжения должна быть с запасом меньше прочности изолирующей подвески троса, чтобы не приводить к ее перекрытию с последующим возникновением дуги, которая, если КЗ было за пределами ВЛ, может сохраняться длительное время.

Схема № 3 должна применяться в тех редких случаях, когда трос задействован для организации ВЧ-связи или на нем организована плавка гололеда. Напряжение 50 Гц, наведенное на трос напряжением фазных проводов, должно быть согласовано с прочностью изолирующей подвески троса.

Если говорить об оптимальном способе обустройства грозозащитных тросов большинства ВЛ 35–750 кВ, то, на наш взгляд, им является схема № 2 (рис. 2), – та, которая в настоящее время признается ПУЭ почему-то только для ВЛ 220–750 кВ. Схема № 2, помимо отсутствия потерь в тросах, имеет ряд иных преимуществ, среди которых решение проблем:

- с измерением сопротивления заземления опор ВЛ;
- с термической стойкостью тросов токам КЗ.

Проблемы с измерением сопротивления заземления опор ВЛ появляются в схеме №1 с многократным заземлением троса из-за того, что контуры заземления опор оказываются включены параллельно друг другу за счет связывающего их троса. Для проведения измерений персоналу приходится подниматься на опору и отсоединять трос, чего никогда не надо было бы делать в схеме № 2 (рис. 2).

Проблемы с термической стойкостью тросов к токам КЗ возникают также только для тех ВЛ, где применено многократное заземление тросов (схема №1, рис.1), ведь при КЗ на опоре таких ВЛ ток проходит не только по телу опоры в землю, но и поднимается вверх, заходит в трос, существенно нагревая его [2]. В схеме № 2 (рис. 2) тока КЗ в тросе не будет.

Может показаться, что для ВЛ 35 кВ проблемы с термической стойкостью тросов не являются аргументом в пользу отказа от схемы № 1 в пользу схемы № 2. К сожалению, такая позиция содержится, например, в п. 4.13.1.5 стандарта [4], где сказано: «Для ВЛ 35 кВ, в связи с режимом работы нейтрали, отсутствует термическое воздействие тока КЗ на ОКГТ, поэтому выполнение расчетов на термическое воздействие токов КЗ не требуется». Это утверждение неверно, поскольку для сети с изолированной (компенсированной) нейтралью однофазное замыкание на землю провоцирует перенапряжения на двух других фазах, способные повредить их изоляцию, после чего в сети вместо однофазного замыкания возникает уже два однофазных замыкания, а значит – двойное КЗ на землю, ток которого в ряде случаев достигает  $\sqrt{3}/2=0,87$  от тока трехфазного КЗ, то есть безусловно может быть опасен для троса.

### ВЫВОДЫ

1. Положения ПУЭ в части заземления грозозащитных тросов ВЛ 35–750 кВ, по нашему мнению, необходимо скорректировать. В частности:
  - нет оснований разделять требования к обустройству тросов ВЛ 35–150 кВ и тросов ВЛ 220–750 кВ; они должны быть едины для всех ВЛ 35–750 кВ;
  - нет оснований для различий в обустройстве тросов ВЛ 35–750 кВ на трассе ВЛ и на подходах к конечным распределительным устройствам.
2. Для всех ВЛ 35–750 кВ оптимальной схемой является деление троса на секции, каждая из которых заземлена один раз. Исключения составляют случаи, когда по тросу организован канал ВЧ-связи или предусмотрена плавка гололеда – тогда требуется полностью изолированное крепление тросов без заземления.
3. Необходимость пересмотра ПУЭ многократно обсуждалась специалистами отрасли, однако опыт последних десятилетий говорит о том, что выпуск очередных редакций ПУЭ, скорее всего, так и не случится. Чтобы навести порядок с тематикой обустройства тросов, по всей видимости, следует обратиться в ПАО «Россети» или ПАО «ФСК ЕЭС» с просьбой инициировать отдельный стандарт на тему тросов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. Утверждены приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.
2. Дмитриев М.В., Родчихин С.В. Расчет термической стойкости грозозащитных тросов ВЛ 110–750 кВ // Электроэнергия: передача и распределение. 2017. № 3(42). С. 32–35.
3. Дмитриев М.В. Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35–750 кВ и защита от них. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 60 с.
4. СТО 56947007-33.180.10.172-2014. Технологическая связь. Правила проектирования, строительства и эксплуатации ВОЛС на воздушных линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше. М., 2014.