

Защита изоляции ВЛ 110-220 кВ от грозовых перенапряжений (Дмитриев М.В., к.т.н., доцент, начальник отдела научно-технических исследований ЗАО «Завод энергозащитных устройств»)

В настоящее время в отечественных сетях 110-220 кВ наметилась тенденция снимать молниезащитные (грозозащитные) тросы, выполняющие важную функцию снижения числа отключений воздушных линий (ВЛ) от грозовых перенапряжений. Наиболее активно подобные работы планируется проводить в МРСК Юга и МРСК Северного Кавказа. После демонтажа троса для компенсации ухудшения грозоупорности на таких ВЛ предлагается массово устанавливать ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН). Цель статьи – дать оценку эффективности применения ОПН на ВЛ 110-220 кВ, в том числе при отказе от традиционной тросовой защиты.

Оценка числа отключений ВЛ с учетом троса и без него

Годовое число ударов молнии в ВЛ 110-220 кВ зависит от многих факторов, но, прежде всего, от протяженности ВЛ и грозовой активности. С точки зрения грозовых перенапряжений для изоляции ВЛ 110-220 кВ основную опасность представляют прямые удары молнии в ВЛ [1], которые условно можно разделить на:

- удары молнии в трос (точка 1 на рис.1) и опоры (точка 2);
- удары молнии в фазный провод (точка 3).

Среднее соотношение числа ударов в элементы ВЛ 110-220 кВ, определенное по различным существующим отечественным и зарубежным методикам [1-3 и др.], приведено в табл. 1.

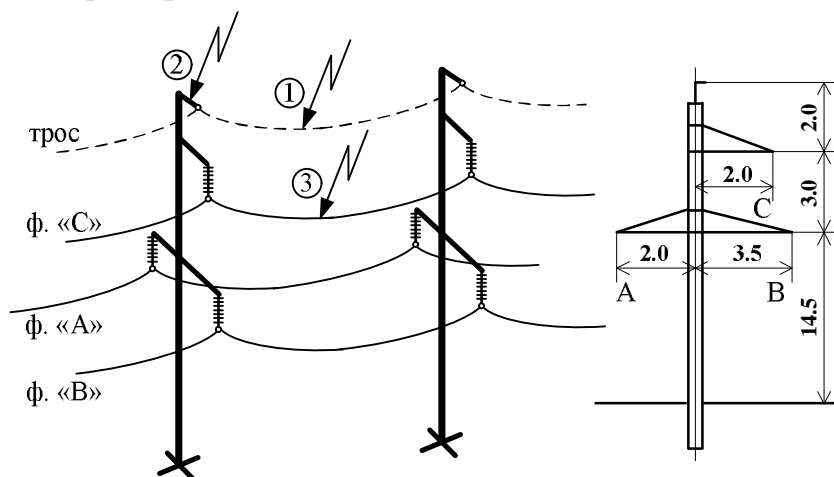


Рис.1. Основные источники грозовых перенапряжений на изоляции одноцепной ВЛ 110-220 кВ и эскиз ж/б опоры типа ПБ110-1.

Упрощенно будем считать, что каждое импульсное перекрытие изоляции ВЛ 110-220 кВ в сетях с заземленной нейтралью переходит в силовое короткое замыкание (ряд методик называют вероятность установления силовой дуги несколько менее 1). Тогда число отключений ВЛ, вызванных грозовыми перенапряжениями, составит:

$$N_{ВЛ} = (D_T \cdot P_T + D_O \cdot P_O + D_\Phi \cdot P_\Phi) \cdot n \cdot \frac{L_{ВЛ}}{100} \cdot \frac{T_q}{100}, \quad (1)$$

где P_T, P_O, P_Φ – вероятности (о.е.) перекрытия изоляции ВЛ соответственно при ударах молнии в трос в пролете, в опору, в фазу; n – удельное число ударов молнии в ВЛ, определенное по [1-2 и др.], составляющее в среднем $n = 100$ раз на каждые 100 км длины ВЛ и 100 грозовых часов; $L_{ВЛ}$ – длина ВЛ (км); T_q – число грозовых часов [1] в году в районе ВЛ (в среднем по России $T_q = 50$).

Табл.1. Распределение числа ударов для рис.1.

Доля D ударов	Есть трос	Нет троса
в трос в пролете D_T	0.5	0
в опору D_O	0.5	0.5
в фазные провода D_Φ	0.005	0.5
$D_T + D_O + D_\Phi$	≈ 1	1

Для оценки числа отключений одноцепной ВЛ 110 кВ (рис.1) необходим расчет вероятностей, входящих в (1). Он был выполнен в компьютерной модели [4,5], созданной в программе ЕМТР и предназначенной для подробного анализа грозовых перенапряжений как на воздушных линиях, так и в распределительных устройствах.

В случае разрядов молнии в фазные провода ВЛ 110 кВ (скорее всего в верхнюю фазу «С») вероятность перекрытия изоляции пораженной фазы можно в первом приближении принять $P_\Phi \approx 1$ вне зависимости от сопротивления заземления опор [4,5]. Если учитывать соображения [6] относительно ориентировки наиболее мощных молний на заземленные части ВЛ, то вероятность перекрытия изоляции P_Φ будет меньше единицы.

В случае разрядов молнии в заземленные части ВЛ 110 кВ (рис.2) видно: даже при весьма малых сопротивлениях заземления вероятны перекрытия изоляции ВЛ 110 кВ. Дело в том, что при разряде молнии в трос или опору по опоре в землю стекает импульсный ток (рис.3,а), создающий падение напряжения и на заземляющем устройстве опоры $R_3 \cdot i(t)$, и на индуктивности [1] опоры $L \cdot di(t)/dt$.

Высокое напряжение на опоре относительно фазного провода приводит к перекрытию изоляции с заземленной траверсы на фазный провод, т.е. к «обратному» перекрытию. Вследствие наличия падения напряжения на индуктивности опоры даже идеальное заземление опоры $R_3 \approx 0$ не гарантирует отсутствия обратных перекрытий изоляции ВЛ 110 кВ при ударах молнии в ее трос или опору. Поскольку для верхних фаз ВЛ 110 кВ индуктивность L участка опоры до заземляющего устройства оказывается больше, то для ВЛ без троса по рис.2 на верхней фазе «С» зафиксирована повышенная вероятность перекрытия изоляции по сравнению с нижними фазами «А» и «В».

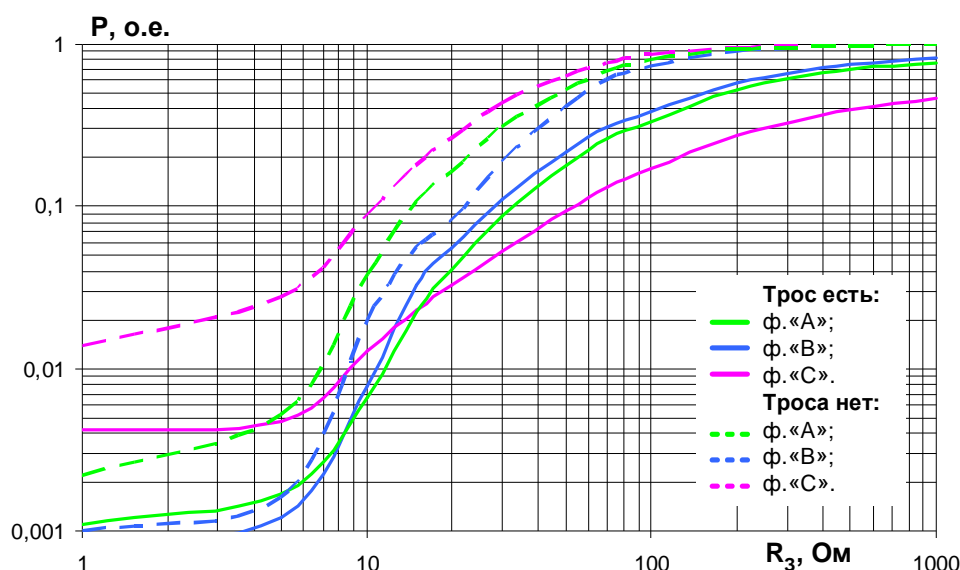


Рис.2. Распределение вероятности перекрытия изоляции различных фаз одноцепной ВЛ 110 кВ в зависимости от сопротивления заземления опор: при наличии троса дано $D_T \cdot P_T + D_O \cdot P_O$ (удар как в пролете P_T , так и на опоре P_O при равной доле $D_T = D_O = 0.5$); в отсутствии троса дано P_O (только удар в опору, $D_T = 0$).

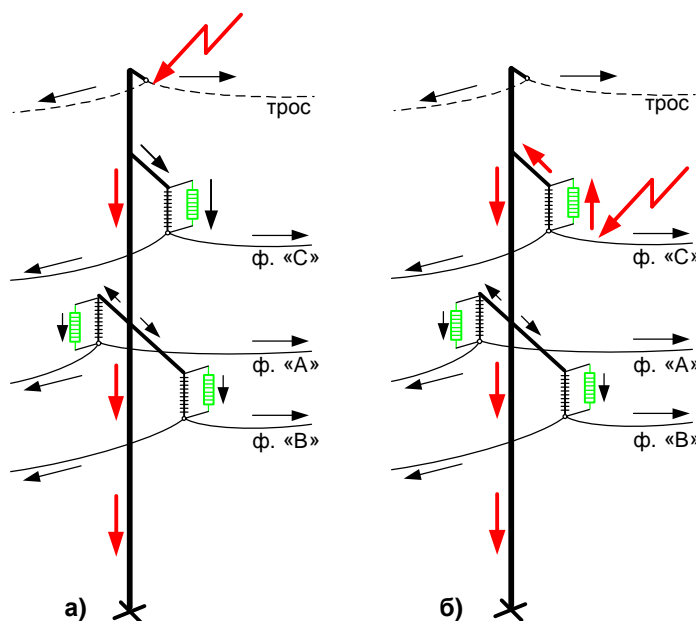


Рис.3. Пути растекания тока молнии при разрядах: а) - в трос или пору, б) - в фазный провод.

На рис.2 верхняя фаза «С» линии с тросом является определяющей в числе обратных перекрытий лишь при «малых» сопротивлениях заземления, когда слабо влияние установленного троса на пути растекания тока молнии. При «больших» сопротивлениях заземления ток молнии стекает в землю не только через заземляющее устройство ближайшей опоры, но и по тросу направляется в заземляющие устройства соседних опор (рис.3,а). Наличие напряжения на тросе $u_T(t)$ приводит к наводкам на фазные провода $K \cdot u_T(t)$, где K – так называемый коэффициент связи провода и троса [1]. Наводки (или коэффициент K) оказываются максимальными для верхнего фазного провода

«С», наиболее близко расположенного к тросу и, следовательно, для верхней фазы будет наименьшим напряжением на изоляции $(1 - K) \cdot u_T(t)$ и вероятность ее перекрытия, что видно из рис.2 при «больших» сопротивлениях.

Вычисления по (1) с учетом предположения $P_\phi = 1$, а также данных табл.1 и рис.2, позволяют оценить число отключений типовой ВЛ 110 кВ с сопротивлением заземления опор $R_3 = 10 \div 30$ Ом, как имеющей трос, так и без него.

Табл.2. Оценка числа грозных отключений одноцепной ВЛ 110 кВ по (1) при $R_3 = 10 \div 30$ Ом с учетом троса и без него.

	Есть трос	Нет троса
$D_T \cdot P_T$, о.е.	0.01 ÷ 0.1	0
$D_O \cdot P_O$, о.е.		$0.5 \cdot (0.09 \div 0.4)$
$D_\phi \cdot P_\phi$, о.е.	$0.005 \cdot 1$	$0.5 \cdot 1$
$N_{ВЛ}$, на 100 км и 100 час	$1.5 \div 10.5$	$54.5 \div 70$

На основе табл.2 для ВЛ 110 кВ можно сделать ряд важных выводов.

1. При наличии троса основной причиной грозных отключений являются разряды молнии в трос и опору с последующим «обратным» перекрытием (согласно рис.2 они наиболее вероятны на нижние фазы);
2. При отсутствии троса основной причиной грозных отключений являются разряды молнии в верхний фазный провод с последующим перекрытием на траверсу.
3. При наличии троса наблюдается сильная зависимость числа грозных отключений от величины импульсного сопротивления заземления. Снижение сопротивления, скажем, с 30 до 10 Ом обеспечит снижение числа грозных отключений оценочно в 7 раз.
4. Отказ от троса приведет к недопустимому росту числа отключений вне зависимости от сопротивления заземления опор.

Снижение сопротивления заземления опор и установка тросовой защиты являются так называемыми традиционными способами повышения грозоупорности ВЛ 110-220 кВ. Вместе с тем, традиционные способы не всегда можно реализовать в полной мере или же их эффективность, выраженная годовым числом грозных отключений ВЛ, не удовлетворяет конечного потребителя. В подобных случаях приходится прибегать к нетрадиционным способам повышения грозоупорности, к которым для ВЛ 110-220 кВ, прежде всего, следует отнести установку на опорах ОПН. В отечественных и зарубежных сетях такие ОПН находят как единичное применение на отдельных заведомо «неблагополучных» участках трассы или опорах ВЛ, так и массовое применение на опорах вдоль всей трассы. Единичное применение ОПН возможно:

- на коротких участках трассы и опорах, часто поражаемых молнией;
- на высоких опорах, имеющих повышенную индуктивность и, следовательно, риск обратных перекрытий изоляции;

- на опорах, ограничивающих пролет, в котором имеется пересечение с другими ВЛ.

Единая установка ОПН на ВЛ вблизи от ввода воздушных линий в распределительное устройство или вблизи от перехода «линия-кабель» не относится к защите изоляции ВЛ и должна рассматриваться в рамках оптимизации схем защиты от перенапряжений подстанционного оборудования.

Далее не будем останавливаться на единичном применении ОПН, а сосредоточим внимание на массовой установке ОПН, где цена неверного технического решения оказывается высокой. Оптимизация сочетания традиционных (трос и заземление) и нетрадиционных (ОПН) средств повышения грозоупорности для каждой конкретной ВЛ напрямую связана с различной технической эффективностью перечисленных средств, а также стоимостью их реализации. Остановимся на технической стороне массового применения ОПН и кратко обсудим ряд важных вопросов:

- как часто вдоль трассы и в какие фазы надо ставить ОПН?
- как присоединять ОПН к опоре?
- какие должны быть характеристики ОПН?

Частота установки ОПН вдоль трассы ВЛ

Перекрытие изоляции ВЛ 110-220 кВ возможно, главным образом, на опорах вдоль гирлянд изоляторов. На опоре с ОПН перекрытие изоляции защищенных фаз исключено, но способен ли ОПН в достаточной мере снижать грозовые перенапряжения на изоляции других опор? На рис.4 показана одноцепная ВЛ 110 кВ, для которой на рис.5 дана вероятность перекрытия изоляции незащищенной опоры в зависимости от места разряда молнии. Для простоты положим, что на ВЛ нет троса, а разряд молнии происходит в верхний фазный провод (точки №1,2,3 по рис.4). Заложенные в расчеты защитные характеристики ОПН 110 кВ отвечают аппарату [7] с наибольшим рабочим напряжением $U_{нрО} = 88$ кВ.

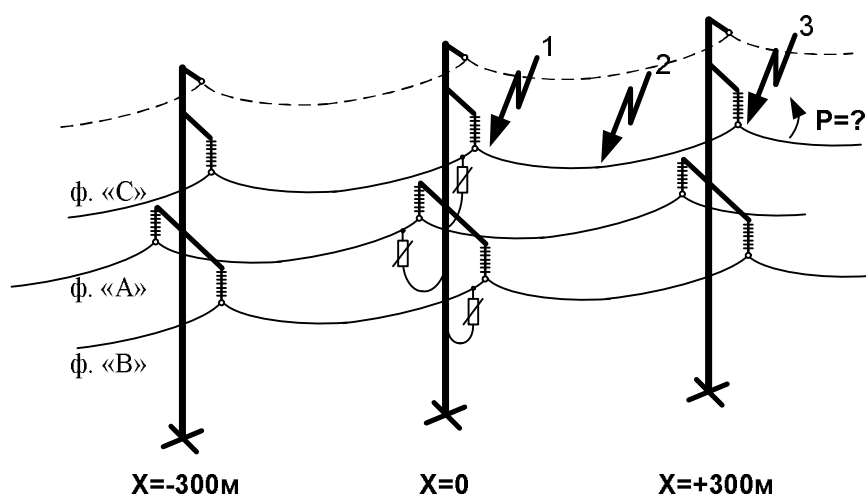


Рис.4. Одноцепная ВЛ с пролетом 300 м и комплектом ОПН на одной из опор.

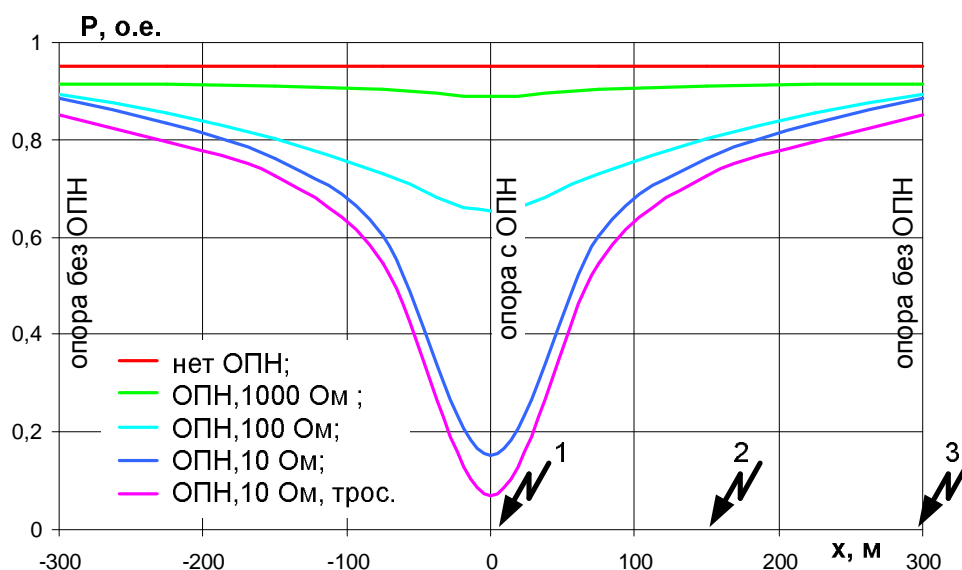


Рис.5. Вероятность перекрытия изоляции фазы «С» на незащищенной ОПН опоре в зависимости от координаты x разряда молнии в фазный провод «С» и сопротивления заземления R_3 опор.

Согласно рис.5 удар молнии в фазный провод на расстоянии $x = 300$ метров от опоры с ОПН (точка №3) вне зависимости от величины сопротивления заземления R_3 с высокой вероятностью сопровождается перекрытием изоляции ВЛ.

Даже при разряде молнии в точку №1 ($x = 0$, есть ОПН) вероятность перекрытия изоляции незащищенной опоры сохраняется. С использованием рис.3,б это объясняется тем, что по фазному проводу в сторону незащищенной опоры распространяется волна $u_{опн} + L \cdot di(t)/dt + R_3 \cdot i(t)$, максимальное значение которой в зависимости от величины $i(t)$ тока молнии и скорости его изменения $di(t)/dt$ может заметно превышать и остающееся напряжение $u_{опн}$ на ОПН, и прочность гирлянды изоляторов незащищенной опоры ВЛ.

При наличии троса доля тока, стекающего по телу опоры в землю, снижается (рис.3,б), следовательно, уменьшаются и величина грозовой волны, уходящей к неповрежденной опоре, и вероятность перекрытия изоляции, что подтверждается рис.5.

Площадь под кривыми, показанными на рис.5, позволяет судить об эффективности массовой установки ОПН в случае, когда ОПН размещены через опору. Так, для ВЛ без троса при сопротивлениях заземления $10 \div 30$ Ом число перекрытий изоляции при разрядах в фазные провода снизится с уровня ≈ 1.0 до уровня $0.6 \div 0.7$, т.е. незначительно. Поэтому при массовой установке ОПН вдоль трассы ВЛ 110-220 кВ, не имеющей «особых» участков, рекомендуется размещение ОПН в выбранные фазы на каждой опоре, что согласуется с мировым опытом, обзор которого дан в [4].

Места первоочередной установки ОПН на опоре ВЛ

Для ВЛ с тросом согласно табл.2 при типовых сопротивлениях заземления опасность представляют обратные перекрытия при ударах в трос (опору). Как видно из рис.2, они наиболее вероятны на нижние фазы «В» и «А».

Для ВЛ без троса согласно табл.2 опасность представляют и разряды молнии в верхний фазный провод «С» (реже в «А») и разряды в опору, которые по рис.2 сопровождаются перекрытиями, прежде всего, фаз «С» и «А».

Изложенное позволяет предложить технические решения по установке ОПН на каждой опоре ВЛ 110 кВ, приведенные в табл.3-4, и оценить их эффективность с использованием рис.6 (например, при $R_3 = 30$ Ом). Наиболее рациональным следует признать установку ОПН одновременно в три фазы защищаемой цепи, что согласуется с мировым опытом [4].

Табл.3. Эффективное размещение ОПН на каждой опоре одноцепной ВЛ 110 кВ (рис.1) при $R_3 = 30$ Ом и наличии троса

ОПН	$D_T \cdot P_T + D_O \cdot P_O$	$D_\phi \cdot P_\phi$	$N_{ВЛ}$, на 100 км и 100 час
нет	0,1	0,005	10,5
В	0,069	0,005	7,4
ВА	0,034	0,005	3,9
ВАС	0	0	0

Табл.4. Эффективное размещение ОПН на каждой опоре одноцепной ВЛ 110 кВ (рис.1) при $R_3 = 30$ Ом и отсутствии троса

ОПН	P_O	$D_O \cdot P_O$	$D_\phi \cdot P_\phi$	$N_{ВЛ}$, на 100 км и 100 час
нет	0,4	0,2	0,5	70
С	0,254	0,127	0	12,7
СА	0,145	0,0725	0	7,2
САВ	0	0	0	0

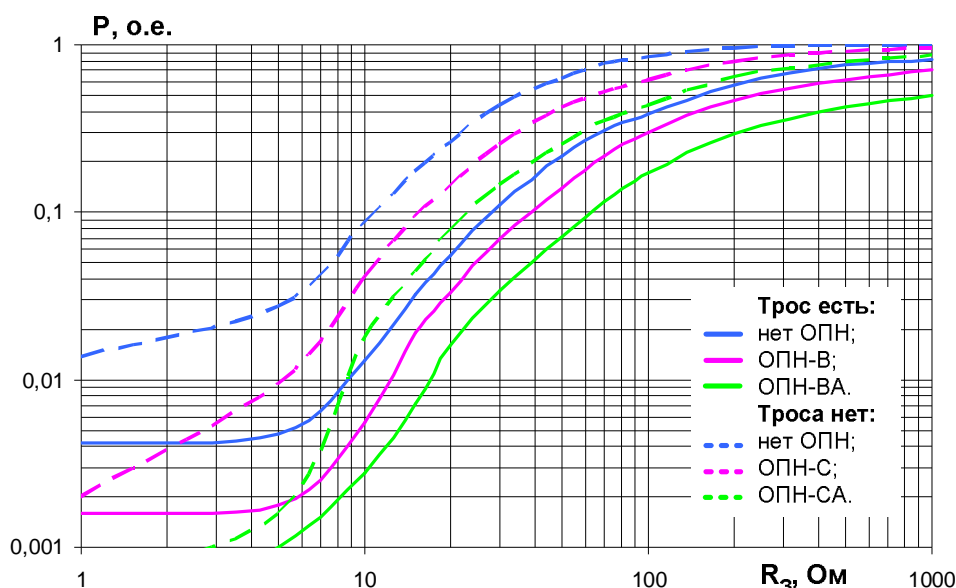


Рис.6. Распределение суммарной вероятности перекрытия изоляции одноцепной ВЛ 110 кВ в зависимости от сопротивления заземления опор и мест установки ОПН на каждой опоре: при

наличии троса дано $D_T \cdot P_T + D_O \cdot P_O$ (удар как в пролете P_T , так и на опоре P_O при равной доле $D_T = D_O = 0.5$); в отсутствии троса дано P_O (только удар в опору, $D_T = 0$).

Присоединение ОПН к опоре

Существует два основных типа ОПН – с внешним искровым промежутком и без него. Первый тип, как правило, имеет жесткое крепление к опоре (рис.7), необходимое для обеспечения постоянства габаритов искрового промежутка. Второй тип, как правило, подвешивается на фазный провод за верхний фланец (рис.8). Анализ зарубежного опыта и подробное сравнение ОПН с искровым промежутком и без него проведено в [4].

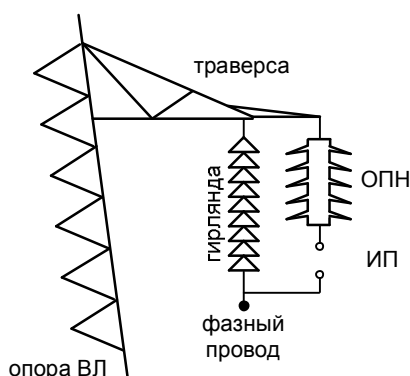


Рис.7. Вариант присоединения к опоре ОПН с внешним искровым промежутком.

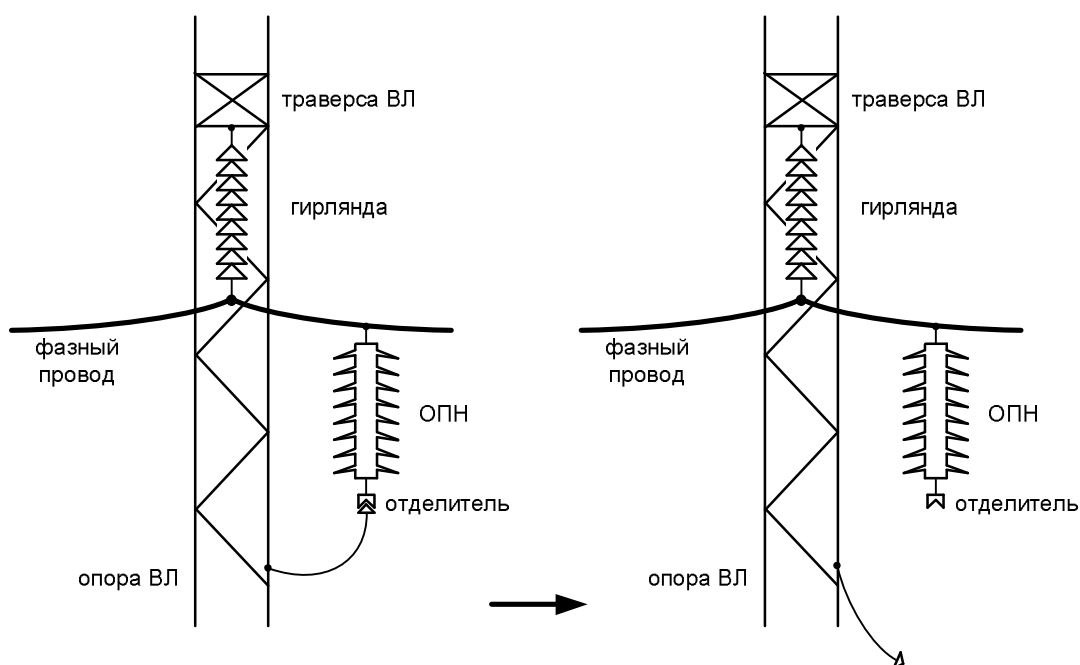


Рис.8. Вариант присоединения к опоре ОПН без искрового промежутка через отделитель.

Искровой промежуток настраивается на срабатывание при грозовых перенапряжениях, исключая воздействие на ОПН коммутационных и квазистационарных перенапряжений, а также исключая длительное воздействие рабочего напряжения сети, что называется его преимуществами. Однако:

1. коммутационные перенапряжения не представляют опасности для ОПН, так как энергия коммутационных перенапряжений ВЛ 110-220 кВ заметно

меньше той, которой обладают грозовые перенапряжения, и при массовой установке ОПН без искрового промежутка она рассеиваются одновременно во многих ОПН заданной фазы.

2. квазистационарные перенапряжения в сетях 110-220 кВ не представляют опасности для ОПН в случае заземления нейтралей силовых трансформаторов [7], присоединенных к ВЛ, а также применения ОПН 110 кВ с наибольшим рабочим напряжением 88 кВ и ОПН 220 кВ с наибольшим рабочим 176 кВ; исключение составляют ВЛ 110-220 кВ, осуществляющие электроснабжение тяговых подстанций переменного тока 27.5 кВ [7].
3. длительное воздействие на ОПН рабочего напряжения сети согласно исследованиям [8] приводит к восстановлению первоначальной вольтамперной характеристики ОПН, компенсируя деградацию свойств нелинейных элементов, вызванную прохождением импульсных токов; кроме того, длительное воздействие напряжения подсушивает аппарат, снижая риск его увлажнения; поэтому отсутствие искрового промежутка, вопреки мнению некоторых специалистов, является преимуществом ОПН.

При выходе из строя ОПН, установленного через искровой промежуток, на ВЛ появляется место с ослабленной электрической прочностью. Обнаружение такого ОПН бывает затруднено, поскольку повреждение ОПН может никак не сказаться на его внешнем виде, а значит, не всегда такой аппарат возможно обнаружить визуальным осмотром при обходе ВЛ.

Отсутствие искрового промежутка позволяет ускорить вступление ОПН в работу по ограничению перенапряжений, позволяет исключить неверную работу промежутка вследствие ошибок монтажа, позволяет рассеивать энергию грозовых перенапряжений одновременно в большом числе ОПН, снижая нагрузки на каждый из них и повышая надежность технического решения [4].

Отсутствие искрового промежутка позволяет присоединить ОПН к опоре с помощью гибкого шлейфа, в который устанавливается специальное устройство – «отделитель» (рис.8). В случае повреждения ОПН в сети с заземленной нейтралью в нем пройдет ток однофазного короткого замыкания, который приведет к быстрому разрушению «отделителя» и отсоединению ОПН от линии еще до завершения отключения ВЛ головными выключателями. Хотя линия все же будет отключена своими выключателями, ее автоматическое повторное включение будет успешным. При этом наличие разорванного шлейфа не мешает дальнейшей эксплуатации ВЛ и при осмотре ВЛ однозначно указывает на поврежденный аппарат (рис.8).

В случае массовой установки ОПН на ВЛ автор выступает за безыскровое присоединение ОПН. Наличие искрового промежутка может быть оправдано лишь в некоторых случаях при единичной установке ОПН.

Характеристики ОПН

В [7] показано, что основными характеристиками ОПН являются его наибольшее рабочее напряжение $U_{нрО}$ и удельная поглощаемая энергия $W_{уд}$. К сожалению, способность ОПН поглощать энергию W при грозовых импульсных токах (величиной в десятки килоампер и длительностью в десятки

микросекунд) специальными испытаниями не проверяется. Косвенно W можно оценить на основе рабочих испытаний ОПН второго и более высоких классов пропускной способности [9], в рамках которых на ОПН в совокупности с напряжением промышленной частоты воздействуют два импульсных тока длительностью $T = 2000$ мкс величины I_{II}

$$W = 2 \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt = 2 \cdot \left\{ \sqrt{2} \cdot U_{HPO} \right\} \cdot K \cdot I_{II} \cdot T,$$

где $K \approx 2$ – кратность ограничения перенапряжений [7].

Для ОПН, имеющего наибольшее рабочее напряжение $U_{HPO} = 88$ кВ и ток пропускной способности $I_{II} = 1000$ А, допустимую энергию можно оценить как $W \approx 1000$ кДж. Результаты расчетов энергии, выделяющейся в ОПН на ВЛ, приведены на рис.9-10.

Как показано в [4], широко используемое некоторыми специалистами моделирование 3-х опор является достаточным для определения числа перекрытий изоляции ВЛ, поскольку они происходят в первые микросекунды после разряда молнии. Для оценок энергии в ОПН необходимо моделировать гораздо большее число опор (для рис.9-10 их было 9), так как энергия рассеивается в течение десятков микросекунд (именно такова длительность тока молнии), за которые в работу по поглощению энергии успеют вступить многие ОПН, установленные на ВЛ безыскровым способом.

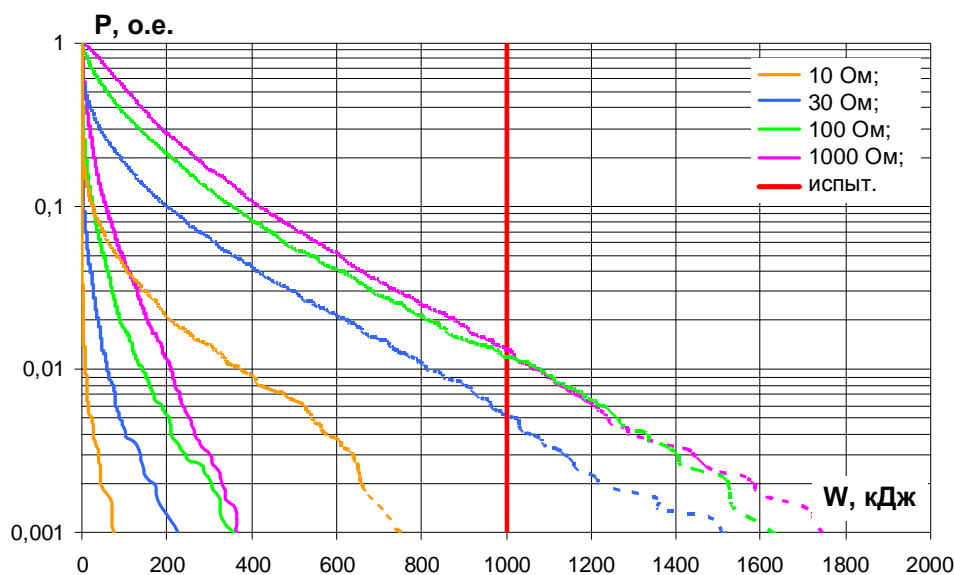


Рис.9. Энергия, выделяющаяся в наиболее нагруженном ОПН одноцепной ВЛ 110 кВ (три ОПН на каждой опоре) в зависимости от сопротивления заземления опор: сплошная линия – расчеты для ВЛ с тросом при ударе молнии в трос в пролете и опору; пунктир – для ВЛ без троса при ударе в опору.

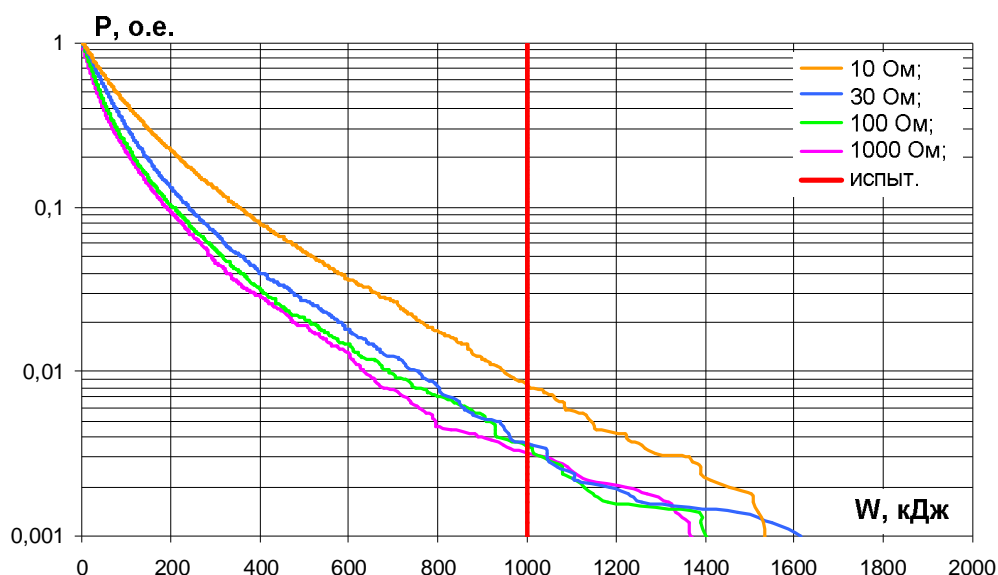


Рис.10. Энергия, выделяющаяся в наиболее нагруженном ОПН при ударе молнии в фазный провод одноцепной ВЛ 110 кВ без троса (три ОПН на каждой опоре).

При ударах в трос и опору из рис.9 следует: наличие троса позволяет существенно снизить токовые и энергетические нагрузки на ОПН, что несложно понять с использованием рис.3,а.

При ударах в фазный провод, вероятных при отсутствии троса, энергия разряда молнии рассеивается сразу во многих ОПН пораженной фазы, тем в большем числе ОПН, чем больше сопротивление заземления опор (рис.3,б). В то же время при отсутствии троса удары в опору приводят к рассеиванию энергии грозовых перенапряжений лишь в трех ОПН пораженной опоры. Именно поэтому энергии по рис.9 (при больших R_3) могут быть больше рис.10.

Для ВЛ без троса при $R_3 = 30$ Ом энергия, выделяемая в наиболее нагруженном ОПН, превзойдет испытательное значение $W \approx 1000$ кДж с вероятностью 0.005 при ударе в опору (рис.9) и примерно с такой же при ударе в фазный провод (рис.10).

Для ВЛ с тросом согласно рис.9-10 при $R_3 = 30$ Ом повреждение ОПН может быть вызвано только ударами в фазный провод, а вероятность повреждения оценивается как 0.005 (с учетом [6] она будет меньше).

В табл.5 приведено число повреждений ОПН-110/88/1000, определенное с использованием рис.9-10 по формуле (1). Для ОПН с искровым промежутком число повреждений ОПН было бы заметно больше.

Табл.5. Оценка числа повреждений ОПН 110 кВ при $R_3 = 30$ Ом с учетом троса и без него.

	Есть трос	Нет троса
$N_{ОПН}$, на 100 км и 100 час	0.0025	0.5

Следует отметить, что при наличии ОПН не в каждой фазе на опоре ВЛ, энергия, выделяющаяся в установленных ограничителях, возрастает, а значит и вероятность их повреждения также увеличивается.

Заключение

1. Грозоупорность ВЛ 110-220 кВ существенно зависит от наличия троса и величин сопротивления заземления опор.
2. Отказ от установки тросовой защиты и (или) от обеспечения приемлемых сопротивлений заземления должен быть тщательно обоснован, так как приведет к заметному ухудшению надежности электроснабжения потребителей и, в качестве компенсации, потребует дорогостоящей массовой установки ОПН на опорах линии.
3. При массовой установке ОПН на ВЛ 110-220 кВ их эффективная работа обеспечивается лишь при размещении одновременно во все фазы защищаемой цепи на каждой опоре защищаемого участка трассы.
4. Отсутствие тросовой защиты предъявляет повышенные требования к энергоемкости ОПН и делает ощутимым риск повреждения ОПН.
5. Подключение ОПН к опорам должно осуществляться через специальные устройства (отделители), так как только в этом случае при повреждении ОПН обеспечивается быстрое восстановление электроснабжения.

Список использованных источников

1. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. –2-е изд. –СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. –355 с.
2. IEEE Std 1243-1997. IEEE Guide For Improving the Lightning Performance of Transmission Lines//The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. –New York, 1997. –36 p. – ISBN 1-55937-937-5.
3. М.В.Костенко, И.Ф.Половой и А.Н.Розенфельд. "Роль прорывов молнии на провода мимо тросов для грозозащиты линий высших классов напряжения". Электричество №4, 1961.
4. Дмитриев М.В. Методика выбора ОПН для защиты оборудования сетей 110-750 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений: дис. канд. тех. наук: СПбГПУ, 2006, 248 стр. Фундаментальная библиотека.
5. Дмитриев М.В. Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35-750 кВ и защита от них. –СПб.: Изд-во "НИВА", 2008. –60 с. ISBN 5-86456-037-5.
6. Гайворонский А.С., Карасюк К.В. Новые методические принципы оценки грозоупорности воздушных линий электропередачи высших классов напряжения//Научный вестник НГТУ. –1998. –№2(5). –с.9-32.
7. Дмитриев М.В. Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ. –СПб.: Изд-во "НИВА", 2007. –60 с. ISBN 5-86456-081-2.
8. С.Heinrich, S.Hayeb, W.Kalkner. Degradation and restoration of metal oxide surge arresters // 10th International symposium on high voltage engineering ISH-97, Canada, 1997.
9. ГОСТ Р 52725-2007. «Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические требования и методы испытаний». Введен с 1-го января 2008 г.