

## Подвесные ОПН для защиты изоляции ВЛ

### Введение

Целью предлагаемой работы является описание переходных процессов, происходящих в ВЛ, изоляция которой защищена с помощью подвесных ОПН от перекрытий при ударах молнии в фазные провода, опоры и тросы. Рассматривается область рационального применения и выбор характеристик подвесных ОПН для защиты изоляции ВЛ от грозовых перенапряжений.

### 1. Расчетная модель

При выполнении работы был сделан ряд допущений, касающихся моделирования элементов расчетной схемы.

**Молния.** Как иногда принимается в расчетах грозоупорности ВЛ, ток молнии будем считать постоянным, имеющим косоугольный фронт (рис.1), что отличается от реальной формы тока молнии [1].

$$I_m(t) = \begin{cases} at & \text{при } \begin{cases} t \leq t_\phi \\ t > t_\phi \end{cases} \\ I_{\max} & \end{cases},$$

где  $I_{\max}$  - амплитуда тока молнии (кА),

$t_\phi$  - длительность фронта тока молнии (мкс),

$a = I_{\max} / t_\phi$  - крутизна тока молнии (кА/мкс).

Будем рассматривать молнию как идеальный источник тока, т.е. пренебрежем волновым сопротивлением канала молнии, составляющим по различным оценкам величину 300 ÷ 1000 Ом [1].

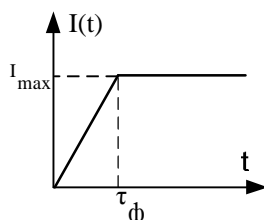


Рис.1. Упрощенная форма тока молнии.

**Фазные провода и тросы.** Воздушную линию представим совокупностью расположенных между опорами пролетов, грозозащитные тросы и провода в которых будем моделировать отрезками “длинных линий” с волновыми сопротивлениями  $Z_{mp}$  и  $Z_\phi$  соответственно. Примем для определенности  $Z_{mp} = 400$  Ом,  $Z_\phi = 300$  Ом. Скорость распространения электромагнитной волны вдоль проводов и тросов положим максимально возможной, т.е.  $v = 300$  м/мкс. Не будем учитывать импульсную корону, уменьшающую волновые сопротивления проводов и тросов, а также снижающую скорость распространения электромагнитной волны вдоль них, что идет в инженерный запас.

Будем считать, что фазные провода и тросы не влияют друг на друга, т.е. пренебрежем так называемыми коэффициентами связи, зависящими от взаимного расположения проводов и их эквивалентных радиусов (что приведет к некоторому увеличению расчетных перенапряжений [2] на изоляции ВЛ по сравнению со случаем учета

этого влияния). Тогда при установке на линии  $N_{mp}$  тросов их эквивалентное волновое сопротивление  $Z_{mp}^{экв} = Z_{mp} / N_{mp}$ ; в случае растекания импульсного тока по  $N_{опп}$  фазным проводам их эквивалентное сопротивление  $Z_{ф}^{экв} = Z_{ф} / N_{опп}$ .

**Опора ВЛ.** Длительность фронта импульса тока молнии составляет единицы микросекунд. Ввиду малого времени пробега электромагнитной волны вдоль тела опоры (0.1 мкс при высоте опоры 30 м) по сравнению с длительностью фронта импульса тока молнии (микросекунды), опору будем рассматривать в качестве сосредоточенного элемента – индуктивности.

Потенциал вершины опоры определяется суммой падений напряжения на самой опоре и на ее заземлителе. При высокой скорости нарастания тока поразившей линию молнии, например 20 кА/мкс, падение напряжения на опоре, обусловленное протеканием части импульсного тока молнии по индуктивности тела опоры, не превысит 600 кВ (при погонной индуктивности 0.5 – 1 мкГн/м и высоте опоры 30 м). Падение напряжения на сопротивлении заземления опоры зависит от его величины и, как будет показано далее (например на рис. 10), может достигать значений, во много раз превышающих 600 кВ. В большинстве интересных нас случаев (высокие сопротивления заземления опор) падение напряжения на теле опоры мало по сравнению с падением напряжения на заземлителе опоры. Поэтому далее, при определении потенциала вершины опоры, будем учитывать только падение напряжения на заземлителе, пренебрегая падением напряжения на теле опоры, т.е. ее индуктивностью.

**Изоляция ВЛ.** Понимая вероятностный характер факта перекрытия изоляции, примем для дальнейших рассуждений за выдерживаемое изоляцией напряжение величину  $U_с = 1500$  кВ, считая это напряжение независимым от временных параметров воздействующего перенапряжения. Выбранное значение соответствует выдерживаемому изоляцией ВЛ 330-400 кВ напряжению при временах его воздействия, составляющих несколько микросекунд.

**ОПН.** При больших токах, протекающих через ОПН (килоамперы, десятки килоампер), остающееся на нем напряжение слабо зависит от величины тока. Это позволяет вольтамперную характеристику реального нелинейного ограничителя перенапряжений в расчетах заменить внешней характеристикой идеального источника напряжения как показано на рис.2. Тогда ОПН в расчетной схеме будет соответствовать источник напряжения  $U_{опн}$  (рис.3). Необходимо отметить, что такая замена допустима только при условии воздействия на ОПН напряжения  $|u(t)|$ , большего величины  $U_{опн}$ .

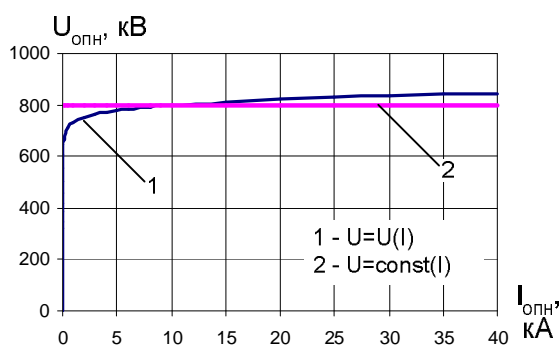


Рис.2. Вольтамперная характеристика ОПН и ее упрощение.

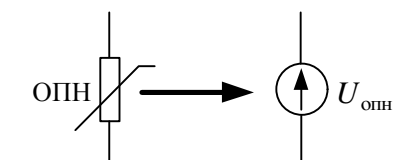


Рис.3. Упрощенная модель ОПН.

## 2. Удар молнии в фазный провод и защита изоляции

Рассмотрим удар молнии в фазный провод ВЛ (узел “0” на схеме рис.4). Определим максимальное расстояние  $l_{дон}$ , на котором ОПН, установленный на ВЛ, еще защищает изоляцию ВЛ в точке удара молнии. Напряжение на фазном проводе в точке удара молнии может быть определено из соотношения

$$U(t) = (Z_{\phi} / 2) \cdot I_m(t).$$

При условии, что  $t \leq t_{\phi}$ , получим

$$U(t) = (Z_{\phi} / 2) \cdot at.$$

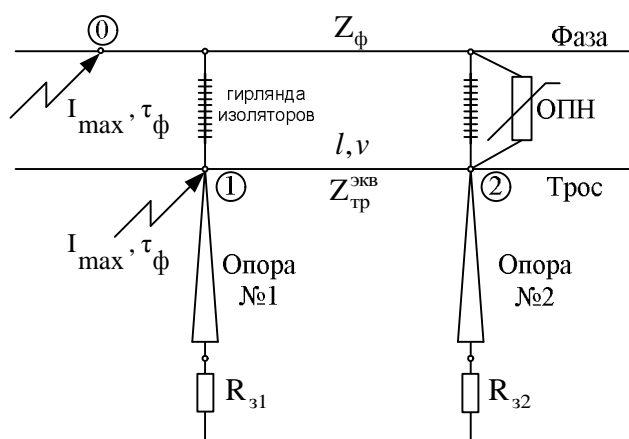


Рис.4. Схема расчетов при ударах молнии в фазный провод ВЛ и в вершину опоры.

При  $t \leq t_{\phi}$  напряжение в рассматриваемой точке удара молнии будет увеличиваться, по крайней мере, до тех пор, пока в эту точку не придет волна, отраженная от ближайшего ОПН, установленного на пораженной фазе. “По крайней мере” означает, что при воздействии на ОПН напряжений, меньших определенного значения, отраженных от ОПН волн не возникает. Эта волна придет не ранее, чем через время

$$2t = 2l / v,$$

где  $l$  - расстояние от точки удара молнии до ОПН.

Для обеспечения надежной работы ВЛ, воздействующее на ее изоляцию напряжение  $U(t)$  не должно быть больше выдерживаемого изоляцией напряжения  $U_{\epsilon}$ .

$$U_{\epsilon} \geq \frac{Z_{\phi}}{2} \cdot a \cdot \frac{2l_{дон}}{v},$$

откуда

$$l_{дон} \leq \frac{U_{\epsilon}}{Z_{\phi}} \cdot \frac{t_{\phi}}{I_{max}} \cdot v.$$

Полученное расстояние  $l_{дон}$  определяет так называемую зону защиты ОПН. Иными словами, для надежной защиты изоляции ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молнии в фазный провод, необходима установка комплекта ОПН через каждые  $2l_{дон}$  длины линии. Из последнего выражения видно, что зона защиты ОПН зависит как от выдерживаемого изоляцией линии напряжения, так и от параметров тока молнии, ударившей в фазный провод. ВЛ СВН, как правило, имеют грозозащитные тросы, предотвращающие прямые попадания молнии в фазные провода. Считается [2], что прорыв токов молнии с амплитудой более  $I_{max} = 30$  кА сквозь тросовую защиту на фазные провода маловероятен. Тогда, задавшись величиной  $t_{\phi} = 2$  мкс, соответствующей относительно небольшим токам молнии [1], получим

$$l_{дон} \leq \frac{1500}{300} \cdot \frac{2}{30} \cdot 300 = 100 \text{ м.}$$

Отсюда следует, что для надежной защиты изоляции ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молнии в фазные провода, необходима установка ОПН каждые  $2l_{дон} = 200$  м длины ВЛ, то есть на каждой опоре. Это согласуется с мировым опытом применения подвесных ОПН для защиты изоляции ВЛ.

### 3. Удар молнии в трос и защита изоляции

Для простоты будем рассматривать удары в трос ВЛ только на опоре (опора №1, узел “1” на схеме рис.4), т.е. будем считать что опора стягивает к себе все удары молнии, которые попали бы в трос ВЛ вблизи опоры. Определим максимальное расстояние  $l_{дон}$  между соседними опорами (№1 и №2), при котором на нарастание напряжения на пораженной опоре №1 может сказаться влияние малого сопротивления заземления  $R_{з2}$  опоры №2, или установленный на ней подвесной ОПН.

Потенциал опоры №1 до прихода отраженных от опоры №2 волн (т.е. при  $t \leq 2t$ ) определится выражением

$$U(t) = \frac{(Z_{mp} / 2) \cdot R_3}{(Z_{mp} / 2) + R_3} \cdot I_m(t). \quad (1)$$

Тогда из (1) при условии  $t \leq t_\phi$  получим

$$U(t) = \frac{R_3 Z_{mp}}{2R_3 + Z_{mp}} \cdot at.$$

Видно, что для  $t \leq t_\phi$  потенциал пораженной опоры №1 будет увеличиваться, по крайней мере, до тех пор, пока в эту точку не придет волна, отраженная от опоры №2. Эта волна придет не ранее, чем через время  $2t = 2l/v$ , где  $l$  - расстояние между соседними опорами. Тогда, поскольку напряжение на гирлянде изоляторов при сделанных выше допущениях совпадает с напряжением на вершине опоры, получим максимально допустимую длину пролета ВЛ

$$l_{дон}^{np} = \frac{2R_3 + Z_{mp}}{2R_3} \cdot \frac{U_\epsilon}{Z_{mp}} \cdot \frac{t_\phi}{I_{max}} \cdot v. \quad (2)$$

Выражение (2) получено и, следовательно, может быть использовано лишь при условии  $t \leq t_\phi$ , т.е. при  $2t \leq t_\phi$ , откуда

$$l_{max} \leq v \cdot t_\phi / 2. \quad (3)$$

На рис.5 для параметров тока молнии  $I_{max} = 100$  кА,  $t_\phi = 5$  мкс с использованием (2) построены зависимости допустимой длины пролета ВЛ при варьировании сопротивления заземления поражаемой молнией опоры и числа установленных на линии тросов (для выбранных параметров использование формулы (2) корректно, согласно (3), до длин пролета, меньших  $v \cdot t_\phi / 2 = 300 \cdot 5 / 2 = 750$  м).

Из рис.5 видно, что при малых сопротивлениях заземления  $R_3 < 20 \div 30$  Ом допустимая длина пролета достаточно велика и превосходит реальную длину пролета ВЛ, составляющую  $300 \div 400$  м. При сопротивлениях заземления около 50 Ом допустимая длина становится сопоставимой с реальными длинами пролета ВЛ. При сопротивлениях заземления более 100 Ом (как для линии с одним тросом, так и с двумя) допустимая длина становится меньше реальной длины пролета ВЛ. Это означает, что при относительно высоких сопротивлениях заземления пораженной опоры, перекрытие присоединенных к ней гирлянд изоляторов будет происходить вне зависимости от того, какое сопротивление заземления или сколько ОПН установлено на ближайших к ней опорах. Поэтому надежно

защитить изоляцию на опоре с большим сопротивлением заземления оказывается возможным только установкой ОПН непосредственно на этой опоре.

В случае удара молнии в фазные провода вопрос о зоне защиты ОПН рассматривался вне зависимости от сопротивлений заземления опор. В случае же удара в трос

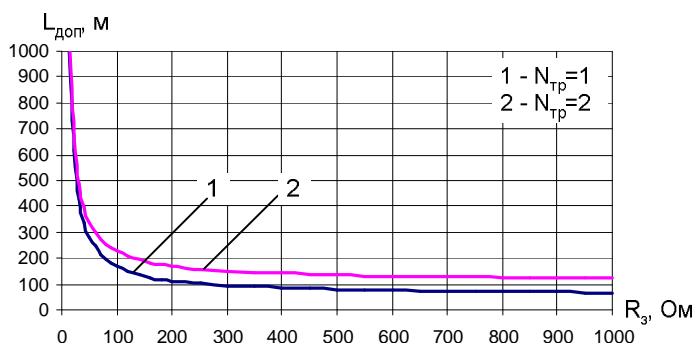


Рис. 5. Максимальная длина пролета ВЛ.

целесообразность установки ОПН должна определяться исходя из величин сопротивления заземления опор вдоль трассы линии. Для надежной защиты изоляции ВЛ от перенапряжений, вызываемых ударами молнии в тросы ВЛ, установка подвесных ОПН необходима на каждой опоре, сопротивление которой относительно велико. Величина такого “критического” сопротивления заземления должна определяться исходя из требуемой надежности работы ВЛ.

#### 4. Токи через подвесные ОПН

Рассмотрим удар молнии в вершину опоры ВЛ (опора №2, узел “2” на схеме рис.4). Определим, какая доля тока молнии ( $I_{max}$ ) пойдет в  $N_{тр}$  грозозащитных тросов ( $I_{тр}$ ), по телу опоры в землю ( $I_з$ ), через  $N_{опн}$  установленных на опоре ОПН в фазные провода ( $I_{опн}$ ). При определении распределения токов не будем учитывать влияние соседних опор (в нашем случае опору №1), что справедливо, по крайней мере, до момента времени прихода отраженной от опоры №1 волны к опоре №2. Тогда эквивалентная схема примет вид рис.6.

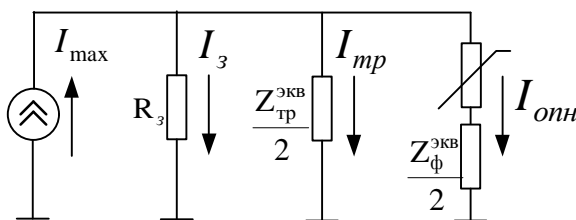


Рис.6. Эквивалентная схема при ударе в трос на опоре ВЛ.

Эквивалентное сопротивление тросов и заземления

$$R_{тр,з}^{экр} = \frac{R_з \cdot Z_{тр}^{экр} / 2}{R_з + Z_{тр}^{экр} / 2}.$$

Используя преобразование источника тока в источник напряжения [3], определим

$$I_{опн} = \frac{I_{max} \cdot R_{тр,з}^{экр} - U_{опн}}{R_{тр,з}^{экр} + Z_{ф}^{экр} / 2}, \tag{4}$$

потенциал вершины опоры

$$U_{опоры} = U_{опн} + I_{опн} \cdot Z_{ф}^{экр} / 2, \tag{5}$$

токи в опоре и в  $N_{тр}$  тросах соответственно

$$I_3 = U_{опоры} / R_3,$$

$$I_{тр} = U_{опоры} / (Z_{тр}^{экв} / 2).$$

На рис.7 и рис.8 для амплитуды тока молнии  $I_{max} = 100$  кА построено распределение токов между элементами схемы. Из рис.7 видно, что при больших сопротивлениях заземления амплитуда тока в единственном установленном на опоре ОПН становится достаточно большой (около 40 ÷ 50 кА, т.е. около половины амплитуды тока молнии). Снижения тока в ОПН можно добиться либо за счет увеличения числа присоединенных к

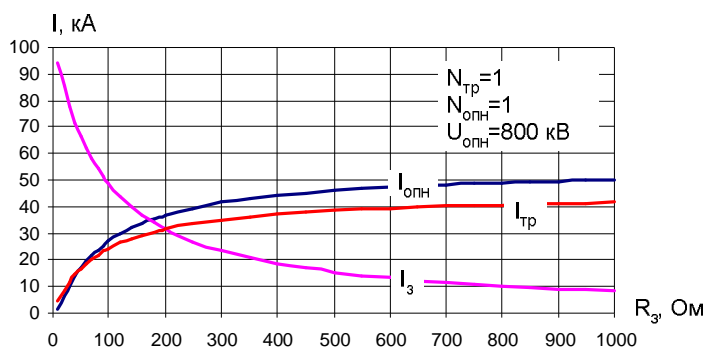


Рис. 7. Распределение амплитуд токов между одним ОПН, одним тросом и телом опоры.

опоре тросов (снижение величины  $Z_{тр}^{экв} = Z_{тр} / N_{тр}$ ), либо за счет увеличения числа защищенных с помощью ОПН фаз ВЛ (снижение величины  $Z_{ф}^{экв} = Z_{ф} / N_{опн}$ ). Так на рис.8, полученном при установке на опоре двух ОПН (защищены две различные фазы ВЛ), амплитуда суммарного тока в двух аппаратах при больших сопротивлениях заземления составляет около 60 кА, т.е. в каждом ОПН амплитуда тока будет 30 кА, что меньше, чем в случае одного ОПН.

Учет отражения волн от соседней опоры слабо повлияет на полученное распределение амплитуд токов через ОПН. Однако приход отраженных от соседней опоры волн, особенно если эта соседняя опора имеет малое сопротивление заземления или установленные ОПН, приведет к тому, что длительность тока в ОПН пораженной опоры заметно уменьшится при

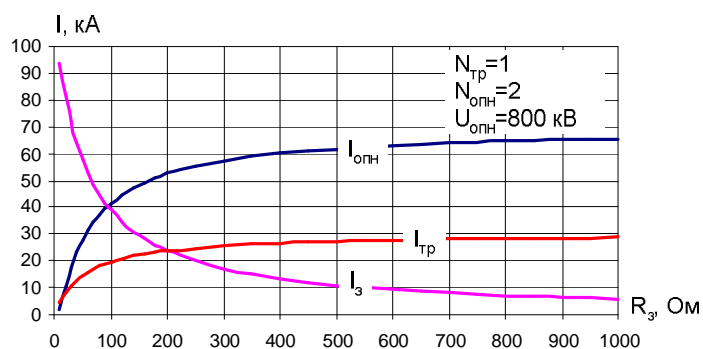


Рис. 8. Распределение амплитуд токов между двумя ОПН, одним тросом и телом опоры.

практически неизменной амплитуде, т.е. уменьшится выделяющаяся в варисторах ОПН энергия.

Определим влияние защитных характеристик ОПН, т.е. величины  $U_{опн}$ , на рассмотренное распределение амплитуд токов. На рис.9 в условиях рис.7 (100 кА, 1 трос, 1 ОПН) построены зависимости амплитуды тока в ОПН от сопротивления заземления опоры при изменении остающегося напряжения ОПН в широком диапазоне (значению  $U_{опн} = 0$  отвечает, очевидно, перекрытие гирлянды изоляторов фазы). Ясно видно, что остающееся напряжение ОПН слабо влияет на ток в ОПН.

Это объясняется тем, что при ударе молнии в вершину опоры, ее потенциал составляет мегавольты. При таком большом напряжении (по сравнению с остающимся на ОПН напряжением) ток в ОПН (см. схему рис.6) определяется, главным образом,

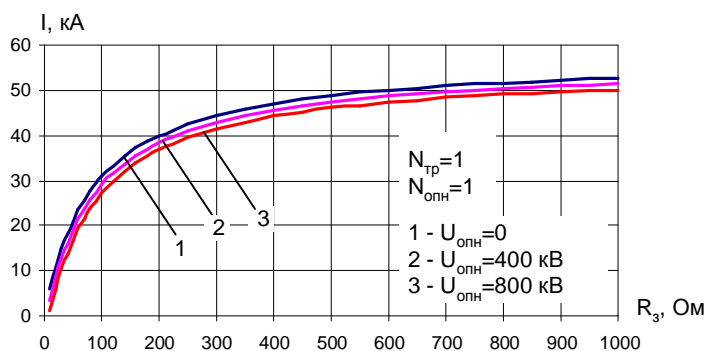


Рис. 9. Ток в ОПН при варьировании его остающегося напряжения.

соотношением величин включенного последовательно с ОПН эквивалентного волнового сопротивления фазного провода, эквивалентного волнового сопротивления тросов, сопротивления заземления.

Считая остающееся напряжение не зависящим от тока (а значит и от времени), запишем выражение для поглощенной ОПН энергии

$$W = \int (i_{опн}(t) \cdot U_{ост}) dt .$$

Удельная энергия в расчете на единицу принятого постоянным остающегося напряжения

$$W_{уд} = \frac{W}{U_{ост}} = \int i_{опн}(t) \cdot dt . \quad (6)$$

Удельная поглощенная ОПН энергия, как видно из (6) при сделанных допущениях, определяется током в ОПН. Ток в ОПН, в свою очередь, согласно (4), определяется сопротивлением заземления опоры, числом фаз, на которых установлены ОПН, числом грозозащитных тросов, присоединенных к опоре. Зависимость тока в ОПН, а, следовательно, и удельной поглощаемой энергии, от вольтамперной характеристики ОПН (его остающегося напряжения) слабая (см. рис.9). Напомним, что ток в ОПН будет определяться также и близостью соседних с пораженной опор, т.е. длиной пролета линии.

Итак, остающееся напряжение подвесного ОПН или его вольтамперная характеристика должны выбираться из условия обеспечения на защищаемой гирлянде напряжений, заведомо меньших ее импульсной прочности. Для ВЛ каждого класса напряжения требуется соответствующие по остающемуся напряжению подвесные ОПН.

Требуемая удельная энергоемкость подвесных ОПН слабо зависит от класса напряжения защищаемой линии, а определяется, главным образом, величинами сопротивлений заземления опор линии, числом тросов на линии, выбираемой схемой защиты (число защищенных с помощью ОПН фаз линии), длиной пролета.

### 5. Потенциал вершины опоры при ударе в нее молнии

Определим влияние числа присоединенных к опоре тросов и числа установленных на ней ОПН на потенциал вершины опоры, или, что тоже самое при сделанных допущениях, на напряжение, воздействующее на гирлянды незащищенных фаз ВЛ. Для этого воспользуемся полученной ранее без учета влияния соседних опор формулой (5) для  $U_{опоры}$ . Результаты расчетов по этой формуле, выполненных для  $I_{max} = 100$  кА и  $U_{ост} = 800$  кВ, приведены на рис.10. Видно, что рост сопротивления заземления опоры приводит к росту воздействующих на изоляцию напряжений. Однако влияние сопротивления заземления тем менее заметно, чем больше тросов и фаз ОПН присоединено к опоре. Рост расчетного значения остающегося напряжения  $U_{ост}$  приводит, как было показано ранее, к незначительному росту воздействующего на изоляцию напряжения.

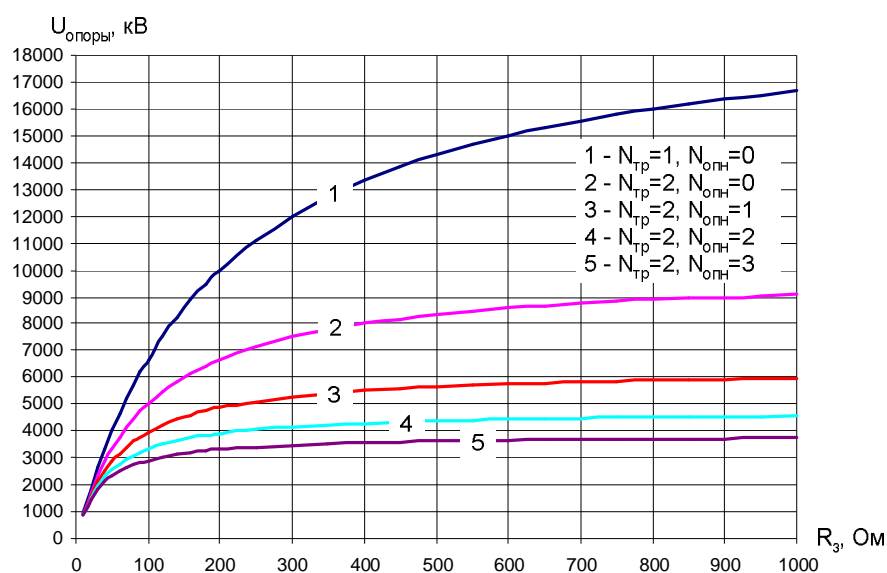


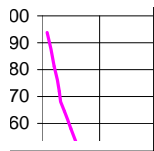
Рис. 10. Потенциал вершины опоры при варьировании числа присоединенных к ней тросов и установленных на ней ОПН.

Из рис.10 видно, что при малых сопротивлениях заземления установка любого количества ОПН на опоре малоэффективна с точки зрения снижения воздействующих на изоляцию напряжений. Из этого следует, что область рационального применения подвесных ОПН для защиты ВЛ с тросами лежит в области больших сопротивлений заземления опор, где установка ОПН, является эффективной мерой снижения перенапряжений.

Рис.9 свидетельствует о слабом влиянии остающегося на ОПН напряжения на протекающие процессы при ударе молнии в трос. Поэтому наличие ОПН параллельно гирлянде изоляторов или просто перекрытие этой гирлянды (случай  $U_{ост} = 0$ ) с точки зрения воздействующего на изоляцию других фаз напряжения – практически одно и то же. Поэтому рис.10 можно использовать для определения перенапряжений на изоляции при пробое 1, 2 или 3 фаз. Так, при сопротивлении заземления опоры  $R_z = 800$  Ом, к которой присоединены 2 троса и нет ОПН, пробоем изоляции одной из фаз приведет к снижению воздействующего на оставшиеся фазы напряжения с 9 МВ до 6 МВ; при пробое второй фазы воздействующее напряжение снизится с 6 МВ до 4.5 МВ и т.д.

Подобный анализ может потребоваться при рассмотрении вопросов грозозащиты изоляции линий в случае двухцепных (многоцепных) опор. Тогда, например, обеспечивая перекрытие фаз одной из цепей, можно добиться существенного снижения напряжения, воздействующего на изоляцию фаз другой цепи. Подобная мера (эффективность которой при





различных сопротивлениях заземления можно проследить по рис.10) позволяет снизить число двухцепных отключений ВЛ.

### Заключение

В России мал опыт расчетов и применения подвесных ОПН для защиты изоляции ВЛ. Поэтому настоящая работа представляется нам, несмотря на сделанные серьезные допущения, важной, в первую очередь для понимания процессов, происходящих в ВЛ, защищенной с помощью ОПН. Очевидно, что применение ОПН – непростой вопрос, требующий детальной проработки в каждом конкретном случае. Точные расчеты можно провести с помощью различных специализированных программных комплексов, среди которых такие, как PSCAD, EMTP. По результатам проведенных нами исследований мы пришли к следующим выводам:

1. Для надежной защиты изоляции ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молнии в фазные провода, необходима установка ОПН на каждой опоре.
2. Для надежной защиты изоляции ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молнии в тросы, установка ОПН требуется только на опорах с большими сопротивлениями заземления.
3. При защите с помощью подвесных ОПН воздушной изоляции линий с тросами (большинство ВЛ СВН) требуемая вольтамперная характеристика аппаратов определяется из условия  $U_{ост} < U_{выдерж}$ .
4. Требуемая удельная энергоемкость подвесных ОПН слабо зависит от класса напряжения защищаемой ВЛ. При заданных параметрах молниевых разрядов она определяется числом присоединенных к опоре тросов, числом защищенных на опоре с помощью ОПН гирлянд изоляторов, сопротивлением заземления опоры и длиной пролета. В свою очередь, закладываемые в расчет удельной энергоемкости ОПН параметры молнии определяются требуемой надежностью защиты изоляции ВЛ.

### Литература

1. Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. Физика молнии и молниезащиты. Москва, «Физматлит», 2001
2. В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Москва, «Энергоатомиздат», 1986
3. Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. Теоретические основы электротехники. Л., «Энергия», 1967