

# **Сравнение методик расчета грозовых отключений в АТР-ЕМТР и программе Groza с применением молниезащитных устройств**

Белько Д.О., Зарецкий Н.Д.

## **Введение**

В настоящий момент существует множество методик расчета грозоупорности линии: с использованием программ ЕМТР (АТР, RV), 2D и 3D моделирования в программах с применением метода конечных элементов, используя полевые задачи или электрогеометрическую модель, методом Монте-Карло на моделях линий, моделью распространения лидера и др. Основной задачей в каждом методе является определение вероятности обратных или прямых перекрытий в случаях удара молнии в опору, в трос, при прорыве молнии на провод. Большинство из описанных методов трудозатратны, требуют знаний работы в специализированных программах и индивидуальны для каждой конкретной линии. Эти методы стараются как можно точнее описать феномен молнии и влияния её на линию, что в итоге должно привести к оценке грозоупорности линии при определенной конфигурации или при проведении молниезащитных мероприятий. На практике, такая точность больше нужна в исследовательских целях, и менее важна для эксплуатирующих и сетевых организаций, особенно при том, что в большей степени число отключений зависит от грозовой активности в регионе, которая может меняться от года к году. Эксплуатирующим компаниям необходимо знать, как наиболее эффективно повысить грозоупорность линии с минимальными затратами, не прибегая к сложным расчетам, составлению больших цепей и моделей линии.

В АО «НПО «Стример» для оценки грозоупорности ВЛ был адаптирован упрощенный метод расчета числа ежегодных отключений линии от прямых ударов молний (ПУМ) и индуцированных перенапряжений. Данная методика основана на аналитическом подходе расчета критического тока молнии, приводящего к перекрытию изоляции или срабатыванию разрядника каждой фазы на опоре. Метод позволяет быстро с приемлемой точностью оценить исходную грозоупорность линии без защитных устройств, определить слабые места на линии и предложить эффективный способ установки устройств.

Разработанный метод реализован в программе Groza, где в качестве защитных устройств выступают разрядники АО «НПО «Стример» [1, 2]. В данной статье приводится описание методики для случая ПУМ в ВЛ с тросом и сравнение результатов расчета вероятности перекрытия изоляции или срабатывания разрядников на ВЛ 110 кВ по данному методу с результатами расчета по методу Монте-Карло в программе АТР-ЕМТР.

## Основные задачи в анализе грозоупорности ВЛ

Можно выделить несколько основных задач в решении проблемы оценки грозоупорности линии, расставим их в порядке течения процесса от удара молнии до перекрытия изоляции:

- определение параметров молнии
- определение числа ударов молнии в ВЛ
- определение вероятности прорыва молнии через трос (при его наличии)
- определение вероятности перекрытий изоляции ВЛ
- определение вероятности установления дуги

Каждая задача требует серьезного и комплексного подхода в изучении, однако для инженерных задач неминуемо приходится пользоваться упрощениями и допущениями.

В РФ основным документом для расчета грозовых отключений ВЛ номинально принимается «Руководство по защите электрических сетей 6-1155 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений» РД 153-34.3-35.125-99 (далее РД) [3].

В мире для оценки грозоупорности ВЛ используется стандарт «IEEE Guide for Improving Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines» IEEE Std 1410-2010 (далее стандарт IEEE) [4].

Оба документа носят больше рекомендательный характер, основанный на исследованиях и измерениях молниевых воздействий на ВЛ в СССР и остальном мире.

### *Определение числа ударов молнии в ВЛ*

Упрощенным решением первой задачи по определению удельного числа прямых ударов молний (ПУМ) в линию на 100 км  $N_{ПУМ}$  согласно указанным документам, принимаются выражения:

$$\text{по РД при } h < 30\text{м: } N_{ПУМ} = 0,2N_g \left( \frac{b}{2} + 5h - \frac{h^2}{15} \right) \quad (1.1)$$

$$\text{по стандарту IEEE: } N_{ПУМ} = N_g \left( \frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (1.2)$$

где  $N_g$  — число ударов молний в землю, ударов/км<sup>2</sup>/год

$h$  — средняя высота подвеса троса/провода, м

$b$  — ширина линии, м

Уже на этой стадии возникают различия в значениях, которые влияют на конечное число грозовых отключений ВЛ. Для диапазона высот подвеса троса/провода  $h$  от 10 до 20 м, значение ударов молнии в ВЛ по IEEE превышает значение по РД на 15-25%. Выражение (1.1) получено по результатам обобщения данных по поражаемости объектов (ВЛ и

молниеотводов) различной высоты на территории СССР, Польши и бывшей Чехословакии. Выражение (1.2) было предложено А. Эриксоном (A.J. Eriksson) в 1987 году [5], выведенная им на основании использования упрощенной модели продвижения лидера молнии, а также на основании данных наблюдений и измерений около 3000 молний, попадающих в сооружения высотой от 22 до 540 м в разных регионах мира. За последние годы в международном сообществе исследователей молниевых воздействий было предложено множество моделей и оценок для определения более точного числа ударов молний в ВЛ, однако до стандартизации и применения они пока не дошли.

#### *Определение вероятности прорыва молнии через трос*

Необходимость решения задачи прорыва молнии через трос определяется прежде всего высотой опоры и классом напряжения ВЛ. Для ВЛ до 220 кВ процент отключений от прорывов молний через трос составляет 0,1-1%, и для приближенных инженерных расчетов можно не рассматривать данный фактор или использовать упрощенные известные формулы. Для ВЛ свыше 220 кВ (включительно) процент прорывов может играть решающее значение в доле всех отключений ВЛ. В РД предлагается использование следующего выражения для расчета вероятности прорыва молнии через трос:

$$P_{\alpha} = e^{-\frac{1}{D_u} \left( 3,2 \frac{\Delta d}{\Delta h} \sqrt{\frac{h_{mp}}{\Delta h}} \frac{9}{D_u} \right)} \quad (2)$$

где учитывается влияние класса напряжения через коэффициент  $D_u$ , высоты подвеса троса на опоре  $h_{mp}$ , угла защиты троса через горизонтальное и вертикальное смещение троса и провода  $\Delta d$  и  $\Delta h$  относительно друг друга.

Однако эта формула может быть применена только при угле защиты троса ориентировочно до 30-35°, иначе значение вероятности стремительно растет на порядки при большем угле защиты. На практике больше применяется эмпирическая формула [6], которая впервые была предложена в 1960-х благодаря обработке данных наблюдений ударов молний, полученных ЛПИ:

$$P_{\alpha} = 10^{-\frac{a \sqrt{h_{mp}}}{90} - 4} \quad (3)$$

где  $a$  — защитный угол троса

$h_{mp}$  — высота подвеса троса на опоре

Формула (3) используется уже 60 лет, очевидно, что она имеет недостатки и требует пересмотра, например, не учитывается влияние напряжения линии. Автор оценивает её применимость только для ВЛ до 220 кВ при углах защиты до 30°, в других случаях вероятность прорыва занижается.

В стандарте IEEE для определения числа прорывов молнии через тросовую защиту (shielding failure rate) предлагается применение электрогеометрической модели (ЭГМ). ЭГМ основана на идее, что ВЛ или другой объект имеет определенный радиус стягивания молнии, который увеличивается с высотой, и этот радиус стягивания зависит от конкретной величины тока молнии в главном разряде. Задача состоит в определении незащищенной зоны между радиусом стягивания троса и областью удара молнии вне линии при каждом элементарном значении тока молнии. Далее, все участки интегрируются по току молнии для определения общей вероятности прорыва.

Такой подход может дать более качественное понимание процессов прорыва молнии через трос, однако сложность заключается в выборе коэффициентов для расчета радиуса стягивания, особенно когда разные исследователи предлагают свои коэффициенты.

#### *Определение вероятности установления дуги*

Исторически сложилось, что в зарубежной методике расчета грозоупорности ВЛ не сильно уделяют внимание определению вероятности установления дуги при перекрытии. В стандарте IEEE рассмотрен небольшой раздел с графиками вероятности установления дуги при использовании только деревянной изоляции на ВЛ, рассчитанный по статистическим опытным данным автором M. Darveniza и другими в 1967 году [7]. Что касается расчета вероятности установления дуги на другом виде изоляции, стандарт об этом умалчивает и рекомендует считать, что все перекрытия ведут к установлению дуги и отключению ВЛ.

В РД используется следующая формула для определения вероятности установления дуги (называется коэффициентом перехода импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты), которая зависит от средней напряженности поля сети вдоль пути перекрытия:

$$\eta = \left( 1.6 \frac{U_{нр}}{l_{разр}} - 6 \right) \cdot 10^{-2} \quad (4)$$

где

$l_{разр}$  — длина разрядного пути по гирлянде изоляторов, м

$U_{нр}$  — наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ

Если применять формулу (4) для ВЛ не менее 110 кВ при линейной изоляции из нормированного числа изоляторов ПС-70, то получим  $\eta=0,9-0,95$ , что в приближении можно принять за единицу, как и рекомендуют в стандарте IEEE. Однако, в последнее время за рубежом всё чаще стали применяться композитные изолирующие траверсы, где учет вероятности установления является необходимым, и вполне возможно, что в будущих редакциях стандарта IEEE вернуться к рассмотрению этого фактора.

### *Определение вероятности перекрытий изоляции ВЛ*

Оценка вероятности перекрытий изоляции ВЛ неразрывно связана с определением параметров импульса тока молнии. Во всех расчетных методиках необходимо понимать, как часто возникают опасные токи с высокими амплитудами или с высокой крутизной нарастания. Для прикладных расчетов прежде всего используются 2 параметра молнии – максимум тока и длительность фронта.

В методиках РД и IEEE применяются разные значения параметров распределения пикового значения тока молнии для главной стадии, в то время как параметры распределения длительности фронта совпадают. В РД медианное значение тока молнии зависит от высоты опоры – чем выше опора, тем выше значение. В РД рекомендуемое медианное значение для опор ниже 20 м составляет  $\bar{I} = 20$  кА, в стандарте IEEE нет привязки к высоте опор и медианное значение тока молнии составляет  $\bar{I} = 31$  кА. Медианное значение длительности фронта принимается равным  $\tau_{30/90} = 3,8$  мкс.

Вероятность превышения тока молнии может быть найдена по выражению, предложенному стандартом IEEE для инженерных расчетов:

$$P_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (5)$$

При выбранном распределении вероятности появления токов молнии, задача сводится к расчету критического тока молнии, способного перекрыть изоляцию.

В классических методиках расчета грозоупорности предлагается использование схемы замещения системы молния-провод-опора, где важно учитывать разрядные характеристики изоляции, индуктивное сопротивление опоры, сопротивление заземления опоры, волновые процессы протекания тока в тросе и проводе, а также емкостное влияние проводов друг на друга.

Для определения вероятности перекрытий в РД предлагается построение кривой опасных воздействий (КОВ), которая ограничивает случаи перекрытия изоляции в зависимости от перебираемых параметров тока молнии и скорости нарастания тока. Площадь под КОВ будет характеризовать общую вероятность перекрытия изоляции. Однако для подробного и правильного определения КОВ требуются математические операции с дифференциальными уравнениями, что повышает сложность расчетной методики.

В рамках расчетной методики программы Groza, было уделено большее внимание именно на упрощение задачи определения вероятности перекрытия изоляции каждой фазы на опоре.

## Основные принципы расчетной методики в программе Groza

В классических методиках расчета грозовых отключений (что в РД, что по стандарту IEEE) предполагается определение вероятности перекрытия только одной любой фазы на опоре, что актуально для сетей с заземленной нейтралью, очевидно, что это вызвано большей ответственностью высоких классов напряжения, чем средних. В редких случаях приводится методика для определения вероятности возникновения второго перекрытия, что подходит для сетей с изолированной нейтралью. Однако, когда необходимо оценить эффективность установки разного числа молниезащитных устройств на опору, становится важным знать вероятность перекрытия каждой фазы в отдельности и их очередность. Вся расчетная методика актуальна как для использования линейной изоляции, так и для применения разрядников со своими значениями импульсной прочности при срабатывании.

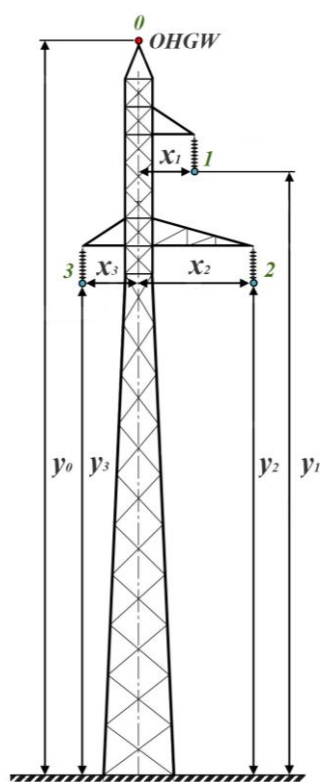


Рис.1. Обозначение координат проводов и троса на опоре

Для описания методики возьмем для примера классическую металлическую одноцепную опору типа П110-1. На рисунке 1 показаны координаты проводов и троса, далее введем обозначения индекса провода  $i, j = 0, 1, 2, 3$ , где нулевое значение индекса принадлежит тросу.

Для определения емкостного влияния проводов необходим расчет собственных  $Z_{ii}$  и взаимных  $Z_{ij}$  волновых сопротивлений:

$$Z_{ii} = 60 \cdot \ln \frac{2y_i}{r_i} \quad (6) \quad Z_{ij} = 60 \cdot \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (7)$$

где  $r_i$  — радиус проводника/троса

$D_{ij} = y_i + y_j$  — расстояние между проводом  $i$  и зеркальным отображением провода  $j$  в приближении что  $y_i \gg x_i$ .

$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$  — расстояние между проводом  $i$  и проводом  $j$

Рассмотрим случай удара молнии в опору с тросом. Нас интересует ток, который непосредственно протекает через эту опору в землю. Очевидно, что часть тока молнии проходит по тросу в обе стороны и стекает на соседних опорах. Чем короче длина пролета, тем большая часть тока молнии стечет по соседним опорам. Ток через опору можно выразить через коэффициент снижения тока  $I_{оп} = \eta I_{мол}$ , который прежде всего зависит от сопротивления заземления опор, длины пролета, волновых сопротивлений проводов. Для определения коэффициента снижения воспользуемся эквивалентной схемой (рис. 2.)

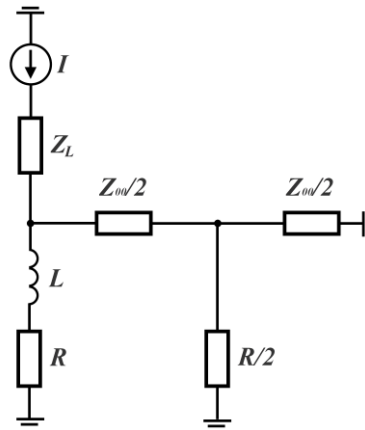


Рис.2. Эквивалентная схема для расчета коэффициента снижения тока молнии при ударе в опору с тросом

Для оценки доли отвода тока к соседним опорам воспользуемся упрощенной методикой, описанной Костенко М.В. в [8].

Электромагнитная волна распространяется по тросу от места удара молнии до соседней опоры и доходит до неё через время  $t = \tau_{np} = l_{np}/c$ , где  $l_{np}$  — длина пролета. Напряжение отраженной и преломленной волны определяется через коэффициенты отражения  $\beta$  и преломления  $\alpha$ :

$$\beta = \frac{\frac{Z_{00}R}{Z_{00} + R} - Z_{00}}{\frac{Z_{00}R}{Z_{00} + R} + Z_{00}}; \quad \alpha = 1 + \beta \quad (8)$$

Отраженная волна от соседней опоры достигнет точки удара молнии в  $t = 2 \tau_{np}$  и преломится с коэффициентом  $\beta_1$  и повторно отразится с коэффициентом  $\alpha_1$ :

$$\alpha_1 = \frac{2 \frac{Z_L \cdot R}{Z_L + R}}{\frac{Z_L \cdot R}{Z_L + R} + \frac{Z_{00}}{2}}; \quad \beta_1 = \alpha_1 - 1 \quad (9)$$

С течением времени всё большее число опор участвует в отводе тока молнии в землю. Для реальных значений длительности фронта импульсов молнии и сопротивлений заземления опор достаточную точность расчетов обеспечивает учет отражений лишь от соседних опор, ближайших к пораженной опоре. В этом случае коэффициент снижения тока из-за отвода тока через соседние опоры, проходящего через пораженную опору может быть записан в следующей виде:

$$\eta = 1 + \frac{\alpha_1 \beta}{1 - \beta \beta_1} \left( 1 - \frac{1 - (\beta \beta_1)^n}{n \cdot (1 - \beta \beta_1)} \right) \quad (10)$$

где  $n$  это целая часть отношения  $t_{\phi}/2\tau_{np}$ ,  $t_{\phi}$  — длительность фронта молнии.

Одним из допущений в методике программы Groza является закрепление длительности фронта импульса молнии. Предполагается, что основную долю в возможность перекрытия изоляции вносит именно максимальное значение тока молнии. Длительность фронта молнии во всех расчетах берется равной медианной  $t_f=3,8$  мкс.

Как уже было сказано, одной из главных задач является определение последовательности перекрытий изоляторов или разрядников всех фаз на опоре и поиск критического тока молнии для этих перекрытий. Для простоты объяснения продолжим рассмотрение случая одноцепной линии с тремя фазами с установленными молниезащитными устройствами, такими как мультикамерные разрядники. Далее римскими цифрами будут обозначаться номера перекрытия (I, II, III).

Вводится эквивалентное сопротивление заземления опоры  $R^{eq}$ , которое учитывает отвод тока молнии по тросу в соседние опоры через коэффициент  $\eta$ , волновое сопротивление молнии, принимается равным  $Z_{мол}=300$  Ом, влияние падения напряжения на индуктивности опор, которое обратно пропорционально длительности фронта молнии. Так как провода могут располагаться на разной высоте, то для каждого провода  $i$  рассчитывается свое  $R^{экв}$  для первого перекрытия:

$$R_i^{экв} = \frac{\eta}{\frac{1}{Z_{мол}} + \frac{1}{R_i^y} + \frac{2}{Z_{00}}} \quad R_i^y = R + \frac{y_i L_0}{t_f} \quad (11)$$

где  $R$  — сопротивление заземления опоры  
 $L_0$  — погонная индуктивность опоры  
 $y_i$  — высота подвеса проводника  
 $t_f$  — длительность фронта импульса молнии

На каждом проводе наводится потенциал от троса, который определяется через коэффициент связи  $k$ . Для нахождения критического тока первого перекрытия коэффициент связи между тросом и проводом  $i$  рассчитывается через собственное волновое сопротивление троса и взаимное волновое сопротивление:

$$k_i^t = \frac{Z_{0i}}{Z_{00}} \quad (12)$$

Далее определяется критический ток молнии для первого перекрытия изоляции каждого проводника  $i$ . В качестве пробивного напряжения используется 50% разрядное напряжение изолятора либо защитного устройства:

$$I_i^t = \frac{U_{50\% i}}{R_i^{экв} (1 - k_i^t)} \quad (13)$$

Из значений  $I_i^t$  выбирается минимальное положительное значение тока, которое указывает номер фазы где произойдет первое перекрытие:



$$I' = \min(|I'_i|), \quad (14)$$

Вероятность  $P^I$  появления тока молнии выше критического для первого перекрытия определяется по формуле (5). На этом основной расчет вероятности отключений для ВЛ с заземленной нейтралью без молниезащитных устройств может быть достаточен, однако в рамках полной методики расчета грозоупорности с устройствами необходимо найти все остальные вероятности перекрытий

В нашем примере предположим, что первой перекрылась фаза  $i=3$  с защитным устройством (в таком случае номер первого перекрытия будем обозначать  $fI=3$ ). При корректном срабатывании мультикамерного разрядника дуга будет погашена и это не приведет к отключению линии. Но если остальные фазы не защищены, для оценки числа вероятных отключений необходимо определить критический ток молнии для второго перекрытия фаз 1 или 2. На рис. 3 показана схема замещения при последовательных перекрытиях В схеме замещения из рис.3 первое перекрытие равносильно замыканию ключа SW3. Часть тока будет отводиться по проводу фазы 3 и эквивалентное сопротивление опоры  $R^{эквII}$  уменьшится. Также изменится коэффициент связи троса и перекрытой фазы относительно других фаз.

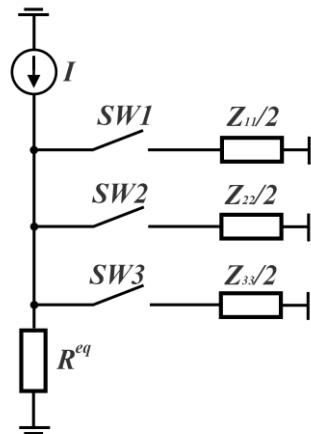


Рис.3. Эквивалентная схема для расчета последовательности перекрытий

Таким образом шаг за шагом определяется последовательность перекрытия изоляции на всех проводниках. В общем случае для любого числа проводников  $i$  на опоре

$$R_i^{эквNf} = \frac{\eta}{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{R_i^y} + \frac{2}{Z_{00}} + \frac{2}{Z_{f1,f1}} + \dots + \frac{2}{Z_{Nf-1,Nf-1}}} \quad (15)$$

$$k_i^{Nf} = \frac{Z_{0i} + Z_{f1,i} + Z_{f2,i} + \dots + Z_{Nf-1,i}}{Z_{00} + Z_{0,f1} + Z_{0,f2} + \dots + Z_{0,Nf-1}} \quad (16)$$

$$I_i^{Nf} = \frac{U_{50\% i}}{R_i^{эквNf} (1 - k_i^{Nf})}; I^{Nf} = \min(|I_i^{Nf}|) \quad (17)$$

$$P^{Nf} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I^{Nf}}{31}\right)^{2.6}} \quad (18)$$

где  $Nf$  — номер перекрытия от 1 до  $i$

$f1, f2 \dots$  — номер проводника, который перекрылся первым, вторым и т.д.

По схожей методике определяется вероятность перекрытия каждой фазы при ударе молнии в середину пролета, либо в опору ВЛ без троса.

### Метод Монте-Карло в АТР-ЕМТР

Для оценки применимости расчетного метода программы Groza и определения границ использования, в качестве сравнения был выбран расчетный статистический метод Монте-Карло на электрической модели в программе АТР-ЕМТР.

Суть метода Монте-Карло заключается в следующем: процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин, модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются вероятностные характеристики рассматриваемого процесса.

Для определения вероятности перекрытия изоляторов в расчетную модель АТР-ЕМТР добавляется статистический элемент. Он позволяет учесть статистическую природу параметров импульса тока молнии, задать количество расчетных экспериментов с учетом логнормального распределения параметров импульса. Расчет переходных процессов при ударе молнии многократно повторяется, при этом фиксируются максимальные значения тока импульса через перекрывшиеся изоляторы при данном токе молнии [9, 10]. В итоге считается количество ударов молнии, приводящие к перекрытию. Отношение этого числа к общему числу ударов молнии будет являться оценкой вероятности перекрытия изолятора. Чем больше проводится расчетов в одной серии, тем более правдоподобнее окажутся результаты. Подобным образом можно оценить вероятность перекрытия каждой фазы в отдельности.

Расчетная модель одноцепной ВЛ 110 кВ с тросом в программе АТР-ЕМТР представлена на рис. 4.

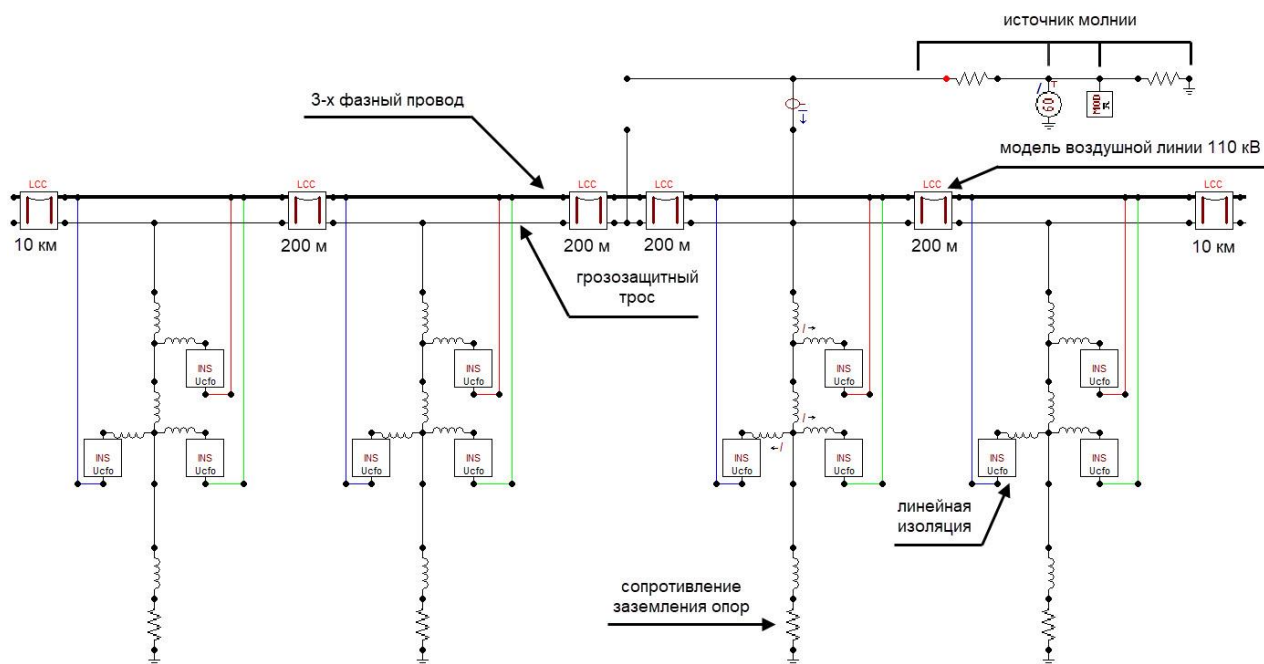


Рис.4. Расчетная модель АТР-ЕМТР для воздушной линии 110 кВ с грозозащитным тросом (случай удара в опору)

В модели приняты следующие параметры и допущения:

- В качестве модели длинной линии используется блок LCC с типом модели JMarti и реалистичной геометрией расположения проводов, включая длину пролета, высоту провиса, размеры проводов и троса.
- Траверсы и стойки опор представлены в виде сосредоточенных индуктивностей, рассчитанных, исходя из погонной индуктивности по РД. Сопротивление заземления опоры постоянно, импульсное сопротивление не учитывалось.
- В качестве источника молнии принимается форма косоугольного импульса с прямолинейным нарастанием тока за время равное длительности фронта импульса. В отличие от использования формы тока молнии Хейдлера [11], импульс молнии с линейным нарастанием позволяет достичь равномерного влияния производной тока молнии вплоть до пика тока, в то время как в форме импульса Хейдлера максимум производной находится на середине фронта импульса, а не в пике импульса, что не отражает физические процессы при ударе молнии.
- Изоляция представлена ключом управляемым напряжением, в качестве напряжения перекрытия принимается 50% импульсная прочность изоляции на отрицательной полярности по графику из РД.
- Для каждого расчетного сопротивления опоры проводилась серия расчетов из 5000 численных экспериментов ударов молнии: половина всех случаев – удары в опору, другая половина – удары в середину пролета.

## Результаты и сравнение расчетных методик

Сравним две описанные расчетные методики (а именно, методику в программе Groza и методику Монте-Карло в АТР-ЕМТР) на примере ВЛ 110 кВ. Проведем сравнение вероятности перекрытия каждой фазы в отдельности, а не числа отключений, чтобы не вносить дополнительных арифметических действий.

Входные данные для расчета и допущения:

- Тип опоры — металлическая опора П110-5В
- Длина пролета — 200 м
- Импульсная прочность гирлянды изоляторов 8хПС-70Е — 610 кВ [3]
- Сопротивление заземления опор —  $R_z = 1..100$  Ом
- Рассматривается ВЛ с тросом и без троса
- Медианное значение максимума тока молнии и среднеквадратичное отклонение в параметрах генератора случайных величин в АТР-ЕМТР подбирается исходя из формулы (5), чтобы соблюсти равноценность распределения токов молний в обоих сравниваемых методах:  $\bar{I} = 31$  кА,  $\sigma_I = 0,29$
- Медиана длительности фронта и её среднеквадратичное отклонение в АТР-ЕМТР берется из стандарта IEEE:  $t_\phi = 3,8$  мкс,  $\sigma_t = 0,24$  [4]

На рис. 5 показаны зависимости вероятностей перекрытия изоляции на ВЛ 110 кВ с тросом от сопротивления заземления опор поочередно для каждого из трех перекрытий фаз в случаях удара молнии в опору и в середину пролета по двум рассматриваемым методикам. При сопротивлении заземления опор свыше 5-10 Ом первой фазой в основном перекрывается дальняя фаза от троса (номер фазы 2 из рис.1) ввиду меньшей емкостной связи с тросом. Второй перекрывается фаза на противоположной траверсе (номер фазы 3 из рис.1), и третьей перекрывается верхняя фаза (номер фазы 1 из рис.1). При меньших сопротивлениях заземления опор возможна ситуация попадания молнии с резким фронтом и высокой скоростью нарастания тока, тогда падение напряжения на индуктивности опоры может превысить наведенное напряжение от троса по емкостной связи и первой фазой перекроется самая верхняя.

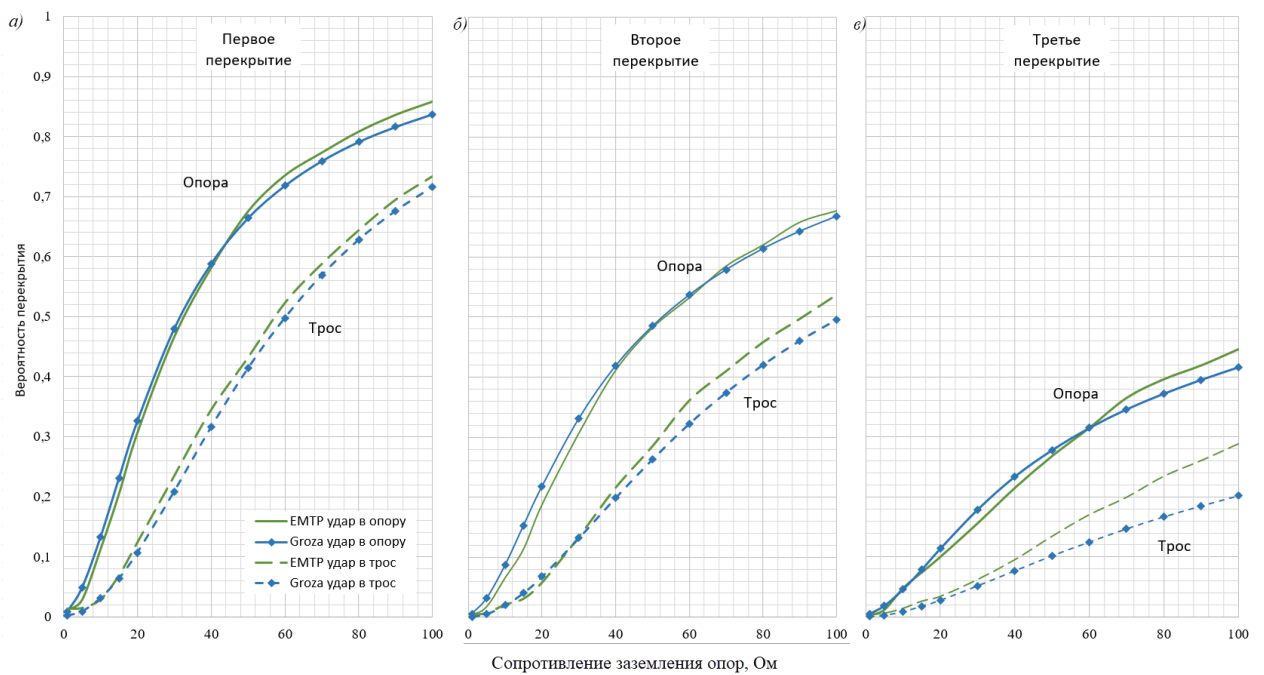


Рис. 5. Вероятности перекрытий изоляции на ВЛ 110 кВ с тросом для случаев удара в пролет и опору для: *a* — первого перекрытия, *б* — второго перекрытия, *в* — третьего перекрытия.

Анализируя полученные результаты на графиках можно заметить следующие особенности:

1. Ожидаемо, что вероятность перекрытия при случаях удара в опору превышает вероятность перекрытия в случаях удара в трос ввиду растекания тока молнии в обе стороны.
2. Наблюдается корреляция зависимостей на всех перекрытиях.
3. Большее соответствие в графиках наблюдается на первом перекрытии, на последующих перекрытиях сказываются допущения, принятые в методике программы Groza.
4. Результаты по методике Groza для случая удара молнии в опору немного переоценены на высоких сопротивлениях свыше 40 Ом по сравнению с расчетами в EMTP и недооценены при меньших сопротивлениях. Для случая удара молнии в пролет недооценены во всем диапазоне сопротивлений, особенно это касается третьего перекрытия. В данном случае сказывается допущение о неизменном времени фронта в методике Groza.

Следует отметить, что общее число грозовых отключений складывается из суммы отключений при ударах молнии в середину пролета и в опору. В РД предлагается оценивать долю ударов молний в опору по следующему выражению:

$$P_{on} = \frac{4 \cdot h_{on}}{l_{np}}, P_{np} = 1 - P_{on} \quad (19)$$

где  $h_{on}$  — высота опоры,  $l_{np}$  — длина пролета.

Если рассматривать самые распространенные в эксплуатации металлические опоры ВЛ 110 кВ высотой 25-30 м и средние длины пролетов 200-250 м, то можно принять, что удары молнии распределяются по опорам и пролетам равномерно, то есть  $P_{on} = P_{np} = 0,5$ .

Таким образом, можно ввести общую вероятность перекрытия, которая учитывает среднее между двумя расчетными случаями:

$$P_{общ}^I = P_{on} P_{on}^I + P_{np} P_{np}^I = \frac{P_{on}^I + P_{np}^I}{2} \quad (20)$$

где  $P_{on}^I$  и  $P_{np}^I$  — вероятности перекрытия в случае удара в опору и пролет соответственно.

На рис. 6 приведены зависимости общих вероятностей перекрытий, полученных из результатов по рис. 5 используя выражение (20). В общем виде наблюдается достаточное совпадение между полученными результатами по двум методам, погрешность результатов по программе Groza относительно результатов по ЕМТР составляет 5-15%.

Подобным образом была проведена серия расчетов для ВЛ 110 кВ без троса при такой же конфигурации и параметрах. На рис. 7 приведены зависимости общих вероятностей перекрытий для ВЛ без троса.

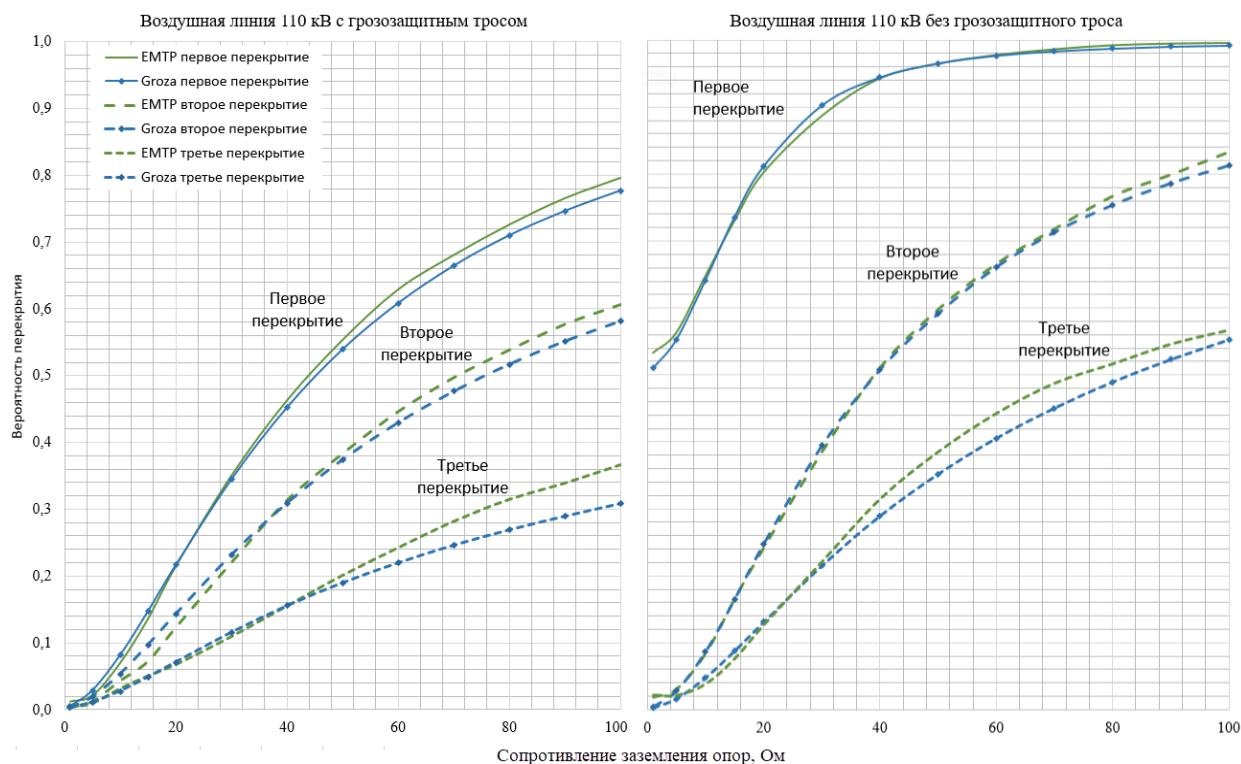


Рис.6. Общие вероятности перекрытий ВЛ 110 кВ с тросом

Рис.7. Общие вероятности перекрытий ВЛ 110 кВ без троса

Сравнивая результаты, полученные по методике программы Groza и методом Монте-Карло в АТР-ЕМТР для всех анализируемых расчетных случаев ударов молнии в ВЛ 110 кВ с тросом и без, можно говорить о приемлемом совпадении в рамках допустимой погрешности в 5-15% на большей части диапазона сопротивлений заземления опор.

## **Выводы**

Для анализа грозоупорности ВЛ инженеру необходимо аккуратно выбирать расчетные методики и рекомендации по имеющимся стандартам и руководящим документам, так как рекомендуемые параметры и принципы расчета отличаются в разных документах, это влияет на конечный результат определения числа грозовых отключений рассматриваемой ВЛ, различия могут составлять 50-100%.

Предложенная расчетная методика, используемая в разработанном программном обеспечении Groza компанией АО «НПО «Стример» для анализа грозоупорности ВЛ, позволяет сократить расчетное время по сравнению с другими более требовательными расчетными методами благодаря упрощениям и простым арифметическим операциям.

Сравнение результатов вычисления вероятности перекрытия изоляции на ВЛ 110 кВ по упрощенной методике в программе Groza и по методу Монте-Карло в программе АТР-ЕМТР позволяет сделать следующие выводы:

1. Предлагаемую методику допустимо использовать для анализа грозоупорности ВЛ до 110 кВ с тросом и без. На более высоких классах напряжения возможно увеличение погрешности расчетов ввиду более высоких опор и длин пролетов.
2. Погрешность расчетной вероятности перекрытия изоляции или срабатывания разрядников составляет до 15% на большей части диапазона сопротивлений заземления опор.
3. Упрощенная методика позволяет оценить вероятность перекрытия не только фазы, которая перекрывается первой, но и всех остальных фаз, что важно для применения молниезащитных устройств, таких как мультикамерные разрядники или ОПН.

## **Список использованной литературы**

1. Podporkin G. V., Enkin E. Y., Zhitenev V. V., Zainalov R.I., Pilshchikov V. E., Belko D. O. Development of shield-type multi-chamber lightning arrester for 35kV OHL. XIII SIPDA, 2015.
2. Belko D.O., Podporkin, G.V., Analysis of current distribution among long-flashover arresters for 10 kV overhead line protection against direct lightning strikes, 33rd ICLP, 2016.
3. РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений.
4. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1410-2010.

5. Eriksson A.J. The incidence of lightning strikes to power lines, IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, July, Vol. PWRD-2, No. 3, P. 859–870
6. Борисоглебский П.В., Дмоховская Л.Ф. Ларионов В.П., Пинталь Ю.С., Разевиг Д.В., Техника высоких напряжений. Под редакцией Разевиг Д.В., а. М.—Л. Госэнергоиздат. 1963. 472с.
7. Darveniza M., Limbourn G.J., Prentice S.A., Line Design and Electrical Properties of Wood, IEEE Transactions on power apparatus and systems, 1967, November, Vol. PAS-86. No. 11 P. 1344-1353
8. Костенко М.В. и др. Физика грозового разряда и грозозащита линий электропередачи. Л.: Ленинградский политехнический институт, 1982.
9. Белько Д.О., Анализ распределения тока по мультикамерным разрядникам при ударе молнии в линию 35 кВ, V Российская конференция по молниезащите, стр. 68–77, 2016.
10. Дмитриев, М.В. Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35-750 кВ и защита от них. — СПб.: Изд-во “НИВА”, 2008. — 60 с.
11. Heidler F., Cvetic J.V., Stanic B.V. Calculation of lightning current parameters // IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, April, Vol. 14. No. 2. P. 399–404.