

## Параметры разряда молнии в задачах грозозащиты

Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В.

В статье рассмотрены следующие вопросы:

- параметры токов молнии, поражающих воздушные линии (ВЛ);
- способы моделирования волны тока молнии (с нулевой начальной производной и без нее).

### 1. Параметры разряда молнии с учетом специфики поражаемого объекта

В проводимых расчетах грозоупорности ВЛ определяются так называемые “критические” параметры молнии, приводящие к перекрытию гирлянд изоляторов. Зная “критические” параметры, далее по вероятностным кривым можно определить вероятность появления молнии с такими параметрами. Зная число ударов молнии в ВЛ и их распределение между тросами и фазными проводами (определяемое, например, по методике [1]), далее определяется число грозовых отключений линий.

Итак, для правильной оценки числа грозовых отключений линии необходимо знать статистическое распределение параметров токов молнии. Сделаем простые оценки, для уточнения широко используемых в расчетах “типовых” параметров воздействующих на ВЛ молний.

Амплитуда тока молнии в месте ее удара является одной из основных характеристик разряда молнии. Согласно [1], вероятность амплитуды тока молнии принимается распределенной по логарифмически нормальному закону.

В [1] приведены параметры логарифмически нормальных законов распределения амплитуд токов молнии, поражающих ВЛ (кривая №2 на рис.1), однако нет разделения параметров токов молнии для случаев поражения фазных проводов, тросов или опор ВЛ.

В [1, 2] отмечено, что расчетное сопротивление канала молнии влияет на амплитуду тока  $I_{об}$ , протекающего через пораженный объект. Расчет  $I_{об}$  рекомендуется вести по формуле

$$I_{об} = I_{об}^{R=0} \cdot \frac{Z_m}{Z_m + Z_{об}}, \quad (1)$$

где  $I_{об}^{R=0}$  - амплитуда тока молнии, протекающего через хорошо заземленный объект;  $Z_{об}$  - эквивалентное сопротивление пораженного объекта;  $Z_m$  - сопротивление канала молнии на стадии главного разряда, зависящее от амплитуды тока молнии.

В [3] со ссылкой на других исследователей приведена “зависимость сопротивления канала молнии  $Z_m$  от мгновенного значения тока молнии на фронте”. Переписав ее применительно к амплитуде тока молнии, получим

$$Z_m(I_{об}) = 140 \left( 1 + \frac{240}{I_{об}} \right), \quad (2)$$

где  $I_{об}$  - в кА.

Формула (1) получена на основе схемы рис.2а, из которой ясно, что амплитуда тока, протекающего через поражаемый объект с сопротивлением  $Z_{об}(I_{об})$ , зависит от соотношения  $Z_{об}(I_{об})$  и  $Z_{м}(I_{об})$ . На рис.2 под  $U_{м}$  следует понимать некоторое условное значение эквивалентного напряжения грозового облака относительно земли.

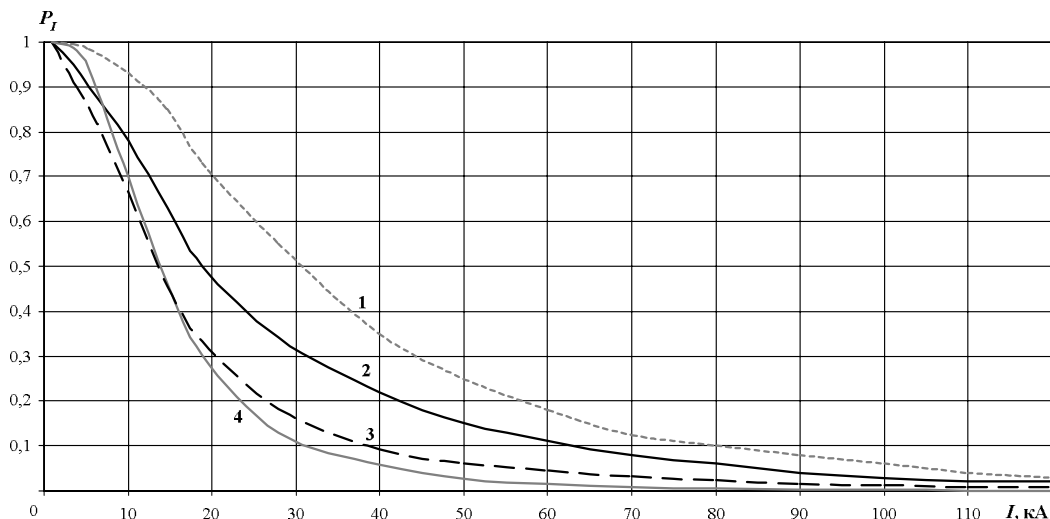


Рис.1. Логарифмически-нормальным законом распределения амплитуды тока разрядов молнии (по данным различных авторов):

- 1- обобщенные данные CIGRE ( $\bar{I} = 30.3$  кА,  $\sigma_{lg I} = 0.32$ , прямые и косвенные измерения преимущественно на башнях);
- 2- обобщенные данные [1] ( $\bar{I} = 20$  кА,  $\sigma_{lg I} = 0.39$ , косвенные измерения на ВЛ);
- 3- данные по Карелии ( $\bar{I} = 13.5$  кА,  $\sigma_{lg I} = 0.39$ , косвенные измерения КирНИОЭ на ВЛ);
- 4- региональные данные по Карельскому перешейку ( $\bar{I} = 14$  кА,  $\sigma_{lg I} = 0.29$ , дистанционные измерения финской сети наблюдений за грозами).

Используя схему рис.2а, запишем для двух различных поражаемых молнией объектов  $U_{м} = (Z_{м}(I_{об1}) + Z_{об1}(I_{об1})) \cdot I_{об1} = (Z_{м}(I_{об2}) + Z_{об2}(I_{об2})) \cdot I_{об2}$ , откуда

$$I_{об2} = I_{об1} \cdot \frac{Z_{м}(I_{об1}) + Z_{об1}(I_{об1})}{Z_{м}(I_{об2}) + Z_{об2}(I_{об2})}, \quad (3)$$

где индекс 1 соответствует параметрам схемы во время эксперимента по определению параметров тока молнии; индекс 2 - параметрам расчетной схемы, для которой определяется ожидаемый ток молнии с учетом сопротивления заземления поражаемого объекта.

С учетом (2) из (3) получим

$$I_{об2} = I_{об1} \cdot \frac{140 + Z_{об1}(I_{об1})}{140 + Z_{об2}(I_{об2})}. \quad (4)$$

Если амплитуда молнии определялась при  $Z_{об1}(I_{об1}) \approx 0$ , тогда из (4) получим соотношение, аналогичное (1). В (1) сопротивление канала молнии числителя и знаменателя – понимается одинаковым; его значение выбирается с учетом ожидаемых токов в поражаемом объекте. В соотношении (4)

принято во внимание, что сопротивления канала молнии числителя и знаменателя являются функциями разных токов, что с учетом сильной зависимости сопротивления от тока в интересующей области наиболее вероятных токов с амплитудами 10-40 кА представляется важным.

В расчетах грозоупорности, как правило, задаются параметры тока молнии в месте ее удара  $J_m(t)$ . В связи с этим, используя известные соотношения, преобразуем схему с источником напряжения (рис.2а) в схему с источником тока (рис.2б).

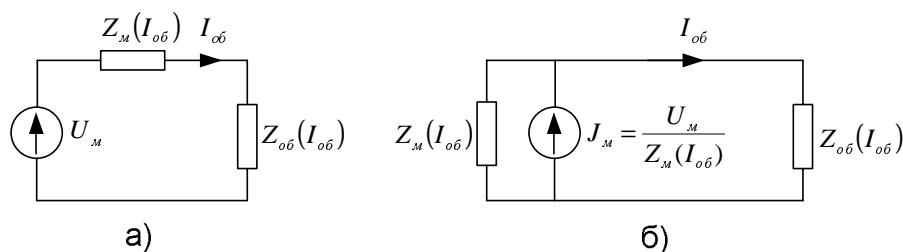


Рис.2. Эквивалентные расчетные схемы для определения величины тока в месте удара молнии.

Если регистрация токов молнии проводилась на хорошо заземленных объектах, таких, что  $Z_{об1}(I_{об1})/Z_m(I_{об1}) \ll 1$ , то результаты измерения  $I_{об1}$  дадут значение сугубо расчетной величины  $J_m$ , используемой в схеме рис.2б.

Если эксперименты проводились на объектах, для которых отношение  $Z_{об1}(I_{об1})/Z_m(I_{об1})$  близко к единице, то для получения расчетной величины  $J_m$  должны быть проведены корректировки результатов экспериментов  $I_{об1}$  по формуле  $J_m = I_{об1} \cdot (1 + Z_{об1}(I_{об1})/Z_m(I_{об1}))$ .

Проведение подобных пересчетов  $I_{об1}$  в  $J_m$  позволило бы значительно уменьшить отличия в полученных разными исследователями параметров распределения амплитуд токов молнии для различных условий.

Пересчеты  $I_{об1}$  в  $J_m$  отразят особенности объекта, на котором проводились регистрации токов молнии. Совместное же использование параметров  $J_m$  и сопротивления канала молнии  $Z_m(I_{об2})$  позволят учитывать специфику объекта  $Z_{об2}(I_{об2})$ , для которого проводятся расчеты грозоупорности.

Отметим, что сопротивление канала молнии  $Z_m(I_{об2})$  зависит от тока  $I_{об2}$ , что неудобно для расчета цепи рис.2б. Поэтому в расчетах можно упрощенно принимать  $Z_m = const(I_{об2})$ , выбрав его значение с учетом ожидаемых токов в поражаемом объекте  $I_{об2}$ .

Покажем на двух примерах влияние сопротивления заземления поражаемого объекта на закон распределения амплитуды тока разрядов молнии.

**Пример №1.** Пусть параметры тока молнии определялись в схеме с малым сопротивлением поражаемого объекта, равным 20 Ом, т.е.  $Z_{o\delta 1}(I_{o\delta 1})=20$  Ом. Предположим, что объект, в который попадает молния в расчетах, - фазный провод ВЛ 500 кВ. Тогда примем  $Z_{o\delta 2}(I_{o\delta 2})=Z_v/2$  и, считая волновое сопротивление фазного провода  $Z_v=280$  Ом, получим  $Z_{o\delta 2}(I_{o\delta 2})=140$  Ом. Указанное значение  $Z_{o\delta 2}(I_{o\delta 2})$  справедливо до момента перекрытия изоляции ВЛ, или до вступления в работу подвесного ОПН, т.е. до любого значительного изменения расчетной схемы.

Заменим выражение (4) на  $I_{o\delta 1}=K \cdot I_{o\delta 2}$ , где обозначено  $K = \frac{140 + Z_{o\delta 2}(I_{o\delta 2})}{140 + Z_{o\delta 1}(I_{o\delta 1})} = 1,688$ .

Вероятность появления амплитуды тока определяется выражением

$$P_{o\delta 1}(I) = P(I_{o\delta 1}) = 1 - \frac{\log(e)}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_0^{I_{o\delta 1}} \left[ \frac{1}{I_{o\delta 1}} \cdot \exp \left[ -0,5 \cdot \left( \frac{\log(I_{o\delta 1}) - \log(I_{mid1})}{\sigma} \right)^2 \right] \right] dI_{o\delta 1}. \quad (5)$$

В качестве исходного распределения амплитуд токов молнии примем распределение CIGRE, для которого согласно [1]  $I_{mid1} = 30,3$  кА,  $\sigma = 0,32$ .

Заменив в распределении (5)  $I_{o\delta 1}$  на равное ему  $K \cdot I_{o\delta 2}$ , получим

$$P_{o\delta 2}(I) = P(K \cdot I_{o\delta 2}) = 1 - \frac{\log(e)}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_0^{K \cdot I_{o\delta 2}} \left\{ \frac{1}{K \cdot I_{o\delta 2}} \cdot \exp \left[ -0,5 \cdot \left( \frac{\log(K \cdot I_{o\delta 2}) - \log(K \cdot I_{mid2})}{\sigma} \right)^2 \right] \right\} d(K \cdot I_{o\delta 2}). \quad (6)$$

Итак, распределение (5), полученное для ударов молнии в хорошо заземленные объекты (к которым следует отнести высотные сооружения, для которых комитет CIGRE и представил обобщенные результаты измерений) пересчитано в распределение (6), справедливое для случая удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ. Исходное и скорректированное распределения показаны на рис.3. Скорректированное значение среднего тока теперь составляет всего  $I_{mid2} = I_{mid1} / K = 18$  кА вместо исходного значения в  $I_{mid1} = 30,3$  кА. Среднеквадратичное отклонение для скорректированной вероятностной кривой такое же, как и у исходной ( $\sigma = 0,32$ ), что можно показать.

Сравнивая полученное на основе изложенных выше упрощенных пересчетов значение среднего тока при ударе молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ, видим совпадение с результатами, изложенными в [3] (полученными с использованием методики ориентировки канала лидера молнии).

В [3] указано на то, что методика ориентировки канала лидера молнии, основы которой изложены в ряде публикаций, позволяет находить не только вероятность прорыва молнии на провода ВЛ (при большом числе экспериментов определяемую как отношение числа разрядов молнии в провода к полному числу разрядов в систему “грозозащитные тросы – провода - земля”), но и амплитуды токов молнии, прорвавшихся на провода.

В подтверждение важности учета ориентировки в [3] приведены кривые распределения амплитуд тока в месте удара в фазный провод ВЛ 500

кВ без учета ориентировки и с ее учетом. По данным авторов, без учета ориентировки среднее значение амплитуды тока молнии прорвавшейся сквозь тросовую защиту составляет 30 кА, с учетом ориентировки это значение снижается до 18 кА, что, без сомнения, существенно.

Если за исходное распределение амплитуд токов молний взять данные по России (кривая №2 на рис.1, для которой  $I_{mid1} = 20$  кА), то средний ток в фазный провод ВЛ 500 кВ составил бы  $I_{mid2} = I_{mid1} / K = 12$  кА.

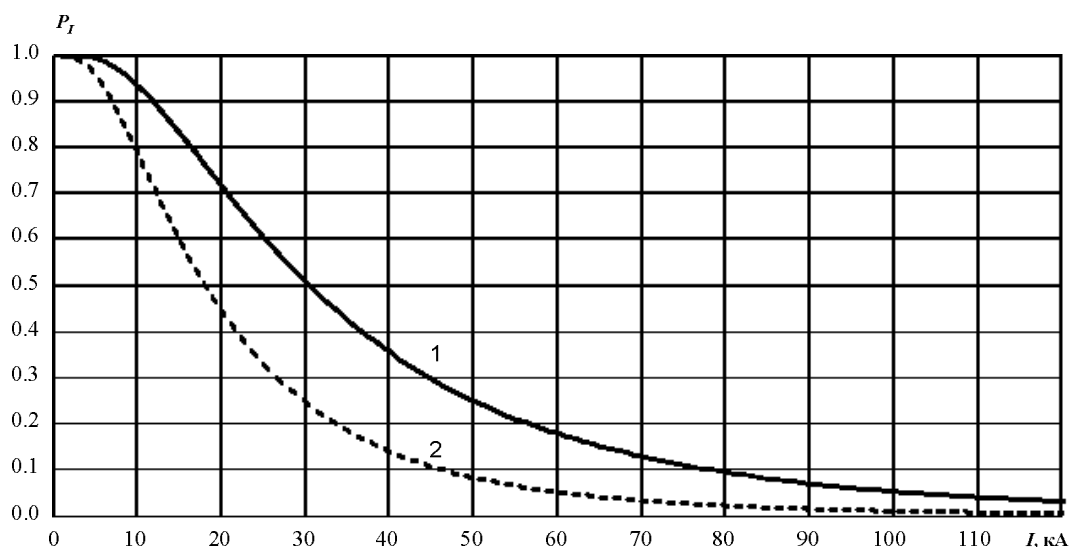


Рис.3. Исходное распределение вероятности появления токов заданных амплитуд (кривая 1) и его коррекция (кривая 2) для случая удара в фазный провод ВЛ 500 кВ.

**Пример №2.** Из рис.1 следует, что амплитуды токов молний, зафиксированные в Карелии (среднее значение тока 14 кА – кривые №3-4) меньше средних российских значений (кривая №2 - 20 кА).

Постараемся дать простое объяснение этому факту, для чего проведем аналогичные полученным для ударов в фазные провода ВЛ 500 кВ оценки.

В среднем по России согласно [1] полученная по косвенным измерениям на ВЛ средняя амплитуда тока молнии составляет 20 кА. Будем считать, что в статистику попали в основном случаи с малыми сопротивлениями  $Z_{об1}(I_{об1})=20$  Ом, так как измерения проводились с помощью датчиков закрепленных на, как правило, хорошо заземленных опорах ВЛ.

Для Карелии характерны скальные породы, удельное сопротивление которых достаточно высоко по сравнению со средними российскими величинами. Поэтому сопротивление растеканию тока молнии при его попадании в землю оказывается высоким, что и приводит к снижению амплитуд регистрируемых токов (рис.1).

В задачах грозозащиты часто используется зависимость величины сопротивления заземлителя от величины тока, стекающего по этому заземлителю. Эмпирически полученная формула, учитывающая пробивные процессы в грунте, выглядит следующим образом:  $R_z(i) = R_0 / (1 + i / I_g)^{0.5}$ , где

$I_g = E_g \frac{\rho}{2\pi R_0^2}$  в кА;  $R_0$  - сопротивление заземлителя постоянному току;  $\rho$  - удельное сопротивление грунта ( $Ом \cdot м$ );  $E_g$  - критическая напряженность начала искрообразования ( $кВ / м$ ).

Для Карелии значения  $R_0$  велики и формула может быть упрощена до вида

$$Z_{об2}(I_{об2}) = R_s(I_{об2}) = \sqrt{\frac{E_g \cdot \rho}{2\pi \cdot I_{об2}}}$$

Задавшись, для определенности, значениями  $\rho = 1000 \div 10000$   $Ом \cdot м$  и  $E_g = 1000$  кВ/м и проделав вычисления аналогичные описанным для ВЛ 500 кВ, получим снижение среднего тока с  $I_{mid1} = 20$  кА до  $I_{mid2} = 12$  кА.

Итак, полученное здесь при оценочных расчетах распределение амплитуд токов и значение среднего тока в месте удара молнии в землю удовлетворительно совпадают с данными эксперимента, представленными на рис.1.

Из результатов упрощенных расчетов для двух рассмотренных примеров (удары молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ и токи молнии в Карелии), следует что параметры импульса тока молнии для объектов энергетики могут существенно отличаться от накопленных статистических данных, полученных для других объектов.

Таким образом:

- в случае удара молнии в фазный провод, амплитуды токов молнии будут меньше, чем, например, в случае удара в хорошо заземленный трос той же ВЛ, по крайней мере для линий высших классов напряжения (из-за достаточной импульсной прочности линейной изоляции);
- в случае плохого заземления троса в расчетах следует ориентироваться на меньшие токи молнии, чем в случае его хорошего заземления;
- вероятности ударов в фазные провода или плохо заземленные тросы молнии с токами более 40 кА малы.

Традиционные средства грозозащиты (тросы) не всегда защищают от ударов молнии в фазные провода. При ударах молнии в тросы эффективность их работы сильно зависит от сопротивления заземления опор ВЛ. Поэтому в тех случаях, когда традиционными средствами грозозащиты не удается достичь требуемой грозоупорности, (велика доля ударов молнии в фазные провода, не обеспечить хорошего заземления опор ВЛ и т.п.) используют подвесные ОПН. В этих случаях задачей ОПН является защита изоляции ВЛ от перекрытий в первую очередь при ударах молнии в фазные провода и плохо заземленные тросы, а это именно те случаи, когда, как было показано выше, требуется корректировка с учетом специфики поражаемого объекта используемых в настоящее время параметров токов молнии.

## 2. Моделирование волны тока молнии

Так как параметры молнии существенны в задачах защиты изоляции ВЛ от грозových перенапряжений (в том числе с помощью ОПН), то возникает вопрос – о корректности использования в расчетах грозозащиты двухэкспоненциального импульса тока

$$i(t) = \gamma \cdot I_{\max} \cdot [\exp(-at) - \exp(-bt)], \quad (7)$$

где  $a$  и  $b$  определяются скоростями нарастания и спада тока молнии,  $\gamma$  - корректирующий фактор амплитуды тока молнии. Действительно, осциллограммы токов молнии свидетельствуют о наличии нулевой начальной производной, в то время как двухэкспоненциальный импульс имеет отличную от нуля производную в начальный момент времени.

Поэтому в различных публикациях предложено большое количество обеспечивающих нулевую начальную производную функций, моделирующих форму тока молнии.

Естественно, что предложения по изменению форм расчетных импульсов привели к попыткам более детального описания фронта импульса тока. Такие попытки сделаны по инициативе международного комитета CIGRE в целях “более достоверного учета опасных воздействий молнии на линии электропередач”. Предложен набор дополнительных параметров, благодаря которым снижается произвол в расшифровке осциллографических записей тока, а отдельные участки фронта получают количественное описание. Заметим, что введение дополнительных параметров существенно усложнило процедуру описания импульсов. Например, часто встречающееся выражение, обеспечивающее нулевую производную

$$i(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} x(t) \cdot y(t) = I_{\max} \cdot z(t) \cdot y(t), \quad (8)$$

где  $x(t) = \frac{(t/t_1)^n}{1+(t/t_1)^n}$ ,  $y(t) = \exp\left(-\frac{t}{t_2}\right)$ ,  $n$  - параметр, определяющий крутизну волны.

Использование модели тока (8), учитывающей нулевую производную в начальный момент времени, требует увеличения числа переменных, задающих параметры импульса в используемых для расчета программах. К тому же нет простых выражений, позволяющих связать крутизну импульса тока и параметр  $n$ . Общее число параметров в этой модели 4 ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\gamma=1/\eta$ ,  $n$ ), в то время как у двух экспоненциального импульса (7) всего 3 параметра ( $a$ ,  $b$ ,  $\gamma$ ).

Кроме того, нет аналитических выражений, по которым можно было бы найти для требуемых временных характеристик импульса тока (фронт и условная длительность) параметры моделирующей ток функции с нулевой начальной производной (8). Для двухэкспоненциального импульса (7) такие формулы есть и они достаточно просты. Заметим, что большинство испытательных импульсов (напряжения и тока), в силу простоты воспроизведения, согласно ГОСТ определяются именно как сумма двух экспонент. Введение импульса с нулевой производной тока может

затруднить сравнение результатов, получаемых расчетным путем и экспериментально.

В задачах грозозащиты важнейшими параметрами импульса тока молнии являются его крутизна и амплитуда. Наличие нулевой производной в начале кривой тока молнии, на первый взгляд, несущественно, так как соответствует малым мгновенным значениям тока, а значит и напряжения воздействующего на изоляцию электрооборудования.

В [3] отмечается, что особенно сильно отличие в способе моделирования тока молнии сказывается при анализе грозоупорности объекта при воздействии срезанной волны, т.е. волны, приведшей при набегании на объект к перекрытию изоляции. В подтверждение этих соображений приводится показанное на рис.4 сопоставление воздействующего на изоляцию напряжения при обоих способах моделирования тока молнии.

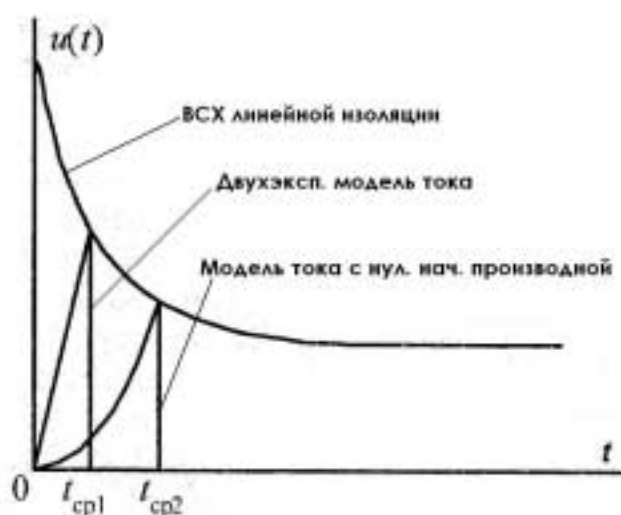


Рис.4. Определение амплитуд срезанных волн по [3].

Известно, что начальная форма напряжения мало влияет на разрядные характеристики изоляции. Этот факт нашел косвенное отражение и в ГОСТ, и в публикациях МЭК на методы испытания изоляции, согласно которым длительность фронта импульса напряжения определяются по двум контрольным точкам, соответствующим 0.3 и 0.9 амплитуды полного импульса (для импульсов тока используют 0.1 и 0.9).

В программах (PSCAD, EMTP), в которых учитываются вольт-секундные характеристики изоляции, как правило, используется следующий алгоритм: по факту появления на изоляции напряжения, превышающего некоторое “начальное” напряжение, запускается блок, моделирующий вольт-секундную характеристику изоляции. В случае, если мгновенное напряжение на изоляции превысит значение, получаемое к этому времени по запущенной вольт-секундной характеристике, - фиксируется факт пробоя изоляции. Наличие в блоке вольт-секундной характеристики необходимо для ее запуска “начального” напряжения и отражает тот факт, что начальная форма



воздействующего на изоляцию напряжения не влияет на пробивное напряжение.

Поэтому рис.4, заимствованный из [3], должен быть приведен к виду рис.5. Из рис.5 видно, что, задав должным образом “начальное” напряжение  $U_0$ , амплитуды срезаемых волн при различных способах моделирования волны тока молнии оказываются практически одинаковыми. Длительность фронта показанных на рис.5 срезаемых волн при ее определении согласно ГОСТ (по уровням 0.3 и 0.9 амплитуды) также близка для двух различных способов моделирования волны тока молнии.

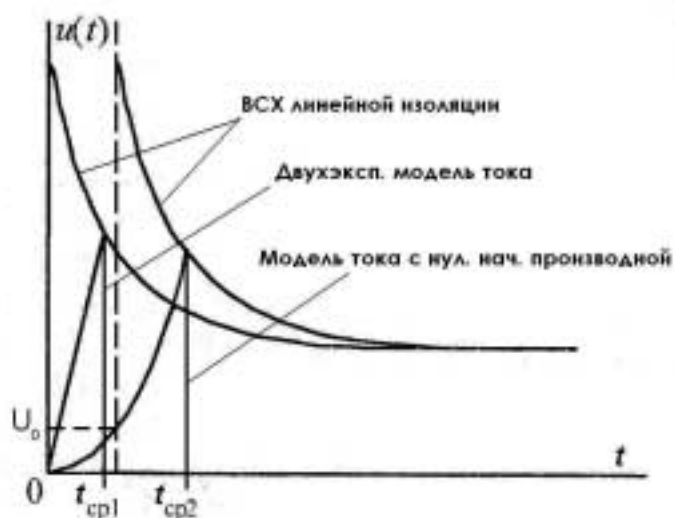


Рис.5. Определение параметров срезаемых волн.

Устранив наиболее серьезное по [3] следствие различия в способах моделирование волны тока молнии, получим, что нет какой-нибудь заметной разницы в получаемых результатах расчетов, проведенных с использованием различных форм тока молнии.

Тем не менее, иногда в расчетах использование импульса с нулевой начальной производной все же оправдано. Например, при рассмотрении удара молнии в опору без тросов, когда расчет с использованием двухэкспоненциального импульса приводит к нереально большим потенциалам вершины опоры в случае ее моделирования сосредоточенной индуктивностью.

Использование импульса с нулевой начальной производной также предпочтительно при определении допустимых расстояний от ОПН до защищаемого оборудования ПС в случае рассмотрения набегающих с линии волн большой крутизны (например, в случае отсутствия на подходах к ПС тросовой защиты на ВЛ, когда возможными становятся близкие к ПС прямые удары в фазные провода; или в случае ВЛ 500-750, когда удары в фазные провода часты и при наличии тросовой защиты), так как применение двухэкспоненциальной модели приводит к получаемому в расчетах сильному занижению размеров зон защиты оборудования с помощью ОПН.

### **3. Выводы**

При оценке грозоупорности ВЛ используемое в расчетах распределение амплитуд токов молнии должно быть скорректировано с учетом эквивалентного сопротивления поражаемого молнией объекта (фазный провод, плохо заземленный грозозащитный трос или опора ВЛ): амплитуды токов молнии при ее ударе в фазные провода ВЛ или плохо заземленные грозозащитные тросы будут существенно меньше таковых при ударе молнии в хорошо заземленные объекты.

Целесообразность использования в расчетах грозоупорности более сложной модели тока молнии с нулевой начальной производной определяется способом моделирования компонентов ВЛ и конкретной решаемой задачей. В большинстве случаев способ моделирования волны тока молнии не является критичным в задачах грозозащиты ВЛ.

### **Литература**

- [1] РАО «ЕЭС России». «Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений». Санкт-Петербург, Издательство ПЭИПК, 1999.
- [2] И.С. Стекольников. «Физика молнии и грозозащита». Москва – Ленинград, изд-во Академии наук СССР, 1943.
- [3] К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А.А. Рейхердт. «Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них». Новосибирск, изд-во НГТУ, 2004.