

5. ЗАЩИТА ВЛ 110-750 кВ ОТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН

Источником грозových перенапряжений на изоляции ВЛ могут быть как прямые удары молнии в ВЛ (в опору, в грозозащитный трос, в фазный провод), так и наведенное напряжение от ударов молнии в объекты вблизи ВЛ. Для обеспечения необходимого уровня грозоупорности ВЛ во всех этих случаях используют сочетания традиционных средств грозозащиты [1,20]: установку одного или нескольких грозозащитных тросов, снижение сопротивления заземления опор, рациональное расположение проводов на опоре, выбор типов опор для конкретной ВЛ.

В ряде случаев, в силу объективных причин (высокие значения сопротивления заземления опор ВЛ из-за высокого удельного сопротивления грунта, невозможность применения грозозащитных тросов из-за высоких ветро-гололедных нагрузок и т.п.) традиционные средства грозозащиты не могут обеспечить необходимую грозоупорность ВЛ. В таких случаях дополнительным, дорогим, но эффективным способом повышения грозоупорности ВЛ может стать установка ОПН на опорах ВЛ для защиты ее изоляции от перекрытий [1,20,52-64]. В ряде публикаций такие ОПН сокращенно называются «подвесными».

Эффективность повышения грозоупорности ВЛ при помощи установки подвесных ОПН подтверждена как многими теоретическими исследованиями расчетами, так и опытом эксплуатации. Несмотря на это, согласно [59] до сих пор нет единого мнения по многим вопросам, среди которых:

- выбор типа ОПН (с искровым промежутком или без);
- выбор мест размещения ограниченного числа комплектов ОПН на опоре (в верхние фазы, в нижние) наиболее эффективных с точки зрения снижения числа перекрытий изоляции ВЛ;
- основные требуемые характеристики ОПН и, прежде всего, его энергоемкость.

Обзор отечественных и зарубежных публикаций, результаты которого в сжатой форме приведены в [59], показал, что недостаточно изученными являются многие вопросы, связанные с расчетом и применением подвесных ОПН. Следствием этого в ряде случаев является использование некорректных расчетных моделей и принятие на основе выполненных расчетов некорректных технических решений. Малоизученными являются вопросы, понимание которых необходимо для правильного выбора характеристик ограничителей перенапряжений, такие, как форма импульсного тока в ОПН, максимальные токовые и энергетические нагрузки на ОПН. В России нет нормативных документов, регламентирующих установку ОПН на ВЛ, а зарубежные нормативные документы [20] содержат лишь рекомендации общего характера, которые не могут быть использованы для решения конкретной технической задачи. Учитывая изложенное, изучение переходных процессов при грозовых перенапряжениях в ВЛ, изоляция которой защищена подвесными ОПН, является важнейшей нерешенной задачей.

Ниже представлены разработанные соискателем упрощенные и полные модели для анализа грозовых перенапряжений на ВЛ; рассмотрена защита от грозовых перенапряжений изоляции ВЛ с помощью ОПН и предложены методические подходы к выбору их характеристик.

5.1. Основные типы подвесных ОПН и способ их присоединения к ВЛ

Подвесные ограничители перенапряжений ОПН устанавливаются на опорах ВЛ параллельно гирляндам линейных изоляторов, т.е. между фазным проводом и траверсой опоры. При этом используются два способа подключения оксидно-цинкового нелинейного сопротивления:

- без искрового промежутка;
- через искровой промежуток.

Общие требования к характеристикам и конструкции таких защитных аппаратов можно сформулировать следующим образом [56,58]:

- ограничители перенапряжений должны обеспечить отсутствие перекрытий линейной изоляции при грозовых перенапряжениях на ВЛ, т.е. обладать необходимыми защитными характеристиками;
- ограничители перенапряжений должны выдерживать без повреждений в течение срока своей службы совокупность эксплуатационных воздействий, в том числе, вызванных перенапряжениями на защищаемой изоляции;
- ограничители перенапряжений должны обеспечивать возможность эксплуатации ВЛ без немедленного проведения ремонтных работ в случае повреждения аппарата.

Расчеты [58] показывают, что в режиме ограничения грозовых перенапряжений величина остающегося напряжения ОПН слабо влияет на токи в нем. Это приводит к тому, что при одном и том же типе варисторов удельная выделяемая энергия не зависит от высоты столба варисторов в ОПН, а полная энергия оказывается пропорциональна высоте столба, или, что то же самое, остающемуся напряжению. Отсюда следует, что при сопоставлении требуемых характеристик ОПН (с искровым промежутком или без него) в расчетах целесообразно оперировать не полной, а удельной энергией аппаратов, называемой далее энергоемкостью.

Энергоемкость варисторов ОПН без искровых промежутков может быть выбрана меньшей, чем у варисторов ОПН с искровыми промежутками. Различие в требуемых энергоемкостях тем больше, чем на большем числе фаз и

опор ВЛ установлены защитные аппараты, так как от этого зависит степень возможной помощи защитных аппаратов друг другу. Поскольку влияние соседних ОПН друг на друга, а также влияние сопротивления заземления опор, удобнее рассматривать на ОПН с глухим подключением, то далее рассматриваются только аппараты без искрового промежутка.

5.2. Исследования условий работы ОПН при различных сопротивлениях заземления опор, различном числе и местах установки ОПН на опорах с использованием упрощенной модели ВЛ

При анализе грозовых перенапряжений на ВЛ 110-750 кВ расчетными случаями являются [1]:

- 1) удар в опору или удар в трос вблизи опоры, по своим последствиям приравниваемый к удару в опору (точка 1 на рис.5.1);
- 2) удар в трос в средней части пролета (точка 2 на рис.5.1);
- 3) прорыв молнии через тросовую защиту (точка 3 на рис.5.1).

Для ВЛ 110 кВ и выше с индуктированными перенапряжениями при ударах в землю можно не считаться, а общее число грозовых отключений ВЛ с тросом по указанным трем причинам ($i = 1,2,3$) определяется по формуле

$$n_i = N_i \cdot P_i \cdot \eta, \quad (5.1)$$

где N_i – число ударов молнии в i -й элемент ВЛ, P_i – вероятность импульсного перекрытия гирлянды изоляторов при ударе в i -й элемент ВЛ; η - вероятность перехода импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты (определяется по [1] и близка к 0.9).

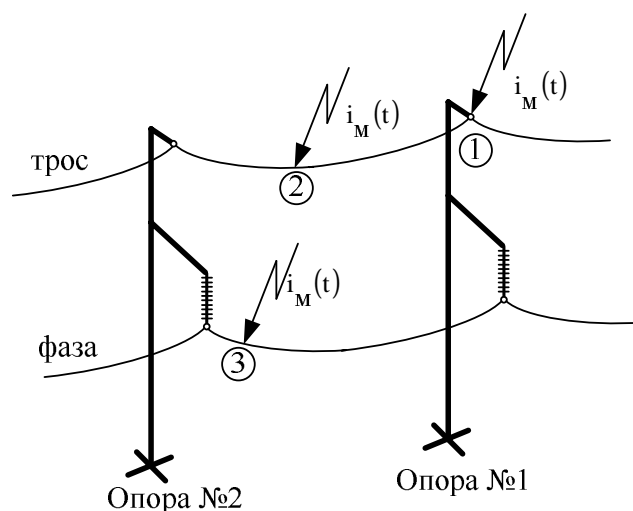


Рис.5.1. Источники грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ.

5.2.1. Упрощенная расчетная модель

При исследованиях с использованием упрощенной модели был сделан ряд допущений, касающихся моделирования элементов схемы рис.5.1.

Молния. Будем рассматривать молнию как идеальный источник тока, т.е. пренебрежем волновым сопротивлением канала молнии. Ток молнии будем считать постоянным, имеющим косоугольный фронт (рис.5.2):

$$i_{.м}(t) = \begin{cases} at & \text{при } \begin{cases} t \leq \tau_{\phi} \\ t > \tau_{\phi} \end{cases}, \end{cases} \quad (5.2)$$

где I_{\max} – амплитуда тока молнии (кА), τ_{ϕ} – длительность фронта тока молнии (мкс), $a = I_{\max} / \tau_{\phi}$ – крутизна тока молнии (кА/мкс).

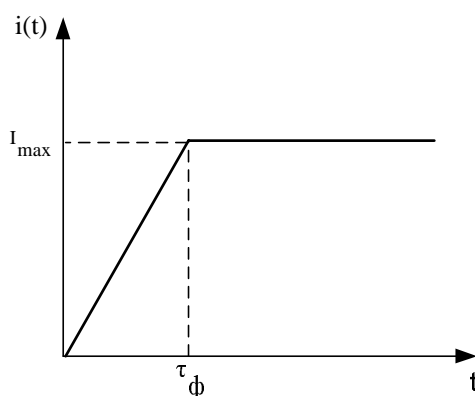


Рис.5.2. Косоугольный импульс тока молнии.

Фазные провода и тросы. Расчеты в схеме замещения ВЛ, показанной на рис.5.1, проведем на примере ВЛ 110 кВ, выполненной на железобетонных опорах типа ПБ-110.5 (рис.5.3). Эту воздушную линию представим совокупностью расположенных между опорами участков ВЛ (пролетов), грозозащитные тросы и провода в которых будем моделировать отрезками “длинных линий”. Не будем учитывать импульсную корону, уменьшающую волновые сопротивления проводов и тросов, а также снижающую скорость распространения электромагнитной волны вдоль них. С целью упрощения расчетной схемы будем рассматривать ВЛ состоящей только из одного фазного провода и грозозащитного троса, как показано на рис.5.1.

Примем полученные расчетом в программном комплексе ЕМТР [5] для волновых сопротивлений верхнего фазного провода и грозозащитного троса (рис.5.3) значения соответственно $Z_{\phi} = 575.5$ Ом и $Z_m = 624.3$ Ом, взаимное волновое сопротивление верхнего фазного провода и троса – $Z_{\phi m} = 222$ Ом. Эти параметры рассчитаны для частоты $f = 50$ Гц при удельном сопротивлении грунта $\rho = 100$ Ом·м (без учета частотных зависимостей параметров ВЛ, а также коронирования проводов и тросов).

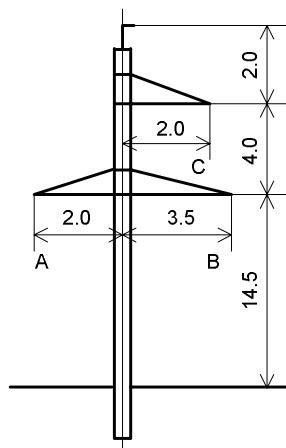


Рис.5.3. Ж/б опора ВЛ 110 кВ типа ПБ-110.5 по [13].

Опора ВЛ. Потенциал вершины опоры определяется суммой падений напряжения на индуктивности опоры и на ее заземлителе (погонная индуктивность опоры составляет величину около $0.5 \div 1.0$ мкГн/м [1]). При больших амплитудах тока молнии и относительно длинных фронтах падение напряжения на заземлителе опоры может достигать значений, во много раз превышающих падение напряжения на индуктивности опоры, что позволяет в первом приближении пренебречь индуктивностью опоры; при коротких волнах индуктивностью опоры пренебрегать нельзя. Далее при определении в упрощенной расчетной модели потенциала вершины опоры и перенапряжений, действующих на изоляцию ВЛ, будем учитывать только падение напряжения на заземлителе опоры, пренебрегая падением напряжения на теле опоры, т.е. ее индуктивностью.

Изоляция ВЛ. В соответствии с изложенным в первой главе вольт-секундную характеристику линейной изоляции (гирлянд изоляторов на опоре) будем описывать выражением (1.2). Для рассматриваемой ВЛ 110 кВ на опорах ПБ-110.5 примем длину гирлянды изоляторов ВЛ 110 кВ $L = 1.25$ м.

ОПН. При моделировании переходных процессов вольтамперную характеристику ОПН будем аппроксимировать степенной функцией $U(I) = AI^\alpha$,

где величина $A = \frac{U_{опн}}{I_{опн}^\alpha}$ такова, что при амплитуде импульса тока через ОПН 10

кА остающееся на аппарате напряжение составит 300 кВ (кривая 1 на рис.5.4).

При больших токах, протекающих через ОПН (килоамперы, десятки килоампер), остающееся на нем напряжение слабо зависит от величины тока, что позволяет вольтамперную характеристику реального нелинейного ограничителя перенапряжений в упрощенных расчетах заменить внешней характеристикой идеального источника напряжения (кривая 2 на рис.5.4), которой в расчетной схеме будет соответствовать источник напряжения $U_{опн}$ (рис.5.5). Необходимо отметить, что такая замена допустима только при условии воздействия на ОПН напряжения $|u(t)|$, большего, чем величина $U_{опн}$. Замену по рис.5.5 будем использовать лишь при выводе ряда формул.

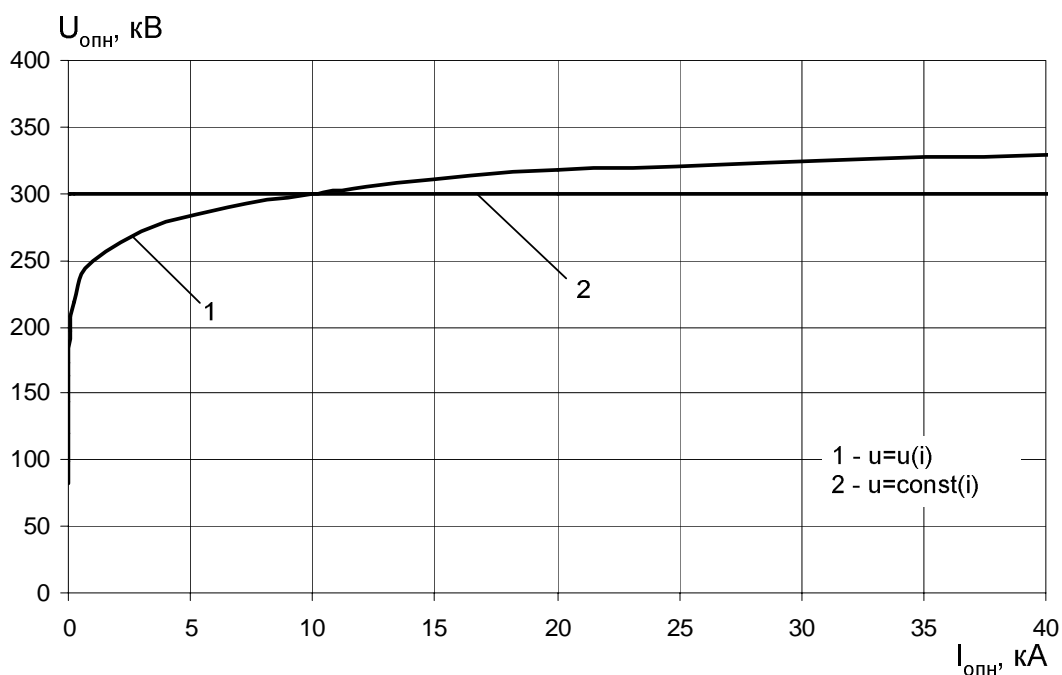


Рис.5.4. Вольтамперная характеристика ОПН 110 кВ и ее упрощение.

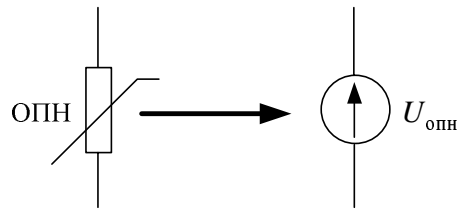


Рис.5.5. Упрощенная модель ОПН.

5.2.2. Расчет перенапряжений на изоляции ВЛ в упрощенной модели

Удар молнии в трос на опоре

Рассмотрим удар молнии в трос на опоре ВЛ, перекрытия изоляции при котором принято называть «обратными», т.е. происходящими с заземленных конструкций опоры на фазные провода.

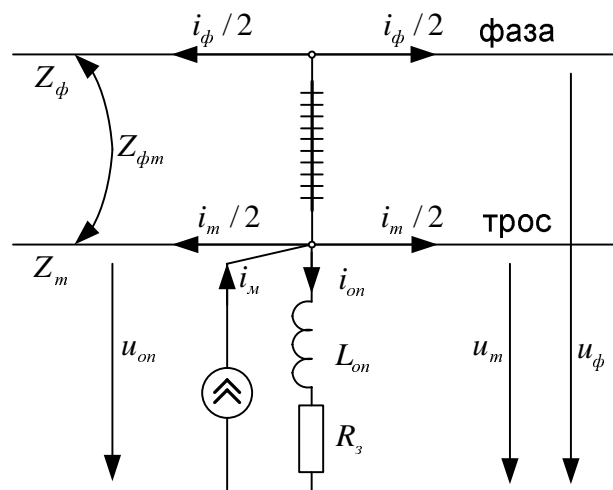


Рис.5.6. Расчетная схема при ударе молнии в вершину опоры №1 (показаны напряжения относительно земли троса u_m , опоры u_{on} , фазного провода u_ϕ ; ток в тросе, опоре, фазном проводе; ток молнии i_m ; индуктивность опоры L_{on} и ее сопротивление заземления R_3).

Система «фазный провод – заземленный трос», при принятых на рис.5.6 обозначениях, при ударе в вершину опоры описывается следующей группой уравнений (без учета соседних опор):

$$U_\phi(p) = Z_\phi \cdot \frac{I_\phi(p)}{2} + Z_{\phi m} \cdot \frac{I_m(p)}{2},$$

$$U_m(p) = Z_{\phi m} \cdot \frac{I_\phi(p)}{2} + Z_m \cdot \frac{I_m(p)}{2},$$

$$U_{on}(p) = U_m(p) = (pL_{on} + R_3) \cdot I_{on}(p),$$

$$I_m(p) = I_m(p) + I_{on}(p),$$

$$I_\phi(p) = 0.$$

Фронт импульса тока молнии косоугольной формы $i_m(t) = at$ имеет операторное изображение $I_m(p) = \frac{a}{p^2}$ (справедливо до момента $t = t_{\phi p}$). Введем

обозначение $\tau = \frac{L_{on}}{R_3 + Z_m / 2}$ – условная постоянная времени процесса.

Решив систему уравнений, определим

$$U_m(p) = \frac{(pL_{on} + R_3) \cdot Z_m / 2}{pL_{on} + (R_3 + Z_m / 2)} \cdot I_m(p) = \frac{aL_{on} \cdot Z_m / 2}{p[pL_{on} + (R_3 + Z_m / 2)]} + \frac{aR_3 \cdot Z_m / 2}{p^2[pL_{on} + (R_3 + Z_m / 2)]},$$

$$U_\phi(p) = \frac{Z_{\phi m}}{Z_m} \cdot U_m(p).$$

Напряжение, воздействующее на изоляцию,

$$U_\phi(p) - U_m(p) = -\left[1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m}\right] \cdot U_m(p);$$

оригинал этого напряжения:

$$u_{уз}(t) = -\left[1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m}\right] \cdot \left\{ at \cdot \frac{Z_m R_3}{Z_m + 2R_3} + \frac{a\tau}{2} \cdot \frac{Z_m^2}{Z_m + 2R_3} \cdot \left[1 - \text{EXP}\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right] \right\}.$$

В случае малой индуктивности опоры напряжение, воздействующее на изоляцию, будет

$$u_{уз}(t) = -\left[1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m}\right] \cdot at \cdot \frac{Z_m R_3}{Z_m + 2R_3},$$

т.е. по абсолютной величине меньше, чем в случае с индуктивностью.

С момента времени $t = \tau_{\phi p}$ ток молнии уже описывается выражением $i_m(t) = at - a(t - \tau_{\phi p}) = a\tau_{\phi p} = I_m$.

Полученные в ЕМТР осциллограммы напряжения, воздействующего на изоляцию фазы, при ударе молнии (отрицательной полярности с амплитудой 40 кА и фронтом 1 мкс) в опору с сопротивлением заземления 50 Ом, приведены на рис.5.7.

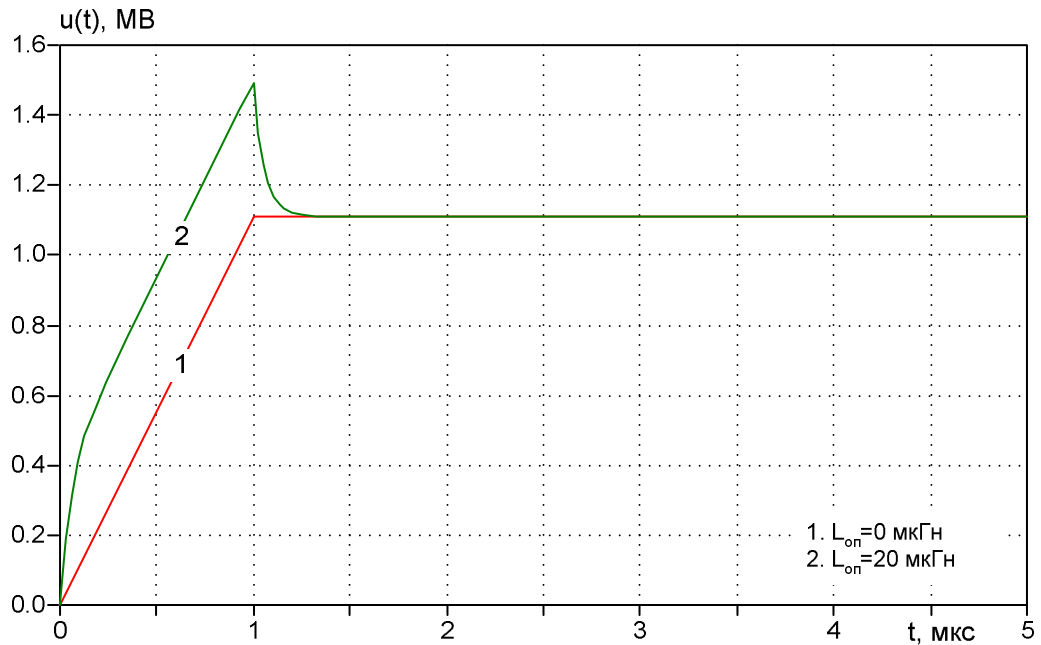


Рис.5.7. Удар молнии с косоугольным фронтом в опору.
Влияние индуктивности опоры на перенапряжения на изоляции.

Видно, что наличие индуктивности опоры приводит к увеличению воздействующего на изоляцию напряжения. Очевидно, что отличие кривых 1 и 2 рис.5.7 будет тем больше, чем больше крутизна импульса тока молнии, т.к. с ростом крутизны тока молнии растет падение напряжения на индуктивности опоры.

После прихода по тросу волн тока и напряжения, отраженных от соседних с пораженной молнией опор, форма напряжения на рассматриваемой гирлянде изоляторов изменится. Проанализируем этот процесс с помощью схемы, изображенной на рис.5.8.

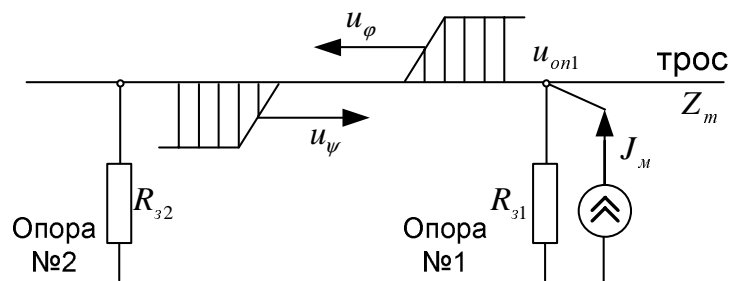


Рис.5.8. Схема для расчета волновых процессов в тросе.

Пусть время пробега волной одного пролета ВЛ длиной l_{np} составляет $\tau_{np} = l_{np} / v$. В интервале времени $0 \leq t < 2 \cdot \tau_{np}$ влияния волн отраженных от опоры №2 еще нет, а потенциал вершины опоры №1 будет

$$u_{on1} = u_{\varphi} = \frac{R_{31} \cdot Z_m}{Z_m + 2 \cdot R_{31}} \cdot J_m.$$

Волна u_{φ} , дойдя до опоры №2, отразится с коэффициентом отражения

$$K_{omp2} = \frac{Z_m \| R_{32} - Z_m}{Z_m \| R_{32} + Z_m} = \frac{-Z_m}{Z_m + 2R_{32}}.$$

Отраженная волна $u_{\psi} = K_{omp2} \cdot u_{\varphi}$ направится к опоре №1. При времени $t \geq 2 \cdot \tau_{np}$ потенциал вершины опоры №1 будет определяться из выражения

$$u_{on1} = u_{\varphi} + K_{прел1} \cdot u_{\psi},$$

где $K_{прел1} = 1 - K_{omp1} = \frac{2R_{31}}{Z_m + 2 \cdot R_{31}}$ – коэффициент преломления волн,

$K_{omp1} = \frac{Z_m \| R_{31} - Z_m}{Z_m \| R_{31} + Z_m} = \frac{-Z_m}{Z_m + 2R_{31}}$ – коэффициент отражения волн.

Для потенциала опоры в интервале времени $2 \cdot \tau_{np} \leq t < 4 \cdot \tau_{np}$ получим выражение

$$u_{on1}(t) = \frac{R_{31} \cdot Z_m}{Z_m + 2 \cdot R_{31}} \cdot J_m \cdot \left\{ 1 - 1(t - 2\tau_{np}) \cdot \frac{2R_{31} \cdot Z_m}{(Z_m + 2R_{31}) \cdot (Z_m + 2R_{32})} \right\}.$$

Видно, что приход к пораженной опоре №1 волны отраженной от соседней опоры (№2) снижает напряжение на вершине рассматриваемой опоры, и, тем самым, воздействующее на гирлянду линейных изоляторов напряжение, которое определяется как

$$u_{uz}(t) = - \left[1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m} \right] \cdot u_{on1}(t).$$

Помощь соседней опоры тем эффективней, чем ближе к единице выражение

$$\frac{2R_{31} \cdot Z_m}{(Z_m + 2R_{31}) \cdot (Z_m + 2R_{32})} = \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_m}{2R_{31}} \right) \cdot \left(1 + \frac{2R_{32}}{Z_m} \right)},$$

т.е. чем больше R_{31} и меньше R_{32} . Иными словами, влияние соседней опоры тем заметнее, чем лучше она заземлена по сравнению с пораженной опорой. Кроме того, «помощь» соседней опоры наступит тем быстрее, чем ближе она к пораженной опоре, т.е. чем меньше l_{np} .

Примеры осциллограмм перенапряжений на изоляции фазы ВЛ на рис.5.9-5.12 получены при следующих условиях в схеме рис.5.1: молния (амплитуда 40 кА, фронт 1 или 5 мкс) попадает в трос на опоре №1, сопротивление заземления которой $R_{31} = 50$ Ом; индуктивность опор опущена, что несколько снижает перенапряжения на изоляции. На рис.5.9-5.12 нанесена вольт-секундная характеристика воздушной изоляции ВЛ 110 кВ, а также напряжение, которое было бы на изоляции в отсутствии опоры №2.

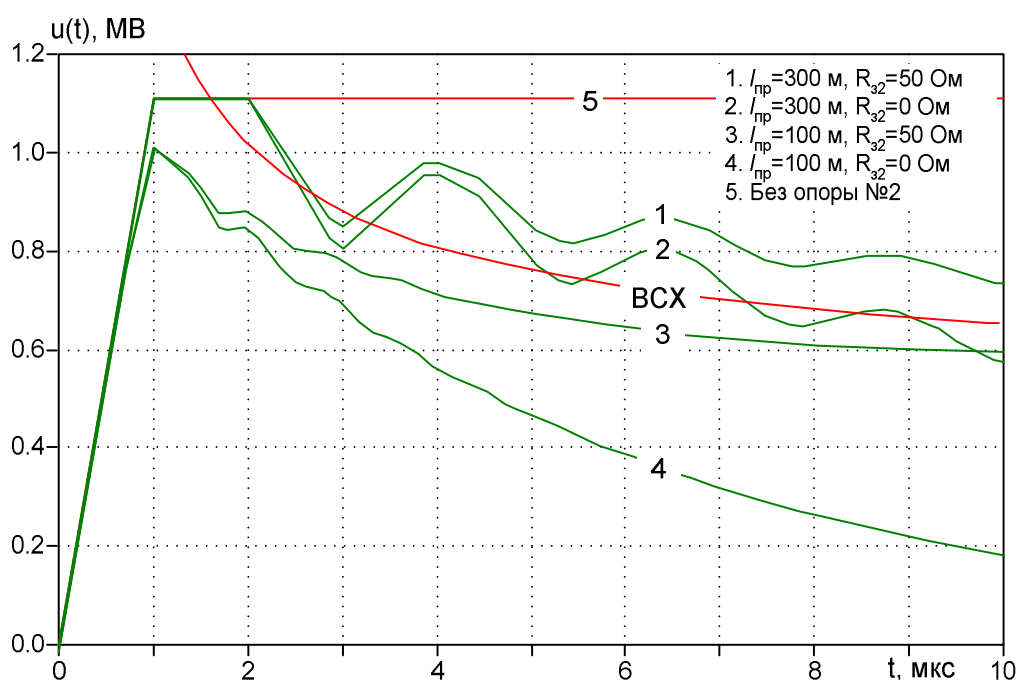


Рис.5.9. Напряжение на изоляции ВЛ. Удар молнии (40 кА, $\tau_\phi = 1$ мкс) в трос на опоре №1. ОПН нет.

Из сопоставления рис.5.9 и 5.10 видно, что:

- на перенапряжения на изоляции оказывает влияние сопротивление заземления соседней опоры R_{32} , а также соотношение между расстоянием до нее l_{np} и длительностью фронта импульса тока молнии τ_ϕ ;

- в большинстве случаев наличие соседней, пусть даже хорошо заземленной, опоры при выбранной амплитуде тока молнии (40 кА) не позволяет надежно защитить изоляцию от перекрытия (случаи 1,2 на рис.5.9 и 1,2,3 на рис.5.10).

Уменьшить воздействующее на изоляцию напряжение можно, снизив сопротивление заземления пораженной опоры, однако если это трудновыполнимо, то на ВЛ можно установить ОПН (на пораженной опоре – условно обозначим как ОПН1, на соседней опоре – ОПН2).

На рис.5.11-5.12 показано:

- установка ОПН эффективна, главным образом, на пораженной опоре (отсутствие перекрытий в случае 4 на рис.5.11-5.12), т.е. установка ОПН1;
- при выбранной амплитуде тока молнии как снижение сопротивления заземления соседних опор, так и установка на соседней опоре ОПН (ОПН2) малоэффективны (перекрытия в случаях 1,2 на рис.5.11 и рис.5.12).

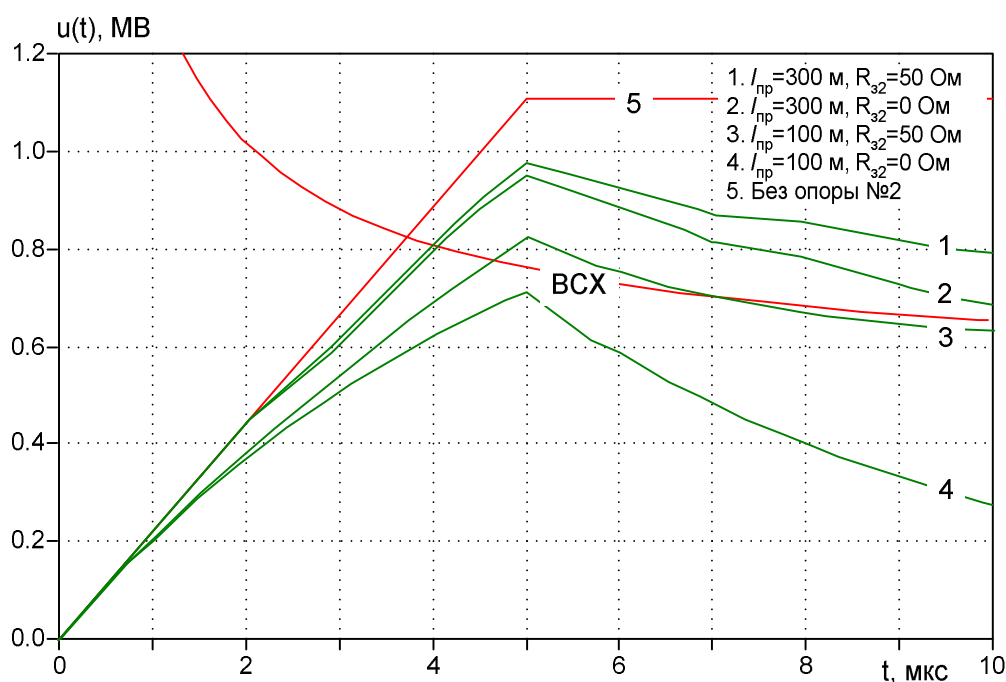


Рис.5.10. Напряжение на изоляции ВЛ. Удар молнии (40 кА, $\tau_{\phi} = 5$ мкс) в трос на опоре №1. ОПН нет.

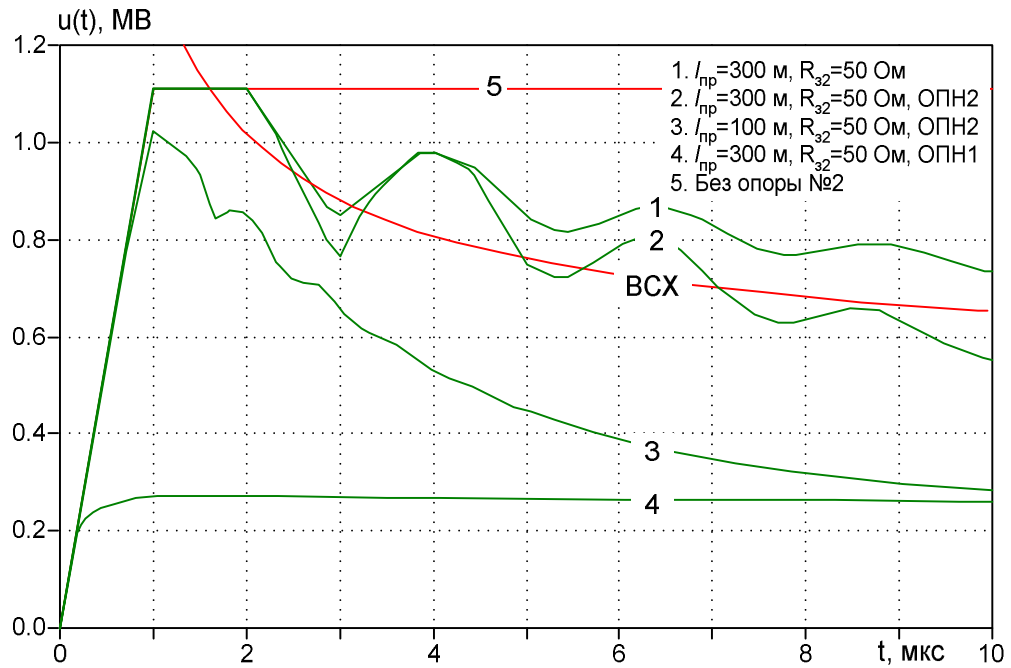


Рис.5.11. Напряжение на изоляции ВЛ на опоре №1. Удар молнии (40 кА, $\tau_{\phi} = 1$ мкс) в трос на опоре №1. Установлен один ОПН (на опоре №2 или на опоре №1).

Итак, установка ОПН для защиты линейной изоляции от обратных перекрытий при ударах молнии в грозозащитный трос наиболее эффективна непосредственно на поражаемой опоре параллельно гирлянде изоляторов (кривая 4 на рис.5.11-5.12).

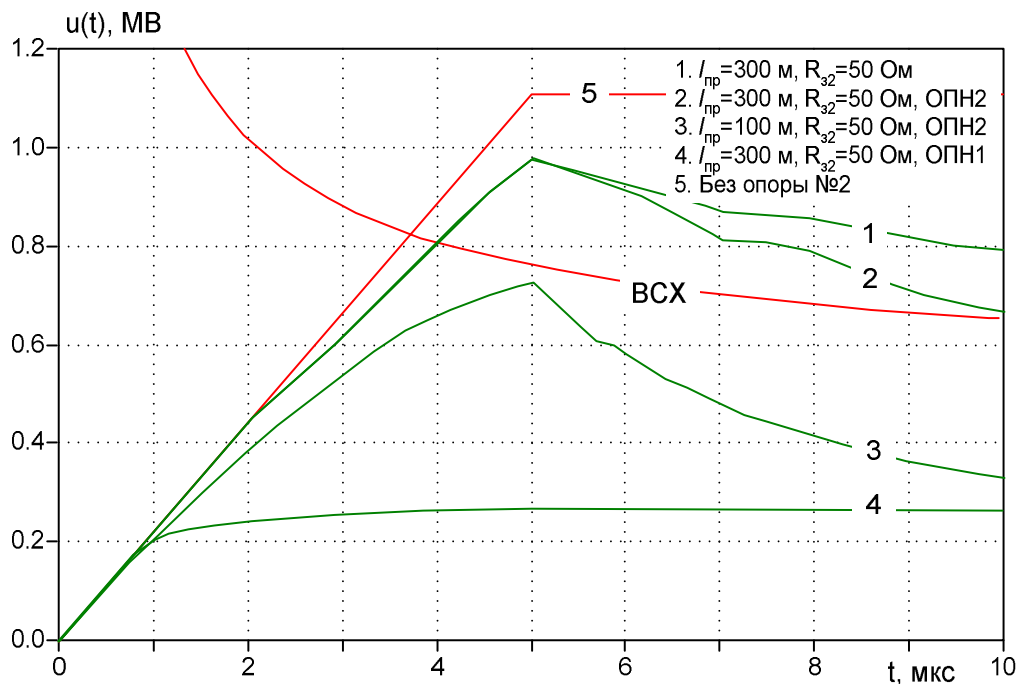


Рис.5.12. Напряжение на изоляции ВЛ на опоре №1. Удар молнии (40 кА, $\tau_{\phi} = 5$ мкс) в трос на опоре №1. Установлен один ОПН (на опоре №2 или на опоре №1).

Удар молнии в фазный провод на опоре

Молния может прорваться сквозь тросовую защиту к фазному проводу практически в любой точке линии (на опоре, в пролете). Так как угол тросовой защиты для линий с тросами минимален в пролете (трос натянут сильнее провода), то вероятность прорыва молнии на фазный провод существенно выше вблизи опоры. Поэтому в дальнейшем упрощенно будем считать, что все удары в фазный провод для линий с тросами происходят вблизи от опоры.

Система «фазный провод – заземленный трос» (рис.5.13) при ударе в фазный провод на опоре может быть описан следующей совокупностью уравнений (без учета соседних опор):

$$U_{\phi}(p) = Z_{\phi} \cdot \frac{I_{\phi}(p)}{2} + Z_{\phi m} \cdot \frac{I_m(p)}{2},$$

$$U_m(p) = Z_{\phi m} \cdot \frac{I_{\phi}(p)}{2} + Z_m \cdot \frac{I_m(p)}{2},$$

$$U_{on}(p) = (pL_{on} + R_3) \cdot I_{on}(p) = U_m(p) = -(pL_{on} + R_3) \cdot I_m(p),$$

$$I_{\phi}(p) = I_m(p),$$

$$I_m(p) = I_{on}(p).$$

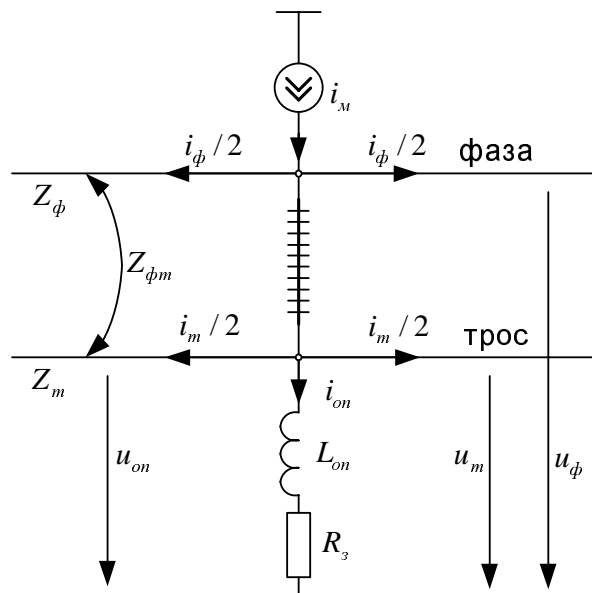


Рис.5.13. Расчетная схема при ударе молнии в фазу на опоре №1.

Решив систему уравнений, определим

$$U_{\phi}(p) = \left[Z_{\phi} - \frac{Z_{\phi m}^2}{2pL_{on} + 2R_3 + Z_m} \right] \cdot \frac{I_M(p)}{2}, \quad U_m(p) = \frac{Z_{\phi m}(2pL_{on} + 2R_3)}{2pL_{on} + 2R_3 + Z_m} \cdot \frac{I_M(p)}{2}.$$

Напряжение, воздействующее на изоляцию,

$$U_{\phi}(p) - U_m(p) = \left[(Z_{\phi} - Z_{\phi m}) + \frac{Z_{\phi m}(Z_m - Z_{\phi m})}{2pL_{on} + 2R_3 + Z_m} \right] \cdot \frac{I_M(p)}{2};$$

оригинал этого напряжения:

$$u_{uz}(t) = \frac{at}{2} \cdot \left[(Z_{\phi} - Z_{\phi m}) + \frac{Z_{\phi m}(Z_m - Z_{\phi m})}{2R_3 + Z_m} \right] - \frac{a\tau}{2} \cdot \frac{Z_{\phi m}(Z_m - Z_{\phi m})}{(2R_3 + Z_m)} \cdot \left[1 - \text{EXP}\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right].$$

В случае отсутствия индуктивности опоры напряжение на изоляции

$$u_{uz}(t) = \frac{at}{2} \cdot \left[(Z_{\phi} - Z_{\phi m}) + \frac{Z_{\phi m}(Z_m - Z_{\phi m})}{2R_3 + Z_m} \right],$$

т.е. больше, чем с учетом индуктивности.

После момента $t = \tau_{\phi p}$ (момент достижения током молнии своего максимального значения) в выражение добавляется слагаемое $-u_{uz}(t - \tau_{\phi p})$.

Через интервал времени $\Delta t = 2\tau_{np}$ к рассматриваемой опоре №1 по фазному проводу придут волны, обусловленные отражением от того места фазного провода, в котором находится заземленная опора №2. Можно показать, что при ударе в фазный провод заземление опоры №1 и ее индуктивность, а тем более заземление опоры №2, слабо влияют на перенапряжения, воздействующие на изоляцию.

Примеры осциллограмм напряжений, воздействующих на изоляцию фазы ВЛ, приведены на рис.5.14-5.15: в схеме рис.5.1 моделируются две опоры №1 (R_{s1}) и №2 (R_{s2}); молния положительной полярности (амплитуда 40 кА, фронт 1 или 5 мкс) ударяет в фазный провод на опоре №1, сопротивление заземления которой $R_{s1} = 50$ Ом; индуктивность опор опущена, что несколько снижает перенапряжения на изоляции. На рис.5.14-5.15 нанесена вольт-секундная характеристика воздушной изоляции ВЛ 110 кВ, а также напряжение, которое было бы на изоляции в отсутствии на ВЛ опоры №2.

На рис.5.14-5.15 показано:

- при ударах в фазные провода перенапряжения на изоляции (при тех же токах молнии) существенно выше, чем в случае удара в заземленный трос;
- для защиты изоляции при ударах в фазные провода можно использовать ОПН подвешного исполнения;
- эффективно защитить изоляцию опоры №1, на которой молния ударила в фазу, можно установкой ОПН на этой же опоре (ОПН1), а ОПН соседних опор (ОПН2) помочь эффективно снизить перенапряжения на интересующей гирлянде изоляторов не успевают.

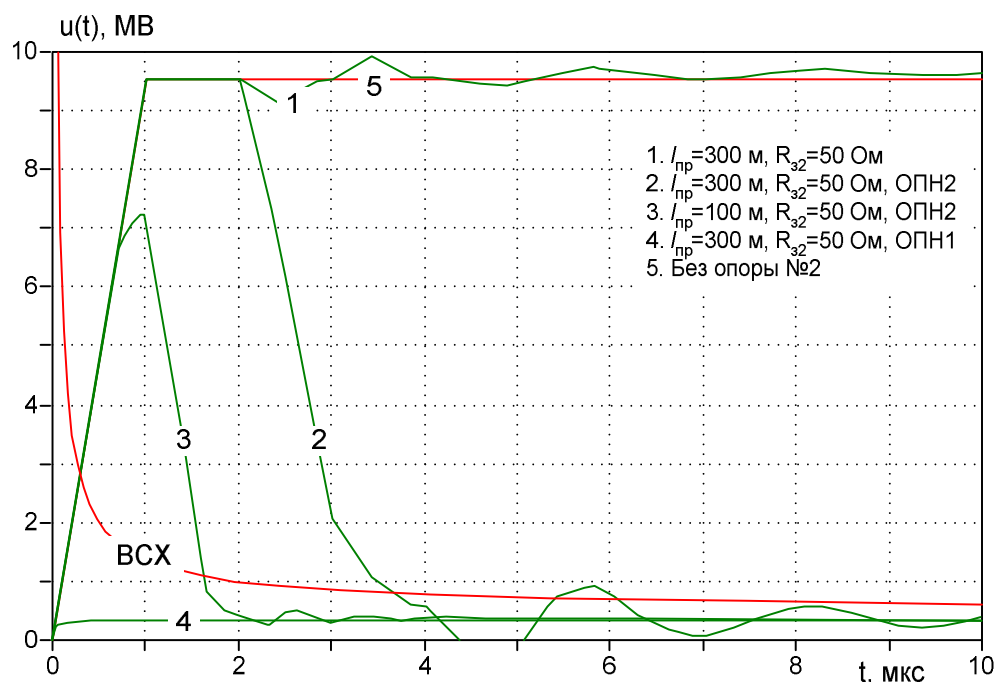


Рис.5.14. Напряжение на изоляции ВЛ на опоре №1. Удар молнии (40 кА, $\tau_{\phi} = 1$ мкс) в фазу на опоре №1. Установлен один ОПН (на опоре №2 или на опоре №1).

5.2.3. Упрощенный расчет токов в подвесных ОПН

В наиболее тяжелых условиях находятся те ОПН, которые расположены ближе всего к месту удара молнии, поэтому в схеме рис.5.1 рассмотрим случай, когда молния попадает в трос или фазный провод на той опоре, на которой установлен ОПН (пусть это опора №1). Наибольший интерес представляет амплитуда импульса тока в ОПН, и поэтому при выводе соответствующих аналитических выражений достаточно рассмотреть начало переходного

процесса, т.е. интервал $t \leq 2\tau_{np}$, а также упрощенно не будем учитывать индуктивность опоры, что позволяет не применять операторный метод.

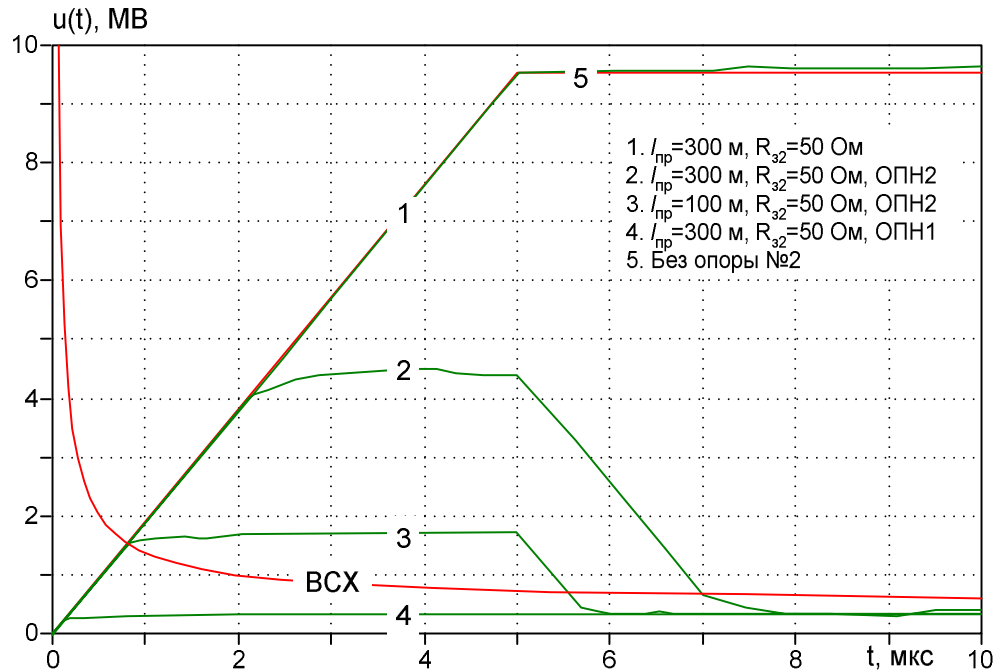


Рис.5.15. Напряжение на изоляции ВЛ на опоре №1. Удар молнии (40 кА, $\tau_{\phi} = 5$ мкс) в фазу на опоре №1. Установлен один ОПН (на опоре №2 или на опоре №1).

Удар молнии в трос на опоре

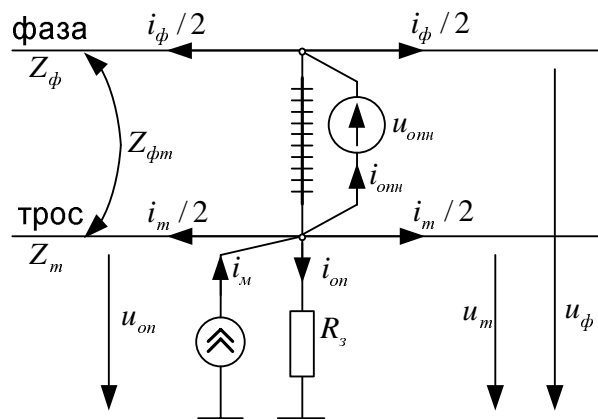


Рис.5.16. Расчетная схема при ударе молнии в вершину опоры №1 при наличии на ней ОПН1 (показаны напряжения относительно земли троса u_m , опоры u_{on} , фазного провода u_{ϕ} ; ток в тросе, в опоре, в фазном проводе, в ОПН; ток молнии i_m ; индуктивность опоры L_{on} и ее сопротивление заземления R_3).

Система «фазный провод – заземленный трос – ОПН», при принятых на рис.5.16 обозначениях, при ударе в вершину опоры может быть описана следующей группой уравнений (без учета соседних опор, т.е. при $t \leq 2\tau_{np}$):

$$u_{\phi} = Z_{\phi} \cdot \frac{i_{\phi}}{2} + Z_{\phi m} \cdot \frac{i_m}{2},$$

$$u_m = Z_{\phi m} \cdot \frac{i_{\phi}}{2} + Z_m \cdot \frac{i_m}{2},$$

$$u_m = u_{\phi} + u_{онн},$$

$$i_m = i_{\phi} + i_m + i_{он},$$

$$u_m = u_{он} = i_3 R_3.$$

После преобразований получим напряжение вершины опоры относительно земли

$$u_m = 0.5 \frac{i_m \cdot \left(Z_{\phi} - \frac{Z_{\phi m}^2}{Z_m} \right) + 2 \cdot u_{онн} \left(1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m} \right)}{\left(\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{2 \cdot R_3} \right) \cdot \left(Z_{\phi} - \frac{Z_{\phi m}^2}{Z_m} \right) + \left(1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m} \right)^2};$$

напряжение, воздействующее на гирлянду изоляторов

$$u_{\phi} - u_m = -u_{онн};$$

токи в фазном проводе и в ОПН

$$i_{онн} = i_{\phi} = \frac{-2u_{онн} \cdot \left(\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{2 \cdot R_3} \right) + i_m \cdot \left(1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m} \right)}{\left(\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{2 \cdot R_3} \right) \cdot \left(Z_{\phi} - \frac{Z_{\phi m}^2}{Z_m} \right) + \left(1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m} \right)^2}.$$

Из последнего выражения видно:

- с ростом остающегося напряжения $u_{онн}$ ток в ОПН $i_{онн}$ падает;
- с ростом сопротивления заземления R_3 ток в ОПН $i_{онн}$ увеличивается, т.е. в наиболее тяжелых условиях находится тот ОПН, для опоры которого $R_3 = \infty$.

Для этого случая

$$i_{онн} = \frac{-2u_{онн} + i_m \cdot (Z_m - Z_{\phi m})}{(Z_{\phi} - Z_{\phi m}) + (Z_m - Z_{\phi m})},$$

и чтобы оценить амплитуду тока в ОПН, примем $u_{онн} = 0$, тогда

$$i_{онн} = \frac{i_m}{1 + \frac{Z_\phi - Z_{\phi m}}{Z_m - Z_{\phi m}}},$$

т.е. даже в самом неблагоприятном случае (нет заземления пораженной опоры, нет соседних опор) амплитуда тока в ОПН ориентировочно не превысит половины тока молнии $i_{онн} \leq \frac{i_m}{2}$.

- если на опоре ВЛ установлено сразу 3 подвесных ОПН (по одному в каждую из трех фаз ВЛ), то амплитуда тока в каждом из присоединенных к опоре ОПН в самом неблагоприятном случае будет не более $i_{онн} \leq \frac{i_m}{6}$ (без учета различия волновых сопротивлений фазных проводов и их взаимного влияния);
- если принять, что в вершину опоры с очень высоким сопротивлением заземления ударила молния, амплитуда импульса тока которой соответствует среднестатистической (20-30 кА), то амплитуда тока в каждом из трех присоединенных к опоре ОПН будет заведомо не более 4-5 кА;
- если принять, что в вершину опоры с очень высоким сопротивлением заземления ударила молния, амплитуда импульса тока которой уже очень маловероятна (например, 240 кА), то амплитуда тока в каждом из трех присоединенных к опоре ОПН никогда не будет более 40 кА.

Полученные в схеме рис.5.1 примеры осциллограмм импульсов тока в единственном установленном на ВЛ ОПН (или ОПН1, или ОПН2) приведены на рис.5.17-5.18, которые соответствуют рис.5.11-5.12 (молния 40 кА ударяет в опору №1, $R_{з1} = 50$ Ом, индуктивность опоры не учтена).

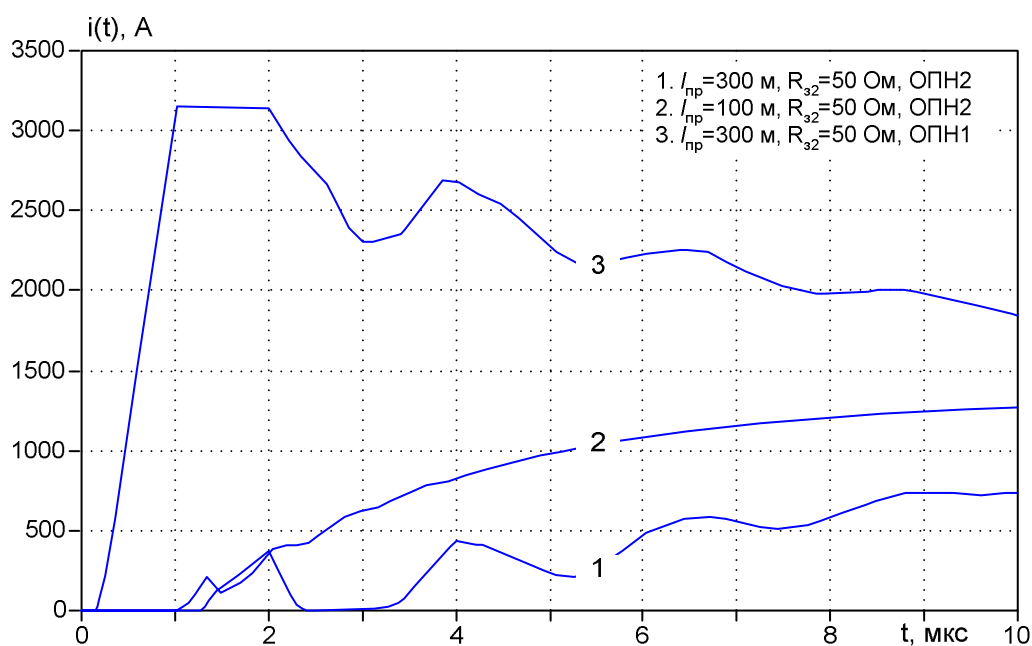


Рис.5.17. Удар молнии (40 кА, $\tau_\phi = 1$ мкс) в вершину опоры №1 ($R_{з1} = 50$ Ом). Ток в единственном установленном ОПН (кривые 1-2 – случай ОПН2 на опоре №2, соседней с пораженной; кривая 3 – случай ОПН1 на пораженной опоре №1).

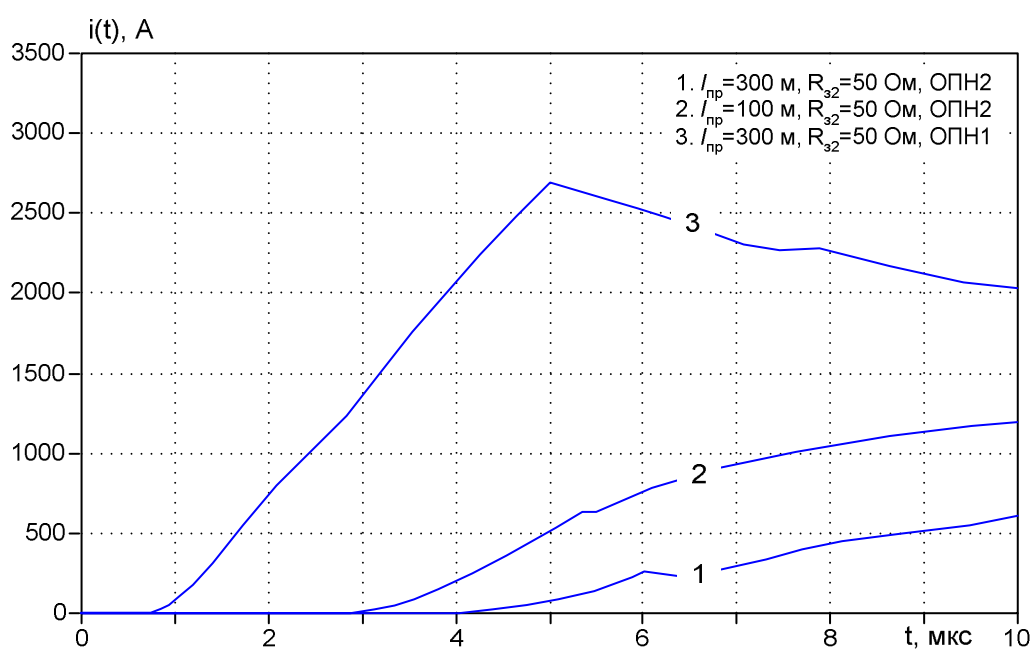


Рис.5.18. Удар молнии (40 кА, $\tau_\phi = 5$ мкс) в вершину опоры №1 ($R_{з1} = 50$ Ом). Ток в единственном установленном ОПН (кривые 1-2 – случай ОПН2 на опоре №2, соседней с пораженной; кривая 3 – случай ОПН1 на пораженной опоре №1).

Длительность импульса тока через ОПН определяется не только длительностью тока молнии (как при ударе в фазный провод), но также зависит от длины пролета ВЛ до соседней опоры и соотношения величин сопротивлений заземления пораженной и ближайших к ней опор.

Из рис.5.17 (кривая 3) видно, что максимальное значение тока в ОПН1 составляет 3.2 кА, тогда как расчет в схеме рис.5.16 по соответствующей формуле для $i_{онн}$ дает 3.05 кА. Отличие связано с тем, что применяемая формула выведена для случая идеализированной ВАХ ОПН (рис.5.4), а осциллограммы получены с использованием реальной ВАХ ОПН. На рис.5.18 (кривая 3) максимальное значение тока в ОПН1 уже меньше, чем для рис.5.17, так как при выбранной длительности фронта импульса тока молнии 5 мкс и длине пролета $l_{np} = 300$ м на ток в ОПН уже успевает повлиять опора №2. Сравнив кривые 1 и 3 на рис.5.17-5.18, становится ясно, что наиболее нагруженным будет тот ОПН, который ближе всего к месту удара молнии в ВЛ (т.е. ОПН1 – кривая 3).

Когда на ВЛ в схеме рис.5.1 установлены одновременно ОПН1 и ОПН2, направления протекания импульсных токов при ударе в опору №1 показаны на рис.5.19: импульсный ток молнии, разветвляясь по элементам ВЛ, стремится попасть в землю, для чего он должен пройти через опоры №1 и №2; в заземлитель опоры №1 импульсный ток попадает достаточно просто; в заземлитель опоры №2 импульсный ток попадает либо придя по тросу от опоры №1, либо от опоры №1 через ОПН1 в фазный провод, из которого через ОПН2 в опору №2, т.е. направления протекания токов в ОПН1 и ОПН2 будут противоположны друг другу.

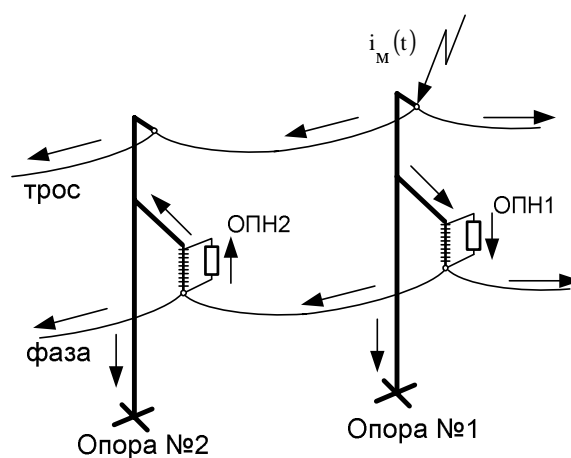


Рис.5.19. Удар в трос на опоре №1. Пути растекания тока молнии.

Удар молнии в фазный провод на опоре

Одно из отличий схем рис.5.16 и рис.5.20 состоит в том, что теперь направление протекания тока через ОПН другое, т.е. необходимо поменять полярность включения моделирующего ОПН источника напряжения $u_{омн}$. Система уравнений, соответствующая рис.5.20, аналогична случаю удара молнии в трос (рис.5.16).

Напряжение, воздействующее на гирлянду изоляторов, $u_{\phi} - u_m = u_{омн}$. Выражения для тока в фазном проводе имеет вид

$$i_{\phi} = \frac{2u_{омн} \cdot \left(\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{2 \cdot R_3} \right) + i_m \cdot \left(1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m} \right)}{\left(\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{2 \cdot R_3} \right) \cdot \left(Z_{\phi} - \frac{Z_{\phi m}^2}{Z_m} \right) + \left(1 - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m} \right)^2}$$

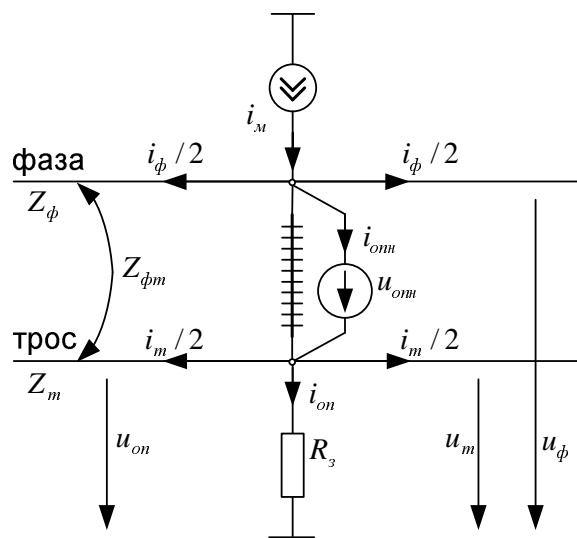


Рис.5.20. Расчетная схема при ударе молнии в фазу на опоре №1 при установленном на ней ОПН.

Ток в ОПН можно определить из выражения $i_{омн} = i_m - i_{\phi}$ (при ударе в трос было $i_{омн} = i_{\phi}$). Из полученных выражений видно, что с ростом остающегося напряжения $u_{омн}$ и сопротивления заземления R_3 ток $i_{омн} = i_m - i_{\phi}$ падает, т.е. при ударе в фазный провод в наиболее тяжелых условиях ОПН будет тогда, когда сопротивление заземления его опоры $R_3 = 0$. В этом случае

$$i_{\phi} = \frac{2u_{\text{омн}}}{Z_{\phi} - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m}},$$

$$i_{\text{омн}} = i_m - i_{\phi} = i_m - \frac{2u_{\text{омн}}}{Z_{\phi} - \frac{Z_{\phi m}}{Z_m}}.$$

Чтобы оценить возможную амплитуду тока в ОПН, примем $u_{\text{омн}} = 0$, что обеспечит $i_{\text{омн}} = i_m$, т.е. весь ток молнии пройдет через ОПН.

Подвесные ОПН, установленные в другие фазы ВЛ, на процессы в пораженной фазе не влияют, а подвесные ОПН, установленные в пораженную фазу ВЛ но на соседних опорах, на амплитуду тока в рассматриваемом ОПН скорее всего повлиять не успеют, однако с течением времени токи в ОПН пораженной фазы постепенно выровняются (токи ближайших к месту удара молнии ОПН).

При среднестатистической амплитуде тока молнии 30 кА амплитуда тока в ближайшем к месту удара молнии ОПН будет практически такой же, что предъявляет серьезные требования к необходимым параметрам таких ОПН. Пример осциллограммы тока в единственном установленном на ВЛ ОПН (ОПН1 или ОПН2) при ударе молнии в фазный провод на опоре №1 ($R_{\text{с1}} = 50$ Ом) приведен на рис.5.21 (соответствует рис.5.14). На рис.5.21 показано, что максимальное значение тока в ОПН действительно близко к амплитуде тока молнии, а сам ток в ОПН повторяет по форме ток молнии, т.е. наиболее тяжелыми условиями работы ОПН являются условия удара молнии в фазный провод, а не в трос и опору.

Если на ВЛ установлен не один ОПН, а два, то с течением времени токи в ОПН будут выравниваться (в ближайшем к месту удара молнии ОПН1 ток будет снижаться, а в удаленном ОПН2 – расти), что показано на рис.5.22.

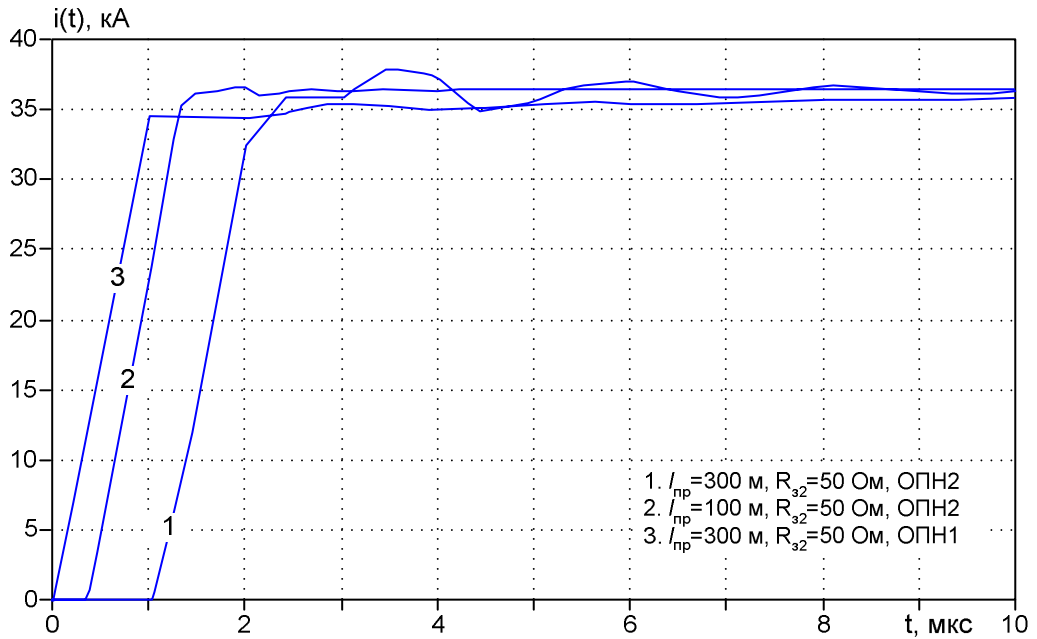


Рис.5.21. Удар молнии (40 кА, $\tau_\phi = 1$ мкс) в фазный провод на опоре №1. Ток в единственном установленном на ВЛ ОПН (ОПН1 или ОПН2).

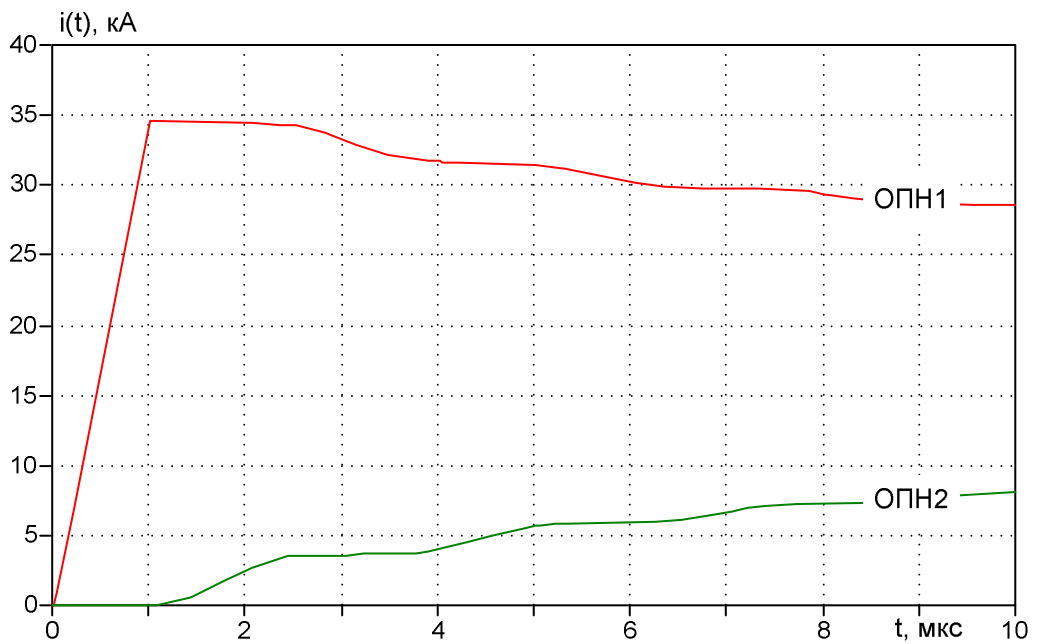


Рис.5.22. Удар молнии (40 кА, $\tau_\phi = 1$ мкс) в фазный провод на опоре №1. В пораженной фазе установлены одновременно ОПН1 и ОПН2 ($I_{np} = 300$ м); $R_{з1} = R_{з2} = 50$ Ом.

В схеме рис.5.1 направления протекания импульсных токов при ударе в фазный провод на опоре №1 показаны на рис.5.23: импульсный ток молнии стекает с фазного провода через присоединенные к нему ОПН1 и ОПН2, т.е. направления протекания токов в ОПН1 и ОПН2 будут одинаковыми.

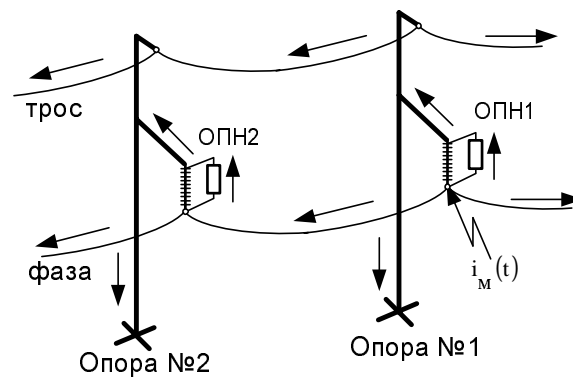


Рис.5.23. Удар в фазу на опоре №1. Пути растекания тока молнии.

5.2.4. Упрощенная оценка выделяющейся в подвесных ОПН энергии

Энергия, выделяющаяся в ОПН, определяется выражением (1.7). В силу высокой нелинейности вольтамперной характеристики современных ОПН, в первом приближении можно считать, что напряжение на ограничителе перенапряжений не зависит от величины протекающего через него тока, и тогда выделяющаяся в ОПН энергия оказывается равной

$$W_{\text{ОПН}} = u_{\text{огм}} \int_t i_{\text{огм}}(t) \cdot dt,$$

а удельная поглощаемая ОПН энергия W' (отношение выделившейся энергии к наибольшему рабочему напряжению аппарата или пропорциональному ему остающемуся напряжению) определится как

$$W' = \frac{W}{u_{\text{огм}}} = \int_t i_{\text{огм}}(t) \cdot dt.$$

Из двух последних выражений следует, что выделяющуюся в ОПН энергию можно легко оценить по осциллограммам тока через него. Выше уже было показано, что форма импульса тока через ОПН зависит от места удара молнии в ВЛ, формы импульса тока молнии, а также соотношения длин пролетов ВЛ и сопротивлений заземления опор. В отличие от амплитуды импульса тока, на длительность импульса тока через ОПН, а значит и на выделяющуюся в нем энергию, существенным образом оказывают влияние и достаточно удаленные опоры.

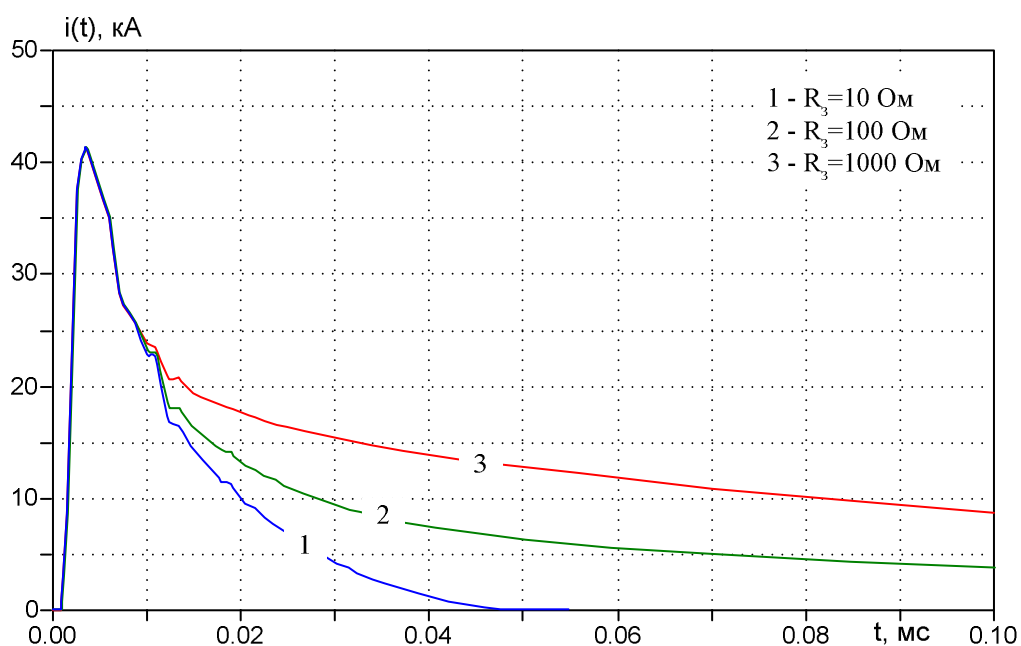


Рис.5.24. Влияние сопротивления заземления удаленной опоры (на расстоянии 1200 м) на форму импульсного тока в ОПН пораженной молнией опоры (сопротивление заземления всех опор 1000 Ом).

На рис.5.24 приведены расчетные осциллограммы импульса тока через ограничитель ОПН, установленный на пораженной молнией опоре ВЛ, в зависимости от величины сопротивления опоры, расположенной на расстоянии 1200 м (на значительном расстоянии). Из рис.5.24 видно, что выделяющаяся в ОПН энергия в случаях 1 и 3 отличается более чем в два раза (по соотношению площадей под кривыми тока). Очевидно, что опоры, расположенные на меньшем расстоянии (менее 1200 м) будут оказывать еще большее влияние на выделяющуюся в ОПН энергию. Это означает, что при расчетах выделяющейся в ОПН энергии недостаточно моделировать лишь непосредственно примыкающие к опоре с ОПН соседние опоры, а необходимо моделировать сразу несколько соседних опор, что многими исследователями не делается.

5.3. Исследования условий работы ОПН с использованием полной расчетной модели ВЛ

5.3.1. Полная расчетная ЕМТР модель

Ранее при анализе перенапряжений, воздействующих на изоляцию ВЛ с использованием упрощенных моделей, была использована косоугольная идеализация волны тока молнии (5.2), однако при расчетах в полной схеме воспользуемся импульсом тока с нулевой начальной производной (1.4). На рис.5.25 показан косоугольный импульс тока молнии (кривая 1) и импульс тока по (1.4): оба импульса имеют амплитуду 40 кА и при расшифровке согласно [65] (по уровням 0.1 и 0.9) дают длительность фронта 1 мкс.

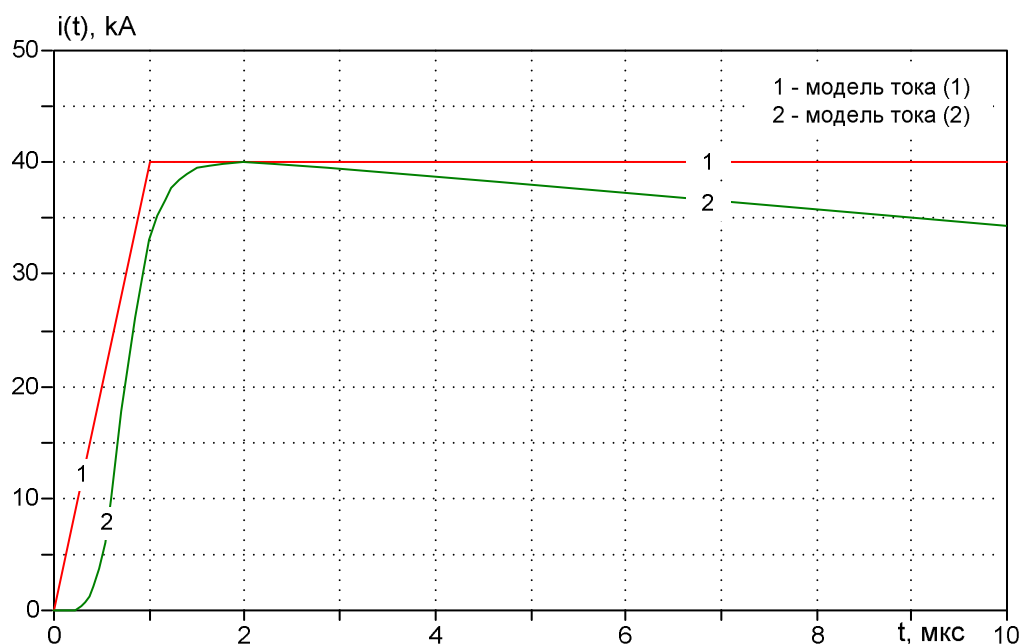


Рис.5.25. Форма импульса тока молнии при различных способах моделирования.

Полная расчетная ЕМТР-схема приведена на рис.5.26, на котором показаны элементы («жирные» соединительные линии отвечают трехфазным элементам, «тонкие» – однофазным):

- ВЛ 110 кВ на опорах ПБ 110.5 – четыре пролета (по 250 м каждый), к которым примыкают «концевые» длинные участки для неучета отражений от ПС. Удельное сопротивление грунта принято $\rho = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; параметры ВЛ определяются с учетом их частотных зависимостей (модель J.Marti [5]).

- В местах сопряжения пролетов ВЛ в схему введены модели опор, состоящие из наборов индуктивностей, величины которых определены с использованием известной геометрии опоры (рис.5.3) и погонных индуктивностей ж/б опор (1 мкГн/м по [1]); каждая опора заземлена через активное сопротивление, моделирующее заземляющее устройство ($R_z = 50$ Ом, если иное не оговорено).
- На каждой из опор фазные провода (условно обозначены «А,В,С») от соответствующих им траверс отделены гирляндами линейных изоляторов, учтенных на схеме своими вольт-секундными характеристиками: порог чувствительности $U_0 = 200$ кВ, длина гирлянды $L_{из} = 1.25$ м (если иное значение не оговорено);
- Импульсный источник тока моделирует удар молнии в ВЛ, (на схеме – это трос на опоре №3). Форма тока задается импульсом (1.4), у которого принято $n = 5$. Волновое сопротивление канала молнии принято постоянным и равным $Z_m = 1000$ Ом во всем диапазоне токов.
- В качестве примера (рис.5.26) на ВЛ установлены три ОПН 110 кВ подвешенного исполнения, защищающие изоляцию фаз на опоре №3.

Для определения энергии, поглощенной ОПН в переходном процессе, проводилось интегрирование во времени произведения тока и напряжения на зажимах ОПН согласно выражению (1.7).

В схеме рис.5.26 и в расчетах перенапряжений на ВЛ с использованием программного комплекса ЕМТР не учтено следующее:

- импульсная корона на проводах и тросах (ее учет является принципиальным, главным образом, при анализе грозовых перенапряжений на подстанции, но не на ВЛ);
- зависимость сопротивления заземления опоры от тока в заземлителе (ионизационные процессы в грунте, которые мало изучены); неопределенность величины сопротивления заземления, обусловленная

сезонными колебаниями проводимости грунта, с лихвой компенсирует изменения, связанные с ионизационными процессами;

- наличие рабочего напряжения на фазных проводах;
- наличие концевых ПС, учет которых (как причины возникновения отраженных волн) важен, в первую очередь, при малой длине ВЛ;
- зависимость волнового сопротивления канала молнии от тока молнии.

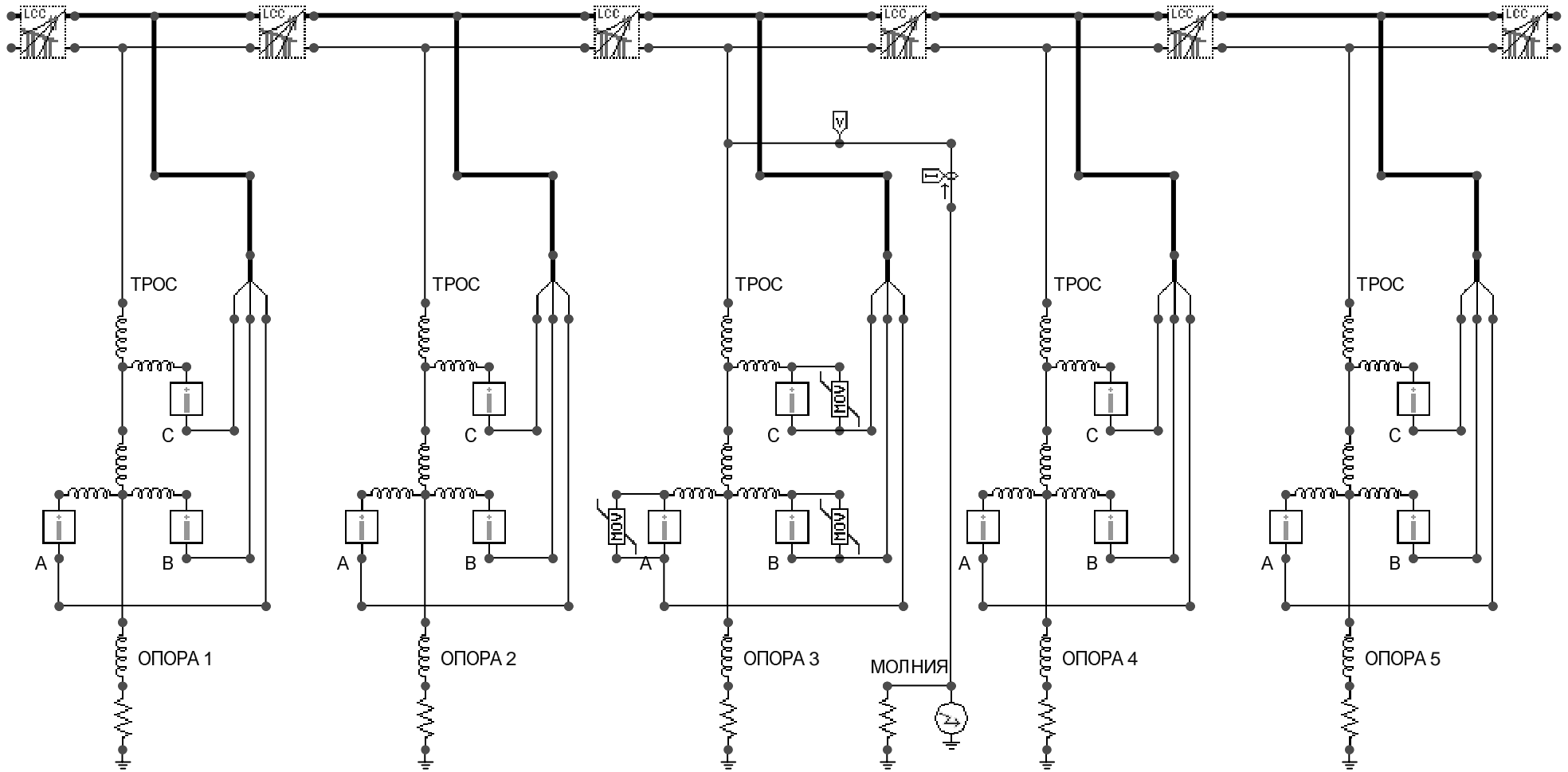


Рис.5.26. EMTP-схема для расчета грозупорности ВЛ 110 кВ.

5.3.2. Расчет перенапряжений в полной схеме

Проведем расчет в схеме рис.5.26 в случае удара молнии отрицательной полярности в трос или фазный провод ВЛ.

Удар молнии в трос

На рис.5.27 показаны перенапряжения, которые вызывает на изоляции верхней фазы («С») удар молнии в вершину опоры №3 ВЛ 110 кВ без ОПН при моделировании формы тока по рис.5.25. Начало кривой 1 (рис.5.27) повторяет рис.5.7, на котором показаны расчетные перенапряжения в аналогичном случае (50 Ом, 20 мкГн). Видно, что кривые 1 и 2 на рис.5.27 отличаются, но незначительно.

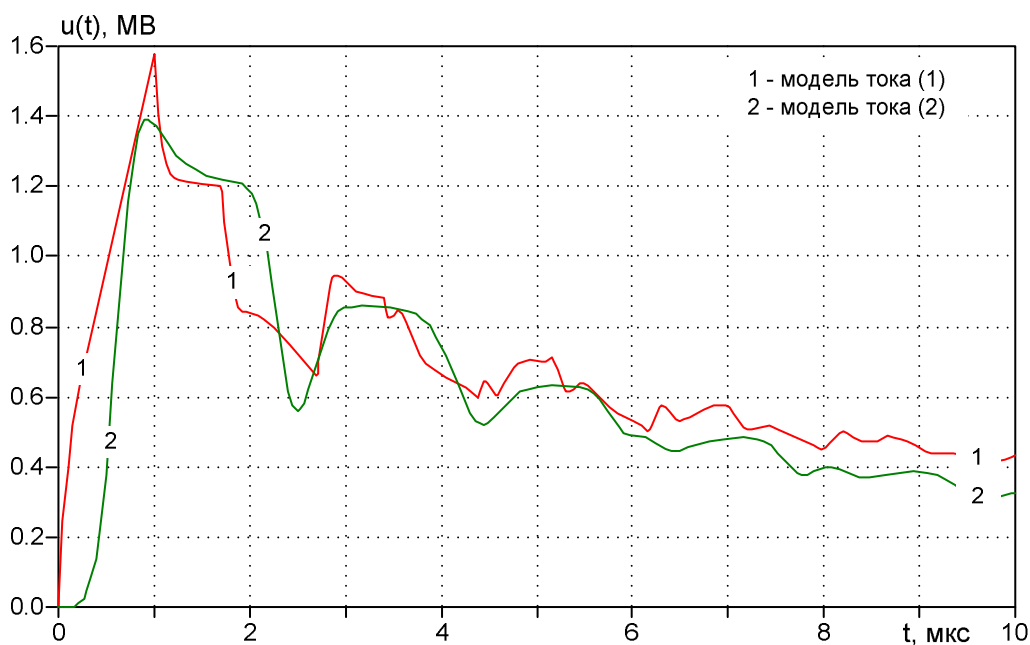


Рис.5.27. Перенапряжения на изоляции верхней фазы «С» ВЛ 110 кВ при ударе молнии (с током рис.5.25; 40 кА, 1 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН нет.

Расчетная осциллограмма напряжений на изоляции фаз «А,В,С» опоры №3 при ударе в ее вершину молнии отрицательной полярности 2/50 мкс амплитудой 37 кА (при такой амплитуде еще нет перекрытий изоляции ВЛ) показана на рис.5.28, а на рис.5.29 – для случая удара молнии с теми же параметрами, но в трос в середине пролета ВЛ.

Из сравнения осциллограмм рис.5.28 и рис.5.29 видно, что удар молнии в трос в пролете вызывает меньшие перенапряжения на изоляции ближайших к

месту удара опор, чем удар в трос на опоре. Это обусловлено тем, что на долю каждой из примыкающих к пораженному молнией пролету ВЛ опор приходится меньшая доля отводимого в землю импульсного тока молнии. Далее в этом разделе будем рассматривать только наиболее тяжелый случай – удар молнии в трос на опоре.

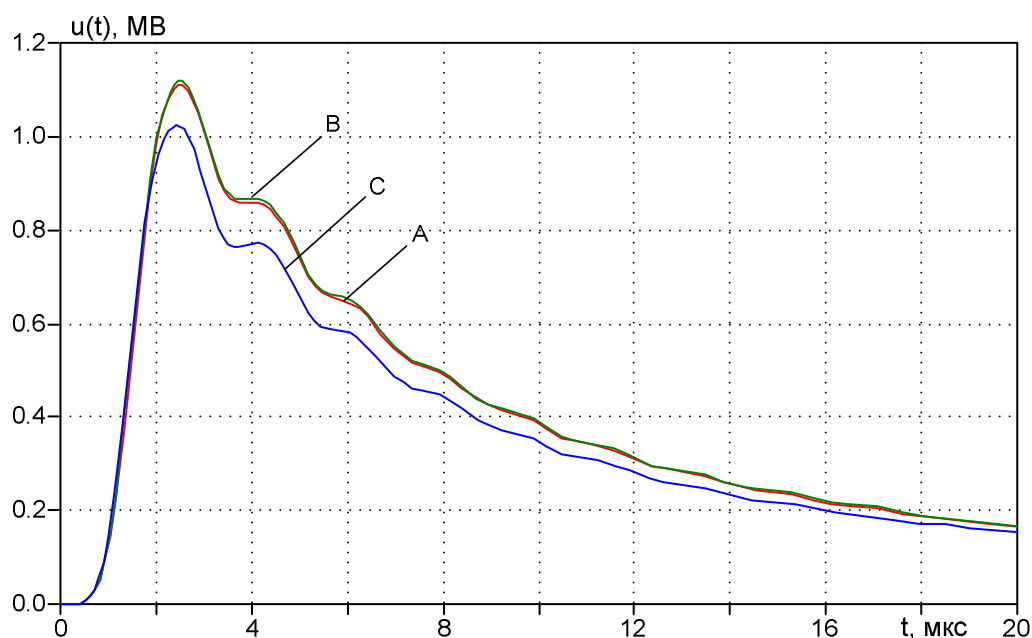


Рис.5.28. Напряжение на изоляции фаз опоры №3. Удар молнии (37 кА, 2/50 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН нет.

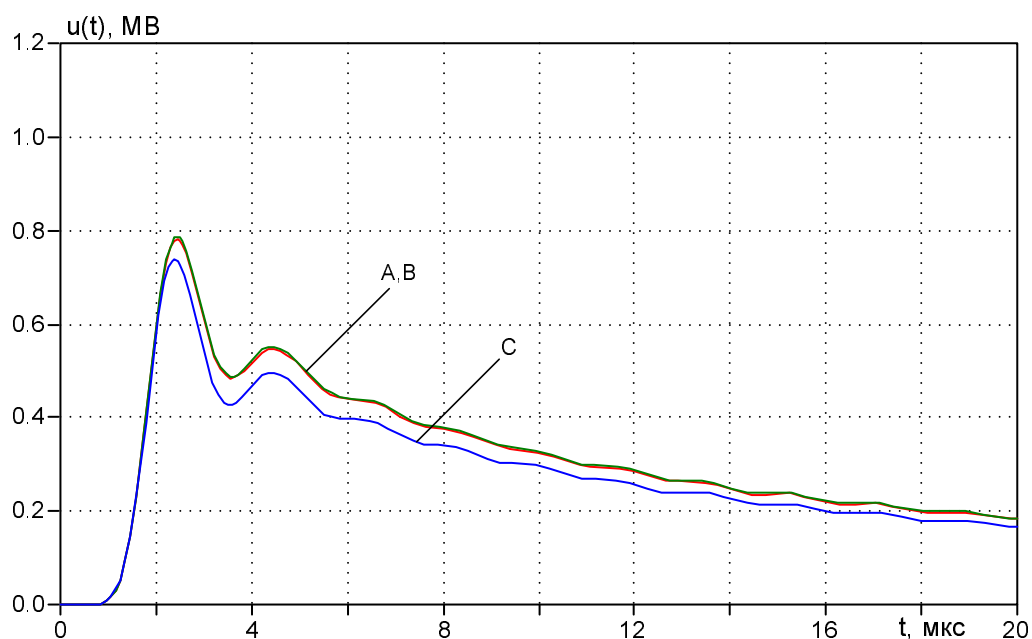


Рис.5.29. Напряжение на изоляции фаз опоры №3. Удар молнии (37 кА, 2/50 мкс) в трос в середине пролета между опорами №3 и №4 ($R_s = 50$ Ом). ОПН нет.

Из рис.5.28 видно, что на изоляцию двух нижних фаз («А» и «В») воздействуют близкие перенапряжения, а на изоляцию верхней фазы «С» – заметно меньшие. Это объясняется тем, что перенапряжения на изоляции определяются разностью потенциалов фазного провода и соответствующей траверсы (точки крепления гирлянды изоляторов к опоре). Потенциал траверсы определяется падением напряжения на теле опоры и ее заземлителе от стекания по опоре части импульсного тока молнии, а потенциал фазного провода определяется коэффициентом связи «фаза-трос», который показывает ту долю от напряжения на тросе, которая наводится на фазный провод. Сочетание этих двух факторов, а также рабочее напряжение проводов, определяют, изоляция какой из фаз будет находиться в наиболее тяжелых условиях при ударах молнии в трос.

Расчеты при сопротивлении заземления опор, составляющем 50 Ом, выполненные без учета рабочего напряжения, показывают, что в большинстве случаев верхняя фаза по сравнению с другими оказывается в наиболее благоприятных условиях с точки зрения воздействующих перенапряжений, т.е. доминирующим фактором является коэффициент связи, а не падение напряжения на теле опоры.

При очень высокой крутизне импульса тока молнии падение напряжения на теле опоры становится существенным, и перенапряжения на изоляции верхней фазы могут кратковременно превзойти перенапряжения на изоляции нижних фаз; на рис.5.30 показан фрагмент такой осциллограммы.

Расчеты показывают, что при повышенных сопротивлениях заземления максимальные перенапряжения будут воздействовать на одну из нижних фаз (фазы «А,В»), и поэтому в эксплуатации наиболее часто грозовые отключения ВЛ выбранной конструкции будут вызваны перекрытиями изоляции именно этих фаз; на рис.5.31 для примера показана осциллограмма воздействующих на изоляцию напряжений при перекрытии изоляции фазы «В».

Так как наиболее часто следует ожидать перекрытия изоляции одной из нижних фаз, то первым вариантом повышения грозоупорности ВЛ 110 кВ

следует признать установку подвесных ОПН параллельно гирляндам линейных изоляторов нижней (нижних) фаз. При этом, как было показано в предыдущей главе, для надежной защиты ВЛ установка ОПН необходима на каждой опоре вдоль трассы линии.

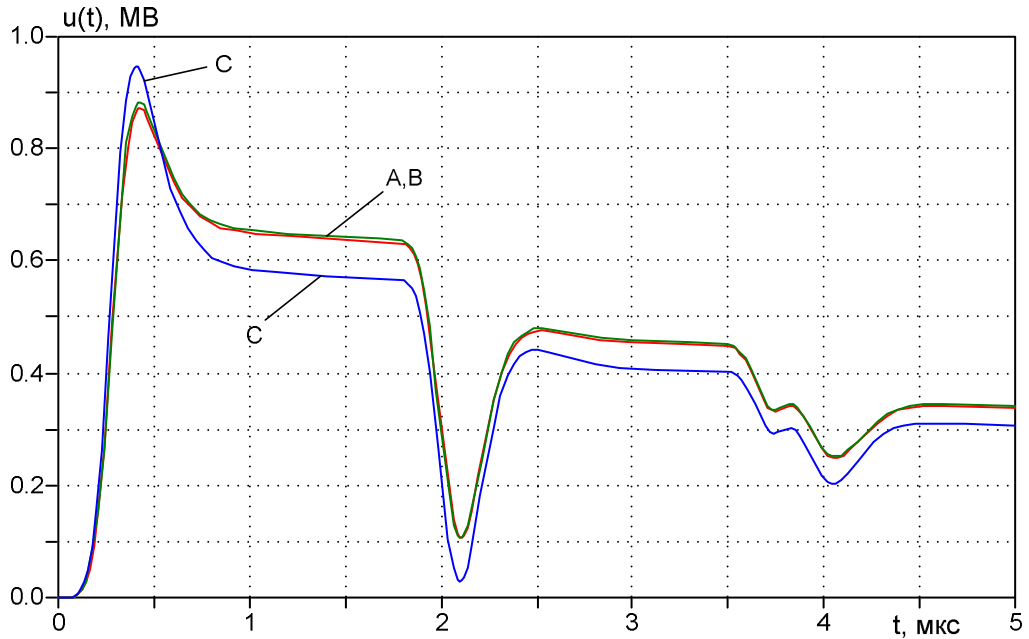


Рис.5.30. Напряжение на изоляции фаз опоры №3. Удар молнии (20 кА, 0.5/50 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН нет.

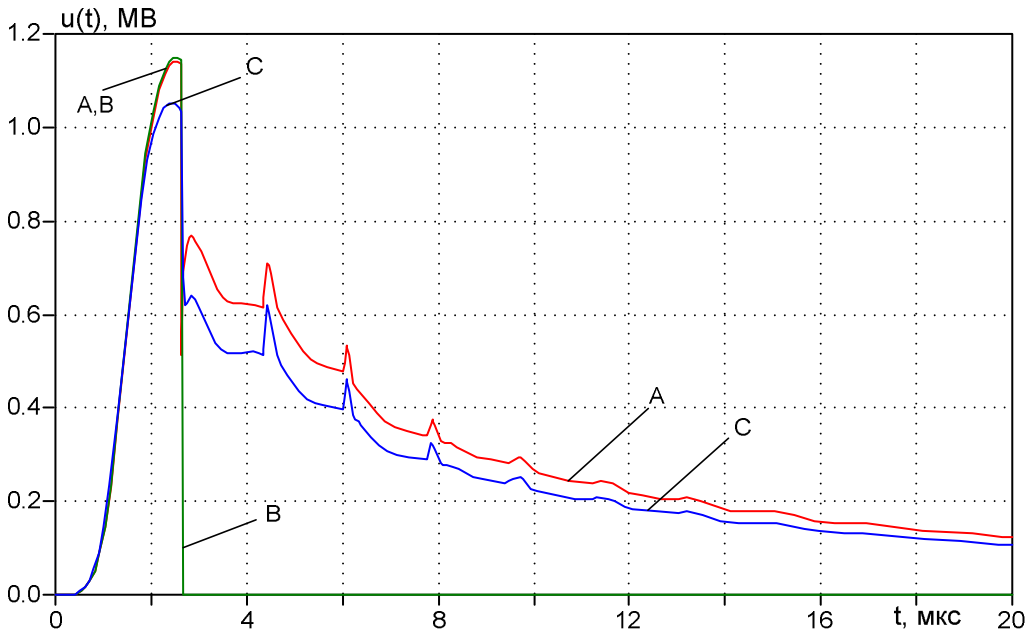


Рис.5.31. Напряжение на изоляции фаз опоры №3. Удар молнии (38 кА, 2/50 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН нет. Перекрытие нижней фазы «В» на опоре №3.

На рис.5.32 приведена осциллограмма перенапряжений на изоляции трех фаз, в случае защиты изоляции фазы «В» подвесными ОПН. Из сравнения рис.5.28 и рис.5.31 с рис.5.32 видно, что наличие ОПН в одной из фаз снижает перенапряжения на изоляции всех фаз, а на изоляции защищенной фазы до безопасных величин.

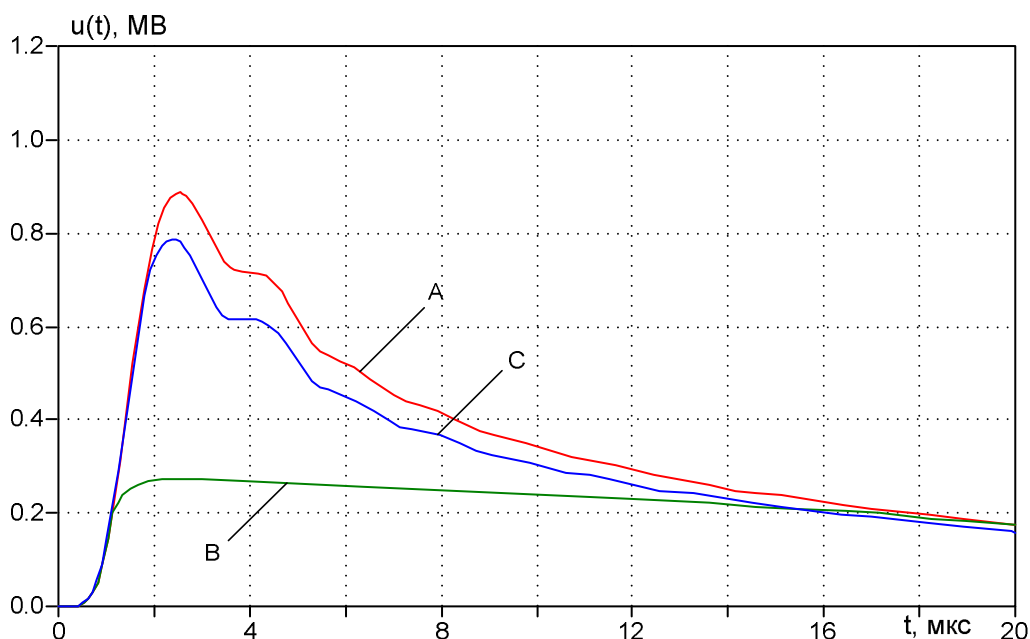


Рис.5.32. Напряжение на изоляции фаз опоры №3. Удар молнии (38 кА, 2/50 мкс) в опору №3 ($R_z = 50$ Ом). ОПН в фазе «В». Перекрытий нет.

На рис.5.33 приведена осциллограмма перенапряжений на изоляции для случая, когда при большом токе молнии наличие ОПН в фазе «В» не обеспечивает достаточного снижения перенапряжения на изоляции незащищенных фаз, и изоляция одной из них (фазы «А») перекрывается.

Очевидно, что для надежной защиты изоляции фазы «А» во всем диапазоне параметров импульсов тока молнии необходима установка ОПН и в эту фазу. Таким образом, для дальнейшего повышения грозоупорности ВЛ необходима установка ОПН не в одну, а в обе нижние фазы, однако для наиболее надежной защиты ВЛ от перекрытий изоляции, вызванных грозовыми перенапряжениями, необходима установка ОПН во все три фазы ВЛ.

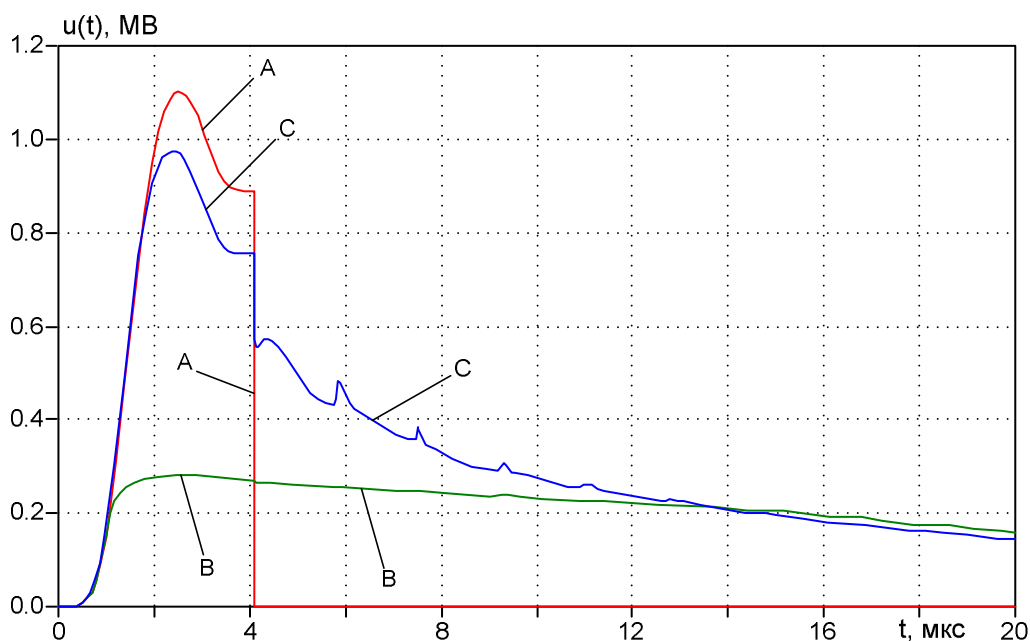


Рис.5.33. Напряжение на изоляции фаз опоры №3. Удар молнии (48 кА, 2/50 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН в фазе «В». Перекрытие нижней фазы «А» на опоре №3.

Рассмотрим перенапряжения, которым подвергается изоляция на опорах, соседних с пораженной. На рис.5.34 в условиях рис.5.28 приведены напряжения, воздействующие на изоляцию фаз опоры №2, при ударе молнии в опору №3, откуда видно, что на изоляцию фаз на опоре №2 воздействуют меньшие перенапряжения, чем на опоре №3.

На рис.5.35 в условиях рис.5.31 приведены напряжения, воздействующие на изоляцию фаз опоры №2, при ударе молнии в опору №3. Видно, что перекрытие изоляции фазы «В» на пораженной опоре №3 заметно изменило форму напряжений, воздействующих на изоляцию соседней опоры №2 (см. отличия осциллограмм рис.5.34 и рис.5.35) – максимальное воздействующее напряжение на изоляцию фаз опоры №2 возросло приблизительно с 250 кВ (рис.5.34) до 750 кВ (рис.5.35). Для объяснения этого обратимся к рис.5.36, полученному в условиях рис.5.31 и рис.5.35.

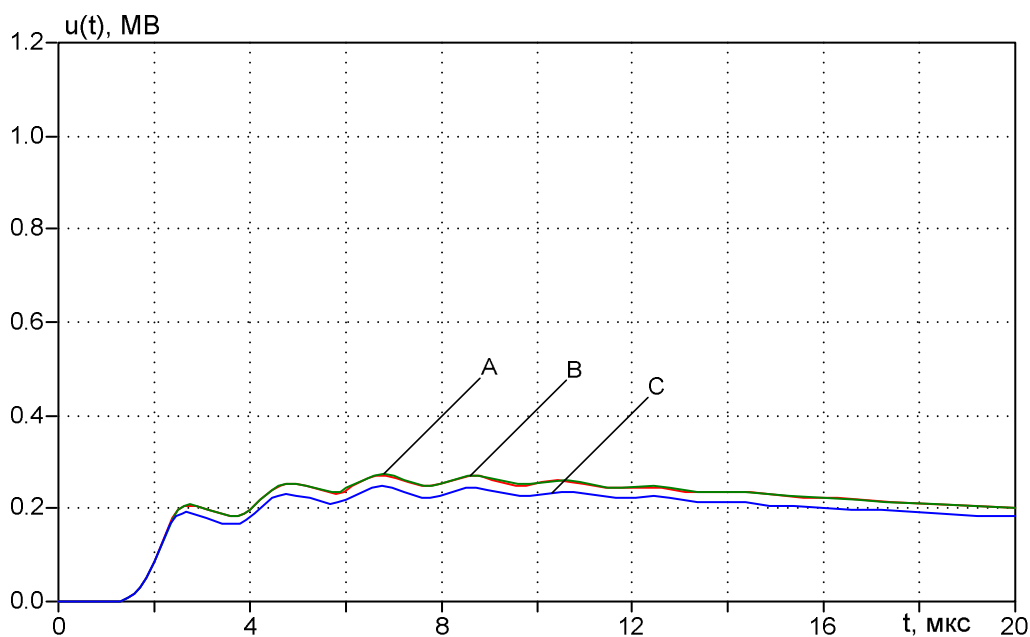


Рис.5.34. Напряжение на изоляции фаз опоры №2. Удар молнии (37 кА, 2/50 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН нет.

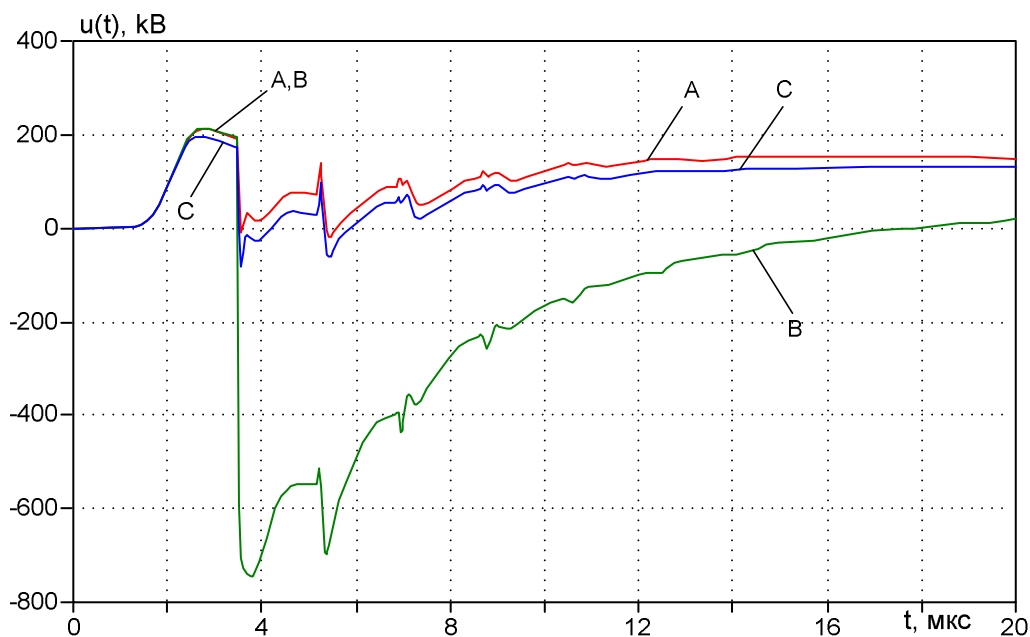


Рис.5.35. Напряжение на изоляции фаз опоры №2. Удар молнии (38 кА, 2/50 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН нет. Перекрытие фазы «В» на опоре №3.

До перекрытия изоляции «фазы В» (до момента приблизительно 3 мкс по рис.5.36) на опоре №3 потенциал фазного провода относительно земли определялся коэффициентом связи провода с тросом. После пробоя изоляции фазы «В» на опоре №3 потенциал фазного провода «В» относительно земли стал равен потенциалу траверсы фазы «В», т.е. возрос по абсолютной величине

(скачок напряжения на рис.5.36 в момент 3 мкс). Потенциал опоры №3 наоборот упал по абсолютной величине, так как после пробоя изоляции снижено эквивалентное сопротивление растеканию тока молнии от места ее удара.

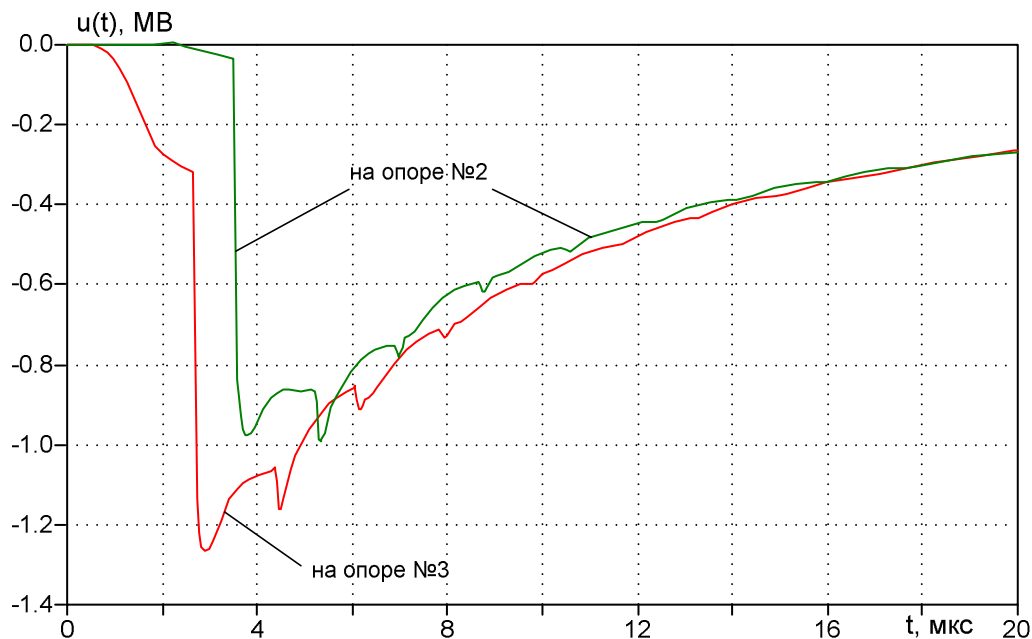


Рис.5.36. Потенциал фазного провода «В» на опоре №2 и №3 относительно земли. Удар молнии (38 кА, 2/50 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН нет. Перекрытие нижней фазы «В» на опоре №3.

Итак, в результате удара молнии в опору №3 к опоре №2 одновременно по тросу и проводу «В» бегут волны напряжения высокой амплитуды, разность между которыми достаточно мала, так как изоляция фазы «В» на опоре №3 перекрылась. Однако на опоре №2 трос заземлен и его потенциал относительно земли будет меньше величины пришедшей по тросу от опоры №3 волны напряжения. Потенциал же фазного провода на опоре №2 практически не зависит от заземления троса на этой опоре и будет близок к потенциалу фазного провода на опоре №3 (см. рис.5.36). Таким образом, разность потенциалов троса (траверсы) и фазного провода «В» на опоре №2 окажется за счет заземления троса на этой опоре заметной, что и объясняет высокие перенапряжения на изоляции фазы «В» опоры №2 (рис.5.35). Иными словами, при соединении фазного провода с траверсой (либо за счет перекрытия изоляции на рассматриваемой опоре, либо при установке на ней ОПН) высокий

потенциал вершины опоры передается на фазный провод и может вызвать заметные перенапряжения на изоляции соседних опор.

Рис.5.37 получен в условиях рис.5.32. На рис.5.32 было показано: наличие ОПН в фазе «В» на пораженной опоре №3 привело к тому, что изоляция на этой опоре при выбранном токе молнии перестала перекрываться. При этом напряжение, воздействующее на изоляцию фазы «В» опоры №2, снизилось по абсолютной величине лишь с 750 кВ (рис.5.35) до 600 кВ (рис.5.37), так как высокий потенциал по-прежнему попадает на фазный провод (для рис.5.32 это было за счет перекрытия изоляции, а для рис.5.37 – за счет ОПН).

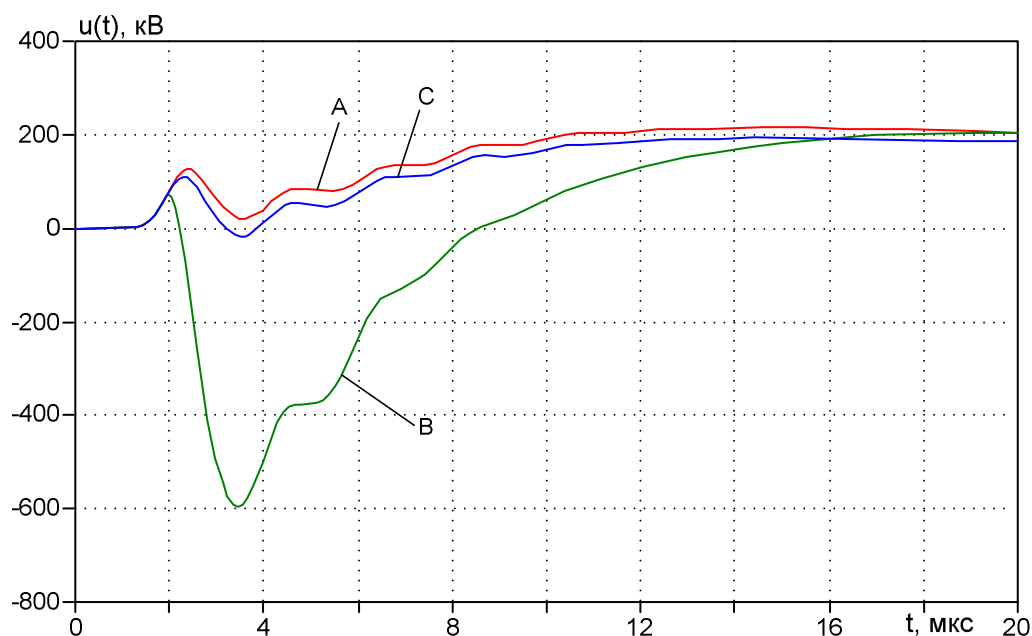


Рис.5.37. Напряжение на изоляции фаз опоры №2. Удар молнии (38 кА, 2/50 мкс) в опору №3 ($R_s = 50$ Ом). ОПН только на опоре №3 в фазе «В».

Удар молнии в фазный провод

Проведем расчеты в схеме рис.5.26 в случае удара молнии отрицательной полярности в фазный провод ВЛ. Наиболее вероятен прорыв молнии на верхний фазный провод [1,16,38], поэтому удар молнии будем рассматривать именно в него.

На рис.5.38 показаны перенапряжения на изоляции «С», которые вызывает удар молнии с амплитудой тока всего 3 кА в верхнюю фазу ВЛ, и видно, что перенапряжения на изоляции пораженной молнией фазы «С» близки

к ее импульсной прочности (около 750 кВ). На рис.5.39 при токе молнии 4 кА изоляция не выдерживает и перекрывается, т.е. в случае удара молнии в фазный провод для перекрытия изоляции ВЛ 110 кВ достаточно тока молнии малой амплитуды (4 кА), или, иными словами, практически каждый прорыв молнии на фазный провод ВЛ 110 кВ будет приводить к ее грозovому отключению. При этом временные параметры импульса тока молнии (фронт, длительность импульса) практически не влияют на возможность перекрытия изоляции; сопротивление заземления опоры также малозначимо.

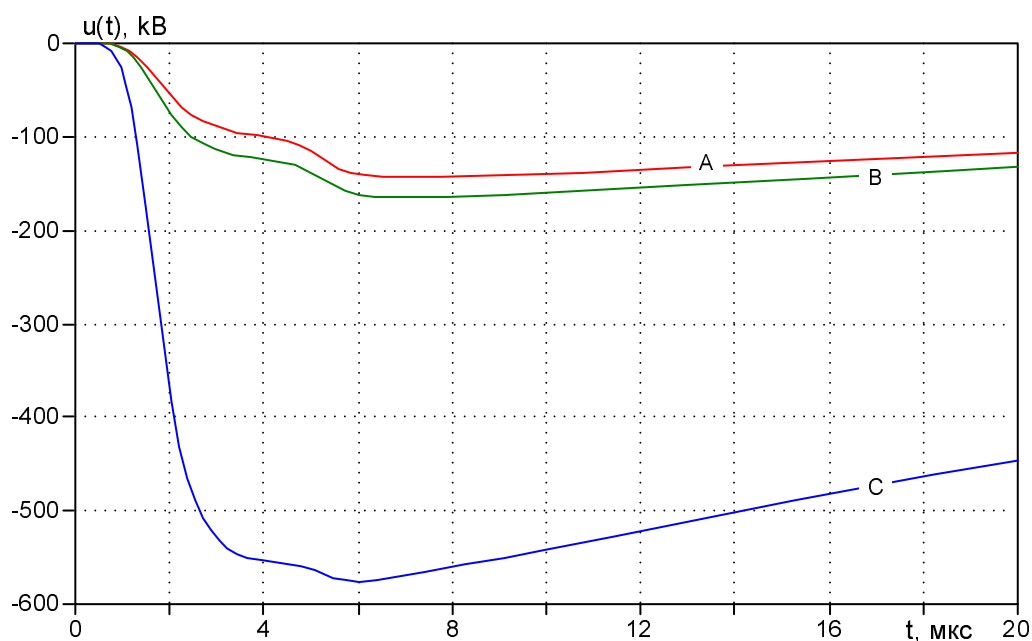


Рис.5.38. Перенапряжения на изоляции верхней фазы «С» при ударе молнии (3 кА, 2/50 мкс) в эту фазу. ОПН нет. Перекрытий нет.

5.3.3. Расчет грозоупорности ВЛ в полной схеме

Показателем грозоупорности ВЛ является число ее грозовых отключений. Опыт эксплуатации ВЛ характеризуется следующими удельными показателями по числу отключений: $n_{\text{общ}}$ – число отключений по всем причинам; $n'_{\text{г}}$ – число грозовых отключений. Большой разброс эксплуатационных показателей грозоупорности ВЛ 110–330 кВ (табл.5.1 по данным [1]) по регионам является следствием местных условий по интенсивности грозовой деятельности и характеристикам грунта, а также различий в конструкции опор.

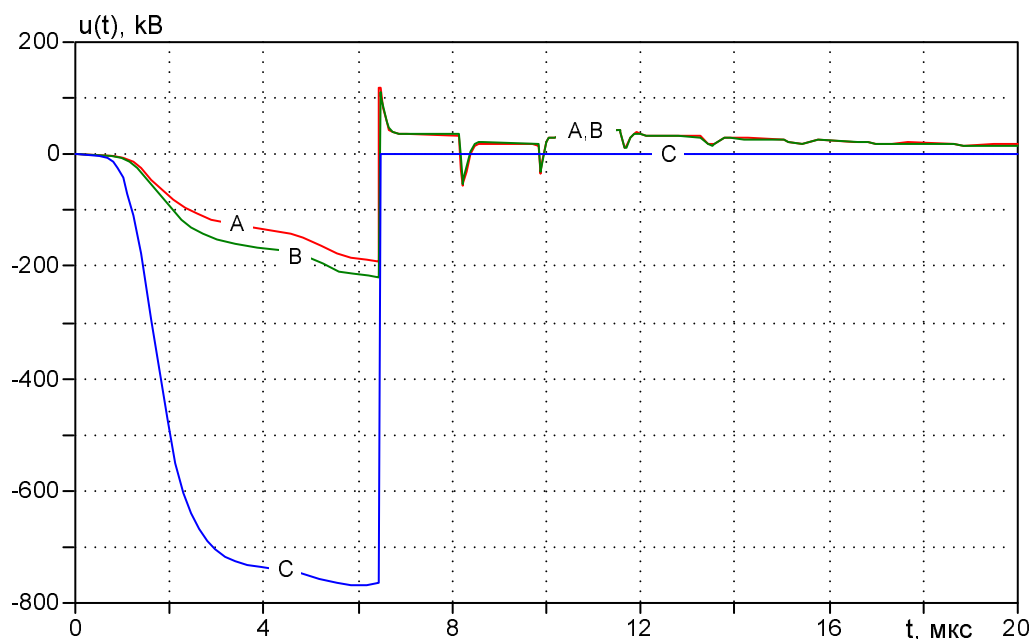


Рис.5.39. Перенапряжения на изоляции верхней фазы «С» при ударе молнии (4 кА, 2/50 мкс) в эту фазу. ОПН нет. Перекрытие изоляции фазы «С».

Таблица 5.1. Эксплуатационные показатели ВЛ 110–330 кВ по отключениям (на 100 км и 1 год эксплуатации) по [1].

U_H , кВ	Число отключений на 100 км и 1 год эксплуатации				Доля грозовых отключений, %	
	$n_{\text{общ}}$		n'_g		Пределы изменения	Средняя
	Пределы изменения	Среднее	Пределы изменения	Среднее		
110	3,5–14,4	9,0	0,33–2,3	1,0	4,5–22,5	12
220	1,3–5,8	3,0	0,03–1,2	0,45	1,2–30,0	15
330	0,4–3,0	2,0	0,1–0,66	0,2	4,3–51,1	10

Расчеты грозоупорности ВЛ проводятся с использованием формулы (5.1). По числу грозовых часов в год определяется плотность ударов молнии на 1 км^2 земной поверхности, на основе которой с учетом средней высоты подвеса троса ВЛ над землей определяется сколько ударов молнии стянет к себе ВЛ. Проведя такие расчеты по методикам [1] и [14], было получено для ВЛ 110 кВ на опорах ПБ 110.5 $N \approx 100$ ударов на 100 км длины ВЛ и 100 гр.ч.

Вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту на фазные провода можно оценить по эмпирической формуле

$$\lg P_{\text{прорыва}} = \alpha \sqrt{h_{\text{мп}}} / 90 - 4,$$

приведенной в [66] (вычисление же $P_{\text{прорыва}}$ по формулам [1] достаточно трудоемко). Для анализируемой ВЛ 110 кВ (рис.5.3) значение угла защиты троса составляет при длине гирлянды $L_{\text{из}} = 1.25$ м $\alpha = \arctg \frac{2}{2 + L_{\text{из}}} = 31.6^\circ$, тогда

при $h_{\text{мп}} = 20.5$ м (упрощенно без учета провеса троса) получим $P_{\text{прорыва}} = 0.004$,

откуда число прорывов молнии на фазные провода можно определить как $N_{\phi} = N \cdot P_{\text{прорыва}} = 100 \cdot 0.004 = 0.4$ на 100 км и 100 гр.час.

Полное число ударов молнии в трос $N_{\text{мп}} = N - N_{\phi} \approx N$ условно разделяют на удары молнии в вершину опоры и на удары молнии в трос в середине пролета:

$N_{\text{он}} = N_{\text{мп}} \cdot \frac{4h_{\text{мп}}}{l_{\text{пр}}} = 100 \cdot \frac{4 \cdot 20.5}{250} = 32.8$ уд. на 100 км и 100 гр.ч. (согласно

[1]); $N_{\text{пр}} = N_{\text{мп}} - N_{\text{он}} = 100 - 32.8 = 67.2$ уд. на 100 км и 100 гр.ч.

Для расчета показателей грозоупорности ВЛ необходимо определить вероятность перекрытия изоляции при ударах молнии в фазный провод, в трос на опоре, в трос в середине пролета. Для определения двух последних вероятностей принципиально могут использоваться:

- методика построения кривых опасных токов молнии [42];
- статистический метод расчета (схожий с примененным в первой главе для анализа грозовых перенапряжений на оборудовании ПС).

Методика построения кривой опасных токов, полностью аналогичная кривой опасных волн, является упрощенной и в [2] отмечаются ее недостатки, тем не менее приведем результаты расчетов по ней: при $\tau_{\phi} = 2$ мкс и $\tau_{\phi} = 10$ мкс в схеме рис.5.26 определялись значения амплитуды токов молнии, при которых уже происходит перекрытие изоляции по крайней мере одной из фаз ВЛ; строилась кривая опасных токов и с использованием данных [42] находилась соответствующая ей вероятность.

Результаты расчетов при ударе молнии в трос на опоре ВЛ 110 кВ представлены на рис.5.40 в виде зависимостей вероятности от сопротивления заземления опоры (принималось одинаковым вдоль всей трассы ВЛ) и длины гирлянды линейных изоляторов (типовая ВЛ 110 кВ имеет длину гирлянды 1.0-1.2 м, что соответствует импульсной прочности 750 кВ при предразрядном времени 4-6 мкс). Рис.5.41 получен аналогично рис.5.40, но при ударе в трос в середине пролета ВЛ, а суммарное удельное число грозовых отключений ВЛ 110 кВ при ударах в трос приведено на рис.5.42 и находилось с использованием данных рис.5.40-5.41 по формуле (сомножитель $\eta \approx 0.9$ упрощенно опущен)

$$n_{mp} = N_{on} \cdot P_{on} + N_{np} \cdot P_{np} .$$

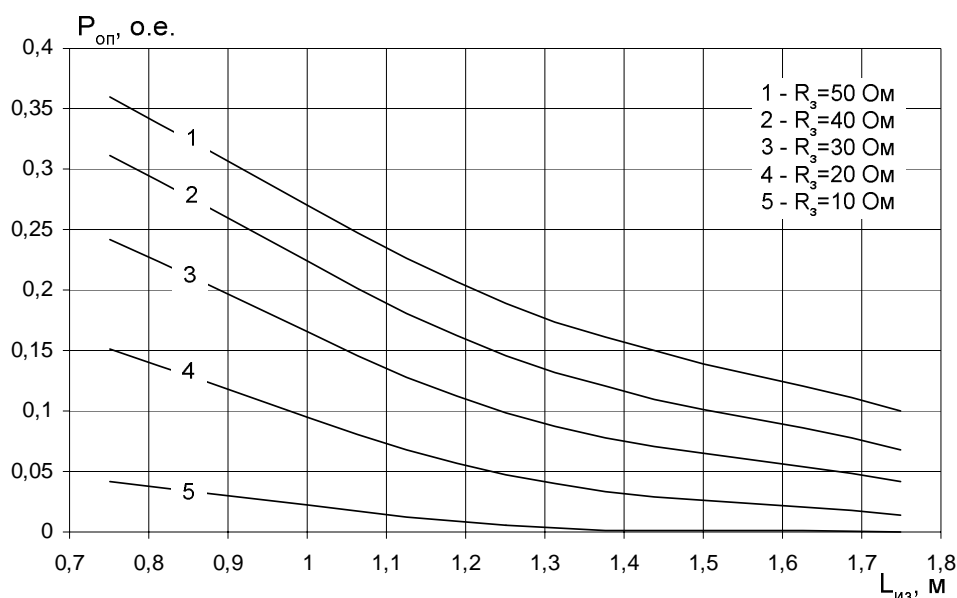


Рис.5.40. Удар молнии в трос на опоре. Вероятность грозового отключения в зависимости от сопротивления заземления опор и длины гирлянды изоляторов.

Из рис.5.40-5.42 видно, что снижение сопротивления заземления опор и увеличение импульсной прочности изоляции являются важными способами повышения грозоупорности ВЛ 110 кВ при ударах молнии в трос. Результаты расчетов грозоупорности ВЛ 110 кВ, аналогичные приведенным на рис.5.42, полученные с использованием других методик, можно найти в [67].

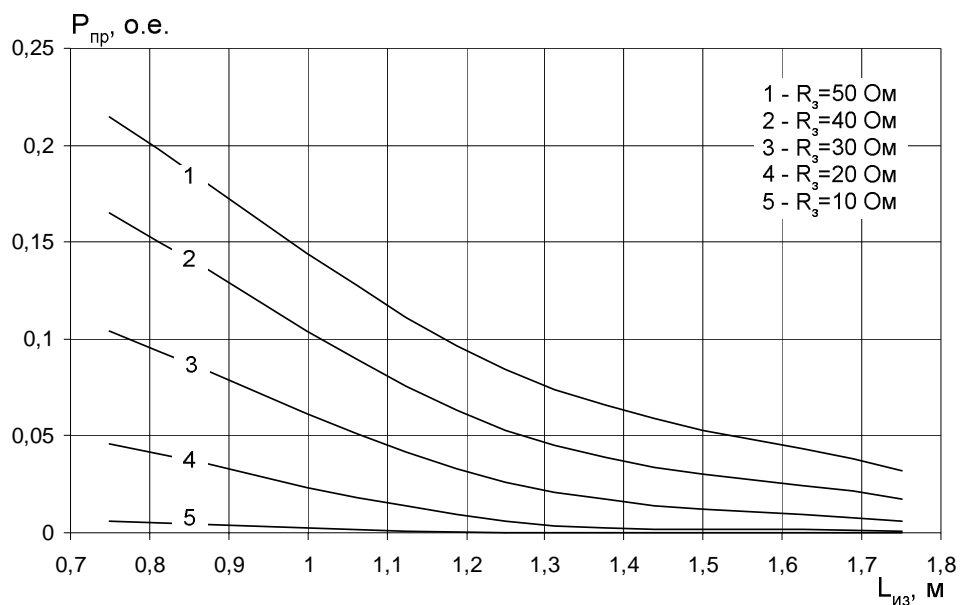


Рис.5.41. Удар молнии в трос в середине пролета. Вероятность грозового отключения в зависимости от сопротивления заземления опор и длины гирлянды изоляторов.

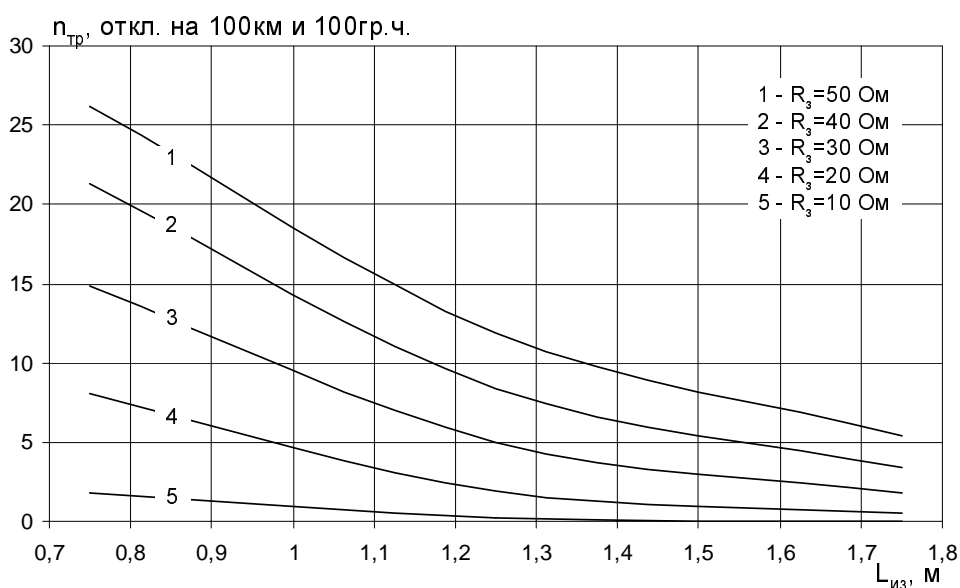


Рис.5.42. Удар молнии в трос. Суммарное удельное число грозовых отключений ВЛ 110 кВ в зависимости от сопротивления заземления опор и длины гирлянды изоляторов.

Для случаев прорыва молнии на фазные провода крутизна импульса тока молнии не столь важна, как амплитуда тока молнии. Ранее было показано, что при ударах в фазный провод к перекрытиям изоляции приводит амплитуда тока молнии более 4 кА. Согласно статистике [1] молния будет иметь амплитуду тока более 4 кА с вероятностью $P_\phi = 0,99$, откуда удельное число отключений ВЛ 110 кВ, вызванных прорывами молнии на фазные провода,

$n_{\phi} = N_{\phi} \cdot P_{\phi} = 0.4 \cdot 0.99 \approx 0.4$ отключения на 100 км и 100 гр.час (сомножитель $\eta \approx 0.9$ упрощенно опущен).

Суммарное удельное число отключений ВЛ 110 кВ при ударах молнии в трос и прорывах на фазные провода будет $n_{\text{гроз}} = n_{\text{тр}} + n_{\phi}$. При длине гирлянды изоляторов $L_{\text{из}} = 1.25$ м и сопротивлениях заземления опор в диапазоне $R_{\text{з}} = 10 \div 30$ Ом, по рис.5.42 с учетом $n_{\phi} = 0.4$ получим $n_{\text{гроз}} = 0.5 \div 5$ отключений на 100 км и 100 грозовых часов. Приняв в среднем по России интенсивность грозовой деятельности равной 50 грозовых часов, получим $0.25 \div 2.5$ грозовых отключений на 100 км в год, что хорошо согласуется с опытом эксплуатации ВЛ 110 кВ (табл.5.1).

Для повышения грозоупорности ВЛ 110 кВ могут применяться ОПН подвешного исполнения. Результаты расчетов грозоупорности ВЛ 110 кВ (схема рис.5.26), изоляция которой на каждой опоре защищена ОПН, приведены на рис.5.43-5.45 для случая, когда сопротивление заземления опор ВЛ $R_{\text{з}} = 50$ Ом.

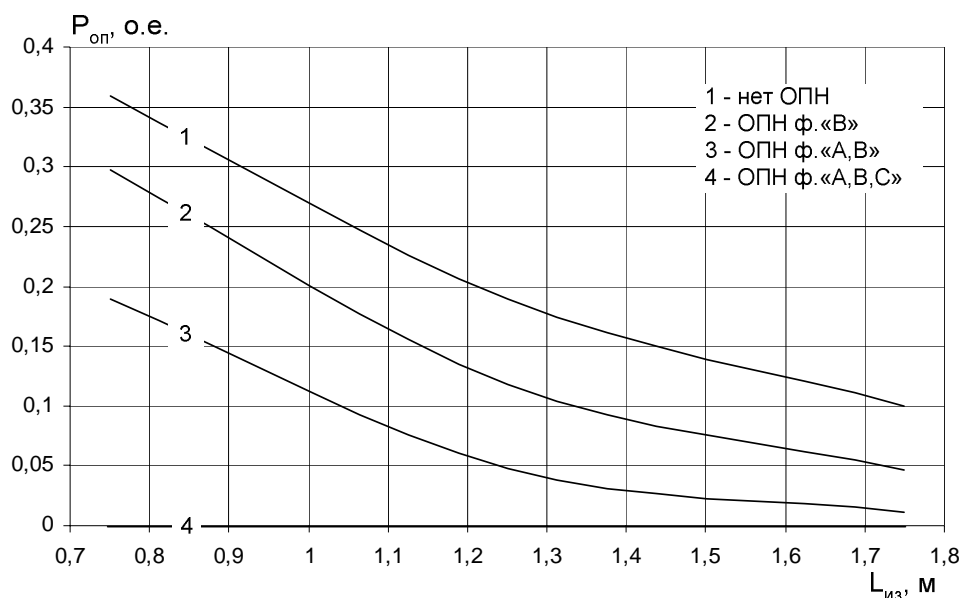


Рис.5.43. Удар молнии в трос на опоре. Вероятность грозового отключения в зависимости от числа ОПН на опоре и длины гирлянды изоляторов; $R_{\text{з}} = 50$ Ом.

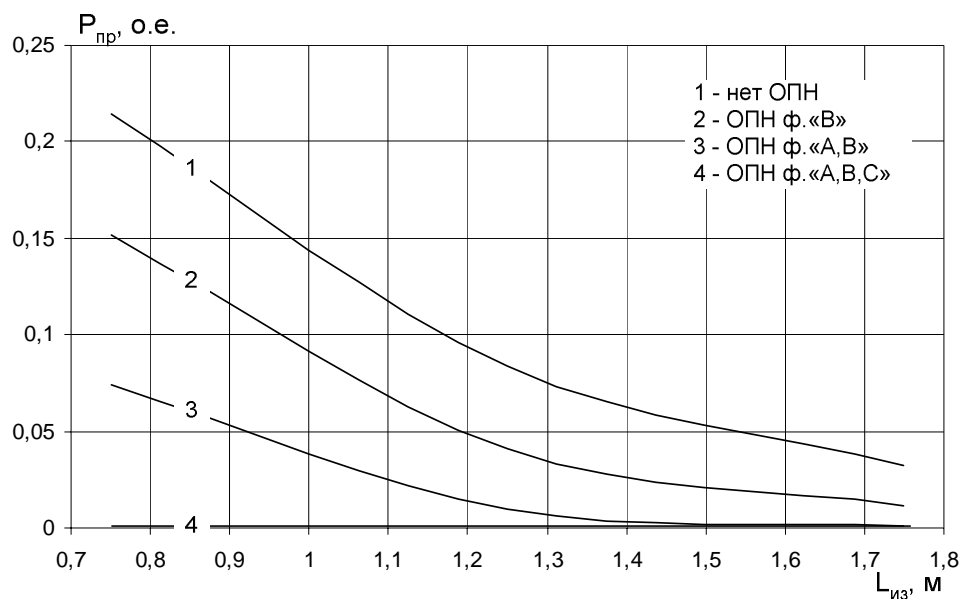


Рис.5.44. Удар молнии в трос в середине пролета. Вероятность грозового отключения в зависимости от числа ОПН на опоре и длины гирлянды изоляторов; $R_z = 50$ Ом.

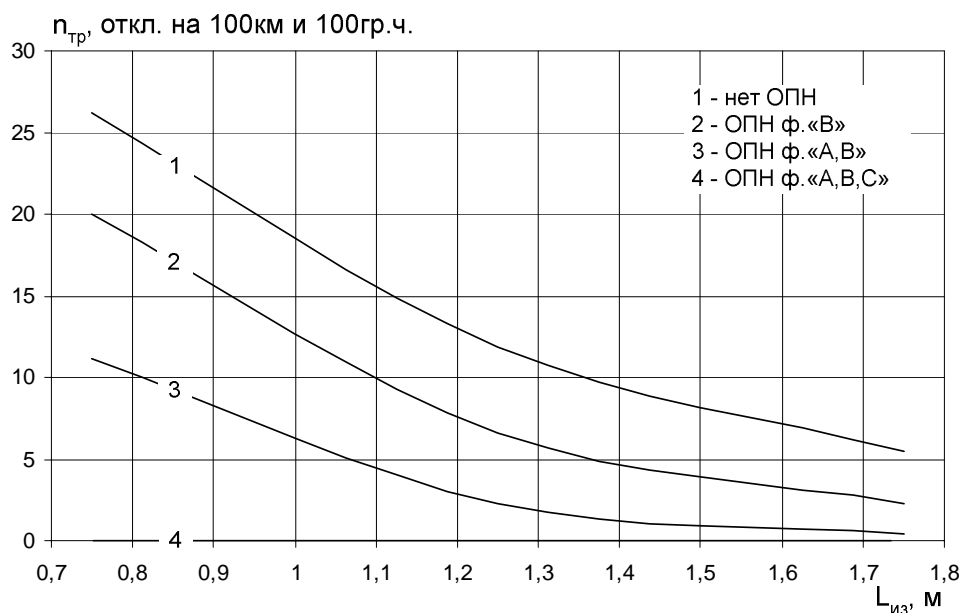


Рис.5.45. Удар молнии в трос. Суммарное удельное число грозовых отключений ВЛ 110 кВ в зависимости от числа ОПН на опоре и длины гирлянды изоляторов; $R_z = 50$ Ом.

Из рис.5.45, полученному для ВЛ 110 кВ, видно:

- установка ОПН на каждой опоре в нижнюю фазу «В» (кривая 2 на рис.5.45) по достигаемому уровню грозоупорности соответствует случаю ВЛ 110 кВ (без ОПН) с сопротивлением заземления опор 30-40 Ом (рис.5.42);

- установка ОПН на каждой опоре в обе нижние фазы «А,В» (кривая 3 на рис.5.45) близка по эффективности к грозоупорности ВЛ 110 кВ в случае снижения сопротивления заземления опор с 50 Ом до 20 Ом (рис.5.42);
- установка ОПН на каждой опоре во все три фазы «А,В,С» (кривая 4 на рис.5.45) позволяет очень надежно защитить изоляцию ВЛ 110 кВ, а число грозových отключений ВЛ в этом случае будет определяться вероятностью повреждения подвесных ОПН при воздействии молнии на ВЛ 110 кВ.

Полученное ранее удельное число грозových отключений ВЛ 110 кВ из-за прорыва молнии сквозь тросовую защиту на фазные провода ($n_{\phi} = 0.4$ отключения на 100 км и 100 гр.час.) относится, главным образом, к прорывам молнии на верхнюю фазу «С». Прорыв молнии на нижние фазные провода «А» и «В» практически исключен [38], и поэтому удельное число отключений ВЛ 110 кВ при прорывах молнии на фазные провода может быть снижено только установкой ОПН в верхнюю фазу «С» (при этом получим $n_{\phi} = 0$). В случае установки ОПН только в одну или две нижние фазы удельное число грозových отключений ВЛ при ударах в фазные провода n_{ϕ} снижено не будет и останется на прежнем уровне $n_{\phi} = 0.4$ отключения на 100 км и 100 гр.час.

5.3.4. Расчет токов подвесных ОПН в полной схеме

Важным является вопрос о токовых нагрузках подвесных ОПН в режиме ограничения грозových перенапряжений, который рассмотрим подробнее с использованием полной ЕМТР-схемы (рис.5.26).

Удар молнии в трос

С увеличением длительности фронта импульса тока молнии снижается потенциал вершины пораженной опоры, так как уменьшается падение напряжения на индуктивности опоры и, кроме того, становится заметным влияние отраженных от соседних опор волн напряжения; как следствие – снижается амплитуда импульса тока в ОПН, что показано на рис.5.46-5.47.

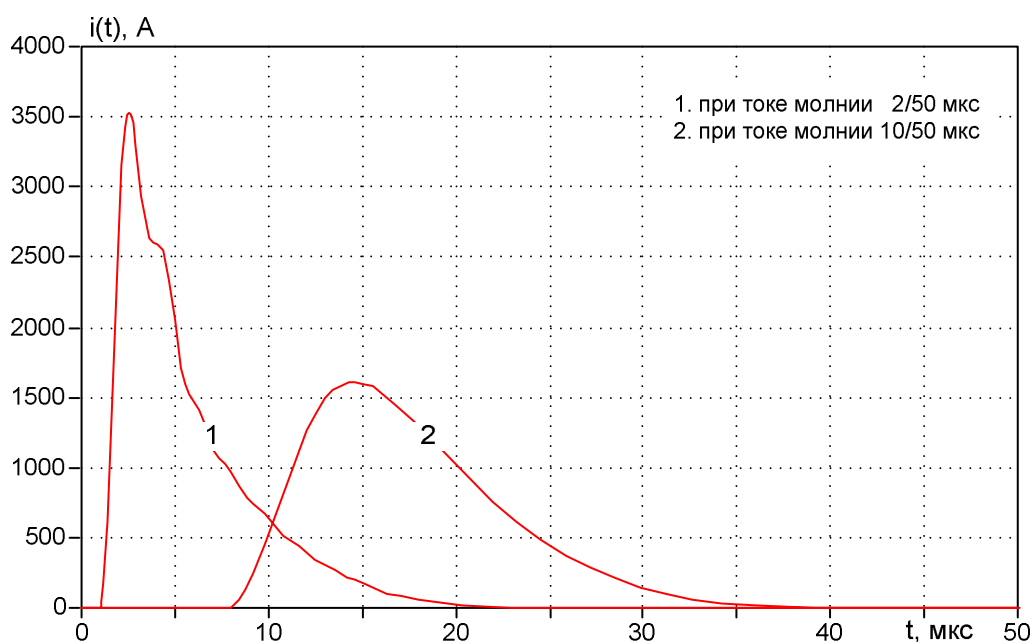


Рис.5.46. Ток в ОПН «В» в зависимости от фронта импульса тока молнии. Удар молнии (40 кА, 2/50 мкс и 10/50 мкс) в опору ($R_s = 50$ Ом), на которой установлен ОПН только в фазе «В». ОПН на соседних опорах нет. Перекрытий изоляции нет.

Длительность импульса тока молнии, как видно из сравнения рис.5.46 и рис.5.47, практически не влияет на фронт и максимальное значение импульса тока в ОПН, однако с ее ростом увеличивается длительность протекания тока в ОПН и, следовательно, значение выделяющейся энергии.

Помимо параметров импульса тока молнии, ударившей в трос ВЛ, на токи в ОПН влияет их число на опоре: чем больше фаз на опоре защищено подвесными ОПН, тем больше будет число возможных путей для растекания импульсного тока молнии и тем меньше будет ток в каждом из ОПН, что показано на рис.5.48.

При установке в дополнение к ОПН «В» еще одного ОПН на опоре, токовые нагрузки на ОПН «В» снижаются не в два раза, а в 1.3 раза (рис.5.48); при установке ОПН во все фазы токовые нагрузки на ОПН «В» снижаются не в три раза, а в 1.5 раза (рис.5.48). Это объясняется нелинейностью вольтамперной характеристики ОПН (ток ОПН и приложенное напряжение непропорциональны) и тем, что за счет взаимного влияния фазных проводов снижение эквивалентного сопротивления подключенных к опоре через ОПН фаз ВЛ идет медленнее роста числа этих фаз (ОПН).

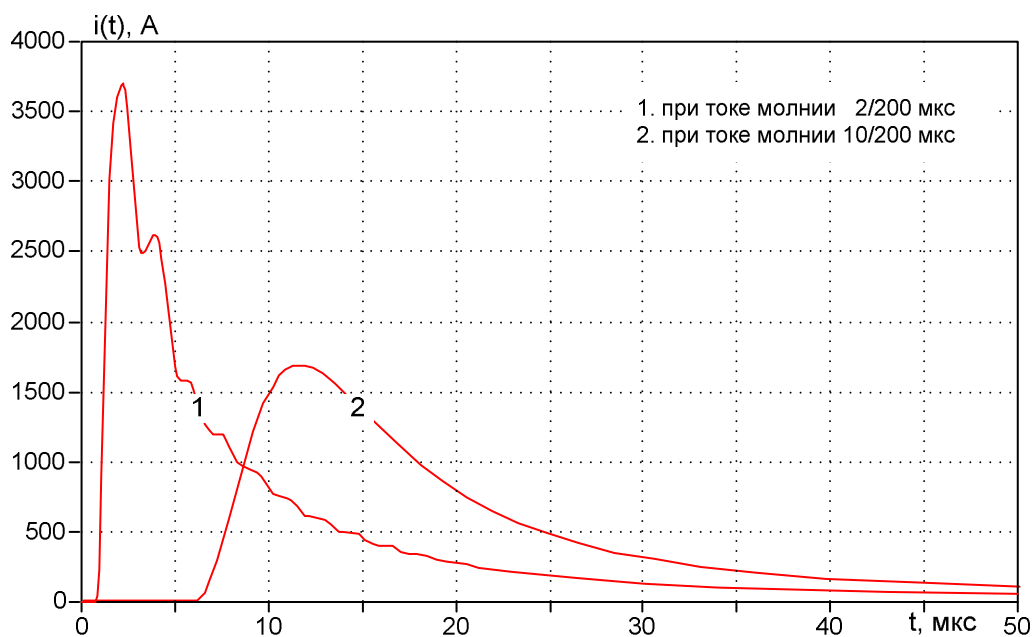


Рис.5.47. Ток в ОПН фазы «В» в зависимости от фронта импульса тока молнии. Удар молнии (40 кА, 2/200 мкс и 10/200 мкс) в опору ($R_s = 50$ Ом), на которой установлен ОПН только в фазе «В». ОПН на соседних опорах нет. Перекрытий изоляции нет.

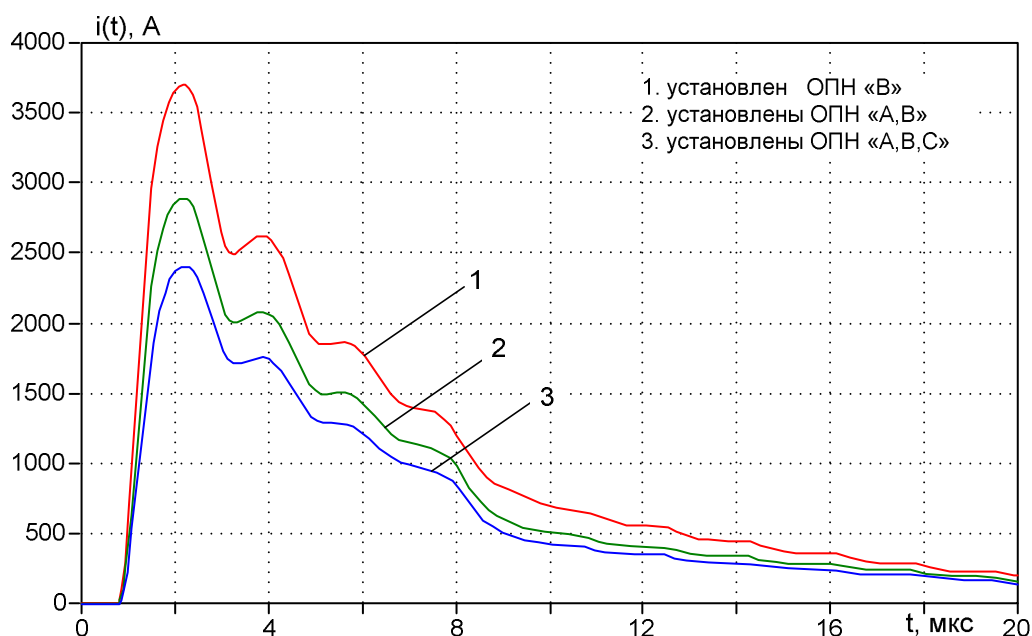


Рис.5.48. Ток в ОПН фазы «В» в зависимости от числа ОПН на опоре. Удар молнии (40 кА, 2/200 мкс) в опору ($R_s = 50$ Ом), на которой ОПН установлены в одну, две или три фазы ВЛ. ОПН на соседних опорах нет. Перекрытий изоляции нет.

Ранее отмечалось, что самым большим перенапряжением при ударе в опору ВЛ без ОПН подвергается, как правило, изоляция нижних фаз «А,В», и поэтому при установке ОПН во все три фазы ВЛ наиболее нагруженными будут защитные аппараты нижних фаз, что видно из рис.5.49.

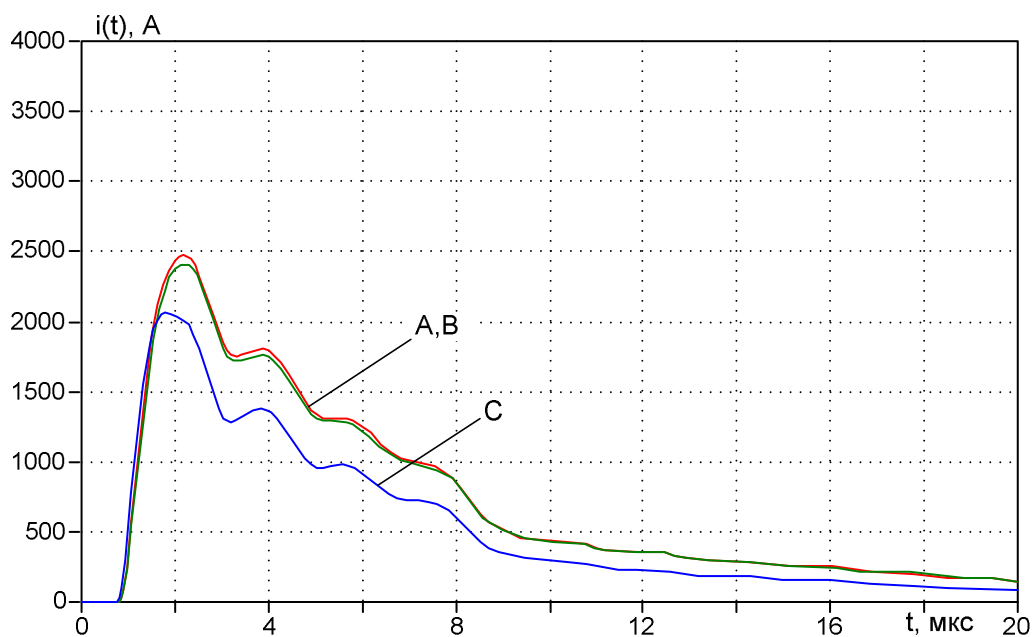


Рис.5.49. Распределение токов по ОПН пораженной опоры. Удар молнии (40 кА, 2/200 мкс) в опору, на которой ОПН установлены во все три фазы ВЛ. ОПН на соседних опорах нет. Перекрытий изоляции нет.

Рассмотрим влияние числа учитываемых при моделировании опор с ОПН (на схеме рис.5.26 их пять) на токи в защитных аппаратах, и пусть при этом на ВЛ на каждой опоре установлен ОПН в фазе «В».

На рис.5.50 показано, что моделирование только одной опоры (только пораженной) при выбранных параметрах тока молнии и заданном сопротивлении заземления ($R_z = 50$ Ом) недостаточно для правильного определения максимального тока в ОПН; в этом случае идет его занижение. Для правильного определения максимального значения тока в ОПН необходимо моделировать по крайней мере 3 опоры, так как на максимальное значение этого тока успевают повлиять ближайšie к пораженной опоры ВЛ.

Из рис.5.50 видно, что рост числа учитываемых опор с ОПН увеличивает длительность тока в наиболее нагруженном ОПН, установленном на пораженной молнией опоре, т.е. для правильного определения длительности протекания тока в ОПН (энергии в ОПН) необходимо учитывать большое число опор ВЛ, (не менее 5 опор – пораженная и по две дополнительно к ней с каждой стороны).



Рис.5.50. Влияние числа моделируемых опор ($R_s = 50$ Ом у каждой) на ток в ОПН пораженной опоры (средняя из моделируемых опор). Удар молнии (40 кА, 2/200 мкс) в среднюю из моделируемых опор. На каждой опоре установлен ОПН только в фазе «В». Перекрытий изоляции нет.

При ударе в трос ВЛ в отведении тока молнии с троса в землю участвует с течением времени все большее число опор ВЛ, а доля тока молнии, отводимая с троса через ОПН в фазный провод становится все меньше, и ток в ОПН снижается. Этим объясняется то, что длительность тока в ОПН заметно меньше длительности импульса тока молнии (см. рис.5.46-5.47). С использованием схемы рис.5.19 относительно быстрое прекращение тока в ОПН можно объяснить тем, что потенциалы опор №1 и №2 с течением времени выравниваются (тем быстрее, чем меньше сопротивление заземления опор ВЛ, т.е. чем ярче выражены процессы отражения/преломления волн на тросе).

Если учитываемых опор много, а сопротивление заземления опор велико, то длительность протекания тока в ОПН пораженной опоры будет определяться длительностью выравнивания потенциалов пораженной опоры с наиболее удаленной от нее (последней из моделируемых) опорой. Следовательно, чем больше число моделируемых опор с ОПН, тем длительность тока в ОПН пораженной опоры будет больше (рис.5.50).

Если сопротивление заземления опор мало, то практически весь ток молнии уйдет с вершины пораженной опоры в ее заземлитель, минуя ОПН. Так как ОПН в этом случае практически не работают, то и влияние числа моделируемых опор не будет проявляться, что показано на рис.5.51, полученном для $R_s = 10$ Ом каждой из опор.

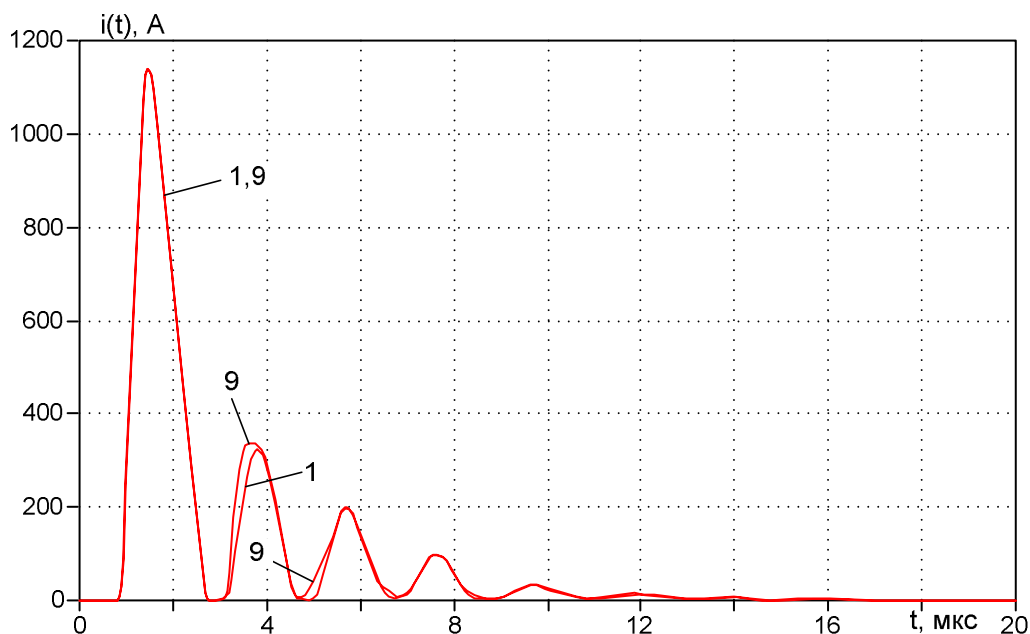


Рис.5.51. Влияние числа моделируемых опор ($R_s = 10$ Ом) на ток в ОПН пораженной опоры. Удар молнии (40 кА, 2/200 мкс) в среднюю из моделируемых опор. На каждой опоре установлен только ОПН «В». Перекрытий изоляции нет.

Заметное влияние числа моделируемых опор (случай высокого сопротивления заземления) на ток в ОПН пораженной опоры, скорее всего, имеет место не только в рамках идеализированной расчетной ЕМТР схемы рис.5.26, но и на реальных ВЛ с подвесными ОПН, однако из-за импульсной короны и затухания волн при их распространении вдоль проводов и тросов на процессы в пораженной опоре и токи в ОПН практически будет влиять меньшее число опор, чем это получалось, например, в расчетном случае по рис.5.50.

Удар молнии в фазный провод

Ранее отмечалось, что в случае прорыва молнии сквозь тросовую защиту на фазный провод, изоляция которого защищена подвесным ОПН, почти весь ток молнии пройдет через этот ОПН. Поэтому токовые нагрузки на подвесные

ОПН в случае удара молнии в защищенную ими фазу достаточно велики, а ОПН соседних фаз практически не влияют на процессы.

Самым нагруженным в случае удара молнии в фазный провод ВЛ будет наиболее близко расположенный к месту удара молнии защитный аппарат, и поэтому проанализируем нагрузки именно на этот ОПН. В схеме рис.5.26 в случае удара молнии в фазный провод «С» на средней опоре на рис.5.52 показан ток в ОПН «С» этой опоры при варьировании числа моделируемых опор (на рис.5.26 их пять). Из рис.5.52 видно, что для правильного определения импульсного тока (амплитуды и длительности протекания) в наиболее нагруженном ОПН необходимо учитывать по крайней мере 3 опоры ВЛ (пораженную и по одной соседней с каждой стороны), а учет более 7 опор уже не имеет смысла.

В случае удара молнии в фазный провод в середине пролета ВЛ токовые нагрузки на ОПН, установленные в пораженной фазе на примыкающих к пролету опорах, будут в два раза меньше, чем приведенные на рис.5.52.

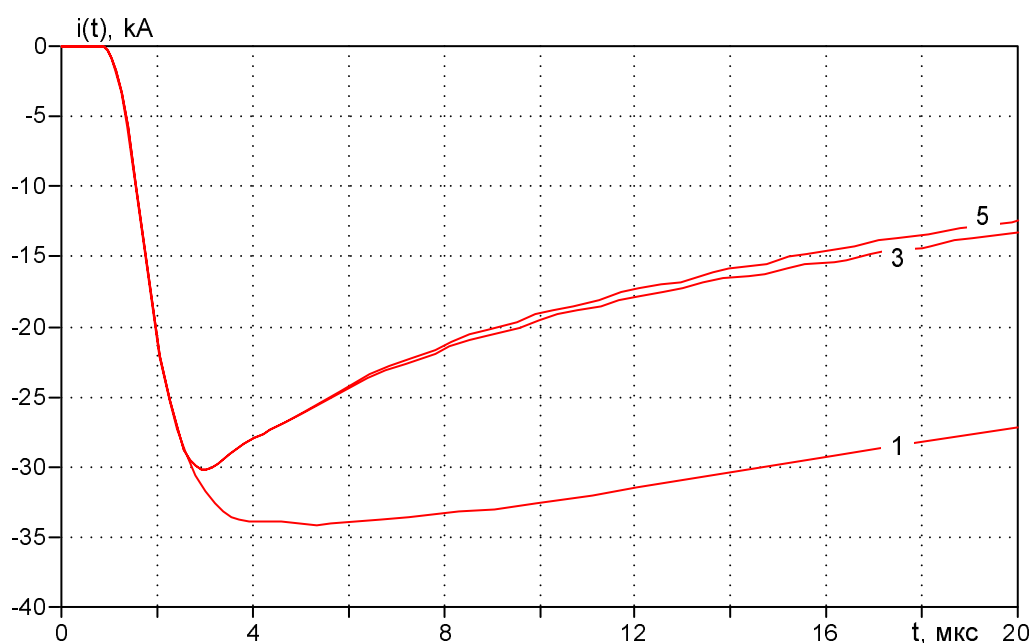


Рис.5.52. Влияние числа моделируемых опор на ток в ОПН пораженной опоры. Удар молнии (40 кА, 2/50 мкс) в фазный провод «С» на средней из моделируемых опор. На каждой опоре установлен ОПН только в фазе «С». Перекрытий изоляции нет.

Для случая удара молнии в трос на основе методики построения кривой опасных токов молнии [42] ранее были получены вероятности перекрытий

гирлянды изоляторов ВЛ 110 кВ в зависимости от длины гирлянды и других факторов. Указанную методику можно использовать и для определения вероятностей появления тока в ОПН с амплитудой, большей заданного значения.

Для случая удара молнии в трос можно предложить следующий алгоритм определения вероятности появления тока в ОПН с амплитудой выше заданного значения (например, 5 кА): для $\tau_{\phi} = 2$ мкс и $\tau_{\phi} = 10$ мкс определить значения амплитуды импульса тока молнии, при которых амплитуда тока в ОПН будет 5 кА; далее по известным формулам [42] находится вероятность того, что параметры молнии попадут в область над построенной по двум точкам кривой опасных токов, т.е. что ток в ОПН будет больше 5 кА.

Задавшись рядом значений тока в ОПН и проведя расчеты в ЕМТР-схеме рис.5.26, был получен набор токов в ОПН и соответствующие вероятности превышения этих токов, на основе которых построены кривые рис.5.53. Расчеты были проведены для случаев удара молнии в вершину опоры (заземление опор вдоль трассы ВЛ $R_s = 50$ Ом или 10 Ом), на которой установлен всего один ОПН в фазе «В» или сразу три ОПН «А,В,С»; защитные ОПН (один или три) были установлены на каждой из пяти моделируемых опор. Во всех случаях регистрировалась амплитуда тока в ОПН фазы «В» пораженной молнией опоры.

В случае удара молнии в трос в пролете ВЛ, токи в ОПН опор, ограничивающих пораженный пролет, будут заметно меньше указанных на рис.5.53.

На рис.5.53 показано:

- в 20-30 % случаев ударов молнии в опору подвесные ОПН практически не работают (ток меньше 0.1 кА);
- в 50% случаев удара в опору амплитуда тока в ОПН фазы «В» незначительна и составляет в соответствии с номерами кривых 0.75 кА, 0.5 кА, 0.1 кА;
- практически невозможно (лишь в одном из 1000 ударов в опору), чтобы амплитуда тока в ОПН превысила соответственно 30 кА, 20 кА, 9 кА;

- наличие на опоре не одного, а трех ОПН снижает токовые воздействия на установленные на опоре аппараты (однако меньше, чем в три раза);
- токовые нагрузки на ОПН при ударах в трос меньше при меньшем сопротивлении заземления опор.

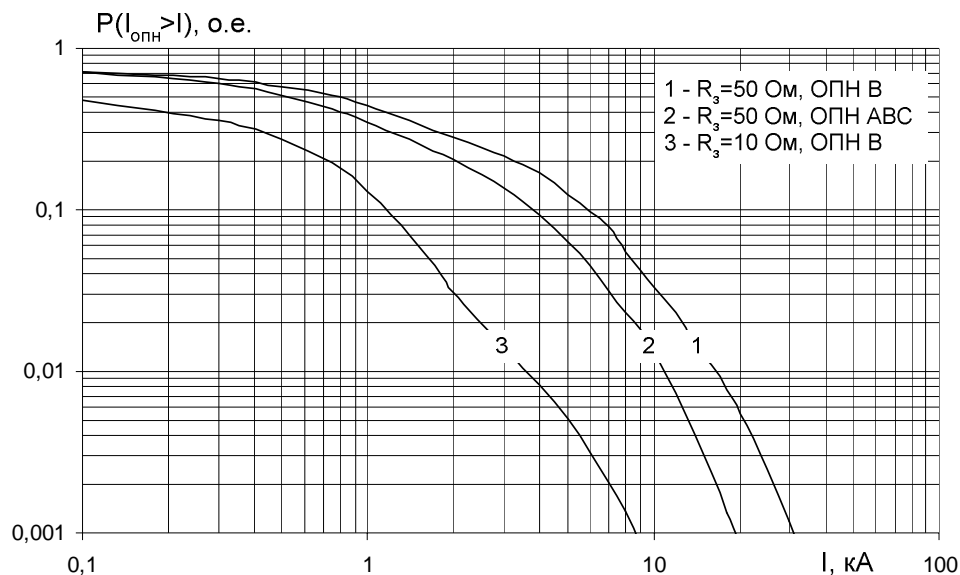


Рис.5.53. Удар молнии в опору. Вероятность превышения амплитуды тока в ОПН фазы «В» пораженной опоры заданного значения. Кривые 1 и 3 получены с учетом возможных перекрытий изоляции незащищенных с помощью ОПН фаз на пораженной опоре.

Следует отметить, что полученные вероятности в области малых токов в ОПН существенно зависят от вольтамперной характеристики ОПН, а также от наличия на проводе напряжения промышленной частоты, которое в ЕМТР-расчетах не учитывалось. Кроме того, снижению тока в ОПН способствуют возникающие при определенных токах молнии перекрытия изоляции незащищенных гирлянд, что учтено при получении кривых рис.5.53.

В случае удара молнии в фазный провод ВЛ амплитуда тока в наиболее нагруженном ОПН определяется, главным образом, амплитудой тока молнии и близостью других ОПН пораженной фазы. По расчетам амплитуда тока в наиболее нагруженном ОПН может составлять 0.5-0.9 амплитуды тока молнии, прорвавшейся на фазный провод. Поэтому вероятностные оценки токовых нагрузок на ОПН при ударе молнии в фазный провод можно легко получить, используя статистические данные по молнии (вероятность появления молнии с амплитудой тока выше заданного значения).

В ряде публикаций [38,68] высказываются предположения, что молнии с высокими амплитудами в большинстве случаев улавливаются тросовой защитой ВЛ, а молнии с низкими амплитудами улавливаются тросовой защитой хуже и могут прорваться на фазные провода и, таким образом, амплитуды токов молнии, прорвавшихся на фазные провода, будут меньше, чем для случая удара в трос. Подобные представления основаны на предположении об избирательности поражения объекта (удар в провод или в трос), которая зависит от того, какой погонный заряд несет с собой данный лидер молнии. Если погонный заряд большой, то лидер молнии, вероятнее всего, будет перехвачен встречным разрядом с троса, а в противном случае – он может "проскочить" на провод, т.е. к проводу будут прорываться (ударять в него) преимущественно лидеры молнии с малым погонным зарядом (меньшим зарядом соответствует меньшая амплитуда тока молнии).

С помощью подобных методик ориентировки в [38] получено, что прорывы молнии с амплитудой тока более 30-40 кА на фазные провода крайне маловероятны. Если ориентироваться на такую амплитуду тока ударившей в фазный провод молнии, то амплитуда импульсного тока в наиболее нагруженном ОПН не превзойдет 30-40 кА.

5.3.5. Расчет в полной схеме выделяющейся в ОПН энергий

Выделяющаяся в ОПН энергия в режиме ограничения грозовых перенапряжений определяется параметрами токов, протекающих в ОПН.

Удар молнии в трос

Результаты расчета энергии, выделяющейся в наиболее нагруженном ОПН фазы «В», при ударе молнии с $\tau_{\phi} = 2$ мкс в опору для случаев ОПН, установленных только в фазу «В» и во все три фазы на всех моделируемых опорах (5 опор, схема рис.5.26), представлены на рис.5.54.

При моделировании большего числа опор (например, не 5, а 9 опор) выделяющиеся в ОПН энергии будут несколько больше указанных на рис.5.54 значений, так как ранее было показано, что в этом случае ток в ОПН будет

большей длительности. В случае удара молнии не в опору, а в трос в пролете ВЛ выделяющиеся в ОПН энергии будут заметно меньше полученных на рис.5.54 значений.

Из рис.5.54 видно:

- чем больше длительность тока молнии, тем дольше протекает ток в ОПН, что увеличивает выделяющуюся в нем энергию (см. кривые 1-2 и 3-4);
- при ударах молнии в трос снижение сопротивления заземления уменьшает токовые нагрузки на ОПН, а значит и выделяющуюся энергию (см. кривые 1-2 и 3-4);
- чем больше установленных на опоре защитных ОПН, тем меньше токи в каждом из них (см. кривые 1 и 5).

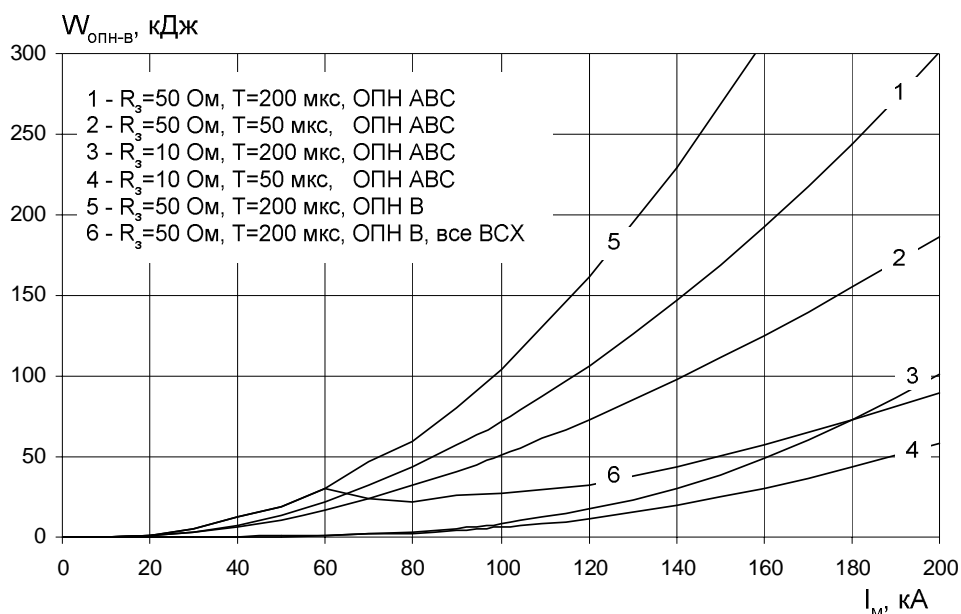


Рис.5.54. Удар молнии в опору. Энергия в ОПН фазы «В» при варьировании параметров тока молнии, сопротивления заземления опор, числа установленных на каждой опоре ОПН.

Кривая 6 получена в том случае, когда вольт-секундные характеристики изоляции приняты во внимание не только на пораженной опоре (кривая 5), но и на соседних опорах (возможность перекрытия изоляции на нескольких соседних опорах была объяснена при рассмотрении перенапряжений на изоляции ВЛ). Перекрытия изоляции, естественно, снизят токовые и энергетические нагрузки на ОПН:

- при выбранных временных параметрах импульса тока молнии до амплитуды тока молнии 60 кА перекрытий изоляции на соседних с пораженной опорах не происходит (кривые 5 и 6 на рис.5.54 идентичны);
- далее с ростом амплитуды тока молнии перекрытия происходят все на большем числе изолирующих подвесок, и выделяющаяся в ОПН фазы «В» энергия снижается (интервал токов молнии 60-80 кА по рис.5.54);
- после 80 кА новых перекрытий не происходит и энергия в ОПН с ростом амплитуды тока молнии растет.

Удар молнии в фазный провод

Результаты расчетов выделяющихся в наиболее нагруженном ОПН энергий в случае удара молнии в фазный провод ВЛ приведены на рис.5.55, на котором большие энергетические нагрузки на ОПН в случае удара в фазный провод обусловлены большими импульсными токами в аппаратах.

При использовании методики ориентировки [38,68], утверждающей, что к фазным проводам могут прорваться относительно слабые молнии (с амплитудой менее 30-40 кА и невысокой длительностью), энергию в ОПН согласно рис.5.55 можно оценить величиной не более 300-350 кДж. С учетом нескольких компонент молниевое разряда выделяющаяся в ОПН энергия может быть больше, однако незначительно, так как последующие компоненты молнии «слабее» первой.

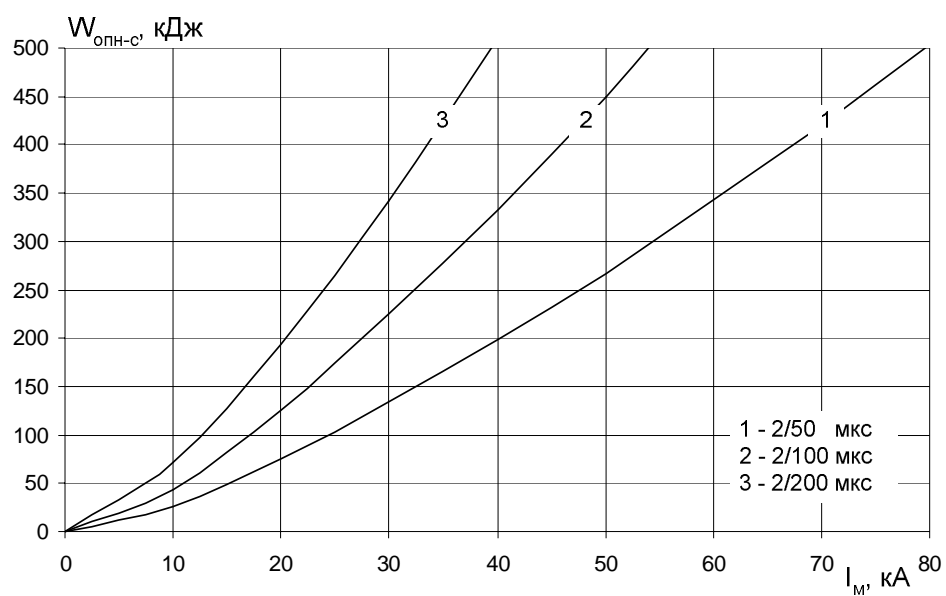


Рис.5.55. Удар молнии в фазный провод «С». Энергия в ОПН фазы «С» при варьировании параметров тока молнии (амплитуды, длительности).

5.4. Выбор основных параметров подвесных ОПН

5.4.1. Выбор вольтамперной характеристики ОПН

В случае применения подвесных ОПН на каждой опоре ВЛ для защиты ее изоляции от грозových перекрытий главное требование к вольтамперной характеристике ОПН таково [56,58]: остающееся напряжение во всем диапазоне токов в ОПН должно быть на 10-15% ниже, чем выдерживаемое гирляндой изоляторов напряжение при стандартном грозовом импульсе 1.2/50 мкс ($1.15 \cdot U_{ост}^{ОПН} < U_{ВСХ}^{из}$). Так как это условие при использовании типовых ОПН заведомо выполняется, то вольтамперную характеристику ОПН достаточно выбирать по условиям надежной работы ОПН при воздействии рабочего напряжения и коммутационных перенапряжений.

ОПН должен быть рассчитан на длительное воздействие на него рабочего напряжения сети (т.е. $U_{пр}^{ОПН} \geq U_{пр}^{сети}$ – наибольшее рабочее напряжение ОПН должно быть не меньше наибольшего рабочего напряжения сети в месте установки ОПН). Для ВЛ, на которых в эксплуатации возможно возникновение резонансных повышений напряжения, допустимость использования выбранного ОПН должна быть проверена по его характеристике «напряжение-время». ОПН не должен срабатывать при воздействии коммутационных перенапряжений, задачу ограничения которых целесообразно возлагать на «тяжелые» подстанционные ОПН (т.е. $U_{ост}^{ОПН} > U_{ост}^{ОПН-ПС}$). Под коммутационными перенапряжениями здесь понимаются наиболее опасные для ОПН с точки зрения выделяющейся в варисторах энергии перенапряжения, связанные с коммутациями ВЛ – эти и другие виды коммутационных перенапряжений не представляют опасности для изоляции ВЛ 110-220 кВ, но могут быть опасны для оборудования ПС.

Работа подвесных ОПН по ограничению коммутационных перенапряжений нежелательная прежде всего в тех случаях, когда на ВЛ установлено малое число таких аппаратов (например, защита так называемых

«больших переходов», когда ОПН установлены только на примыкающих к переходу опорах).

При большом числе установленных на ВЛ подвесных ОПН задачу ограничения коммутационных перенапряжений принципиально можно (но так не делают) возложить на эти аппараты (т.е. $U_{ocm}^{ОПН} \leq U_{ocm}^{ОПН-ПС}$), так как на долю каждого из них придется лишь незначительная энергия. Поскольку в этом случае коммутационные перенапряжения не будут предъявлять требований по высокой энергоемкости к подстанционным аппаратам, то в качестве подстанционных ОПН можно использовать «легкие» ОПН, предназначенные главным образом для защиты оборудования от набегающих с линии грозových волн.

5.4.2. Выбор ОПН по токовым и энергетическим воздействиям

Расчеты показали, что ОПН, установленные на ВЛ, подвергаются воздействию импульсов тока, амплитуда которых и временные характеристики изменяются в широких пределах. На основе найденного расчетным путем диапазона воздействующих на ОПН в эксплуатации импульсов тока и выделяющейся при этом энергии необходимо выбрать ограничители перенапряжений, характеристики которых определены только при нормированных воздействиях.

Пропускная способность ОПН, в большинстве случаев, определяется только для двух форм грозových импульсов тока – номинального разрядного 8/20 мкс (20 воздействий тока номинального амплитуды) и импульса "большого" тока 4/10 мкс (2 воздействия тока амплитудой 65 или 100 кА). Согласно МЭК [33] к ОПН специального назначения (для районов с высокой грозовой активностью) требования по пропускной способности на импульсе 4/10 мкс (2 воздействия) заменяются на импульс 30/80 мкс с амплитудой 40 кА (3 воздействия). В испытаниях энергоемкость ОПН определяется только при воздействии прямоугольного импульса тока длительностью 2000 мкс с

амплитудой до 2000 А, зависящей от заявленного производителем класса пропускной способности.

Возможность использования значения поглощаемой энергии, определенной в режиме ограничения коммутационных перенапряжения, в качестве значения энергии, допустимой для ОПН в режиме ограничения грозových перенапряжений, неправомерна без необходимых проверок.

В этих условиях выбор ОПН для защиты изоляции ВЛ от грозových перенапряжений может быть сделан на основе допущения: ОПН в режиме ограничения грозových перенапряжений выдержит любой импульс тока с амплитудой, не превосходящей амплитуды импульса "большого" тока для этого ОПН при условии неперевышения выделяющейся энергии значения, определенного при испытаниях для импульса длительностью 2000 мкс.

Значения удельной энергии, выделяющейся в ОПН при воздействии грозových импульсов тока с формой, нормированной МЭК (8/20 мкс, 4/10 мкс, а так же импульса 30/80 мкс), полученные расчетным путем, приведены в табл.5.2 (расчеты выполнены для ОПН 110 кВ, остающееся напряжение которого при импульсе тока 8/20 мкс 10 кА составляет 300 кВ).

Таблица 5.2. Различные испытательные импульсы по МЭК и их энергии (для ОПН 110 кВ)

Импульс тока, мкс/мкс	Амплитуда тока, кА	Энергия одного импульса, кДж/кВ	Число импульсов в цикле испытаний	Способ приложения
8/20	5	0,3	20	4 серии по 5 импульсов; между импульсами 1 минута, интервал времени между сериями должен быть достаточным для остывания образцов
	10	0,6		
	20	1,3		
4/10	65	2,3	2	с интервалом в 1 минуту
	100	3,6		
30/80	40	10,7	3	с интервалом в 1 минуту

В табл.5.2 показано, что один импульс тока 30/80 мкс выделяет в ОПН энергию, которая в несколько раз превосходит энергию на импульсе 4/10 мкс. Испытанные по МЭК ограничители (табл.5.2) можно расположить по мере

возрастания токовых и энергетических нагрузок на них, как это показано в табл.5.3, где приведены возможные сочетания различных параметров производимых промышленностью ОПН: первый вариант – наиболее «легкие» ОПН; пятый вариант – «тяжелые» ОПН специального назначения. Номер варианта (табл.5.3) не является классом разряда линии по МЭК.

Таблица 5.3. Различные варианты сочетаний параметров производимых ОПН 110 кВ.

Вариант	Амплитуда импульса заданной формы, кА			Макс. энергия одного импульса тока, кДж/кВ
	8/20 мкс	4/10 мкс	30/80 мкс	
1	5	65	-	2,3
2	10	65	-	2,3
3	10	100	-	3,6
4	20	100	-	3,6
5	20	100	40	10,7

Росту амплитуды номинального разрядного тока ОПН (импульс 8/20 мкс) по табл.5.3 соответствует рост диаметра варисторов, что приводит к увеличению допустимых энергетических воздействий на ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений.

На основе токовых и энергетических воздействий на ОПН, найденных в результате расчета переходных процессов в ВЛ, изоляция которой защищена ОПН, можно, с использованием табл.5.3, предложить методику выбора основных токовых и энергетических характеристик ОПН:

- по табл.5.3 выбирается наиболее подходящий набор токовых характеристик ОПН;
- выбранный по току вариант проверяется по допустимости выделяющихся в ОПН энергий. В случае превышения выделяющихся в ОПН энергий тех значений, которым они подвергались в процессе испытаний, необходимо перейти к варианту с более высоким порядковым номером по табл.5.3 (вплоть до 5-го варианта).

Согласно проведенным для ВЛ 110 кВ ЕМТР-расчетам, в случае установки ОПН во все фазы ВЛ, в подавляющем большинстве случаев ударов молнии в трос, ток в ОПН будет по амплитуде менее 5-7 кА. В редких случаях амплитуда тока может достигать 20-30 кА, при этом условная длительность протекания тока в ОПН не превысит 10 мкс. Таким образом, не учитывая ударов молнии в фазные провода, достаточными будут токовые характеристики вариантов 1 или 2 по табл.5.3.

Расчеты энергии для удара молнии в трос ВЛ 110 кВ в случае установки ОПН во все фазы ВЛ показали, что в редких случаях выделяющаяся в ОПН энергия может достигать 300 кДж. В большинстве же случаев энергия будет заметно меньше, даже приняв во внимание многокомпонентность разряда молнии. Таким образом, по энергии необходимо выбрать ОПН с параметрами, соответствующими варианту 3 табл.5.3.

Так как вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту на фазные провода для ВЛ 110-220 кВ мала, то ориентироваться на этот расчетный случай при выборе параметров подвесных ОПН не имеет смысла. При прорыве мощной молнии на фазный провод, ближайший подвесной ОПН, скорее всего, будет поврежден и потребует замены. Если доверять методике ориентировки молнии [38,68], то мощные молнии не могут прорваться на фазные провода, а значит и вероятность повреждения ОПН мала.

5.5. Статистический подход к расчету грозоупорности ВЛ

Ранее было показано, что для расчета показателей грозоупорности можно использовать методику построения кривой опасных токов, однако более полным будут статистический метод, суть которого применительно к анализу грозовых перенапряжений на линии такова:

- выбирается расчетный случай (удар молнии в опору, в трос, в фазный провод);
- для выбранного случая в полной ЕМТР-схеме многократно повторяется расчет грозовых перенапряжений на ВЛ рассматриваемой конструкции и класса напряжения;
- в каждом из расчетов параметры импульса тока молнии (форма импульса описывается выражением (1.4)) принимаются с учетом статистических данных по молнии, приведенных, например, в [1] (здесь в отчете все расчеты выполнялись для вероятностных распределений «НИИПТ» по [1]);
- суммарное число перекрытий изоляции ВЛ, отнесенное к общему числу выполненных экспериментов, дает вероятность перекрытия изоляции ВЛ в рассмотренном расчетном случае, а найденные таким образом вероятности $P_{опора}$ ($i=1$), $P_{трос}$ ($i=2$), $P_{пр}$ ($i=3$) являются исходными данными для проведения расчетов по формуле (5.1).

В качестве примера использования такой методики ниже кратко приведен анализ грозовых перенапряжений на ВЛ 330 кВ с промежуточными опорами типа ПЗ30-3 по [13] (рис.5.56).

В табл.5.4-5.6 представлены результаты расчетов числа ударов молнии в ВЛ 330 кВ на опорах ПЗ30-3 по четырем различным методикам, а также вероятности прорыва молнии на фазные провода.

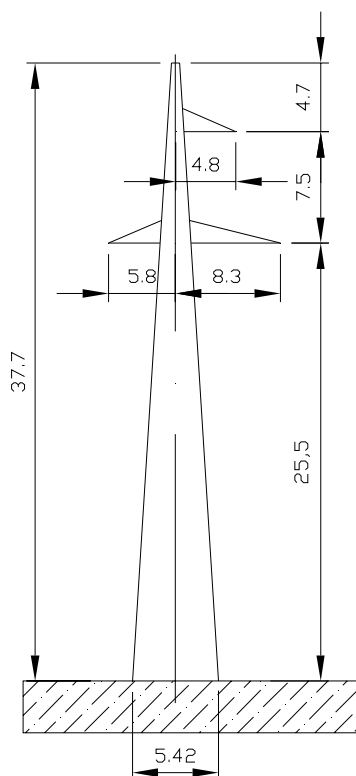


Рис.5.56. Эскиз опоры П330-3 по [13] (условно будем обозначать: нижнюю левую фазу – «А», нижнюю правую фазу – «В», верхнюю фазу – «С»).

Таблица 5.4. Число ударов молнии N в ВЛ 330 кВ на опорах П-330-3 (на 100 км длины ВЛ и на 100 грозových часов в год)

[1]	92
[11]	198
[14]	112
[20]	157

Таблица 5.5. Число ударов молнии в опору $n_{опора}N$ и трос $n_{трос}N$ ВЛ 330 кВ на опорах П330-3 (на 100 км длины и на 100 грозových часов в год)

	В опору	В трос
[1]	35	57
[20]	94	63

Таблица 5.6. Вероятность $n_{пр}$ прорыва молнии на фазные провода ВЛ 330 кВ на опорах П330-3 (в относительных единицах)

[1]	0.00882
[66]	0.00686

На рис.5.57 приведены результаты статистических расчетов вероятностей $P_{опора}$, $P_{прос}$, $P_{пр}$ в полной ЕМТР-схеме при варьировании величины импульсного сопротивления заземления опор ВЛ 330 кВ. Проанализировав результаты, увидим, что наиболее «аварийная» фаза определяется величиной сопротивления заземления опоры: при «высоких» и «средних» сопротивлениях заземления импульсные перекрытия всегда происходят на нижних фазах; при «низких» сопротивлениях заземления перекрытия изоляции происходят на верхней фазе. Больше число перекрытий на нижних фазах по сравнению с верхними отмечалось ранее при подробном анализе грозовых перенапряжений ВЛ 110 кВ.

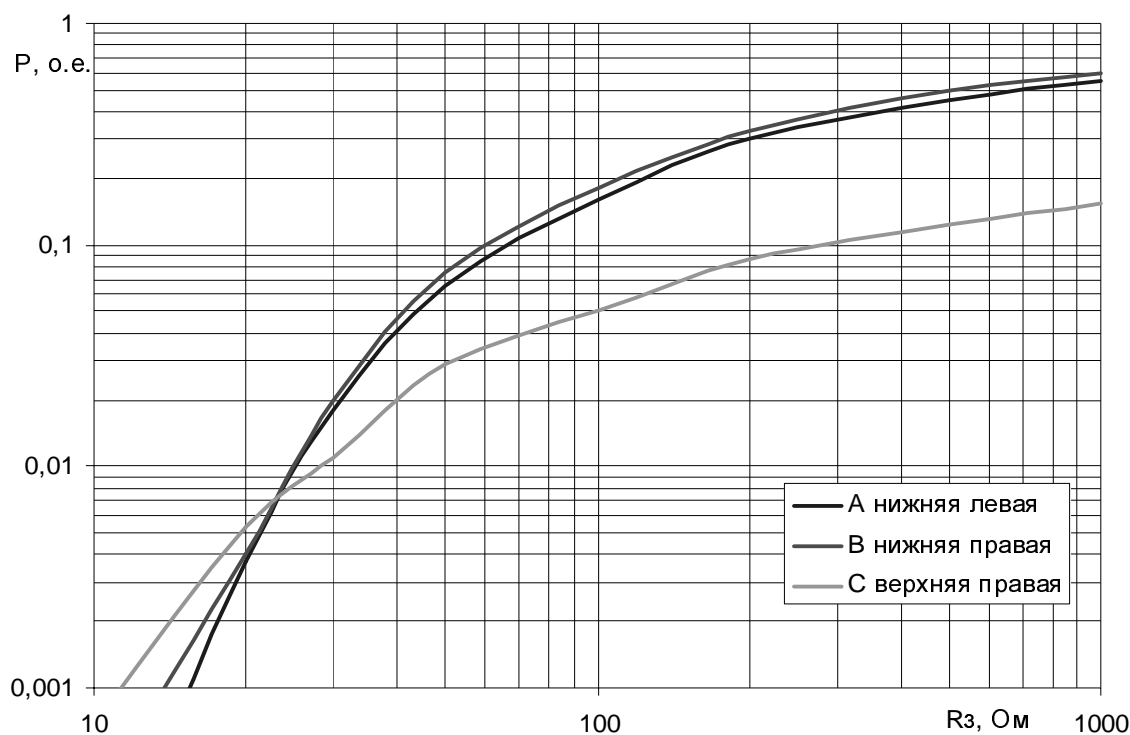


Рис.5.57,а. Вероятность $P_{опора}$ перекрытия изоляции фаз на опоре при ударе молнии в опору ВЛ 330 кВ на опорах ПЗ30-3.

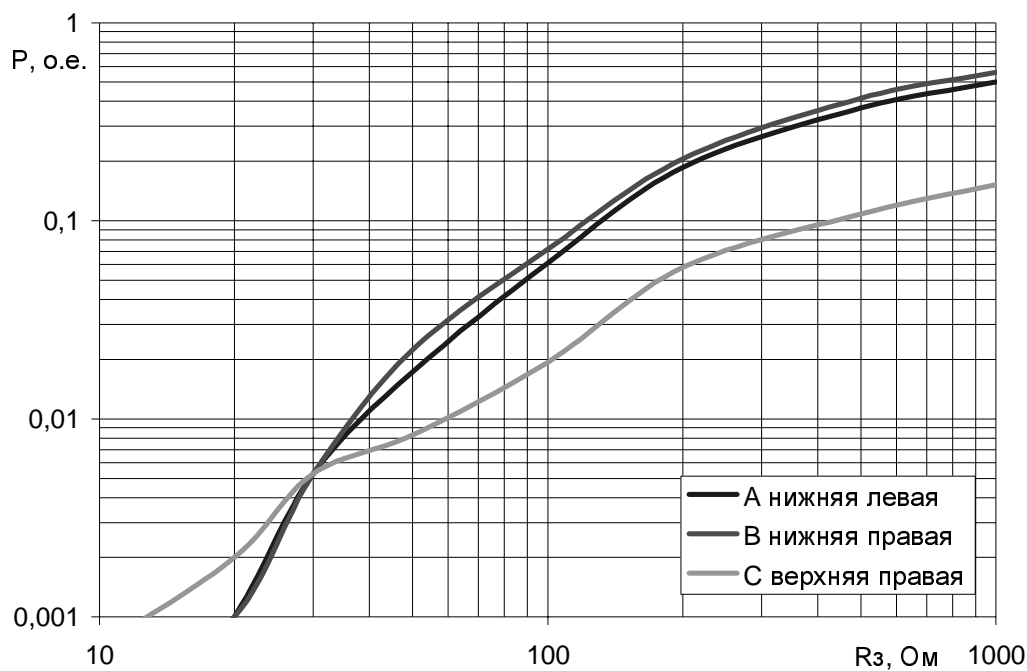


Рис.5.57,б. Вероятность $P_{\text{трос}}$ перекрытия изоляции фаз на опоре при ударе молнии в трос в середине пролета ВЛ 330 кВ на опорах П330-3.

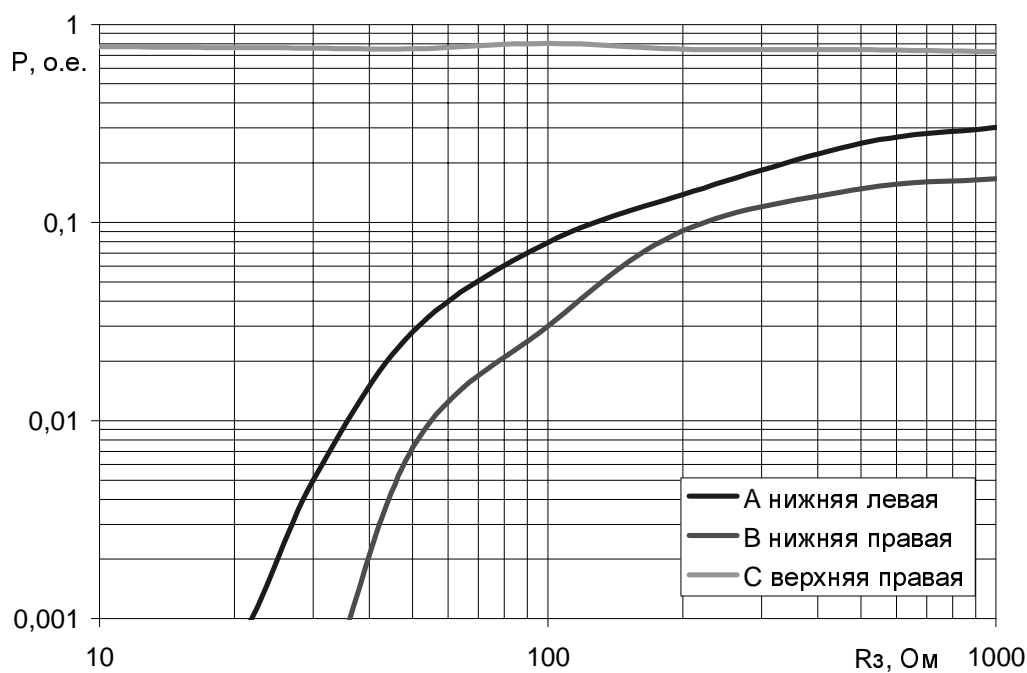


Рис.5.57,в. Вероятность $P_{\text{пр}}$ перекрытия изоляции фаз на опоре при ударе молнии в верхний (С) фазный провод ВЛ 330 кВ на опорах П330-3.

Результаты расчетов (на 50 грозových часов) по формуле (5.3) годового числа грозových перекрытий изоляции ВЛ 330 кВ длиной 100 км на промежуточных опорах П330-3, полученных с учетом табл.5.4-5.6, в которых за основу принято использование методики [1], приведены в табл.5.7 и на рис.5.58. При типовых сопротивлениях заземления из диапазона 10-30 Ом полученное число отключений ВЛ 330 кВ в год близко к значениям, указанным в табл.5.1, т.е. примененный в ЕМТР статистический метод дает удовлетворительные результаты.

Таблица 5.7. Число грозových отключений ВЛ 330 кВ на опорах П330-3 (на 100 км длины и на 50 грозových часов в год)

Рз, Ом	N, раз в год
10	0,26
20	0,37
30	0,70
50	2,1
100	5,2
200	11,3
500	20
1000	25

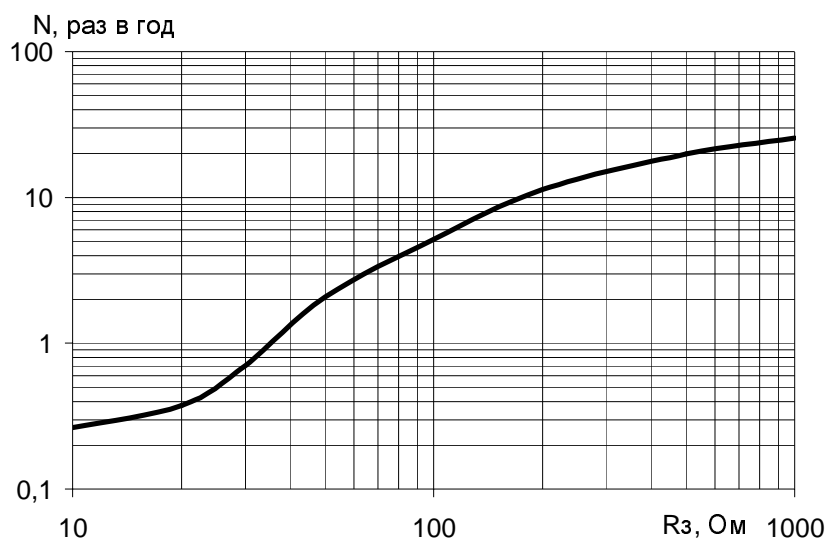


Рис.5.58. Годовое число грозových отключений ВЛ 330 кВ длиной 100 км на промежуточных опорах типа П330-3 в зависимости от их сопротивления заземления (результаты расчетов указаны при 50 грозových часах в год).

С использованием описанного статистического метода были проведены расчеты для ВЛ различных номинальных напряжений и конструкций опор:

- одноцепные и двухцепные;
- с вертикальным и горизонтальным расположением проводов;
- с одним тросом или с двумя.

В расчетах варьировалась величина сопротивления заземления опор ВЛ 110-750 кВ, в зависимость от которой поставлены искомые вероятности $P_{опора}$, $P_{трос}$, $P_{пр}$. На основе анализа полученных результатов для опор разных типов сделаны следующие важные выводы:

- для ВЛ с горизонтальным расположением проводов обратные перекрытия наиболее вероятны на крайних фазах;
- для ВЛ с иным (вертикальное, треугольник) расположением проводов наиболее «аварийная» фаза определяется величиной сопротивления заземления опоры: при «больших» сопротивлениях заземления перекрытия всегда происходят на нижних фазах; при «средних» сопротивлениях заземления перекрытия происходят на средних фазах (для вертикального расположения проводов, т.е. для двухцепных опор); при «малых» сопротивлениях заземления перекрытия изоляции происходят на верхних фазах.

На основе этих выводов, а также подробных расчетов грозовых перенапряжений на примере ВЛ 110 кВ, сделаны следующие обобщающие рекомендации относительно мест установки ОПН:

- для эффективной защиты изоляции ВЛ от грозовых перенапряжений необходима установка ОПН на каждой опоре;
- для снижения числа грозовых отключений, вызванных прорывами молнии на фазные провода, наиболее эффективно устанавливать защитные ОПН в верхние фазы (при вертикальном расположении или расположении проводов в «треугольник») и в крайние фазы (при горизонтальном расположении проводов);

- для снижения числа грозových отключений, вызванных обратными перекрытиями изоляции с опоры на фазные провода, установка ОПН наиболее эффективна в крайние фазы ВЛ с горизонтальным расположением проводов, а на ВЛ с иным расположением проводов – в зависимости от сопротивлений заземления опор;
- для исключения перекрытий изоляции на опоре необходима установка ОПН сразу во все фазы на опоре.

Аналогично анализу грозových перенапряжений и числа отключений ВЛ, в случае установки на ВЛ защитных ОПН подвешеного исполнения при помощи статистического метода были определены вероятности появления в ОПН импульсных токов с амплитудой, превышающей заданное значение, и вероятности выделения в ОПН энергии, превосходящей заданную (например, испытательную) величину. При определении токовых и энергетических нагрузок на ОПН 110-750 кВ, установленных на ВЛ 110-750 кВ, рассматривались удары в опору, трос и фазный провод, а для обеспечения возможности корректного сравнения полученных токовых и энергетических нагрузок на ОПН 110-750 кВ расчеты были проведены для случая, когда на каждой опоре моделируемого участка ВЛ установлено одинаковое число ОПН (вне зависимости от числа цепей), например, только один ОПН. На основе проделанной работы сделаны следующие основные выводы:

- класс напряжения ВЛ практически не сказывается на амплитуде импульсного тока в ОПН и его удельной поглощаемой энергии;
- амплитуда импульсного тока в ОПН и его удельная поглощаемая энергия практически не зависят от остающегося напряжения на ОПН;
- закладываемые в расчеты статистические характеристики параметров импульса тока молнии (данные «НИИПТ» и СИГРЕ [1]) незначительно сказываются на амплитуде импульсного тока в ОПН и выделяющейся энергии;

- число тросов практически не сказывается на амплитуде импульсного тока в ОПН, однако большему числу тросов соответствуют меньшие энергетические нагрузки на ОПН;
- число цепей заметно влияет на импульсные токи и выделяющуюся энергию, которые для двухцепных ВЛ заметно меньше, чем для одноцепных;
- наибольшую опасность представляет удар молнии в фазный провод, так как он приводит к самым большим токовым и энергетическим нагрузкам на ОПН, которые в ряде случаев могут приводить к повреждению ОПН и необходимости его замены;
- разработанная [38,68] методика учета ориентировки канала лидера молнии является важной в расчетах максимальных импульсных токов и выделяющихся энергий в подвесных ОПН, так как позволяет обосновать снижение практически невыполнимых требований к подвесным ОПН при ударах молнии в фазные провода.