

1. ГРОВОЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ОБОРУДОВАНИИ ПС И ЗАЩИТА ОТ НИХ

Опасные грозвые перенапряжения на изоляции оборудования подстанций 110-750 кВ возникают как при ударах молнии непосредственно в ПС, так и при поражениях ВЛ. Последнее сопровождается образованием и приходом на распределительное устройство подстанции грозвых волн [1,2].

Защита оборудования подстанций от прямых ударов молнии обеспечивается системой стержневых и тросовых молниеотводов, а защита подстанций от набегающих с ВЛ волн грозвых перенапряжений, которой посвящена эта глава, основана на ряде мероприятий, главным из которых является выбор мест установки и характеристик защитных аппаратов (ОПН, разрядников), обеспечивающих необходимую надежность работы оборудования ПС [1-4].

Исследования в области защиты оборудования ПС от грозвых перенапряжений с помощью вентильных разрядников проводились во многих научных центрах СССР, среди которых важное место занимает Ленинградский Политехнический Институт (ЛПИ). Среди специалистов, посвятивших свою работу защите оборудования подстанций от грозвых перенапряжений, следует выделить Костенко М.В., Ефимова Б.В., Гумерову Н.И., Халилова Ф.Х., Кадомскую К.П.

Вентильные разрядники практически сняты с производства с середины 90-х годов (в настоящее время выпускаются только для сетей до 220 кВ Великолукским заводом) и в большинстве случаев отслужили свой нормативный срок службы. Замена РВ возможна лишь на современные ОПН, и поэтому при модернизации существующих схем защиты необходимо решить задачу по выбору характеристик ОПН, предназначенных для замены устаревших РВ.

Защитные характеристики ОПН, а также их конструкции существенно отличаются от вентильных разрядников, что вызывает необходимость критически переосмыслить сложившуюся практику использования аппаратов

для защиты оборудования ПС от перенапряжений вообще, и от грозových, в частности. Иными словами, актуальными становятся: выбор числа ОПН на подстанции и места их установки, а также их характеристик.

Вопросы защиты оборудования ПС от грозových перенапряжений с помощью вентильных разрядников рассмотрены в правилах устройства электроустановок, где для различных схем открытых распределительных устройств в зависимости от числа и типа вентильных разрядников даны максимальные расстояния до оборудования. Впервые требования ПУЭ в части расстояний от вентильных разрядников до защищаемого оборудования были сформулированы еще в 1961 году с помощью так называемых анализаторов грозозащиты и с тех пор до недавнего времени не пересматривались. Одним из подтверждений этого служит то, что требования по защите оборудования ПС 750 кВ от грозových перенапряжений были добавлены в ПУЭ лишь сравнительно недавно, тогда как класс напряжения 750 кВ появился в СССР еще в 70-е годы.

В последней (7-й) редакции ПУЭ [3] впервые помимо вентильных разрядников в качестве защитного аппарата от грозových перенапряжений на оборудовании ПС рассматривается также и ОПН. В этой редакции ПУЭ допустимые расстояния от оборудования ПС до ОПН предлагается определять в соответствии с защитными характеристиками ОПН на основе требований к расстояниям до вентильных разрядников, приведенных в предыдущих редакциях ПУЭ. Следовательно, за основу построения защиты оборудования ПС от грозových перенапряжений в последней редакции ПУЭ положены все те же требования ПУЭ еще 1961 года, полученные в весьма упрощенной постановке на анализаторах грозозащиты.

В настоящее время возможности современной компьютерной техники и наличие соответствующего программного обеспечения позволяют решить задачу защиты оборудования ПС от грозových перенапряжений более точно.

Для расчетов грозových перенапряжений на оборудовании подстанций был использован известный канадско-американский программный комплекс

EMTP (Electromagnetic Transients Program [5-7]), дополненный соискателем рядом специализированных модулей, позволяющих учесть вольт-секундную характеристику изоляции, импульсную корону на проводах ВЛ, статистические данные по параметрам импульса тока молнии. Расширенный дополнительными модулями программный комплекс EMTP позволяет проводить расчеты грозовых перенапряжений на подстанциях при подробном моделировании процессов в ОРУ совместно с процессами в присоединенной ВЛ, для которой рассматривается поражение молнией, т.е. разработанная на базе EMTP компьютерная модель для анализа грозовых перенапряжений состоит из модели открытого распределительного устройства подстанции и моделей присоединенных воздушных линий электропередачи.

Использование программного комплекса EMTP, адаптированного соискателем к расчету грозовых перенапряжений на оборудовании ПС, позволяет проверить с помощью компьютерного моделирования переходных процессов обоснованность требований ПУЭ к расстановке защитных аппаратов в РУ ПС, базирующихся, главным образом, на работах более чем сорокалетней давности.

Разработанные модели для расчета грозовых перенапряжений на оборудовании ПС 110-750 кВ использованы при выполнении целевой программы ОАО «ФСК ЕЭС» по замене вентильных разрядников на ограничители перенапряжений на подстанциях в период 2005-2006 гг., в рамках которой соискателем проведены расчеты грозовых перенапряжений более чем в семидесяти ОРУ 110-750 кВ на 35 подстанциях. На основе анализа полученных в процессе выполнения этой работы результатов сделаны обобщающие выводы относительно защищенности оборудования ПС 110-750 кВ от грозовых перенапряжений, даны рекомендации по способам ее повышения, а также предложения по корректировке требований ПУЭ. В этой главе в качестве иллюстраций приведены результаты расчетов грозозащиты ОРУ 500 кВ подстанции «Луч» (МЭС Центра), которая является типовой в своем классе.

1.1. Описание расчетной модели

1.1.1. Модель открытого распределительного устройства

Переход от реальной схемы ОРУ к расчётной эквивалентной схеме осуществлен с учётом определённых правил и допущений:

- Считаются пренебрежимо малыми потери в проводах и земле, а также пренебрегается влиянием соседних фаз (ОРУ смоделировано в однофазной постановке) и эффектом короны на проводах ошиновки подстанции (корона на линии учтена). Возможности программного комплекса ЕМТР позволяют моделировать ОРУ в трехфазной постановке, однако ряд контрольных расчетов, а также данные [2] свидетельствуют об отсутствии такой необходимости для решения практических задач.
- Учитывая то, что расчет грозových перенапряжений в ОРУ при отказе от учета волнового характера процессов может привести к существенным погрешностям [8], участки ошиновки, соединяющие оборудование, приняты однопроводными линиями без потерь заданной длины и моделируются волновыми параметрами [1,8] (волновым сопротивлением Z и скоростью распространения электромагнитной волны, которая принимается равной $v = 300$ м/мкс). Волновое сопротивление Z ошиновки задается по данным [1] в зависимости от класса номинального напряжения ОРУ.
- Трансформаторы и другие высоковольтные аппараты заменяются их входными емкостями, усредненные величины которых указаны в [1,9].
- Нелинейный ограничитель перенапряжений моделируется нелинейным сопротивлением [10], вольтамперная характеристика которого задается выражением $U = AI^\alpha$. Показатель степени α для анализа грозových перенапряжений принимается $\alpha = 0.08$, а коэффициент A определяется по одной известной точке вольтамперной характеристики моделируемого ОПН, в качестве которой, как правило, используется остающееся напряжение на импульсе тока 8/20 мкс с максимальным значением 10 кА.

- Импульсное сопротивление заземления ОПН принимается равным нулю. Соединительный шлейф между ОПН и ошиновкой ОРУ моделируется сосредоточенной индуктивностью, величина которой определяется длиной шлейфа и его погонной индуктивностью (принята равной 1 мкГн/м).
- Согласно [11] считается, что для изоляции оборудования в эксплуатации допустимо воздействие грозового перенапряжения с амплитудой не более

$$U_{\text{доп}} = 1.1(U_{\text{исп}} - 0.5U_{\text{ном}}), \quad (1.1)$$

где $U_{\text{исп}}$ – испытательное напряжение полного грозового импульса нового оборудования по [12], $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение оборудования. Допустимые кратности грозовых перенапряжений считаются одинаковыми вне зависимости от формы импульса грозового перенапряжения на изоляции оборудования.

1.1.2. Модель присоединенных к ОРУ воздушных линий

В каждом расчетном случае удара молнии все присоединенные к ОРУ воздушные линии разделены на две группы:

- воздушные линии, по которым на ОРУ не набегает грозовых волн;
- воздушная линия, с которой на ОРУ набегает грозовая волна, вызванная разрядом молнии в эту линию.

Воздушные линии, относящиеся к первой группе, моделируются упрощенно, т.е. активными сопротивлениями, равными волновому сопротивлению фазного провода [2]. Воздушная линия, относящаяся ко второй группе, моделируется подробно в трехфазной постановке в соответствии со своими конструктивными особенностями.

При анализе грозовых перенапряжений в ОРУ 110-750 кВ расчетными случаями являются следующие воздействия молнии на присоединенные воздушные линии [1]:

1. Удары молнии в грозозащитный трос ВЛ на подходе к ПС. Все удары молнии в грозотрос условно разделяют на удары в трос вблизи опоры (точка

1 на рис.1.1) и на удары в трос в средней части пролета между двумя соседними опорами (точка 2 на рис.1.1).

2. Прорыв молнии мимо тросовой защиты на фазные провода для линий с тросами (точка 3 на рис.1.1). 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.

Для ВЛ 110 кВ и выше с индуктированными перенапряжениями при ударах молнии в землю можно не считаться [1], и в расчетах они не учтены.

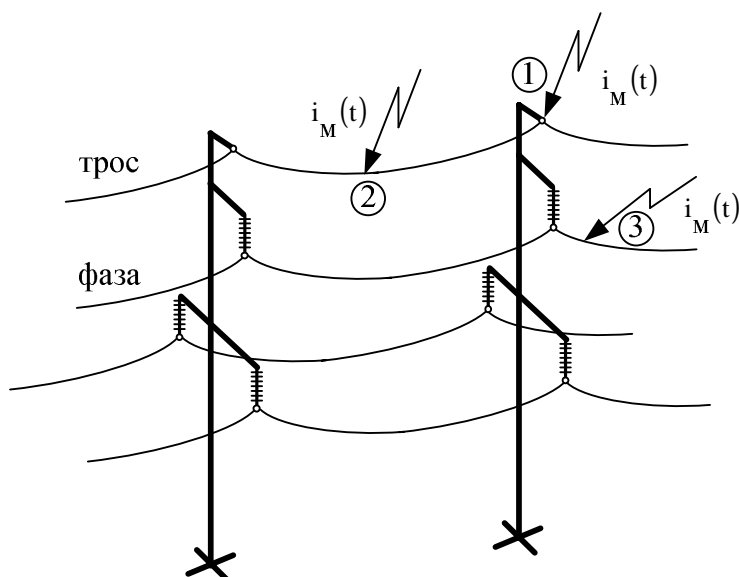


Рис.1.1. Источники грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ.

Опора ВЛ. Все опоры моделируемой ВЛ, присоединенной к ОРУ, приняты одинаковыми, соответствующими типовой конструкции промежуточной опоры, наиболее широко применяемой для ВЛ рассматриваемого класса номинального напряжения. Модель опоры ВЛ представлена набором индуктивностей [1], величины которых определены с использованием известной геометрии опоры (см. [13]) и погонных индуктивностей опор (около $0.5 \div 1.0$ мкГн/м по [1]); каждая опора заземлена через активное сопротивление, моделирующее заземляющее устройство. Величина сопротивления заземления опор каждый раз оговаривается отдельно.

В нормативных документах [3] и протоколах измерений, как правило, указаны сопротивления опор растеканию тока, полученные методом «вольтметр-амперметр», однако для расчета грозовых перенапряжений требуется величина импульсного сопротивления опор. С некоторой погрешностью импульсное сопротивление заземления опоры можно принять равным сопротивлению растекания. Такое допущение возможно, поскольку с одной стороны в импульсном режиме из-за пробоя грунтов при больших импульсных токах через опоры коэффициент импульса становится меньше единицы, с другой – в таком режиме сказывается индуктивность лучей заземлителя, что увеличивает коэффициент импульса. В итоге упомянутые факторы в значительной степени взаимно компенсируются.

Фазные провода и тросы. Воздушная линия представлена совокупностью расположенных между опорами участков ВЛ (пролетов). Каждый участок (пролет) ВЛ моделируется многопроводной линией, состоящей из фазных проводов и тросов, взаимное расположение которых задается в зависимости от выбранного типа опоры с учетом длины гирлянды изоляторов. По данным [13] усредненные значения длин пролета для ВЛ 110, 220, 330, 500, 750 кВ составляют соответственно, 300 м, 350 м, 400 м, 450 м, 500 м.

Изоляция ВЛ. Перекрытие изоляции ВЛ 110-750 кВ наиболее вероятно на опоре, вдоль гирлянды изоляторов, т.е. там, где электрическая прочность промежутка «провод-земля» («провод-траверса») минимальна. Возможность перекрытия линейной изоляции при различных воздействующих перенапряжениях определяется ее прочностью, которая задается вольт-секундной характеристикой (ВСХ) [1,14]. При воздействиях, по форме близких к стандартному грозовому импульсу 1.2/50 мкс, согласно [14] вольт-секундная характеристика (в кВ) описывается выражением

$$u(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}}, \quad (1.2)$$

где t – предразрядное время (в мкс), а коэффициенты K_1 и K_2 находятся по длине гирлянды изоляторов L (выраженной в метрах) как $K_1 = 400 \cdot L$, $K_2 = 710 \cdot L$.

В качестве длины гирлянды изоляторов для ВЛ 110, 220, 330, 500, 750 кВ по данным [13] можно использовать, соответственно, усредненные значения $L = 1.25$, $L = 2.3$ м, $L = 3.0$ м, $L = 4.0$ м, $L = 6.0$ м. Полученные при таких длинах вольт-секундные характеристики гирлянд изоляторов ВЛ 110-750 кВ близки к рекомендациям [1].

Импульсная корона на проводах ВЛ. По данным [2,11,15] динамическая емкость одиночного коронирующего провода описывается эмпирической формулой:

$$C_d = C_0 \left[1 + \frac{5}{3} A (u^* - 1)^{2/3} \right],$$

где $u^* = u / U_{нач}$ – мгновенное значение напряжение на проводе в относительных единицах, $U_{нач}$ – начальное напряжение общей короны, A – эмпирический коэффициент, зависящий от полярности напряжения на проводе ($A^{(+)} = 0.78$, $A^{(-)} = 0.375$).

Емкость C_0 – собственная емкость некоронирующего провода, которая может быть определена через потенциальный коэффициент

$$\alpha = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{2h}{R_{экв}} \right],$$

$$C_0 = \frac{1}{\alpha},$$

где $R_{экв} = (n \cdot r_0 \cdot R^{n-1})^{1/n}$ – эквивалентный радиус расщепленного провода [1], r_0 – радиус одного провода, n – число проводов в расщепленном, $R = \frac{D}{2} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)$ – радиус расщепления провода, D – шаг расщепления.

Начальное напряжение общей короны определено выражением [2,11,15]

$$U_{нач} = 2\pi\epsilon_0 m_0 E_{нач} \cdot \frac{r_0 n}{k_m C},$$

где $m_0 = 0.82$ – коэффициент негладкости провода (для витого провода); r_0 – радиус провода; n – число проводов в фазе; C – средняя емкость фазы; $E_{нач} = 29 \div 33 \approx 31$ кВ/см – начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению короны; $k_m = 1 + (n-1) \cdot r_0 / R$ – обозначение множителя формулы, обусловленного расчетом электростатического поля расщепленного провода.

Типовые значения числа проводов в расщепленной фазе n и радиуса r_0 составляющих приняты по [16], а результаты расчетов, выполненных при $h = 15$ м, $D = 0.4$ м, приведены в табл.1.1.

Таблица 1.1. Исходные данные для расчета емкости коронирующего провода ВЛ.

| $U_{ном}$, кВ | n | r_0 , см | $R_{экс}$, см | C_0 , пФ/м | $U_{нач}$, кВ |
|----------------|-----|------------|----------------|--------------|----------------|
| 110 | 1 | 0.86 | 0.86 | 6.8 | 178 |
| 220 | 1 | 1.26 | 1.26 | 7.2 | 249 |
| 330 | 2 | 1.38 | 7.43 | 9.3 | 394 |
| 500 | 3 | 1.38 | 13.02 | 10.2 | 511 |
| 750 | 4 | 1.46 | 19.07 | 11.0 | 650 |

В программном комплексе ЕМТР импульсная корона на проводах ВЛ учтена при помощи дополнительных сосредоточенных емкостей (в дополнение к собственной распределенной емкости C_0 фазного провода), включаемых между фазными проводами и землей

$$C_d^{EMTP} = C_d - C_0 = C_0 \left[\frac{5}{3} A (u^* - 1)^{2/3} \right] = C_0 \left[1.667 A (u^* - 1)^{0.667} \right] \quad (1.3)$$

Так как все молнии считаются отрицательными [1,17], то достаточно моделировать импульсную корону только при отрицательной полярности напряжения на фазном проводе. В расчетной модели ЕМТР сосредоточенные емкости, моделирующие импульсную корону при отрицательной полярности напряжения на фазном проводе, присоединены к фазным проводам ВЛ на расстоянии l друг от друга; в качестве входных параметров необходимо

задавать класс напряжения линии $U_{ном}$ (кВ), длину участка линии l (м), для которой вычисляется емкость $C_0 l$. Далее, используя класс напряжения линии $U_{ном}$ и данные табл.1.1, программа ЕМТР определяет значения C_0 и $U_{нач}$.

На каждом шаге расчета в ЕМТР в каждом j -м блоке, моделирующем корону, с использованием емкости $C_0 l$ и мгновенного значения напряжения $u_j^* = u_j / U_{нач}$, измеренного на проводе в месте размещения j -го блока, осуществляется корректировка учитывающей корону емкости $(C_d^{EMTP})_j$ в соответствии с выражением (1.3).

В программном комплексе ЕМТР учтено влияние импульсной короны только на фронт распространяющихся от места удара молнии в ВЛ грозовых волн напряжения отрицательной полярности, а искажения «хвостовой» части импульса не учтены. Это достигнуто за счет подключения к фазным проводам моделирующих корону динамических емкостей $(C_d^{EMTP})_j$ через диоды, которые позволяют протекать импульсным токам с отрицательно заряженного фазного провода в незаряженные подключенные емкости, но исключают обратное направление протекания тока.

1.1.3. Моделирование импульса тока молнии

При решении задач грозозащиты для моделирования тока молнии часто используется двухэкспоненциальный импульс [1,18,19]

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

где a и b определяются скоростями нарастания и спада тока молнии, γ – корректирующий фактор амплитуды тока молнии.

Натурные осциллограммы токов молнии [1] свидетельствуют о наличии нулевой начальной производной, в то время как двухэкспоненциальный импульс имеет производную отличную от нуля в начальный момент времени. Поэтому в различных публикациях предложено большое количество обеспечивающих нулевую начальную производную функций, моделирующих

форму тока молнии. Например, часто встречающееся выражение, обеспечивающее нулевую производную [18,19]

$$i(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} x(t) \cdot y(t) = I_{\max} \cdot z(t) \cdot y(t), \quad (1.4)$$

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

Сопротивление канала молнии составляет по различным оценкам величину 300 ÷ 1500 Ом [1,17].

1.1.4. Статистический метод, используемый для анализа грозовых перенапряжений на оборудовании

Удар молнии в фазный провод ВЛ приводит к возникновению грозовой волны, которая, распространяясь в обе стороны от места удара молнии в линию, набегает на ОРУ. Наибольшую опасность для оборудования ОРУ представляют набегающие грозовые волны напряжения с большой крутизной фронта и большой амплитудой. Согласно [1,2] амплитуда набегающих волн ограничена импульсной прочностью изоляции ВЛ, а крутизна фронта – действием импульсной короны на проводах. Учитывая действие импульсной короны, удаленные на несколько километров от входа ПС удары молнии в присоединенные ВЛ уже не способны вызвать на изоляции оборудования опасные грозовые перенапряжения и, поэтому, наибольшую опасность для оборудования ПС представляют грозовые волны, вызванные близкими к ПС ударами молнии, т.е. ударами в зоне «опасного» подхода.

Для снижения числа ударов молнии в фазные провода на подходах к ПС на присоединенных линиях устанавливаются грозозащитные (молниезащитные) тросы [1,3]. Удары молнии в тросовую защиту в ряде случаев могут приводить к обратным перекрытиям с тела опоры на фазные провода. В таких случаях на фазных проводах образуются волны высокой крутизны фронта, которые могут вызывать на изоляции оборудования ПС опасные грозовые перенапряжения.

Разработанная в ЕМТР модель для расчета грозových перенапряжений на оборудовании ПС учитывает статистическую природу параметров импульса тока молнии и удаленности от ПС места удара молнии в ВЛ (в фазный провод, в трос, в опору):

1. Выбирается i -я линия из $N_{ВЛ}$ присоединенных к ОРУ воздушных линий.
2. Задается расчетный случай (удар молнии в трос, в опору, в фазный провод).
3. Задается расстояние x от места удара молнии в линию до входа ПС.
4. Для выбранного случая в подробной ЕМТР-модели ПС многократно повторяется расчет грозových перенапряжений на оборудовании ОРУ. В каждом из расчетов параметры импульса тока молнии (форма импульса описывается выражением (1.4)) принимаются с учетом выбранного закона распределения параметров тока молнии.
5. Фиксируется число грозových перенапряжений на конкретном оборудовании ОРУ (например, на силовом трансформаторе) с максимальным значением, превышающим допустимое значение $U_{дон}$ амплитуды грозových перенапряжений для этого оборудования. Полученное число опасных перенапряжений соотносится с общим числом выполненных экспериментов, что дает вероятность появления опасных грозových перенапряжений на конкретном оборудовании ОРУ при ударах молнии в i -ую присоединенную линию: $P_{пр}^i(x)$ (при ударах в фазный провод), $P_{опора}^i(x)$ (при ударах в опору), $P_{трос}^i(x)$ (при ударах в трос).
6. На основе полученных для i -ой присоединенной линии зависимостей $P_{пр}^i(x)$, $P_{опора}^i(x)$, $P_{трос}^i(x)$ определяется необходимая длина $l_{опасн}^i$ защищенного тросами «опасного» подхода, за пределами которого удары молнии в эту ВЛ уже не вызывают опасных грозových перенапряжений на оборудовании ОРУ.
7. На основе интегрирования для i -ой присоединенной линии зависимостей $P_{пр}^i(x)$, $P_{опора}^i(x)$, $P_{трос}^i(x)$, полученных по результатам расчетов для нескольких значений расстояния x , определяются усредненные по длине

$l_{опасн}^i$ «опасного» подхода значения $\overline{P}_{пр}^i$, $\overline{P}_{опора}^i$, $\overline{P}_{трос}^i$, которые являются исходными данными для проведения расчетов годового числа опасных для изоляции оборудования перенапряжений n по формуле:

$$n = \frac{T_q}{100} \cdot \frac{N}{100} \cdot \sum_1^{N_{ВД}} \left[l_{опасн}^i \cdot \left(n_{пр} \overline{P}_{пр}^i + n_{опора} \overline{P}_{опора}^i + n_{трос} \overline{P}_{трос}^i \right) \right], \quad (1.5)$$

где T_q – число грозových часов в году в районе расположения ПС (по карте грозовой активности из [1]), N – число ударов (на 100 км длины и 100 грозových часов) молнии в ВЛ на опорах рассматриваемой конструкции, $n_{пр}$ – относительное число ударов молнии в фазный провод (вероятность прорыва молнии на фазные провода), $n_{опора}$ – относительное число ударов молнии в опору, $n_{трос}$ – относительное число ударов молнии в трос в середине пролета. Числовые значения N , $n_{пр}$, $n_{опора}$, $n_{трос}$ могут быть определены по рекомендациям [1,11,14,20].

8. Определяется и сравнивается с рекомендациями [1] показатель $M = 1/n$ (1/лет) защищенности оборудования ОРУ (например, силового трансформатора) от грозových перенапряжений.

1.2. Расчет грозовых перенапряжений на подстанции

Расчеты грозовых перенапряжений с использованием статистического метода проводились для большого числа ОРУ 110-750 кВ и здесь проиллюстрированы на примере ОРУ 500 кВ подстанции «Луч», которая является типовой в своем классе.

1.2.1. Расчет допустимых расстояний от оборудования до защитных аппаратов в зависимости от их типа

Схема ОРУ 500 кВ приведена на рис.1.2. В ОРУ установлено 4 комплекта защитных аппаратов (у автотрансформаторов АТ-1,2,3 и на ВЛ «Луч - Нижегородская»).

Составленная с учетом указанных выше допущений расчетная ЕМТР схема ОРУ 500 кВ подстанции приведена на рис.1.3: длины участков ошиновки определены по размерной схеме ОРУ 500 кВ и указаны в метрах на схеме рис.1.3; емкости автотрансформаторов (АТ), измерительных трансформаторов напряжения электромагнитного (ТН) и емкостного типа (НДЕ), воздушных выключателей (ВВ), измерительных трансформаторов тока (ТТ), линейных разъединителей (ЛР) приняты усредненными для оборудования 500 кВ по данным [1].

Известно, что прорывы отрицательных молний на фазный провод ВЛ 500 кВ наиболее вероятны при положительной полярности напряжения на проводе [21,22]. В схеме рис.1.3 упрощенно не показан источник напряжения промышленной частоты, задающий напряжение фазного провода так, чтобы на момент удара молнии в фазный провод оно соответствовало амплитуде наибольшего рабочего напряжения сети 500 кВ (428 кВ). Далее при расчетах грозовых перенапряжений в ОРУ совместно с присоединенной ВЛ в ряде случаев учет рабочего напряжения будет произведен (см. схему рис.1.5).

В общем случае проведение расчетов в схеме рис.1.3 возможно с учетом различия вольтамперных характеристик установленных защитных аппаратов, однако упрощенно считаем, что все четыре защитных аппарата, показанные на

рис.1.2 и рис.1.3, имеют близкие друг другу вольтамперные характеристики в режиме ограничения грозовых перенапряжений. Расчеты проведены для значений остающегося напряжения на защитном аппарате (импульс 8/20 мкс амплитудой 10 кА): 900 кВ, 1050 кВ (отмечено на рис.1.3), 1200 кВ. Значение в 1200 кВ является близким к защитному уровню разрядников [23] РВМГ-500 и РВМК-500, а значения 1050 кВ и 900 кВ перекрывают диапазон остающихся напряжений современных ОПН 500 кВ [1,24].

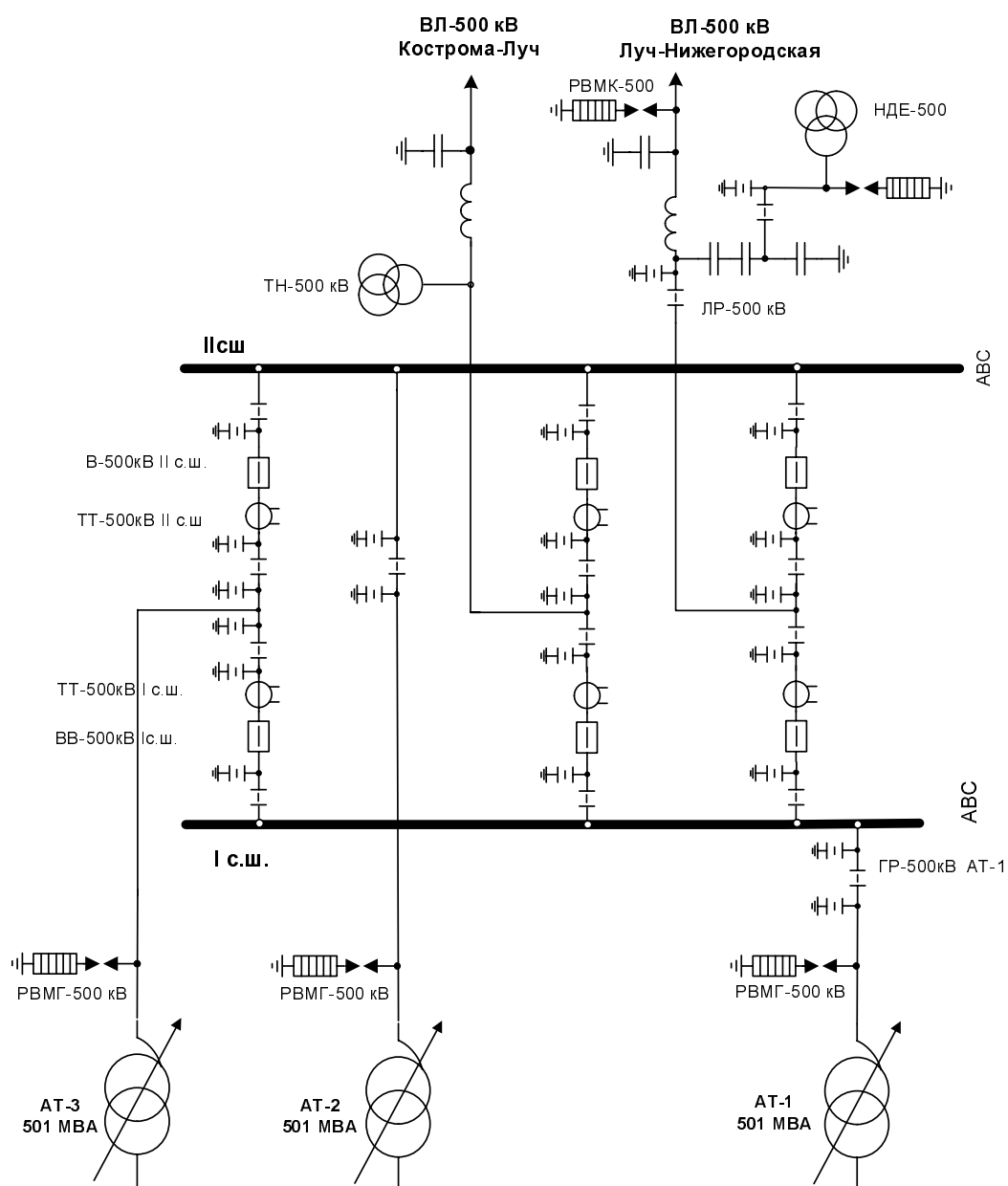


Рис.1.2. Схема ОРУ 500 кВ ПС «Луч» (МЭС Центра).

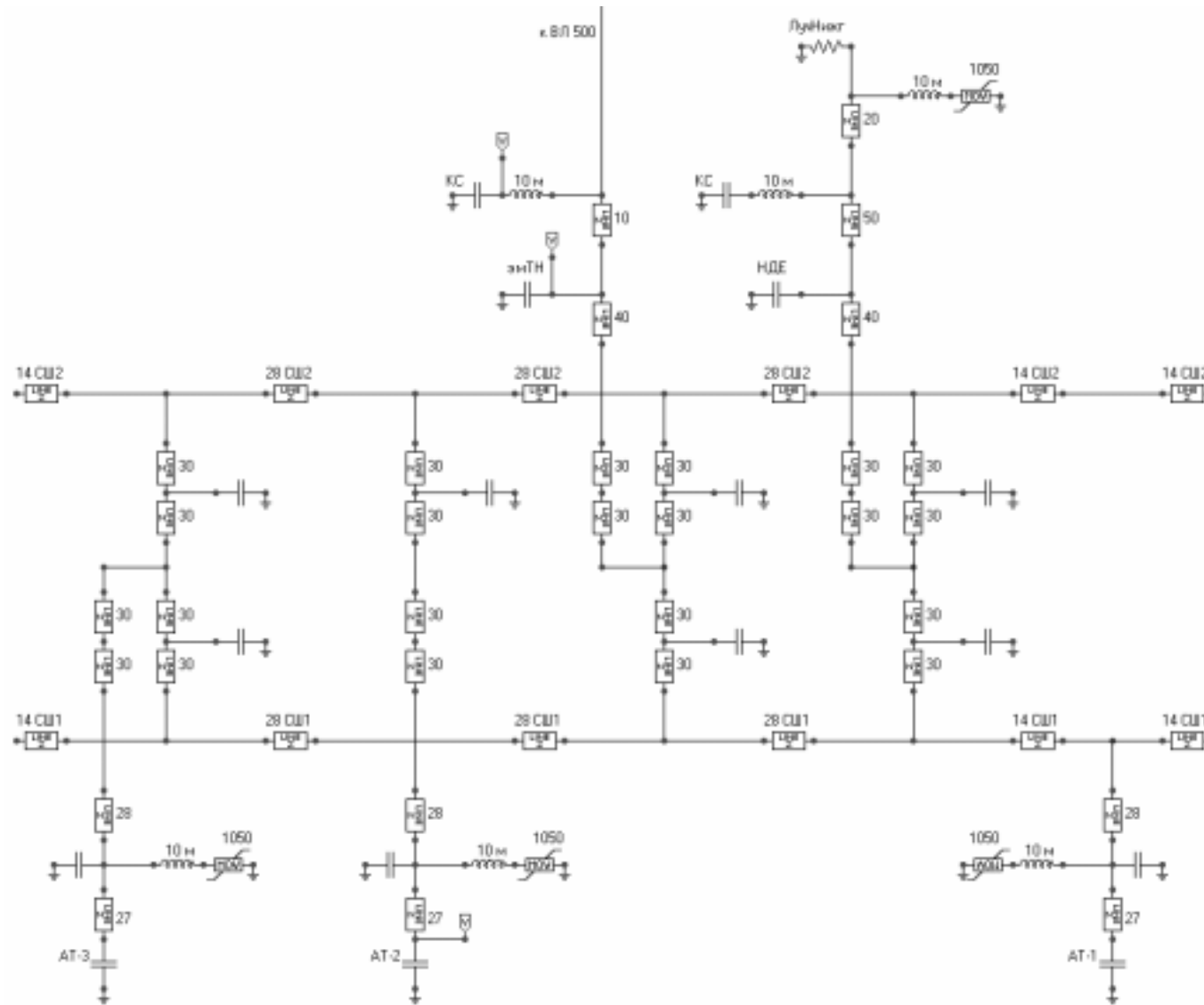


Рис.1.3. Расчетная ЕМТР схема замещения ОРУ 500 кВ для расчета грозовых перенапряжений на оборудовании при ударе молнии в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч».

На рис.1.4-1.5 приведены расчетные осциллограммы перенапряжений на стороне 500 кВ автотрансформатора АТ-2 и на измерительном ТН-500 кВ, установленном на ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч», полученные в схеме рис.1.3 в случае, когда на ОРУ 500 кВ по ВЛ «Кострома - Луч» набегают косоугольная волна напряжения с амплитудой 2500 кВ и длительностью фронта 1 мкс.

На рис.1.4 показано, что при снижении защитного уровня ограничителей перенапряжений (разрядников) максимальные перенапряжения на АТ-2 снижаются. На снижение перенапряжений на АТ-2 в первую очередь влияет снижение остающегося напряжения ближайшего к нему защитного аппарата и, учитывая это, снижение остающегося напряжения защитного аппарата у АТ-2 можно использовать для увеличения расстояния между АТ-2 и его защитным аппаратом. Следовательно, замена вентильных разрядников (прежде всего, разрядника, установленного у АТ) на современные ОПН позволят увеличить допустимые расстояния между АТ и его защитным аппаратом.

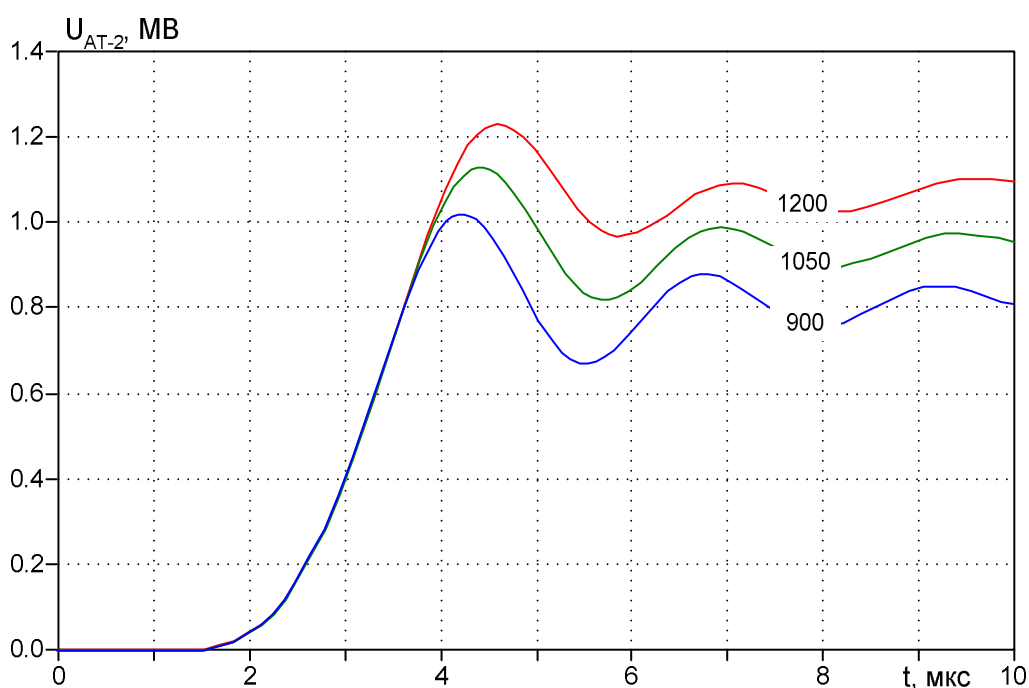


Рис.1.4. Перенапряжения на АТ-2 в зависимости от защитного уровня всех установленных в ОРУ защитных аппаратов (1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ).

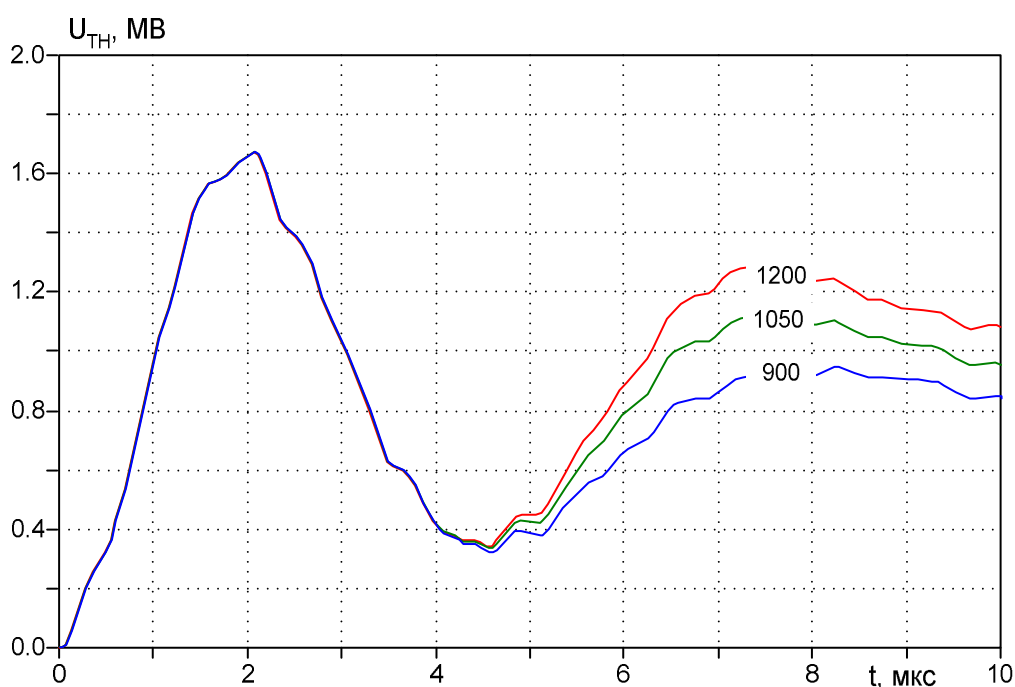


Рис.1.5. Перенапряжения на ТН в зависимости от защитного уровня всех установленных в ОРУ защитных аппаратов (1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ).

На рис.1.5 показано, что при снижении защитного уровня защитных аппаратов максимальные перенапряжения на ТН не изменяются, а наличие защитных аппаратов сказывается уже после того, как максимум перенапряжений на оборудовании достигнут. Следовательно, замена даже всех вентильных разрядников в ОРУ на современные ОПН не позволяет увеличивать допустимые расстояния до наиболее удаленного оборудования ОРУ.

Для того, чтобы учесть все возможные сочетания параметров набегающих на ОРУ грозовых волн (фронт, амплитуда, наличие среза), расчеты грозовых перенапряжений для ОРУ 500 кВ ПС «Луч» проведены статистическим методом.

Пусть присоединенные ВЛ 500 кВ выполнены на промежуточных железобетонных опорах типа ПБ-500-1, внешний вид которых приведен на рис.1.6. [13]

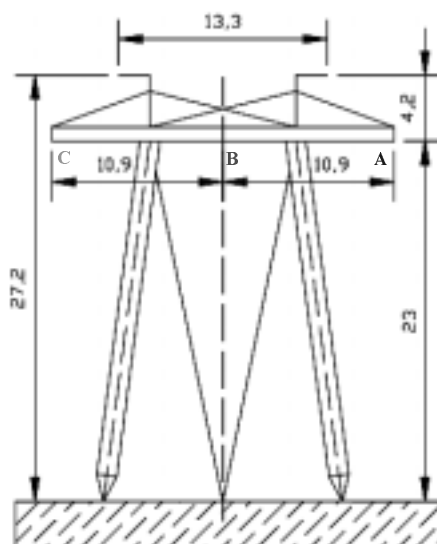


Рис.1.6. Ж/б опора ВЛ 500 кВ типа ПБ-500-1 по [13].

Примем для ВЛ 500 кВ [16]: фазные провода ЗАСО-400, радиус составляющей расщепленного провода $r_0 = 1.38$ см, число составляющих $n = 3$, шаг расщепления $D = 40$ см; марка троса С-70, радиус троса $r = 0.55$ см; расчетная стрела провеса провода $f_{np} = 10.4$ м, расчетная стрела провеса троса $f_{тр} = 7.8$ м; длина пролета 450 м.

При статистических расчетах грозовых перенапряжений в ОРУ схема рис.1.3 используется совместно с подробной приведенной на рис.1.7 моделью примыкающего к ОРУ 500 кВ участка ВЛ 500 кВ, на котором показаны следующие элементы («жирные» соединительные линии отвечают трехфазным элементам, «тонкие» – однофазным):

- Четыре пролета (каждый пролет разбит на два участка длиной 225 м) ВЛ 500 кВ на опорах ПБ-500-1. Удельное сопротивление грунта вдоль трассы ВЛ 500 кВ принято $\rho = 100$ Ом·м, а параметры ВЛ 500 кВ определяются программным комплексом ЕМТР с учетом частотных зависимостей (модель J.Marti [5]) на основе задания геометрических характеристик опоры (рис.1.6) с учетом стрел провеса проводов и тросов в середине пролета.

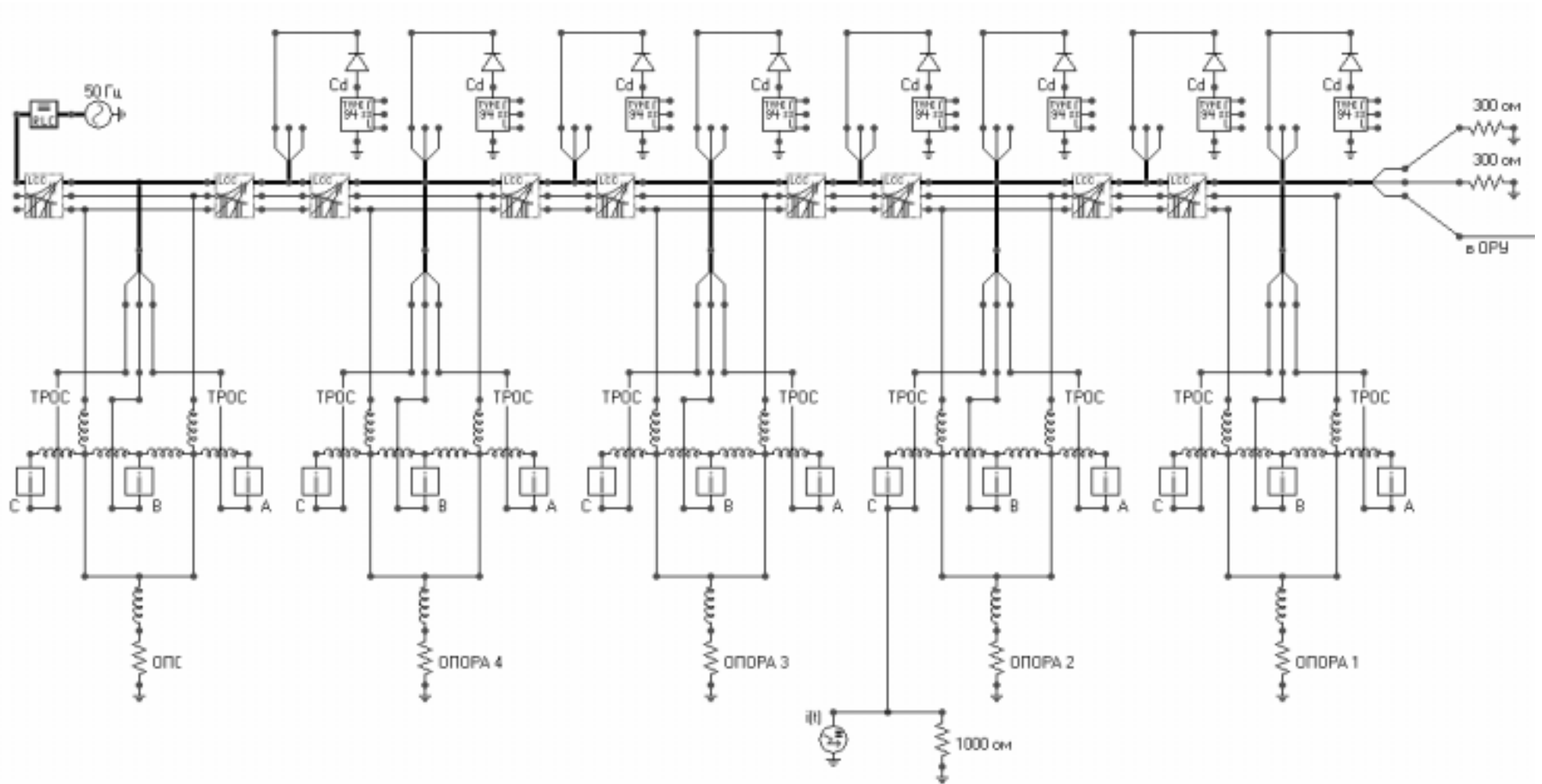


Рис.1.7. Расчетная EMTP модель ВЛ 500 кВ, предназначенная для расчета грозовых перенапряжений на оборудовании ОРУ 500 кВ (схема рис.1.3) совместно с процессами в присоединенных линиях.

- С одной стороны к рассматриваемому участку примыкает «концевой» длинный участок ВЛ для неучета отражений от противоположного по отношению к ПС «Луч» конца ВЛ 500 кВ. С другой стороны к рассматриваемому участку примыкает однофазная схема ОРУ 500 кВ ПС «Луч» (рис.1.3), присоединенная к одному из крайних фазных проводов (так как прорывы молнии и обратные перекрытия для ВЛ 500 кВ на опорах ПБ-500-1 практически исключены на средний фазный провод), а два других фазных провода ВЛ 500 кВ заземлены через активное сопротивление, равное волновому сопротивлению ошиновки ОРУ 500 кВ ($Z = 300 \text{ Ом}$).
- По концам четырех пролетов ВЛ 500 кВ в схему введены модели пяти опор, представляющих из себя набор индуктивностей, величины которых определены с использованием известной геометрии опоры (рис.1.6) и погонных индуктивностей порталных ж/б опор (0.7 мкГн/м по [1]); каждая опора заземлена через активное сопротивление, $R_s = 20 \text{ Ом}$, если иное не оговорено.
- На каждой из опор фазные провода (условно обозначены «А,В,С») от траверсы отделены гирляндами линейных изоляторов, которые на схеме учтены своими вольт-секундными характеристиками (блоки вольт-секундных характеристик обозначены «I» от англ. «Insulation» – изоляция). В случае превышения воздействующего на изоляцию перенапряжения значения, определяемого по вольт-секундной характеристике, блок фиксирует факт пробоя изоляции и соединяет соответствующий фазный провод с траверсой опоры; блок запускается только в случае превышения напряжения на изоляции минимального значения U_0 , принятого равным 430 кВ (несколько больше амплитуды фазного наибольшего рабочего напряжения сети 500 кВ). Длина гирлянды $L_{из} = 4.0 \text{ м}$ принята по данным [13], а вольт-секундная характеристика в соответствии с выражением (1.2).
- Импульсный источник тока молнии, включаемый в место удара (на схеме – это крайний фазный провод «С» на опоре №2). Форма тока задается

импульсом (1.4), у которого принято $n = 5$. Волновое сопротивление канала молнии принято постоянным и равным $Z_{\text{м}} = 1000$ Ом во всем диапазоне токов. Расчеты выполнены для вероятностных распределений параметров токов молнии «НИИПТ» по [1], справедливых для первой компоненты отрицательной молнии, и положено, что амплитуда импульса, фронт и длительность не зависят друг от друга. В ЕМТР импульсный источник тока может быть подключен к ВЛ (к фазному проводу или к тросу) на любом расстоянии x от входа ПС, однако далее упрощенно учтены лишь дискретные значения x , кратные длине пролета 450 м, т.е. рассматриваются удары молнии в трос и фазный провод непосредственно на опоре.

- Блоки, подключаемые через диоды к пораженному молнией крайнему фазному проводу «С», моделирующие импульсную корону на проводах. Блоки представляют собой динамическую емкость коронирующего фазного провода ВЛ 500 кВ на его участке длиной 225 м (половина длины пролета), определяемую на основе мгновенного значения напряжения по (1.3).

Для ВЛ 500 кВ импульсная прочность линейной изоляции достаточно велика, и поэтому обратные перекрытия при ударах молнии в заземленные тросы практически исключены при сопротивлениях заземления опор менее 20 Ом [1], а расчетным случаем для ВЛ 500 кВ при таких сопротивлениях заземления является прорыв молнии сквозь тросовую защиту на фазные провода. Для случая удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на рис.1.8-1.10 в качестве примера приведены распределения вероятности появления перенапряжений выше заданного значения (откладываемого по оси абсцисс) для для АТ-2 и ТН, установленного на ВЛ «Кострома - Луч».

В статистических расчетах, проводимых в ЕМТР, наиболее интересна координата по оси вероятностей точки пересечения получаемого распределения максимальных значений грозовых перенапряжений на изоляции оборудования с допустимыми для этой изоляции значениями. Исследования на модели в ЕМТР показали, что для получения этой координаты в большинстве случаев достаточно проводить всего 1000 экспериментов, и, поэтому, на рис.1.8-1.10 и в

дальнейшем каждая из кривых получена по результатам статистических расчетов перенапряжений, вызванных 1000 ударами молнии в рассматриваемую точку присоединенной к подстанции ВЛ, что соответствует минимальной вероятности $P = 0.001$ по оси ординат.

Допустимые уровни грозовых перенапряжений на изоляции оборудования получены по (1.1) и приведены в табл.1.2, но далее, не теряя общности рассуждений, примем во внимание только оборудование с полной изоляцией (класс изоляции «Б»), для которого на рис.1.8-1.10 нанесены допустимые уровни грозовых перенапряжений: для измерительных ТН – $U_{дон} = 1568$ кВ; для АТ и НДЕ – $U_{дон} = 1430$ кВ.

Представленные на рис.1.8-1.10 зависимости были получены в предположении, что все четыре комплекта защитных аппаратов, установленных в ОРУ 500 кВ, имеют одинаковые вольтамперные характеристики: для рис.1.8-1.9 остающееся напряжение на импульсе 8/20 мкс амплитудой 10 кА составляет 1200 кВ; для рис.1.10 остающееся напряжение варьировалось (900, 1050, 1200 кВ).

Таблица 1.2. Испытательные напряжения полного грозового импульса оборудования класса 500 кВ по ГОСТ 1516.3-96 и допустимые грозовые перенапряжения, определенные по рекомендациям [11].

| Оборудование | Напряжение полного грозового импульса, кВ | | | |
|------------------------|---|------|------------|------|
| | Испытательное | | Допустимое | |
| | Класс изоляции | | | |
| | «А» | «Б» | «А» | «Б» |
| силовые трансформаторы | 1300 | 1550 | 1155 | 1430 |
| электромагнитные ТН | 1425 | 1675 | 1293 | 1568 |
| НДЕ, ТТ, аппараты | 1425 | 1550 | 1293 | 1430 |

Из рис.1.8 видно влияние импульсной короны на максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании ОРУ 500 кВ, учет которой приводит к существенному снижению вероятности возникновения опасных перенапряжений для всего оборудования ОРУ, а особенно – для наименее защищенного оборудования (электромагнитного трансформатора напряжения

ТН-500 на ВЛ «Кострома - Луч») – от значения $P = 0.26$ до $P = 0.057$, т.е. почти в пять раз.

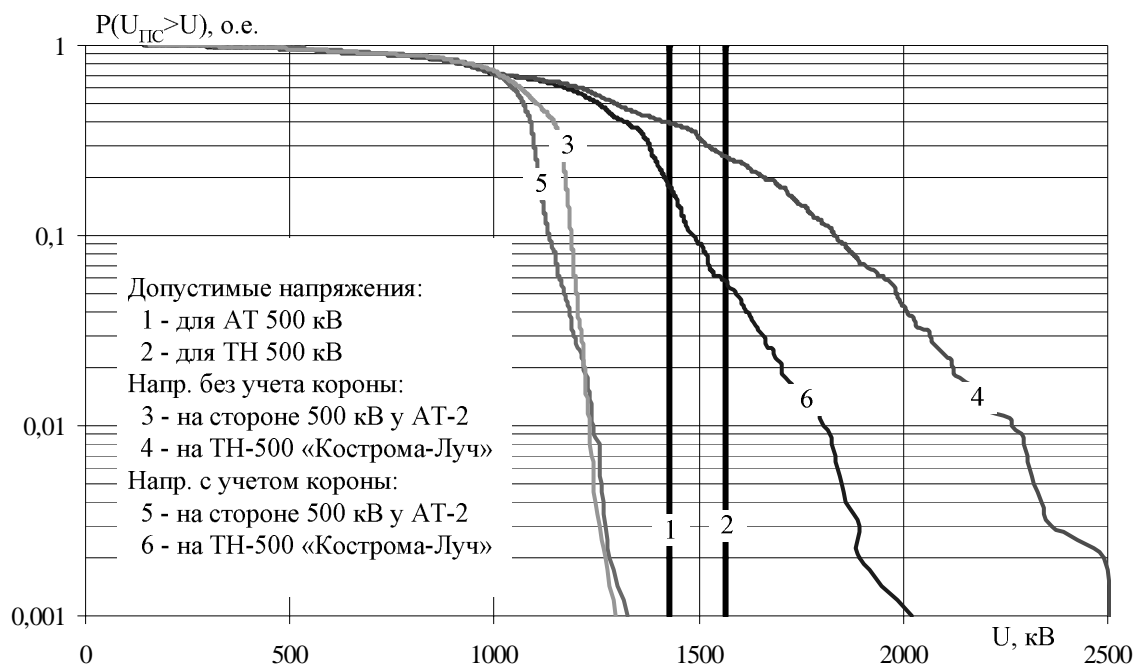


Рис.1.8. Влияние импульсной короны на максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании ОРУ 500 кВ (рассмотрены удары молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на расстоянии 450 м от входа ПС «Луч»; не учитывается рабочее напряжение на проводах ВЛ и ОРУ).

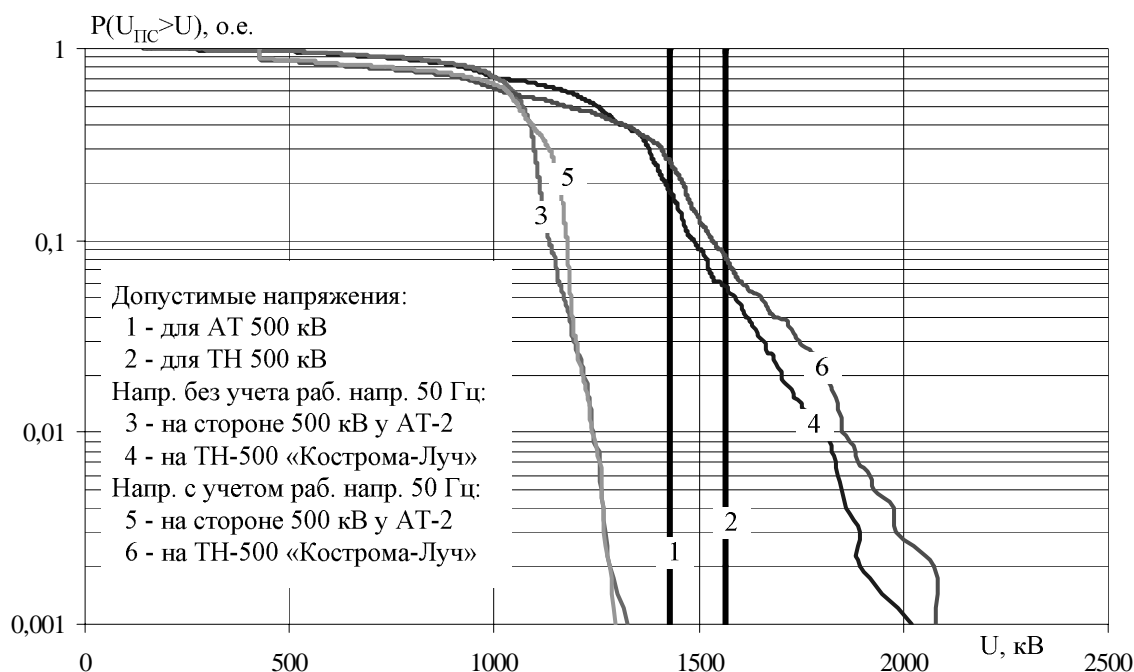


Рис.1.9. Влияние рабочего напряжения положительной полярности (+428 кВ) на максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании ОРУ 500 кВ (рассмотрены удары отрицательной молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на расстоянии 450 м от входа ПС «Луч»; учтена импульсная корона на проводах ВЛ).

На рис.1.9 показано влияние начального рабочего напряжения на проводах ВЛ 500 кВ и ОРУ 500 кВ в момент удара молнии (отрицательной полярности) в присоединенную к ПС линию. Учет наиболее неблагоприятной величины рабочего напряжения (для сети 500 кВ это +428 кВ) приводит к увеличению вероятности возникновения опасных перенапряжений для всего оборудования ОРУ, а особенно – для наименее защищенного оборудования (электромагнитного трансформатора напряжения ТН-500 на ВЛ «Кострома - Луч») – от значения $P = 0.057$ до $P = 0.08$, т.е. практически в полтора раза.

Приведенные на рис.1.10 распределения вероятностей появления максимальных грозовых перенапряжений на изоляции АТ-2 (кривые 3,4,5) и на изоляции ТН-500 (кривые 6,7,8), получены при варьировании вольтамперной характеристики защитных аппаратов, принятой одинаковой для всех четырех аппаратов, установленных в ОРУ 500 кВ (на импульсе тока 8/20 мкс с амплитудой 10 кА остающееся напряжение составляет 1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ). Из рис.1.10 видно, что снижение остающегося напряжения защитных аппаратов приводит к снижению уровня максимальных грозовых перенапряжений на АТ, однако снижения уровня максимальных грозовых перенапряжений на удаленном от защитных аппаратов оборудовании (на ТН-500 кВ «Кострома - Луч») практически не происходит, т.е. надежность защиты от перенапряжений удаленного оборудования не изменяется.

На основе результатов расчетов, проиллюстрированных рис.1.10, а также осциллограммами рис.1.4-1.5, сделаны следующие обобщающие выводы:

- при снижении остающегося напряжения защитных аппаратов, установленных в ОРУ, максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании снижаются;
- степень снижения грозовых перенапряжений на оборудовании (при заданном снижении остающегося напряжения защитных аппаратов) зависит от удаленности этого оборудования от защищенных аппаратов;

- наибольшее снижение перенапряжений достигается для силовых трансформаторов и автотрансформаторов, так как они наиболее близко расположены к защитным аппаратам;
- минимальное снижение перенапряжений характерно для наиболее удаленного от защитных аппаратов оборудования ОРУ.

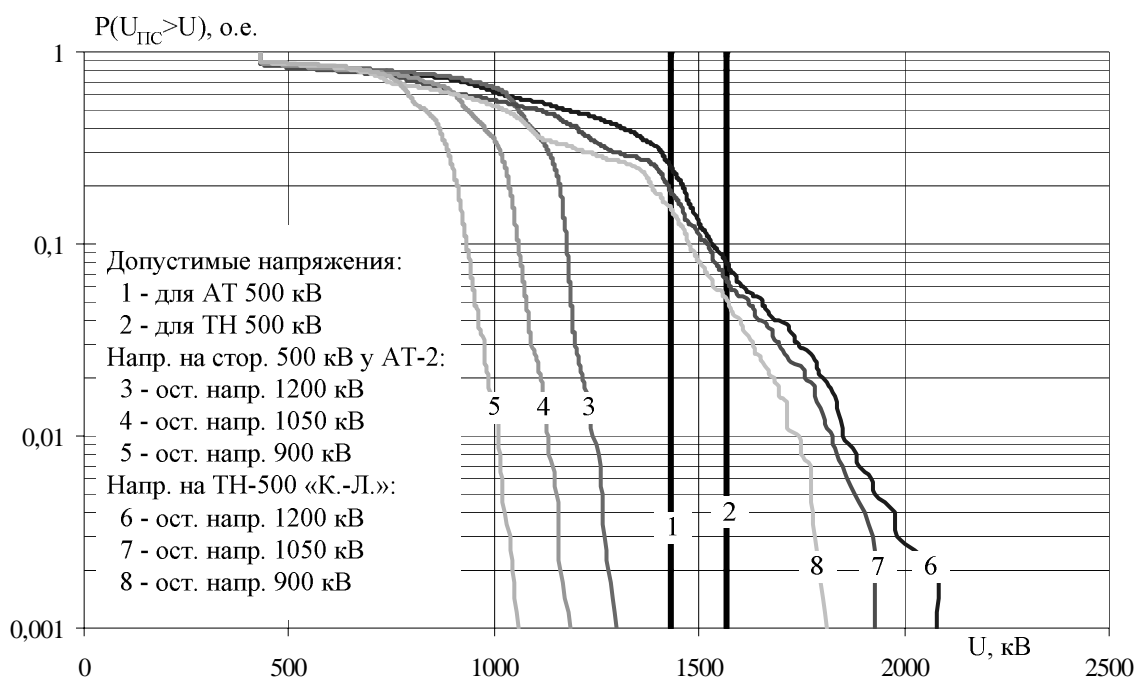


Рис.1.10. Влияние остающегося напряжения защитных аппаратов на максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании ОРУ 500 кВ (рассмотрены удары отрицательной молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на расстоянии 450 м от входа ПС «Луч»; учтено возникновение импульсной короны на проводах ВЛ и рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и ОРУ).

1.2.2. Расчет необходимой длины тросового подхода ВЛ

Расчеты грозовых перенапряжений (рис.1.10) показали, что наименее защищенным оборудованием ОРУ 500 кВ при ударах молнии в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» является измерительный трансформатор ТН-500 «Кострома - Луч». Аналогично приведенным на рис.1.10 результатам можно показать, что при ударах молнии в ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» наименее защищенным оборудованием ОРУ 500 кВ является измерительный трансформатор емкостного типа НДЕ-500 «Луч - Нижегородская».

Влияние удаленности места удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ на максимальные грозовые перенапряжения на наименее защищенном оборудовании ОРУ 500 кВ отражено на рис.1.11 (удар в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч») и рис.1.12 (удар молнии в ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская»). При получении рис.1.11-1.12 было принято, что все четыре комплекта защитных аппаратов, установленных в ОРУ 500 кВ, имеют одинаковые вольтамперные характеристики (остающееся напряжение на импульсе 8/20 мкс амплитудой 10 кА составляет 1200 кВ).

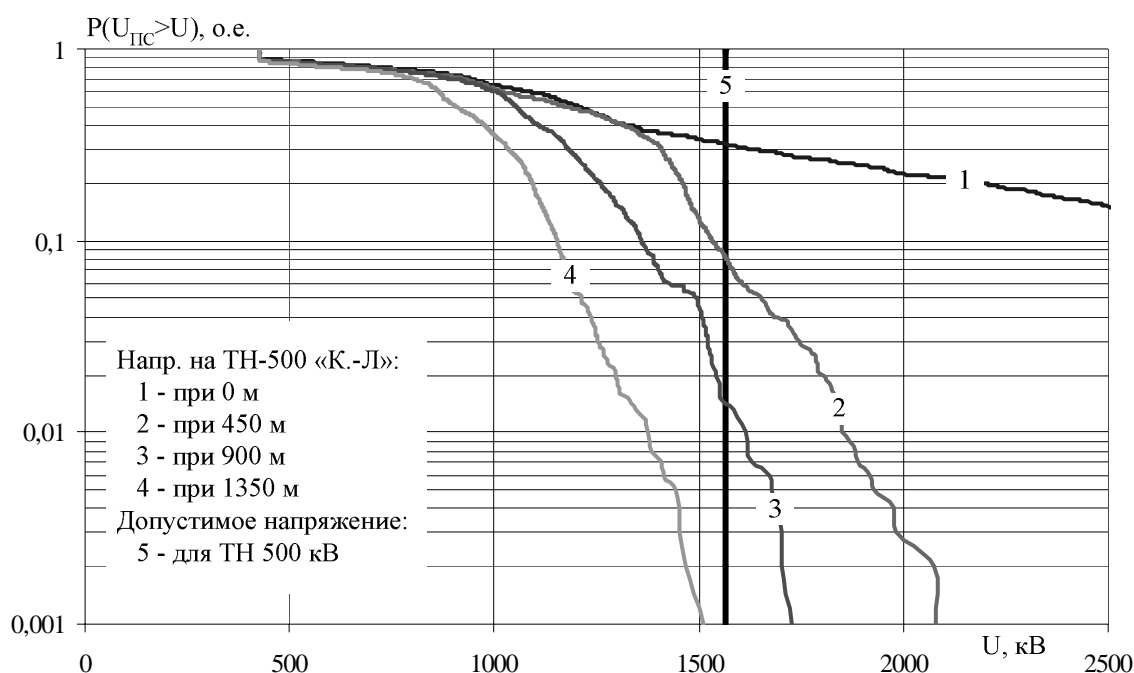


Рис.1.11. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции ТН-500 «Кострома - Луч» (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и ОРУ).

На рис.1.11-1.12 показано, что максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании ОРУ 500 кВ возникают при наиболее близких к ПС ударах молнии в присоединенные ВЛ 500 кВ. С увеличением расстояния от места удара молнии в ВЛ 500 кВ до ПС максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании ОРУ 500 кВ снижаются, что соответствует уменьшению вероятности появления опасного для изоляции грозового перенапряжения.

В расчетной модели при ударах молнии в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» (рис.1.11) на расстоянии более 1350 м от входа ПС грозовые перенапряжения на наименее защищенном оборудовании ОРУ 500 кВ ни в одном из случаев не превышали допустимого для изоляции уровня. При ударах в ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» (рис.1.12) соответствующее расстояние меньше и находится в диапазоне 450-900 м, что обусловлено наличием в линейной ячейке этой ВЛ 500 кВ защитного аппарата.

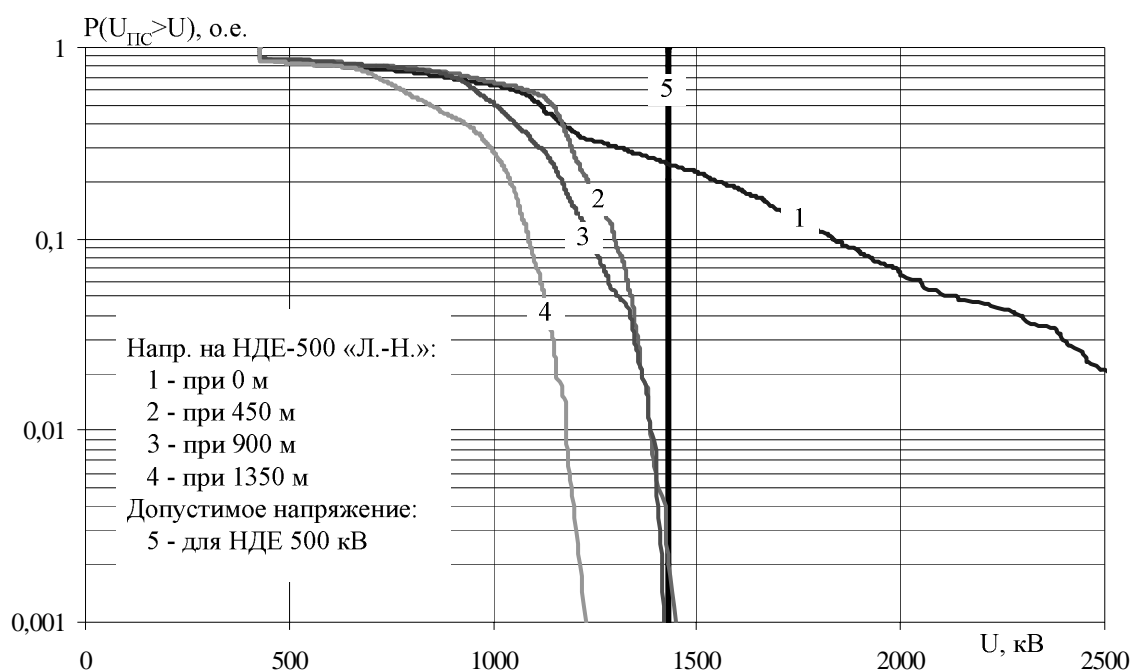


Рис.1.12. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции НДЕ-500 «Луч - Нижегородская» (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и ОРУ).

Проведенные расчеты, проиллюстрированные рис.1.11-1.12 на примере ОРУ 500 кВ, позволяют сделать следующие выводы:

- наибольшую опасность для оборудования ОРУ представляют грозовые перенапряжения, вызванные ударами молнии в фазные провода присоединенных ВЛ на расстоянии не более 500-1500 м от ПС (длина так называемого «опасного» подхода);

- удары молнии в фазные провода ВЛ на расстоянии более 500-1500 м практически не способны вызвать опасных грозových перенапряжений на оборудовании ОРУ;
- для снижения числа прямых ударов молнии в фазные провода, а значит и числа опасных грозových перенапряжений на оборудовании ОРУ, на длине «опасного» подхода ВЛ к ПС необходима установка тросовой защиты;
- увеличение длины тросового подхода ВЛ к ПС свыше длины «опасного» подхода не изменяет (не повышает) защищенности оборудования ПС от грозových перенапряжений;
- наименьшая длина «опасного» подхода ВЛ к ПС необходима на тех присоединенных ВЛ, в линейных ячейках которых установлены защитные аппараты (разрядники или ОПН); на подходах таких ВЛ допустимо не устанавливать трос, так как ОПН линейной ячейки берет на себя выполнение роли троса по снижению числа опасных волн, проходящих на подстанцию.

1.2.3. Каскадные схемы защиты оборудования и их эффективность

На рис.1.13 в зависимости от удаленности места удара молнии в ВЛ 500 кВ показано изменение вероятности превышения грозowymi перенапряжениями допустимого для изоляции уровня (кривые 1 и 3, приведенные на рис.1.13, получены с использованием данных рис.1.11 и рис.1.12 соответственно).

В соответствии с выражением (1.5), в котором для ОРУ 500 кВ могут быть исключены слагаемые от обратных перекрытий на присоединенных ВЛ 500 кВ (при сопротивлениях заземления опор менее 20 Ом), оценка защищенности оборудования ОРУ 500 кВ от грозových перенапряжений при ударах в фазные провода ВЛ 500 кВ пропорциональна площади \overline{P}_{np}^i ($i = 1,2$) под кривыми на рис.1.13, а наибольшая защищенность от грозových перенапряжений будет у того оборудования, для которого рассматриваемая

площадь минимальна. Площади под кривыми 1-4 (рис.1.13) приведены в табл.1.3.

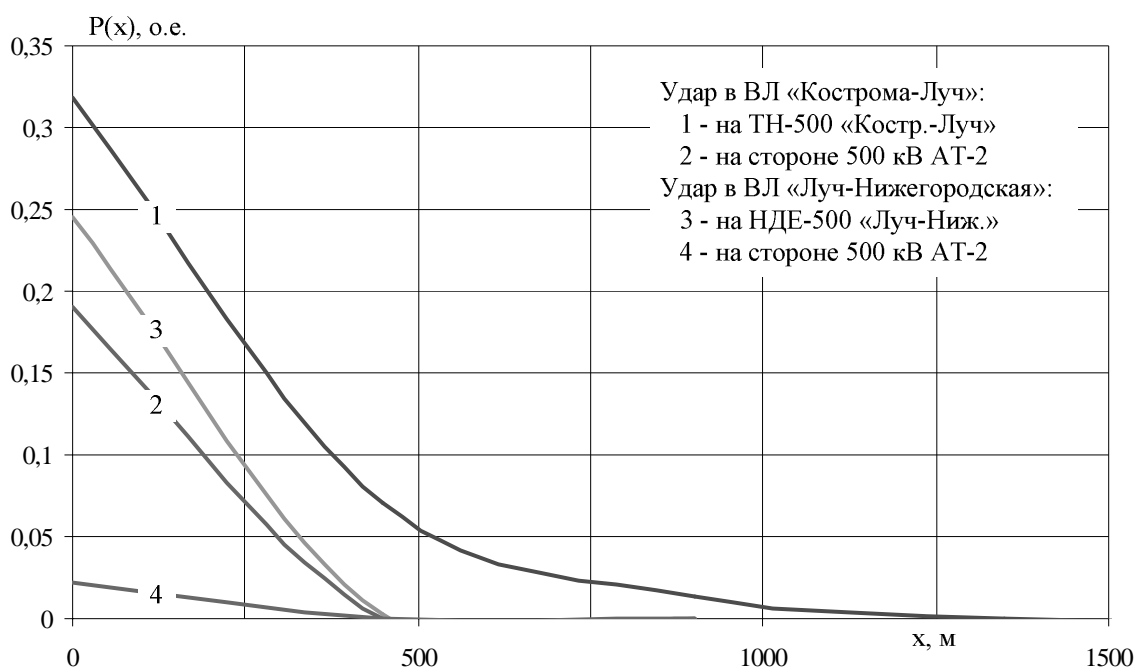


Рис.1.13. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в фазный провод присоединенных ВЛ 500 кВ на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции оборудования ОРУ 500 кВ (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и ОРУ).

Таблица 1.3. Площадь (о.е.×м) под кривыми 1-4 (рис.1.13).

| номер кривой по рис.1.13 | удар молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ | оборудование ОРУ 500 кВ | площадь под кривой |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | "Кострома - Луч" | ТН-500 | 110 |
| 2 | | АТ-2 | 43 |
| 3 | "Луч - Нижегородская" | НДЕ-500 | 55 |
| 4 | | АТ-2 | 5 |

На основе анализа табл.1.3 и рис.1.13 можно сказать, что:

- наименее защищенным оборудованием ОРУ является оборудование линейных ячеек присоединенных ВЛ (при отсутствии в них защитных аппаратов);
- наличие в линейной ячейке присоединенной ВЛ защитного аппарата (разрядника или ОПН) повышает защищенность от грозовых

- перенапряжений установленного в ней оборудования (для ОРУ 500 кВ ПС «Луч» в 2 раза согласно табл.1.3);
- наличие в линейной ячейке присоединенной ВЛ защитного аппарата существенно повышает защищенность установленных на ПС силовых трансформаторов и автотрансформаторов от грозовых перенапряжений, вызванных ударами молнии в эту ВЛ (для ОРУ 500 кВ ПС «Луч» в 8-9 раз согласно табл.1.13);
 - наиболее защищенным от грозовых перенапряжений будет оборудование того ОРУ, в котором в линейных ячейках присоединенных ВЛ установлены защитные аппараты; в таких ОРУ практически исключены повреждения изоляции силовых трансформаторов и автотрансформаторов от грозовых перенапряжений, вызванных набегающими с присоединенных ВЛ грозовыми волнами.

Схема рис.1.14 защиты оборудования ОРУ от грозовых перенапряжений, когда по ходу набегающей с ВЛ грозовой волны последовательно установлены два защитных аппарата (один – в линейной ячейке или на сборных шинах, второй – у трансформатора или автотрансформатора), называется «каскадной» и, как показали исследования, является очень эффективной для защиты оборудования от грозовых перенапряжений и особенно эффективной при $L_1 > L_2$.

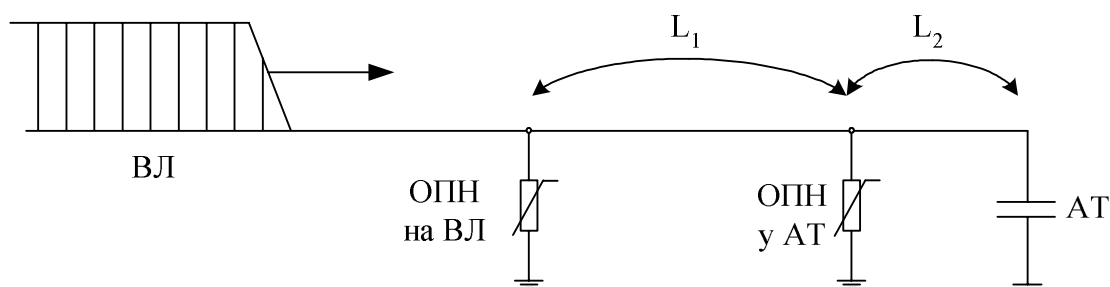


Рис.1.14. Каскадная схема защиты оборудования ОРУ от грозовых перенапряжений, вызванных набегающими с ВЛ грозовыми волнами.

1.2.4. Учет обратных перекрытий на присоединенных ВЛ

Удары молнии в заземленные тросы ВЛ 500 кВ не приводят к обратным перекрытиям с опоры на фазные провода при сопротивлениях заземления опор, меньших 20 Ом. Как правило, на подходах ВЛ к ПС стремятся обеспечить сопротивления заземления опор ВЛ, не превосходящие 10-20 Ом [3], однако известны случаи, когда не удается обеспечить низких сопротивлений заземления опор ВЛ на подходах ПС. В таких случаях при расчетах грозовых перенапряжений на оборудовании ОРУ, вызванных ударами в присоединенные ВЛ, необходимо учитывать обратные перекрытия на фазные провода на подходах к ПС.

Удары молнии в трос в средней части пролета ВЛ могут приводить к обратным перекрытиям на опоре с заметно меньшей вероятностью, чем при ударах молнии в опору или трос вблизи нее. Поэтому далее упрощенно не рассмотрены удары молнии в трос в средней части пролета, а все внимание сосредоточено на ударах молнии непосредственно в опору (удаленность x места удара молнии в ВЛ от входа ПС кратна длине пролета).

Аналогично случаю удара молнии в фазный провод на рис.1.15 (удар в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч») и рис.1.16 (удар молнии в ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская») рассмотрено влияние удаленности места удара молнии в опору ВЛ 500 кВ на максимальные грозовые перенапряжения на наименее защищенном оборудовании ОРУ 500 кВ. При получении рис.1.15-1.16 было принято, что все четыре комплекта защитных аппаратов, установленных в ОРУ 500 кВ, имеют одинаковые вольтамперные характеристики (остающееся напряжение на импульсе 8/20 мкс амплитудой 10 кА составляет 1200 кВ), а сопротивление заземления всех опор ВЛ, в отличие от ранее рассмотренных случаев, составляет $R_3 = 50$ Ом.

На рис.1.17 в зависимости от удаленности места удара молнии в опору ВЛ 500 кВ показано изменение вероятности превышения грозовыми перенапряжениями допустимого для изоляции уровня (кривые 1 и 3, приведенные на рис.1.17, получены с использованием данных рис.1.15 и

рис.1.16 соответственно). Площади под кривыми 1-4 (рис.1.17) приведены в табл.1.4.

Таблица 1.4. Площадь (о.е.×м) под кривыми 1-4 (рис.1.17).

| номер кривой по рис.1.17 | удар молнии в трос на опоре ВЛ 500 кВ | оборудование ОРУ 500 кВ | площадь под кривой |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | "Кострома - Луч" | ТН-500 | 34 |
| 2 | | АТ-2 | 10 |
| 3 | "Луч - Нижегородская" | НДЕ-500 | 22 |
| 4 | | АТ-2 | 1 |

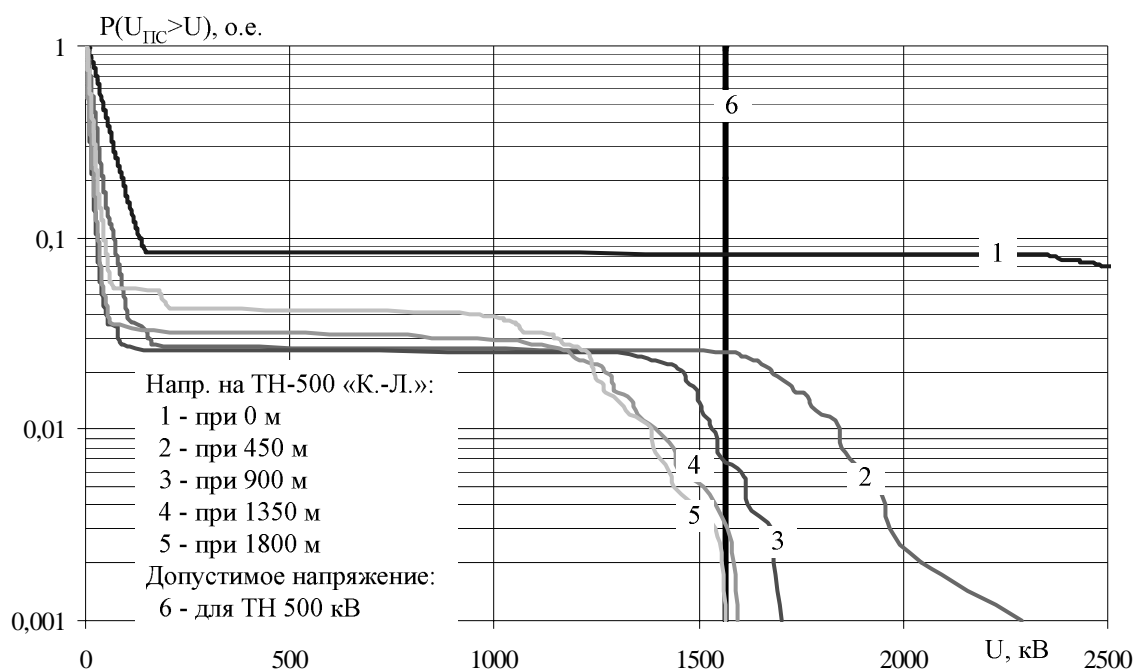


Рис.1.15. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в опору ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции ТН-500 «Кострома - Луч» (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; рабочее напряжение на проводах ВЛ и ОРУ не учтено; $R_3 = 50$ Ом).

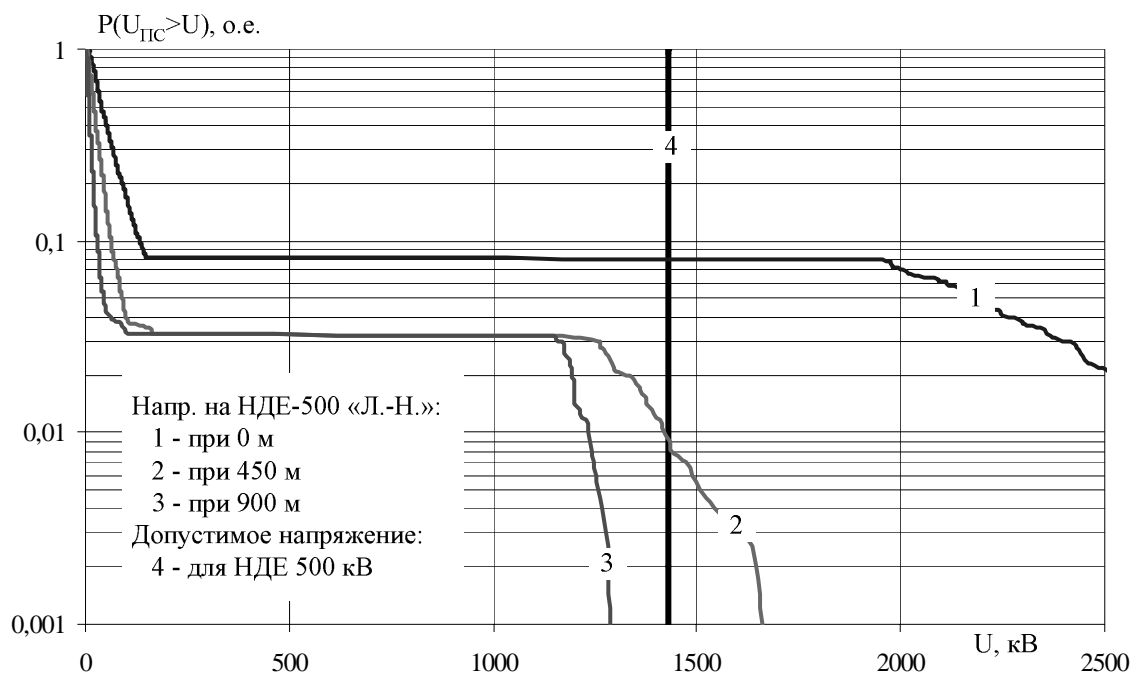


Рис.1.16. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в опору ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции НДЕ-500 «Луч - Нижегородская» (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; рабочее напряжение на проводах ВЛ и ОРУ не учтено; $R_3 = 50$ Ом).

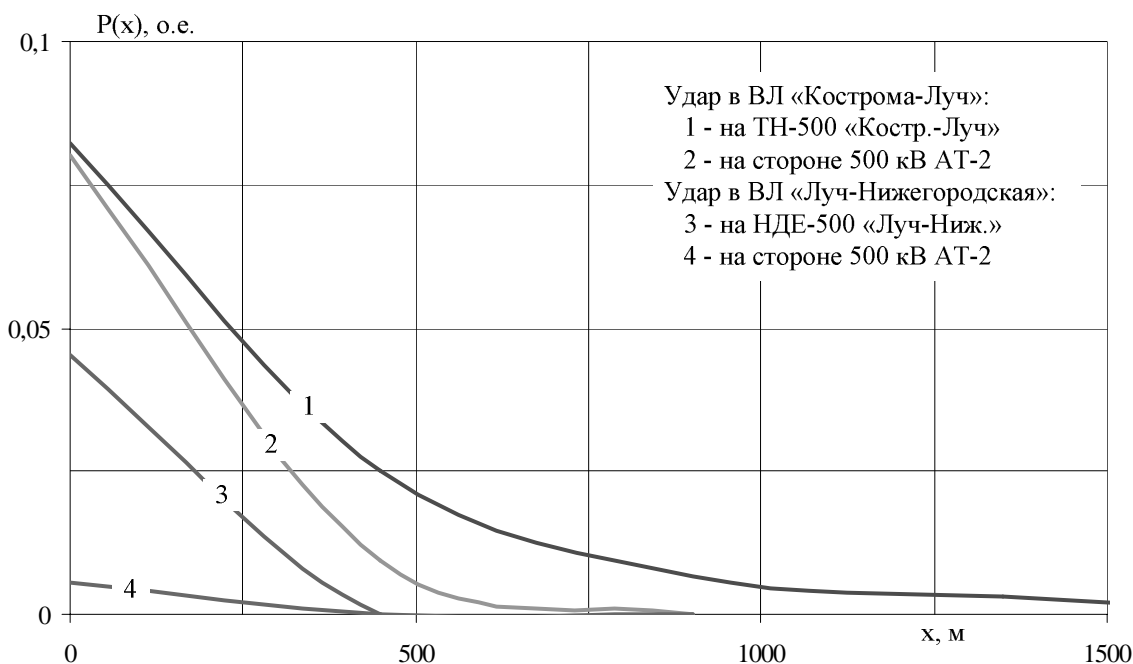


Рис.1.17. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в опору присоединенных ВЛ 500 кВ на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции оборудования ОРУ 500 кВ (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; рабочее напряжение на проводах ВЛ и ОРУ не учтено; $R_3 = 50$ Ом).

На основе анализа табл.1.4 и рис.1.17, учитывая данные [1], свидетельствующие о существенном влиянии сопротивления заземления опор различной конструкции на число обратных перекрытий при ударах молнии опоры и тросы, сделаны следующие выводы (в дополнение к выводам на основе табл.1.3):

- число набегających на ОРУ грозовых волн, вызванных ударами молнии в опоры и тросы присоединенных ВЛ, существенно зависит от сопротивления заземления опор на подходах ВЛ к ПС; следовательно, защищенность оборудования ОРУ от грозовых перенапряжений так же существенно зависит от сопротивления заземления опор на подходах ВЛ к ПС;
- так как число ударов молнии в опоры и тросы по крайней мере на порядок больше числа прорывов молнии на фазные провода, то важнейшей задачей защиты оборудования ПС от грозовых перенапряжений является обеспечение как можно более низких сопротивлений заземления опор ВЛ на подходах к ПС;
- наиболее важно обеспечение минимальных сопротивлений заземления 2-3 ближайших к ПС опор присоединенных ВЛ;
- в случае невозможности обеспечения малых сопротивлений заземления ближайших к ПС опор присоединенной ВЛ высокой защищенности оборудования ПС от грозовых перенапряжений можно достичь установкой защитного аппарата (разрядника или ОПН) в линейной ячейке этой ВЛ.

1.2.5. Оценка числа лет безаварийной работы оборудования подстанции при грозовых перенапряжениях

Согласно рекомендациям [1] для ВЛ 500 кВ на промежуточных опорах типа ПБ-500-1 определены следующие необходимые для расчета по (1.5) величины: $N = 84$ удара на 100 км длины ВЛ и 100 грозовых часов; относительное число (вероятность) прорывов молнии на фазные провода $n_{np} = 0.0052$ о.е.; относительное число ударов молнии в опору $n_{опора} = 0.24$ о.е. и в трос $n_{трос} = 0.76$ о.е.

Исходные данные для расчета по (1.5) приведены в табл.1.5, которая составлена на основе табл.1.3-1.4 и рис.1.13, рис.1.17, а результаты расчетов содержатся в табл.1.6.

Таблица 1.5. Исходные данные для расчета по (1.5) для наименее защищенного от грозовых перенапряжений оборудования ОРУ 500 кВ ПС «Луч».

| i | удар молнии в ВЛ 500 кВ | оборудование | $l_{опасн}^i$, км | $l_{опасн}^i \cdot \overline{P}_{пр}^i$, о.е.×км | $l_{опасн}^i \cdot \overline{P}_{опора}^i$, о.е.×км | | $l_{опасн}^i \cdot \overline{P}_{трос}^i$, о.е.×км |
|---|-------------------------|--------------|--------------------|--|---|-------|--|
| | | | | | <20 Ом | 50 Ом | |
| 1 | "Кострома - Луч" | ТН-500 | 1,35 | 0,110 | 0 | 0,034 | 0 |
| 2 | "Луч - Нижегород." | НДЕ-500 | 0,45 | 0,055 | 0 | 0,022 | 0 |

Таблица 1.6. Оценка по (1.5) защищенности от грозовых перенапряжений наименее защищенного оборудования ОРУ 500 кВ ПС «Луч» (при $T_q = 100$ часов в год).

| i | удар молнии в ВЛ | оборудование | R_3 , Ом | n, 1/год | M, лет |
|---|-----------------------|--------------|------------|----------|--------|
| 1 | "Кострома - Луч" | ТН-500 | <20 | 0,00048 | 2100 |
| | | | 50 | 0,00733 | 140 |
| 2 | "Луч - Нижегородская" | НДЕ-500 | <20 | 0,00024 | 4160 |
| | | | 50 | 0,00468 | 210 |

Общий уровень защищенности ПС от грозовых перенапряжений определяется наиболее удаленным от защитных аппаратов оборудованием – измерительными трансформаторами напряжения ТН-500 и НДЕ-500, и поэтому в результате расчетов грозовых перенапряжений важно оценить достаточность защищенности именно этого оборудования. Для этого полученные в табл.1.5 оценки M защищенности оборудования от грозовых перенапряжений сопоставлены с рекомендуемыми уровнями.

Рекомендуемый [1] показатель надежности грозозащиты наиболее дорогого и ответственного подстанционного оборудования 500 кВ (силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов) составляет $M = 800 \div 1000$ лет. Рекомендаций относительно значений M для

трансформаторов напряжения 500 кВ в [1] нет, так же как их нет и для другого оборудования помимо «наиболее ответственного». Это означает, что основное внимание в [1] уделяется защите от грозовых перенапряжений наиболее дорогостоящего оборудования ПС, которым и являются силовые трансформаторы и автотрансформаторы.

Представленные в [1] рекомендации относительно достаточных величин показателя M основаны на приемлемом для энергосистемы числе повреждений наиболее дорогостоящего оборудования от грозовых перенапряжений в год. Однако, перерывы в снабжении потребителей электрической энергией могут быть вызваны повреждением не только силовых трансформаторов и автотрансформаторов, но и любого другого оборудования ПС, а с этих позиций экономически целесообразный уровень надежности защиты от грозовых перенапряжений должен быть достаточно высоким не только для наиболее дорогого оборудования ПС, но и для всей подстанции в целом. Например, если на ПС учесть большое число трансформаторов тока, которые являются важнейшими в организации релейной защиты всей ПС и присоединенных ВЛ, то требуемый уровень защищенности каждого из них будет даже выше, чем для установленных силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

Учитывая изложенное, а также большое число влияющих на результаты расчетов M исходных данных, достоверное знание и задание которых невозможно, в настоящее время в определенной мере назрел вопрос об изменении подходов к выбору схем защиты оборудования ПС от грозовых перенапряжений. Новые схемы защиты оборудования от грозовых перенапряжений, построенные с использованием современных защитных аппаратов типа ОПН, должны обеспечивать повышенную надежность всего оборудования ПС, а не только силовых трансформаторов. Как уже было показано, в качестве наиболее эффективных схем защиты оборудования ПС грозовых перенапряжений следует признать каскадные (рис.1.14).

1.3. Анализ нормативных документов и предложения по их корректировке

1.3.1. Анализ требований ПУЭ в части грозозащиты подстанций

Замена РВ на ОПН. Изначально требования ПУЭ [3] в части грозозащиты ПС были сформулированы для случаев применения в качестве защитных аппаратов вентильных разрядников. В настоящее время основным защитным аппаратом от грозовых и коммутационных перенапряжений является ОПН [1,2,24-28]. Для случаев применения ОПН в ПУЭ расстояния, полученные для вентильных разрядников, предлагается пересчитывать соразмерно с защитными характеристиками ОПН (остающим напряжением в режиме ограничения грозовых перенапряжений).

В последней редакции ПУЭ в главе 4 в примечаниях к табл.4.2.10 (допустимые расстояния от вентильных разрядников до защищаемого оборудования) указано, что:

«При использовании ОПН вместо РВ или при изменении испытательных напряжений защищаемого оборудования расстояние до силовых трансформаторов или другого электрооборудования определяется по формуле

$$L_{\text{ОПН}} = L_{\text{РВ}} \frac{U_{\text{исп}} - U_{\text{ОПН}}}{U_{\text{исп}} - U_{\text{РВ}}},$$

где $L_{\text{ОПН}}$ - расстояние от ОПН до защищаемого оборудования, м; $L_{\text{РВ}}$ - расстояние от разрядника до защищаемого оборудования, м; $U_{\text{исп}}$ - испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе, кВ; $U_{\text{ОПН}}$, $U_{\text{РВ}}$ - остающееся напряжение на ОПН (РВ) при токе 5 кА - для классов напряжения 110-220 кВ; 10 кА - для классов напряжения 330 кВ и выше».

В условиях ОРУ 500 кВ ПС «Луч» для наиболее удаленного оборудования (ТН-500 кВ на ВЛ «Кострома - Луч») по ПУЭ имеем: $U_{\text{исп}} = 1550$ кВ; $U_{\text{РВ}} = 1200$ кВ; $U_{\text{ОПН}} = 900$ кВ; допустимо увеличение расстояний в $K = 1.86$ раза. Однако, как видно из рис.1.5 и рис.1.10, максимальные грозовые перенапряжения на удаленном оборудовании ОРУ (для ПС «Луч» 200 метров) практически не зависят от остающегося напряжения на защитных аппаратах,

установленных в ОРУ, и, следовательно, расстояния до защитных аппаратов не могут быть увеличены (после замены РВ на ОПН), так как это снизит защищенность удаленного оборудования от грозовых перенапряжений [29].

Приведенная в ПУЭ формула достаточно точна в случае, когда пересчитывается расстояние от трансформатора до его защитного аппарата исчисляемое десятками метров. Наибольшую же ошибку, как показано выше, приведенная в ПУЭ формула дает при пересчете расстояний до наиболее удаленного оборудования подстанции (при расстояниях более 100 метров). Учитывая изложенное, при замене разрядников на ОПН рекомендуется использовать формулу ПУЭ только при пересчете расстояний до силовых трансформаторов, автотрансформаторов, но не до наиболее удаленного оборудования ОРУ (оборудования линейных ячеек), расположенного до защитного аппарата (РВ или ОПН) по ходу набегающих с присоединенных ВЛ грозовых волн.

В подтверждение состоятельности высказанных предложений выступает примечание к табл.4.2.8 в главе 4 из ПУЭ 6.0:

*«При использовании разрядников I группы вместо разрядников II группы по ГОСТ 16357-70 * расстояния до силовых трансформаторов 150-220 кВ с уровнем изоляции по ГОСТ 1516.1-76 * могут быть увеличены в 1,5 раза».*

Это примечание еще раз показывает, что при использовании у трансформатора защитного аппарата со сниженным остающимся напряжением пересчитывать расстояние можно только до силового трансформатора, а не для всего оборудования ОРУ, как это делается в ПУЭ 7.0 [3] и Указаниях [24].

Длина тросового подхода. ПУЭ обязывает обустроить защищенный тросами подход ВЛ к ПС длиной вплоть до 3-4 км. Расчетами показано, что такое требование является избыточным, а при использовании каскадных схем защиты оборудования от грозовых перенапряжений можно снизить длину тросового подхода до 500 м или вовсе отказаться от установки троса. Поэтому предлагается в ПУЭ добавить пункт, который допускает снижать длину

тросового подхода ВЛ в случае установки дополнительных ОПН в ее линейную ячейку.

Активность грозовой деятельности. Согласно [30] требования ПУЭ к расстояниям до защитных аппаратов сформулированы при 30 грозových часах, в то время как по данным [1] для многих ПС на территории России следует принять 50-80 грозových часов в год. Поэтому предлагается в ПУЭ дать примечание о том, что требования к расстояниям сформулированы при 30 грозových часах и менее. В случае, если число грозových часов более 30 в год, необходимо пропорционально снижать допустимые расстояния [30].

Сопротивление заземления опор. ПУЭ обязывает обеспечить сопротивление заземления опор присоединенных ВЛ на подходах к ПС не более 10, 15, 20 Ом в зависимости от удельного сопротивления грунта. Согласно опыту эксплуатации многие опоры ВЛ на подходах к ПС имеют сопротивление заземления более 20 Ом, что приводит к росту числа обратных перекрытий и, как следствие, росту числа опасных грозových перенапряжений на оборудовании [31]. Поэтому предлагается в ПУЭ добавить пункт, который рекомендует в случае повышенных (более 20 Ом) сопротивлений заземления опор ВЛ на подходах к ПС устанавливать дополнительные ОПН, размещаемые в линейные ячейки ВЛ или на сборные шины; при этом, прежде всего, влияние сопротивления заземления на защищенность оборудования ПС заметно для сетей 110-330 кВ.

Открытые распределительные устройства 110-220 кВ. В ПУЭ 7.0 в главе 4 есть примечание к табл.4.2.10:

«Расстояния от вентильных разрядников до электрооборудования, кроме силовых трансформаторов, не ограничиваются при количестве параллельно работающих ВЛ: на напряжении 110 кВ - 7 и более; 150 кВ - 6 и более; 220 кВ - 4 и более».

Типовые ОРУ 110-220 кВ, как правило, выполняются по схеме «две системы шин с обходной» (междушинный выключатель нормально замкнут). Нередко длина сборных шин крупных ОРУ 110-220 кВ с большим числом присоединений превосходит 200 м. Учитывая реальные габариты таких ОРУ,

воздушные линии, присоединенные к одной системе шин, физически (скорость волны конечна) не успевают повлиять на грозовые перенапряжения на оборудовании другой системы шин и оборудовании линейных ячеек присоединенных к ней ВЛ (см.[29]). Кроме того, следует помнить, что увеличение числа присоединенных ВЛ пропорционально увеличивает количество грозовых волн, набегающих на ПС.

Расчетами грозовых перенапряжений в ОРУ 110-220 кВ, которые здесь не приводятся, показано, что даже при большом числе присоединенных линий максимально допустимые расстояния до удаленного оборудования должны быть ограничены.

1.3.2. Предложения по корректировке ПУЭ

На основе проведенных расчетов и рассуждений предложены следующие выводы, корректирующие требования ПУЭ в части защиты от грозовых перенапряжений оборудования ПС:

- при замене разрядников на ОПН допускается пересчитывать расстояния только до силовых трансформаторов, автотрансформаторов; недопустим пересчет расстояний до наиболее удаленного оборудования ОРУ (оборудования линейных ячеек), расположенного до защитного аппарата (РВ или ОПН) по ходу набегающих с присоединенных ВЛ грозовых волн;
- допускается снижать длину тросового подхода ВЛ в случае установки дополнительных ОПН в ее линейную ячейку;
- допустимые расстояния от оборудования до защитных аппаратов указаны при грозовой активности не более 30 грозовых часов в год; в случае, если число грозовых часов в районе расположения более 30 в год, допустимые расстояния должны быть пропорционально снижены;
- в случае повышенных (более 20 Ом) сопротивлений заземления опор ВЛ 110-330 кВ на походах к ПС необходимо устанавливать дополнительные ОПН 110-330 кВ, размещаемые в линейные ячейки ВЛ или на сборные шины ПС;

- необходимо исключить примечание к табл.4.2.10 ПУЭ 7.0, допускающее не ограничивать расстояния до удаленного оборудования при большом числе присоединенных ВЛ 110, 150, 220 кВ.

1.4. Расчет импульсных токов и выделяющихся энергий при грозовых перенапряжениях

Помимо рассмотренного выбора числа и мест установки защитных аппаратов на подстанции, обеспечивающих высокий уровень защиты оборудования от грозовых перенапряжений, важным является вопрос о воздействиях на сами защитные аппараты. Корректное определение токовых и энергетических нагрузок на ОПН позволяет правильно сформулировать требования к соответствующим техническим характеристикам этих защитных аппаратов и снизить риск их повреждения, т.е., в конечном счете, повысить надежность работы ПС в целом.

1.4.1. Расчет амплитуды импульсного тока в ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений

Пусть на ПС по присоединенной к ней ВЛ набегают грозовая волна $u_{зп}(t)$, которая действием установленного на подстанции ОПН будет ограничена в месте его установки до уровня $u_{опн}(t)$. Расчетная схема для определения импульсного тока $i_{опн}(t)$ в ОПН, составленная по правилу эквивалентной волны, приведена на рис.1.18.

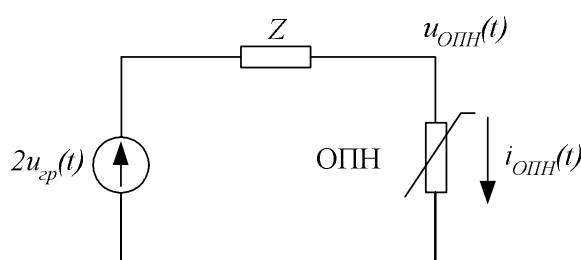


Рис.1.18. Эквивалентная схема для определения тока в ОПН.

Максимальное значение импульса тока $I_{зп}^{ОПН}$ может быть найдено как

$$I_{зп}^{ОПН} = \frac{2 \cdot U_{\max}^{зп} - U_{ост}^{зп}}{Z_{К}^{ВЛ}}, \quad (1.6)$$

где U_{\max}^{ep} – импульсная прочность изоляции ВЛ при грозовых перенапряжениях; U_{ocm}^{ep} – остающееся напряжение ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений; $Z_k^{ВЛ}$ – волновое сопротивление фазного провода ВЛ с учетом импульсной короны (см. [32]).

В табл.1.6 приведены исходные данные и результаты расчетов по формуле (1.6), полученные при условии $U_{ocm}^{ep} = 2 \cdot (\sqrt{2} \cdot U_{np}^{сети} / \sqrt{3})$, т.е. при кратности ограничения грозовых перенапряжений в месте установки ОПН, равной двум [1,24] по отношению к амплитуде фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети $U_{np}^{сети}$.

Таблица 1.6. Амплитуда импульсного тока ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений, вызванных удаленными ударами молнии в присоединенные к ПС линии.

| | | | | | | |
|---------------------|----------------------|--------|------|------|---------|------|
| Расчеты по (1.6) | $U_{ном}$, кВ | 110 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| | $U_{np}^{сети}$, кВ | 126 | 252 | 363 | 525 | 787 |
| | U_{\max}^{ep} , кВ | 730 | 1300 | 1850 | 2350 | 2900 |
| | $Z_k^{ВЛ}$, Ом | 300 | 300 | 200 | 200 | 200 |
| | $I_{ep}^{ОПН}$, кА | 4,2 | 7,3 | 15,5 | 19,2 | 22,6 |
| по МЭК | | 10 (5) | 10 | 10 | 20 (10) | 20 |

Результаты расчетов по (1.6) в целом согласуются с рекомендациями МЭК [33] по выбору номинального разрядного тока ОПН (так же см.[24]), которые приведены в последней строке табл.1.6.

Формула (1.6) получена без учета многократных отражений волн, распространяющихся между точкой удара молнии в ВЛ и точкой ПС, в которой установлен ОПН, и, поэтому, соответствует так называемым удаленным ударам молнии, т.е. не может быть корректно применена при близких к ПС ударах молнии ВЛ.

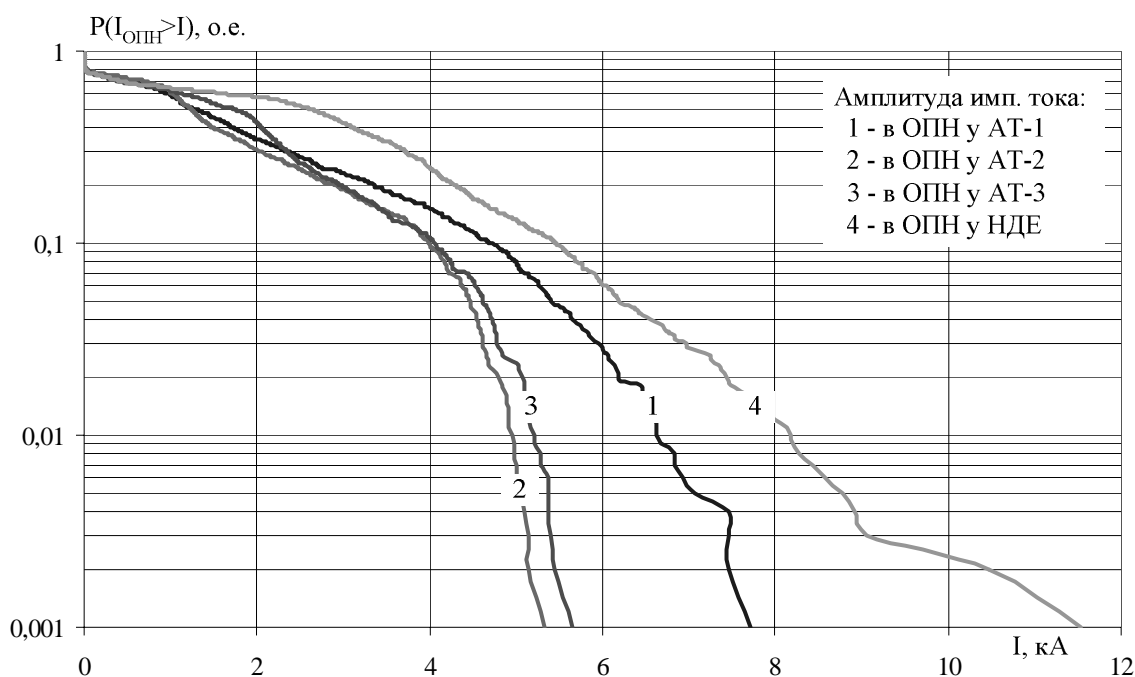


Рис.1.19. Распределение максимальных импульсных токов в ОПН 500 кВ, установленных на ПС «Луч», при ударе молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» за 450 м от входа ПС (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и ОРУ).

На рис.1.19 в случае близкого к ПС «Луч» удара молнии в фазный провод ВЛ «Луч – Нижегородская» получены для каждого из четырех ОПН 500 кВ, установленных на ПС «Луч», распределения вероятности превышения импульсным током, максимального значения, откладываемого по оси абсцисс. С помощью рис.1.19 показано, что наибольшие по амплитуде импульсные токи протекают в ОПН, установленном в линейной ячейке пораженной молнией ВЛ, а также то, что максимальные импульсные токи в каждом из ОПН заметно меньше, чем 19 кА, указанные в табл.1.6 для сети 500 кВ. Отличие данных рис.1.19 от табл.1.6 связано с большим числом установленных на ПС защитных аппаратов 500 кВ, тогда как при получении табл.1.6 учитывался лишь один из них.

На рис.1.20 в случае близкого к ПС «Луч» удара молнии в фазный провод ВЛ «Луч – Нижегородская» отражено влияние числа находящихся в работе автотрансформаторов (со своими ОПН) на максимальные значения грозовых импульсных токов в ОПН, установленном у НДЕ-500 кВ. Показано, что

максимальные значения импульсных токов в ОПН зависят от числа находящихся в работе присоединений, а также то, что при близких к ПС ударах молнии амплитуда тока в ОПН (кривая 1 на рис.1.20) может превышать значение, соответствующее удаленному от ПС удару молнии в присоединенную ВЛ (см. табл.1.6).

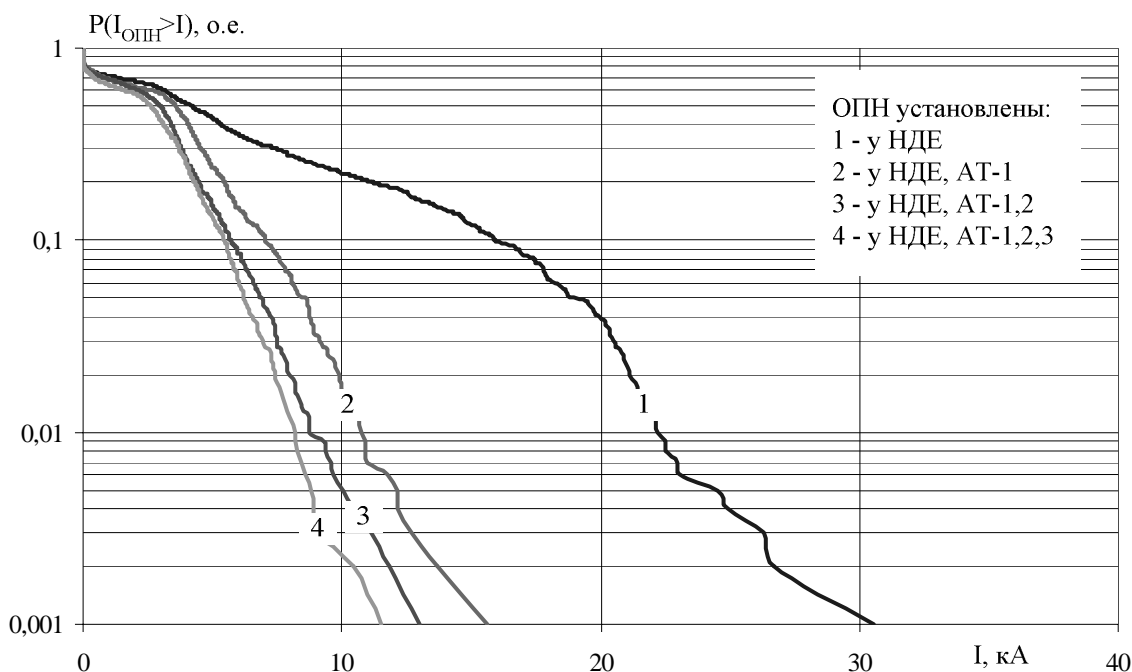


Рис.1.20. Влияние числа находящихся в работе автотрансформаторов и их ОПН 500 кВ на максимальные импульсные токи в ОПН, установленном на ПС «Луч» у НДЕ-500, при ударе молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» за 450 м от входа ПС (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и ОРУ).

На рис.1.21 в случае близкого к ПС «Луч» удара молнии в фазный провод ВЛ «Луч – Нижегородская» отражено влияние удаленности места удара молнии в фазный провод ВЛ, на максимальные импульсные токи в установленных на ПС защитных ОПН. Показано, что при близких к ПС ударах молнии в присоединенные ВЛ максимальные значения импульсных токов в ОПН могут превосходить 50-100 кА [34]. Следует понимать, что кривая №1 на рис.1.21 соответствует прямому удару в ОПН, установленному у НДЕ-500 кВ, который, по сути, является прорывом молнии через систему молниеотводов ПС и может

считаться нерасчетным случаем при выборе ОПН, чего уже нельзя сказать про кривую №2 на рис.1.21.

При получении рис.1.19-1.21 считалось, что все четыре комплекта защитных аппаратов, установленных в ОРУ 500 кВ, имеют одинаковые вольтамперные характеристики (остающееся напряжение на импульсе 8/20 мкс амплитудой 10 кА составляет 1050 кВ).

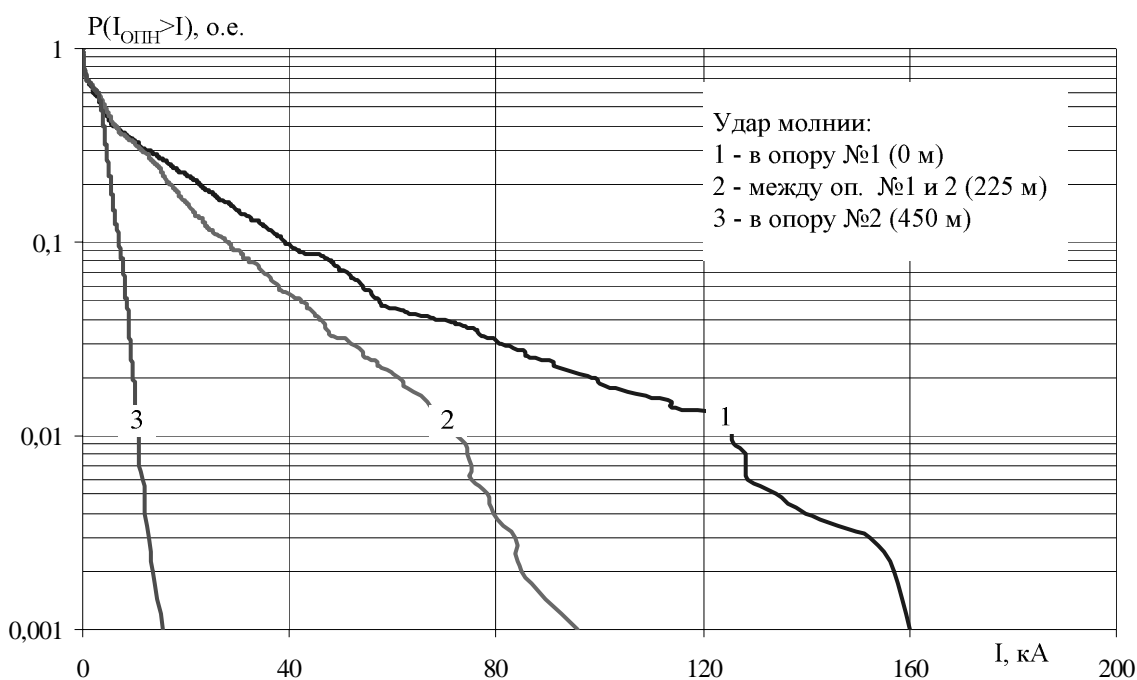


Рис.1.21. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» на максимальные импульсные токи в ОПН 500 кВ, установленном у НДЕ-500 (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и ОРУ; автотрансформаторы АТ-2,3 и их ОПН выведены из работы).

На основе рис.1.19-1.21 сделан вывод о необходимости испытаний ОПН импульсами тока с большой амплитудой. В качестве амплитуды таких импульсов в МЭК [33] приняты 65 и 100 кА. Для наглядного обоснования возможности протекания в ОПН столь больших импульсных токов необходима схема рис.1.22, на которой рассмотрен удар молнии $i_m(t)$ в фазный провод ВЛ в ближайшем к ПС пролете длиной $l_1 + l_2$, по концам которого учтены гирлянда изоляторов и ОПН.

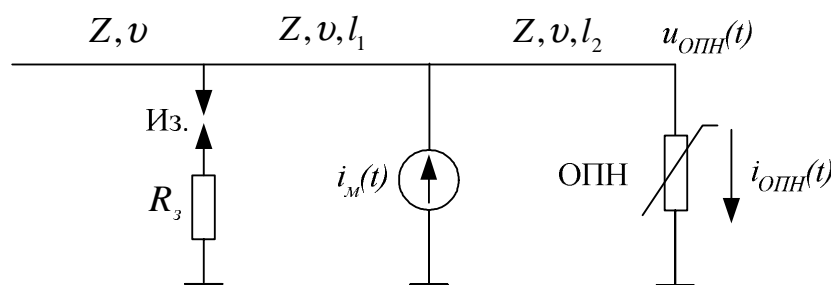


Рис.1.22. Упрощенная схема для определения тока в ОПН при близком ударе молнии.

Расчетные осциллограммы импульсных токов в ОПН 500 кВ, установленном на входе ПС, при $l_1 + l_2 = 450$ м, $l_1 = l_2 = 225$ м, $Z = 200$ Ом (см. табл.1.6), $v = 300$ м/мкс, выдерживаемом напряжении изоляции 2350 кВ (см. табл.1.6) приведены на рис.1.23-1.25. При получении рис.1.23-1.25 в упрощенной схеме рис.1.22 не учитывались вольт-секундная характеристика воздушной изоляции при малых предразрядных временах, сопротивление канала молнии, ошиновка подстанции, импульсная корона и потери, индуктивность опоры и наличие тросов.

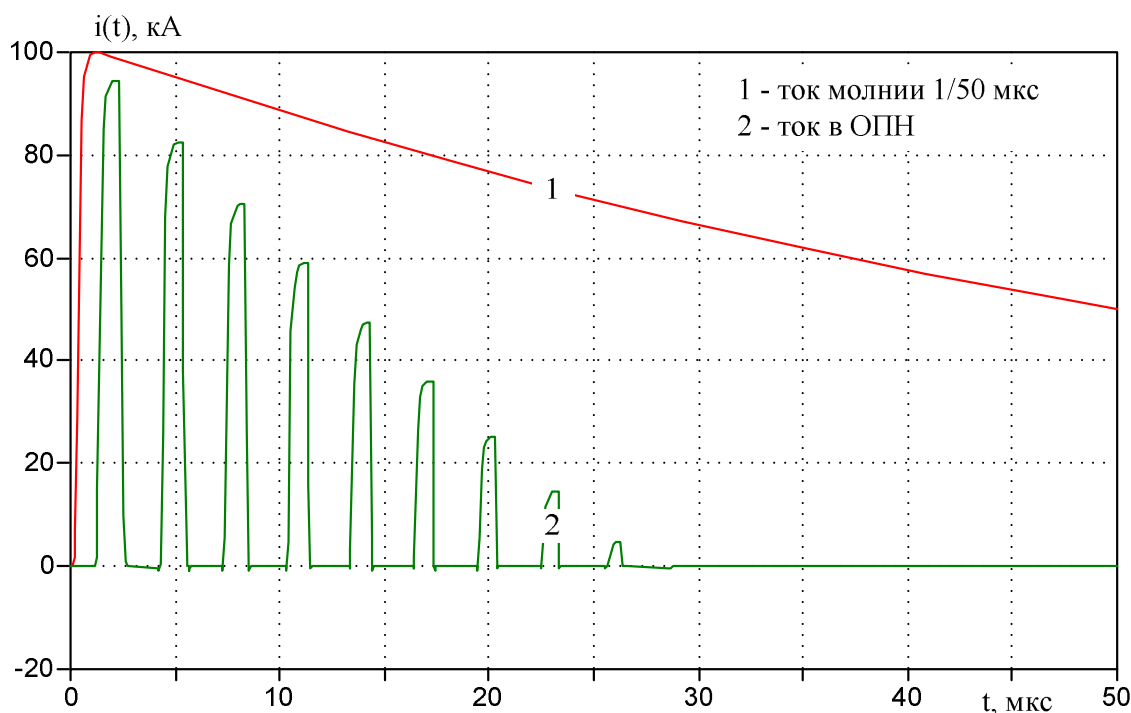


Рис.1.23. Импульсный ток в ОПН при близком ударе молнии (схема рис.1.22, ток молнии 1/50 мкс с амплитудой 100 кА, сопротивление заземления опоры $R_3 = 0$ Ом).

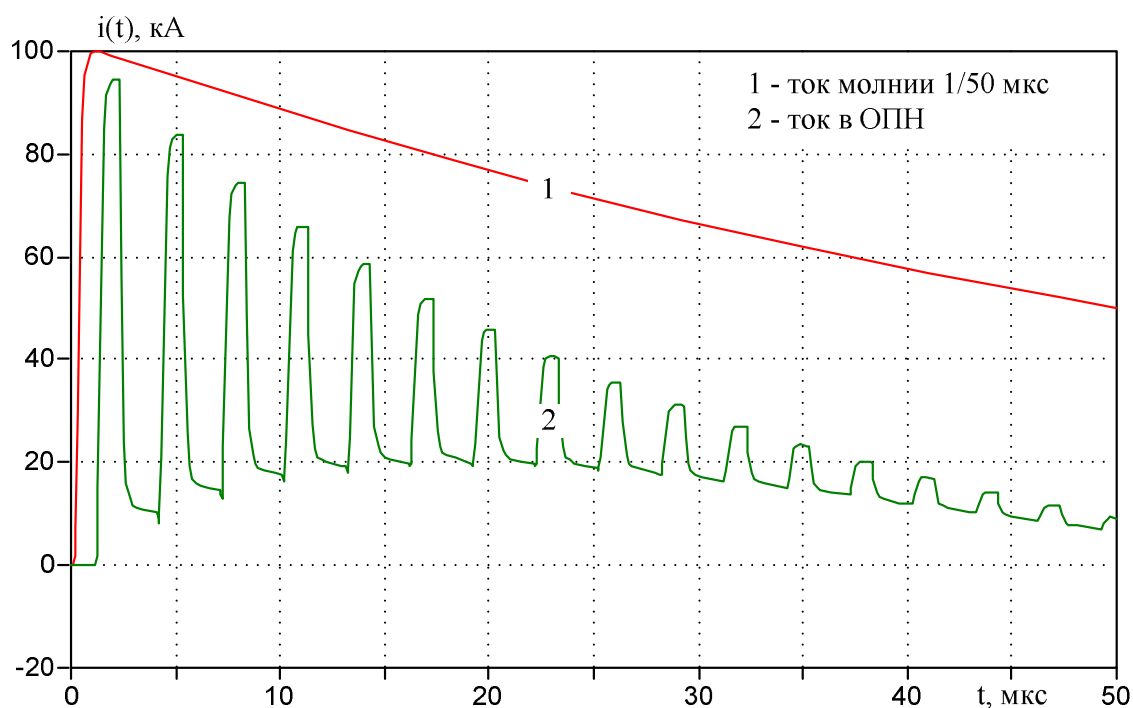


Рис.1.24. Импульсный ток в ОПН при близком ударе молнии (схема рис.1.22, ток молнии 1/50 мкс с амплитудой 100 кА, сопротивление заземления опоры $R_z = 20$ Ом).

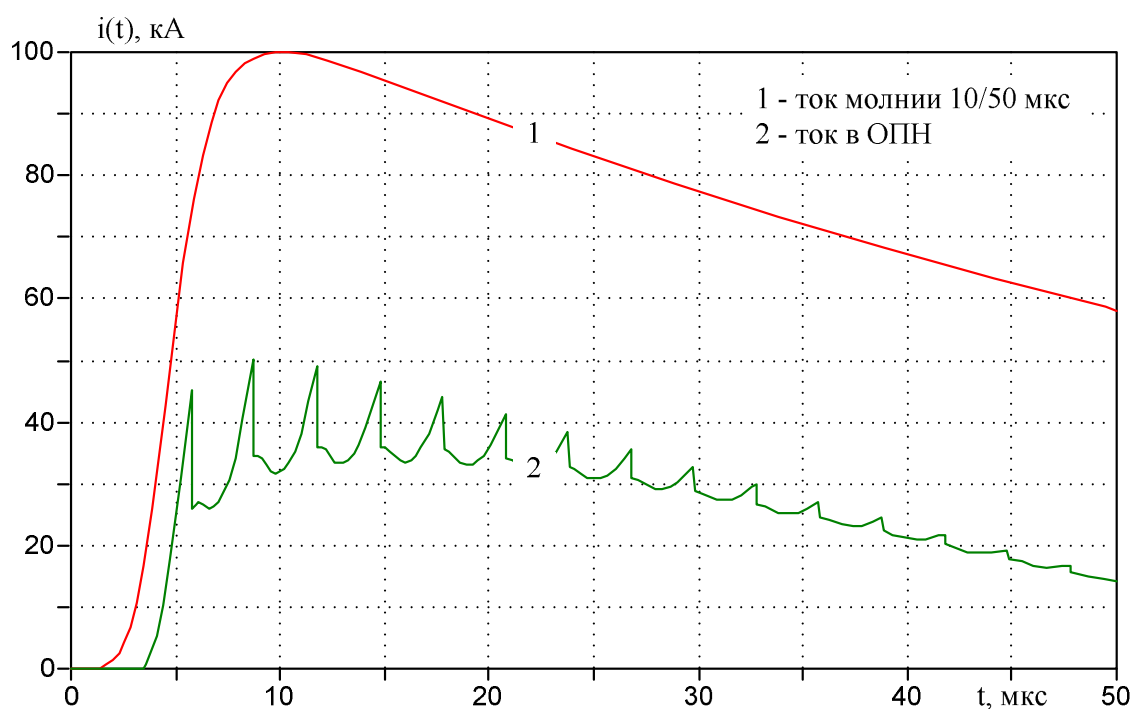


Рис.1.25. Импульсный ток в ОПН при близком ударе молнии (схема рис.1.22, ток молнии 10/50 мкс с амплитудой 100 кА, сопротивление заземления опоры $R_z = 20$ Ом).

С использованием рис.1.23-1.25 показано, что амплитуда импульсного тока в ОПН при близком к ПС ударе молнии в ВЛ может достигать амплитуды

импульса тока молнии, а форма тока в ОПН, т.е. выделяющаяся энергия, существенно зависит от сопротивления заземления опоры и от временных параметров импульса тока молнии. Большие амплитуды импульсных токов в ОПН обусловлены многократными отражениями волн, распространяющихся между точкой удара молнии в ВЛ, точкой ПС, в которой установлен ОПН, и заземлителем ближайшей к месту удара молнии опоры ВЛ с перекрывшейся гирляндой изоляторов.

По расчетным осциллограммам рис.1.23-1.25, полученным при близких к ПС ударах молнии, следует ожидать повышенных выделяющихся в ОПН энергий по сравнению с энергией при удаленных ударах молнии.

1.4.2. Расчет выделяющихся в ОПН энергий в режиме ограничения грозовых перенапряжений

Выделяемая в ОПН энергия может быть определена из выражения

$$W_{\text{ОПН}} = \int_t u_{\text{омн}}(t) \cdot i_{\text{омн}}(t) \cdot dt. \quad (1.7)$$

В области больших максимальных значений протекающих по ОПН импульсных грозовых токов его остающееся напряжение вследствие высокой нелинейности варисторов практически не изменяется и, поэтому, будем считать, что остающееся на ОПН напряжение остается постоянным и равным величине $u_{\text{омн}}(t) = U_{\text{ост}}^{\text{зп}}$ – остающееся на ОПН напряжение в режиме ограничения грозовых перенапряжений (соответствует остающемуся напряжению ОПН при токах 8/20 мкс с амплитудами 5-10 кА).

Из схемы рис.1.18 и правила эквивалентной волны для случая удаленного от ОПН удара молнии в ВЛ можно записать

$$i_{\text{омн}}(t) = \frac{2 \cdot u_{\text{зп}}(t) - u_{\text{омн}}(t)}{Z_{\text{к}}^{\text{ВЛ}}},$$

откуда с учетом сделанных допущений

$$i_{\text{омн}}(t) = \frac{2 \cdot u_{\text{зп}}(t) - U_{\text{ост}}^{\text{зп}}}{Z_{\text{к}}^{\text{ВЛ}}}.$$

Временными характеристиками грозовых импульсов напряжения являются длительность фронта импульса и условная длительность импульса – время до его полуспада [1]. Для упрощения задачи будем характеризовать волны грозовых перенапряжений только их условной длительностью в силу того, что длительность подавляющего большинства импульсов существенно превосходит длительность их фронтов [1]. Аналитически волна набегающих на подстанцию грозовых перенапряжений $u_{zp}(t)$ с амплитудой U_{\max}^{zp} может быть записана в следующем виде

$$u_{zp}(t) = U_{\max}^{zp} \cdot \exp(-t/\tau),$$

где τ – постоянная времени импульса. Задав условную длительность импульса $t = t_{0.5}$, можно записать

$$\frac{u_{zp}(t_{0.5})}{U_{\max}^{zp}} = \exp(-t_{0.5}/\tau),$$

откуда с учетом

$$\frac{u_{zp}(t_{0.5})}{U_{\max}^{zp}} = 0.5$$

определим постоянную времени импульса

$$\tau = \frac{t_{0.5}}{\ln(2)}.$$

Импульсный ток в ОПН будет протекать до тех пор, пока воздействующее на него напряжение $2u_{zp}(t)$ не станет меньше его остающегося напряжения $u_{ост}(t) = U_{ост}^{zp}$, откуда длительность $t_{ост}$ протекания тока в ОПН может быть найдена из условия

$$U_{ост}^{zp} = 2U_{\max}^{zp} \cdot \exp(-t_{ост}/\tau),$$

поэтому

$$t_{ост} = \tau \cdot \ln\left(\frac{2U_{\max}^{zp}}{U_{ост}^{zp}}\right).$$

Введем обозначение

$$K_{zp} = \frac{U_{\max}^{zp}}{U_{ост}^{zp}}$$

– коэффициент, равный отношению импульсной прочности линейной изоляции ВЛ к остающемуся на ОПН напряжению в режиме ограничения грозových перенапряжений. С учетом обозначений получим $t_{ocm} = \tau \cdot \ln(2K_{zp})$.

Энергия (1.7), поглощенная ОПН в режиме ограничения грозových перенапряжений, равна

$$W_{ОПН}^{zp} = \int_0^{t_{ocm}} U_{ocm}^{zp} \cdot i_{онн}(t) \cdot dt = \frac{U_{ocm}^{zp}}{Z_{к}^{ВЛ}} \cdot \int_0^{t_{ocm}} (2 \cdot U_{max}^{zp} \cdot \exp(-t/\tau) - U_{ocm}^{zp}) dt.$$

Преобразуем далее к виду

$$W_{ОПН}^{zp} = \frac{(U_{ocm}^{zp})^2}{Z_{к}^{ВЛ}} \cdot \int_0^{t_{ocm}} (2 \cdot K_{zp} \cdot \exp(-t/\tau) - 1) dt$$

и вычислим интеграл:

$$W_{ОПН}^{zp} = \frac{(U_{ocm}^{zp})^2}{Z_{к}^{ВЛ}} \cdot [-2 \cdot \tau \cdot K_{zp} \cdot (\exp(-t_{ocm}/\tau) - 1) - t_{ocm}].$$

Используя выражения для τ и t_{ocm} , после преобразований имеем

$$W_{ОПН}^{zp} = \frac{(U_{ocm}^{zp})^2}{Z_{к}^{ВЛ}} \cdot \frac{t_{0.5}}{\ln(2)} \cdot [2 \cdot K_{zp} - \ln(2K_{zp}) - 1]$$

или

$$W_{ОПН}^{zp} = \frac{(U_{max}^{zp})^2}{Z_{к}^{ВЛ}} \cdot \frac{t_{0.5}}{\ln(2)} \cdot \frac{[2 \cdot K_{zp} - \ln(K_{zp}) - 2]}{(K_{zp})^2}. \quad (1.8)$$

Удельная выделяемая в ОПН в режиме ограничения грозových перенапряжений энергия (по отношению к наибольшему рабочему напряжению ОПН, соответствующему фазному значению наибольшего рабочего напряжения сети $U_{np}^{сети}$) определяется выражением

$$W_{ОПН}^{уд,zp} = \frac{W_{ОПН}^{zp}}{U_{np}^{сети} / \sqrt{3}}. \quad (1.9)$$

С помощью (1.8) показано, что выделяемая в ОПН энергия пропорциональна длительности воздействующей на ОПН грозовой волны, а также пропорциональна квадрату ее амплитуды, напрямую связанной с импульсной прочностью гирлянды изоляторов ВЛ.

Выражения (1.8)-(1.9) позволяют определить энергию, выделяемую в ОПН, при однократном воздействии на него грозового импульса. Известно [1], что разряд молнии состоит из нескольких компонент, т.е. энергия, выделяемая в ОПН, должна быть получена с учетом вероятного числа компонент молнии и их временных параметров. С другой стороны, на подстанции, как правило, установлено несколько комплектов ОПН, что снижает энергетические нагрузки на каждый из них и, поэтому, расчеты по формулам (1.8) и (1.9) проведены только для одного импульса.

Исходные данные для проведения расчетов по формулам (1.8) и (1.9) указаны в табл.1.6, а результаты расчетов – в табл.1.7, полученной при

$$U_{ост}^{zp} = 2 \cdot (\sqrt{2} \cdot U_{нр}^{сету} / \sqrt{3}).$$

Таблица 1.7. Энергия, выделяющаяся в ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений, вызванных удаленными ударами молнии в присоединенные к ПС линии.

| | $t_{0,5}$, мкс | $U_{ном}$, кВ | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------------|-----|------|------|------|
| | | 110 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| $W_{ОПН}^{zp}$, кДж | 50 | 42 | 141 | 432 | 737 | 1195 |
| | 150 | 126 | 424 | 1297 | 2211 | 3585 |
| $W_{ОПН}^{уд,zp}$, кДж/кВ | 50 | 0,6 | 1,0 | 2,1 | 2,4 | 2,6 |
| | 150 | 1,7 | 2,9 | 6,2 | 7,3 | 7,9 |

Данные табл.1.7 соответствует удаленному от ПС удару молнии в ВЛ, т.е. не могут быть использованы при близких к ПС ударах молнии ВЛ. На рис.1.26 показано для случая близкого к ПС удара молнии в фазный провод ВЛ, влияние удаленности места удара молнии на выделяющуюся в одном ОПН энергию. Из рис.1.26 видно, что при близких к ПС ударах молнии в присоединенные ВЛ (кривые 1-2) максимальная энергия в ОПН может превосходить значения, указанные в табл.1.7 для удаленного удара.

Кривые 3-5 на рис.1.26 дают выделяющиеся в ОПН энергии, меньшие значений, указанных в табл.1.7 для удаленного удара, что объясняется, во-первых, используемыми одновременно двумя комплектами ОПН (у НДЕ-500 и

у АТ-1), во-вторых, наличием присоединенной к шинам ПС линии 500 кВ «Кострома – Луч», а в-третьих, – перекрытием в расчетной модели гирлянды изоляторов ВЛ 500 кВ «Луч – Нижегородская», пораженной молнией.

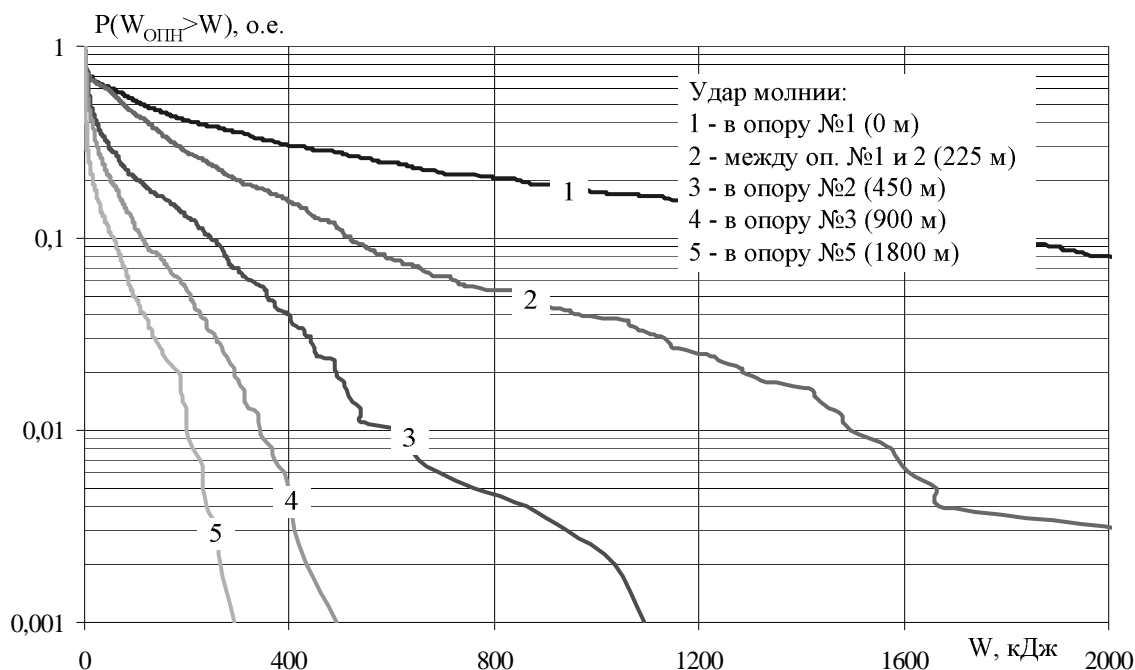


Рис.1.26. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» на выделяющуюся энергию в ОПН 500 кВ, установленном у НДЕ-500 (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и ОРУ; автотрансформаторы АТ-2,3 и их ОПН выведены из работы).

Для сравнения расчетных выделяющихся в ОПН энергий (табл.1.7 и рис.1.26) с величинами энергий, выделяющихся в ОПН при их испытаниях грозowymi импульсами тока [24,33], расчетным путем с использованием программного комплекса ЕМТР получена табл.1.8.

Испытательные импульсы грозowych токов формы 8/20 мкс и 4/10 мкс, указанные в табл.1.8, являются достаточно короткими по сравнению с теми импульсами, для которых в табл.1.7 была определена энергия в ОПН. Для иллюстрации этого на рис.1.27 показана форма импульса тока в ОПН 500 кВ, полученная в схеме рис.1.18 при параметрах набегающей грозовой волны из табл.1.7. На рис.1.27 показано, что импульсные грозowych токи в ОПН могут иметь условную длительность до 100 мкс, т.е. в несколько раз больше, чем испытательные 8/20 и 4/10 мкс.

Таблица 1.8. Энергия, выделяющаяся в ОПН в процессе их испытаний грозовыми импульсами тока различной формы и амплитуды.

| Импульс тока, мкс/мкс | Амплитуда тока, кА | Энергия одного импульса, кДж для ОПН классов напряжения, кВ | | | | |
|-----------------------|--------------------|---|-----|-----|-----|------|
| | | 110 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| 8/20 | 5 | 19 | 37 | 52 | 71 | 104 |
| | 10 | 40 | 78 | 111 | 151 | 220 |
| | 20 | 85 | 164 | 234 | 319 | 465 |
| 4/10 | 65 | 151 | 293 | 418 | 569 | 831 |
| | 100 | 240 | 467 | 667 | 906 | 1323 |

Для оценки допустимости воздействия на ОПН длинных грозовых импульсов тока выделяющуюся при этом энергию правильнее сравнить с энергией, выделяющейся в ОПН в процессе испытаний относительно длинными импульсными токами, на роль которых наиболее всего подходит прямоугольный импульс тока длительностью 2000 мкс. О допустимости воздействия на ОПН длинных импульсов грозовых токов свидетельствует сравнение энергий по табл.1.7 (случай длинного импульса 150 мкс) с испытательной энергией типовых ОПН 110-750 кВ, полученной на прямоугольных импульсах тока (см. вторую главу).

Для оценки допустимости воздействия на ОПН относительно коротких грозовых импульсов тока достаточно сопоставить энергии по табл.1.7 (случай импульса 50 мкс) и с испытательными энергиями на импульсах 8/20 и 4/10 мкс (табл.1.8).

На основе сравнения испытательных энергетических воздействий на ОПН с возможными реальными воздействиями при ограничении грозовых перенапряжений можно сделать вывод о том, что испытательные воздействия на ОПН, в целом, соответствуют реальным.

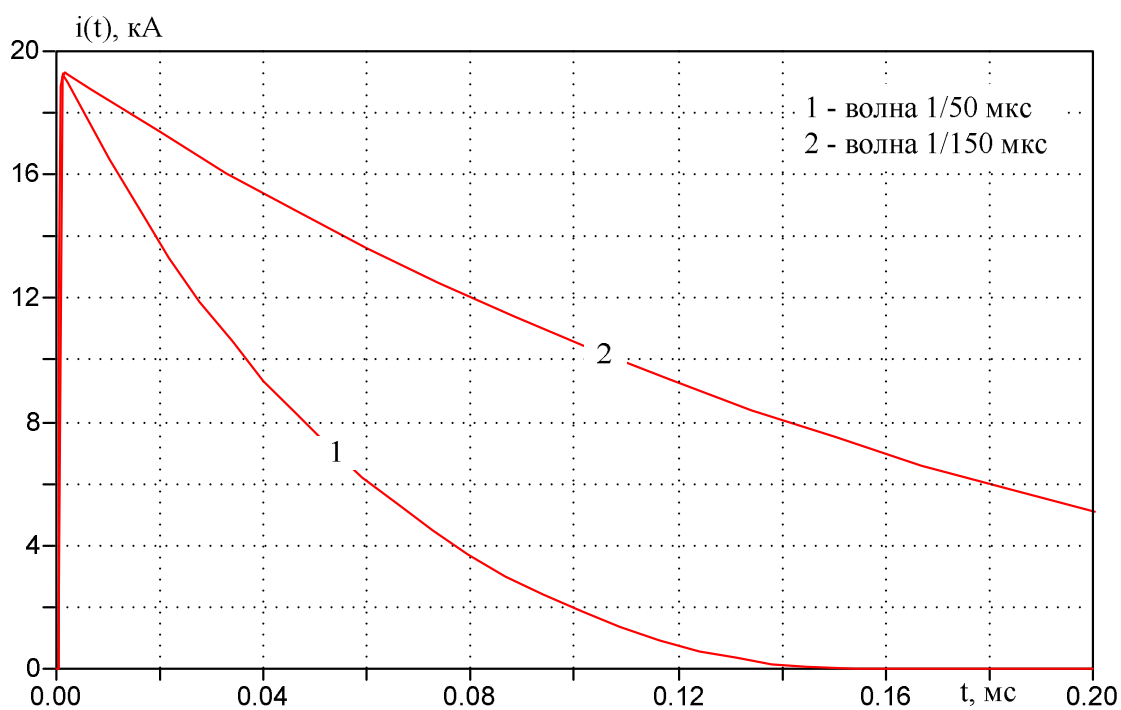


Рис.1.27. Форма тока в ОПН 500 кВ в схеме рис.1.18 при различных временных параметрах набегающей грозовой волны, амплитуда которой соответствует импульсной прочности изоляции ВЛ 500 кВ.