

Различные подходы к выбору схемы защиты оборудования от грозовых перенапряжений (Дмитриев М.В.)

1. Введение

Выбор числа защитных аппаратов и мест их установки в открытом распределительном устройстве (ОРУ) подстанции (ПС) зависит от принципов и методов, которые используются в расчетах.

Существует два основных подхода к расчетам грозовых перенапряжений и выбору схемы защиты оборудования от грозовых перенапряжений:

- вероятностный подход;
- «детерминистский» подход.

Вероятностный подход предполагает получение оценки вероятности повреждения того или иного оборудования в условиях конкретной ПС и сравнение полученного результата с рекомендуемыми показателями защищенности оборудования от грозовых перенапряжений, приведенными, например, в [1].

«Детерминистский» подход предполагает «абсолютно надежную» защиту оборудования от грозовых перенапряжений. Этот метод, естественно, предъявляет повышенные требования к числу защитных аппаратов в схеме ОРУ и к защитным характеристикам этих аппаратов. Однако использование этого метода при построении схемы защиты оборудования ОРУ от перенапряжений минимизирует вероятность ошибки, связанной с неточностью и неопределенностью исходных данных, с которыми всегда необходимо считаться при расчетах грозовых перенапряжений.

Расчеты в рамках и вероятностного, и «детерминистского» подхода могут быть выполнены различными методами, среди которых выделим два:

- расчеты с использованием кривой опасных волн (КОВ);
- расчеты с использованием метода Монте-Карло.

Рассмотрим различные подходы к выбору схемы защиты от перенапряжений оборудования ОРУ и различные методы расчетов на примере ОРУ 500 кВ ПС «Металлургическая» (схема рис.1).

В ОРУ 500 кВ на ПС «Металлургическая» согласно [2] у обмотки 500 кВ автотрансформатора должен быть установлен защитный аппарат (например, ограничитель перенапряжений нелинейный ОПН). При этом в цепи между этим ОПН 500 кВ и автотрансформатором не должно быть коммутационных аппаратов. Главный вопрос, на который необходимо ответить относительно ПС «Металлургическая» – необходима или нет установка дополнительного ОПН 500 кВ в ячейке линейного разъединителя присоединенной воздушной линии (ВЛ) 500 кВ.

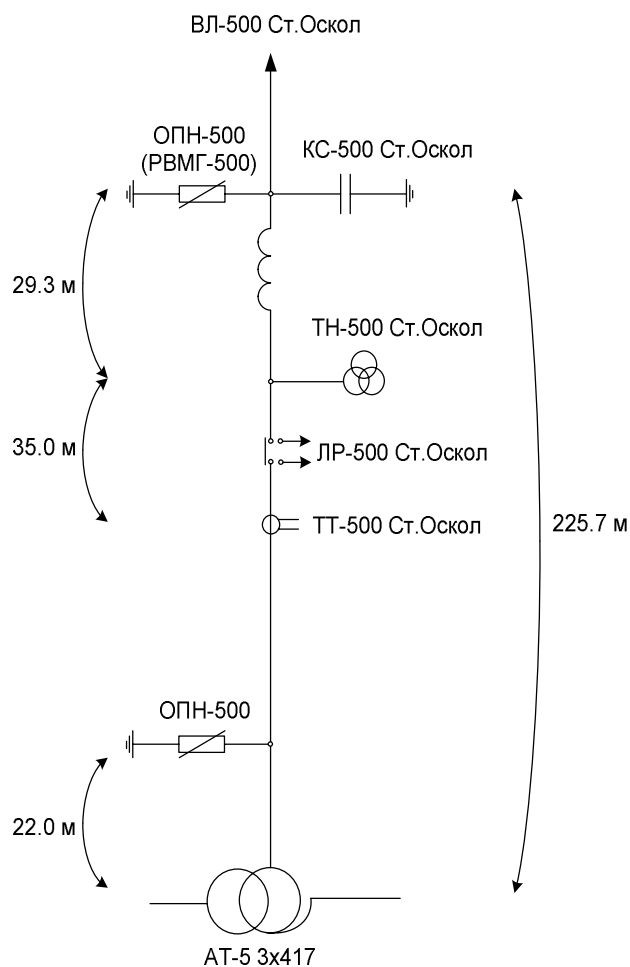


Рис.1. Схема ОРУ 500 кВ ПС «Металлургическая» нормального режима.

Считаем, что оборудование ПС надежно защищено от прямых ударов системой молниеотводов, у которых обеспечено малое импульсное сопротивление заземления, исключающее обратные перекрытия на оборудование. Тогда надежность защиты ПС от грозовых перенапряжений определяется числом отключений, вызванных набегающими с присоединенных ВЛ волнами грозовых перенапряжений.

Набегающие по ВЛ на ПС грозовые волны могут образовываться вследствие ударов молнии непосредственно в ВЛ (трос, провод) и при близких к ВЛ ударах молнии в наземные объекты.

В расчетах грозоупорности ОРУ 220 кВ и выше с индуцированными перенапряжениями, вызванными близкими к ВЛ ударами молнии, не считаются. Для ВЛ 500 кВ практически исключены обратные перекрытия с тросов на фазные провода. Поэтому расчетным случаем удара молнии в ВЛ 500 кВ является прорыв сквозь тросовую защиту на фазные провода.

2. Расчеты методом кривой опасных волн

Защищенность подстанции от набегающих с линии волн может быть охарактеризована кривой опасных волн (КОВ), т.е. зависимостью между амплитудой и длиной фронта волны, дошедшей до подстанции, если эта

волна создает в какой-либо точке подстанции перенапряжения выше допустимых. Совместное рассмотрение КОВ и вольт-секундной характеристики (ВСХ) линейной изоляции позволяет определить область опасных и возможных волн. При распространении вдоль линии волны затухают и сглаживаются. Поэтому существует ограниченная длина подхода, удары молнии в ВЛ за пределами которой не могут создать для подстанции опасных набегающих волн.

Грозоупорность ПС зависит от импульсной прочности линейной изоляции присоединенных ВЛ. Поэтому расчеты проведены для трех значений длины гирлянды изоляторов ВЛ 500 кВ: $L = 3.0$ м, $L = 3.5$ м, $L = 4.0$ м. Максимальные грозовые перенапряжения при использовании на ПС «Металлургическая» одного комплекта ОПН (у автотрансформатора АТ) будут на конденсаторе связи (КС), на трансформаторе напряжения (ТН), на трансформаторе тока (ТТ), так как это оборудование наиболее удалено от защитного аппарата. Результаты расчетов кривой опасных волн (КОВ) для конденсатора связи представлены на рис.2 (на ПС только один ОПН-500 кВ, установленный у АТ).

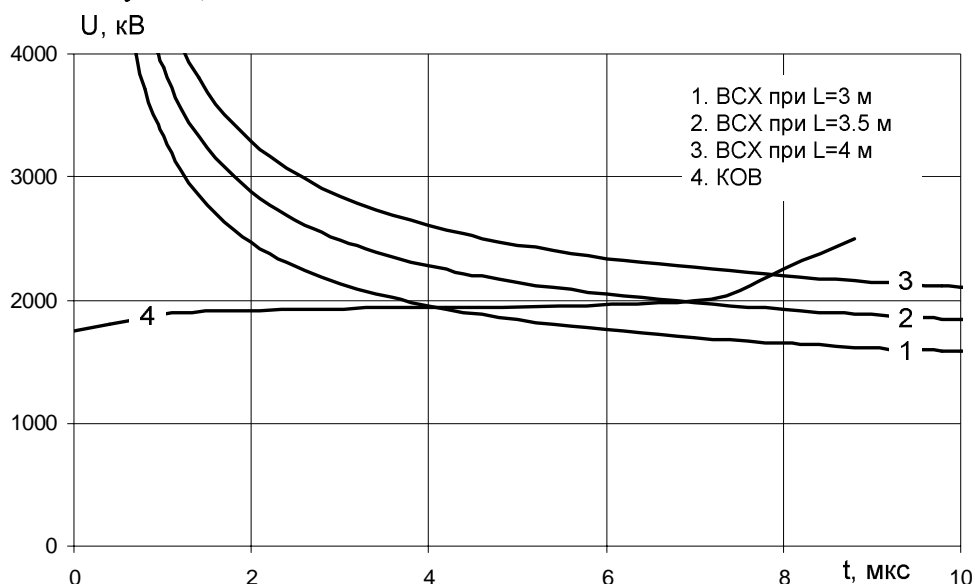


Рис.2. КОВ для КС-500 кВ в ОРУ 500 кВ на ПС «Металлургическая» в случае, когда защитный ОПН на ВЛ отсутствует.

Координаты точки пересечения КОВ и ВСХ изоляции обозначены через $U_{кр}$ и $t_{кр}$ и приведены в табл.1.

Таблица 1

Координаты точек пересечения КОВ и ВСХ изоляции, определенные по рис.2 для КС-500 кВ

$L_{из}, м$	$t_{кр}, мкс$	$U_{кр}, МВ$
3	4,1	1,95
3,5	6,8	1,99
4	7,9	2,20

По указанным в таблице параметрам критической волны по эмпирической формуле, приведенной в [3], определяется длина опасной зоны тросового подхода

$$l_{on} = \frac{t_{кр} h_{cp}}{0.5h_{cp} + 8U_{кр}},$$

где h_{cp} - средняя высота подвеса фазного провода.

Высота подвеса гирлянды изоляторов на опоре ВЛ 500 кВ порталного типа принята $h = 27.2$ м, минимальное расстояние от фазного провода до земли в середине пролета принято $h_{мин} = 8$ м, высота подвеса провода на опоре $h_{on} = h - L_{из}$, стрела провеса провода $f = h_{on} - h_{мин}$, средняя высота подвеса фазного провода $h_{cp} = h_{on} - \frac{2}{3}f$. Результаты расчетов длины опасного подхода приведены в табл.2.

Таблица 2

Результаты расчетов длины опасного подхода ВЛ 500 кВ «Старый Оскол –
Металлургическая» к ПС «Металлургическая»

$L_{из}$, м	$h_{пр}$, м	f , м	h_{cp} , м	$l_{оп}$, км
3	24,2	16,2	13,4	2,5
3,5	23,7	15,7	13,2	4,0
4	23,2	15,2	13,1	4,3

В том варианте схемы грозозащиты подстанции, где критическая длина опасной зоны оказывается наибольшей, будет наибольшим и число опасных волн, возникающих вследствие поражения линии в зоне защищенного подхода, поэтому при проектировании схем грозозащиты стремятся к тому, чтобы длина подхода не превышала некоторого предельного значения. Для ПС 500 кВ это 2.5 – 3 км. Если величина l_{on} превышает указанные значения, то целесообразно изменить тип, число или расположение защитных аппаратов на подстанции.

Усредненная по длине l_{on} вероятность прихода на подстанцию опасной волны зависит от случайных величин расстояния между местом удара молнии и подстанцией, амплитуды и крутизны тока молнии. С погрешностью в сторону запаса годовое число возникновения опасной для оборудования волны можно оценить по приближенной формуле:

$$n = \frac{T_q}{100} \cdot \frac{N}{100} \cdot P_{пр} \cdot l_{on} \cdot k_y,$$

где T_q - число грозовых часов в год, N - число ударов молнии в ВЛ на 100 км длины и 100 грозовых часов, $P_{пр}$ - вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту на фазный провод, k_y - поправочный коэффициент, учитывающий то, что по мере удаления места удара молнии в ВЛ снижается вероятность возникновения волн с опасными параметрами.

Примем $T_y = 60$ грозových часов в год. Для типовой ВЛ 500 кВ $N = 174$ удара на 100 км и 100 грозových часов, $P_{np} = 0.0027$. Поправочный коэффициент $k_y \approx 0.2 \div 0.5$ (определяется интегрированием области опасных волн, ограниченной КОВ и ВСХ изоляции).

Число безаварийных лет работы ПС можно оценить как $M = 1/n$. Результаты расчетов приведены в табл.3.

Таблица 3

Число лет безаварийной работы оборудования ОРУ 500 кВ ПС «Металлургическая» при грозových перенапряжениях

$L_{из}, м$	$l_{оп}, км$	М, лет	
		$k_y=0.2$	$k_y=0.5$
3	2,5	864	346
3,5	4,0	533	213
4	4,3	498	199

Рекомендуемые показатели надежности грозозащиты наиболее дорогого и ответственного подстанционного оборудования (силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов) для ПС 500 кВ оцениваются как $M = 800 \div 1000$ лет. Для прочего оборудования ПС 500 кВ этот показатель в [1] не нормируется, но считаем, что он должен быть не хуже уровня $M = 500$ лет.

Из табл.3 видно, что M для ПС «Металлургическая» варьируется в широком диапазоне значений. Однако, в среднем, $M < 500$, т.е. критерий достаточности надежности грозозащиты оборудования 500 кВ ПС «Металлургическая» не выполняется. Этот вывод относится к удаленному от ОПН 500 кВ оборудованию (КС, ТН, ТТ), так как в расчеты была заложена полученная для них КОВ. Можно показать, что надежность защиты обмотки 500 кВ автотрансформатора от грозových перенапряжений, в отличие от КС, достаточна в рассмотренном случае, когда в ОРУ 500 кВ установлен только один защитный ОПН-500 кВ, размещенный у АТ.

Из рис.2 видно, что КОВ имеет «пологий» характер. Это означает, что при определении координат $U_{кр}$ и $t_{кр}$ точки пересечения КОВ и ВСХ изоляции можно заметно ошибиться в значении $t_{кр}$ даже при небольшом изменении положения ВСХ (обусловленным, например, неточностью задания свойств линейной изоляции).

Длина $l_{он}$ пропорциональна $t_{кр}$, поэтому ошибка в $t_{кр}$ приведет к ошибке в $l_{он}$. Так из табл.2 видно, что удлинение гирлянды изоляторов с $L_{из} = 3$ м до $L_{из} = 4$ м (т.е. на 33%) привело к изменению $l_{он} = 2.5$ км до $l_{он} = 4.3$ км (т.е. на 72%).

Огромная чувствительность получаемых с использованием методики КОВ результатов расчетов заставляет очень осторожно относиться к оценкам числа лет безаварийной работы ПС. Следует также отметить сложность учета затухания и деформации волн при их распространении вдоль ВЛ. В частности, это выражается в том, что коэффициент k_y может изменяться в широком диапазоне значений.

Это означает, что методику построения КОВ (определение длины опасного подхода и ее сравнение с типовыми значениями; определение числа лет безаварийной работы и его сравнение с типовыми значениями) нельзя применять для оценки грозоупорности ПС «Металлургическая».

3. Расчеты методом Монте-Карло

Можно показать, что наиболее опасные перенапряжения на оборудовании ПС возникают при ударах молнии в ближайшие к подстанции 0.5 ÷ 1.5 км длины ВЛ. Удары молнии за пределами этой зоны (но в рамках l_{on}) заметно реже вызывают опасные перенапряжения на оборудовании ПС.

На рис.3 показаны распределения вероятности превышения максимального значения перенапряжений на КС-500 кВ заданного значения для случая прорыва молнии сквозь тросовую защиту на удалении 1 км от ПС. Параметры импульса тока молнии (амплитуда, длительность фронта, условная длительность импульса) принимались случайным образом по вероятностным распределениям, приведенным в [1].

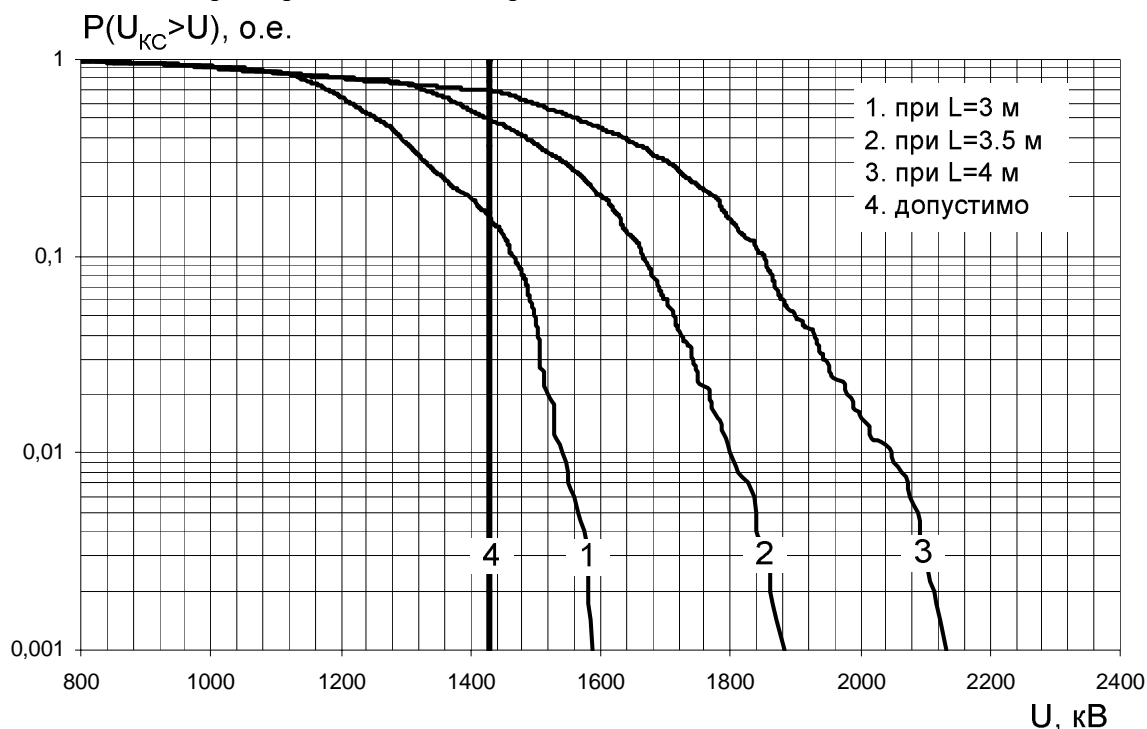


Рис.3. Результаты расчетов грозовых перенапряжений на конденсаторе связи КС-500 кВ, полученные методом Монте-Карло (случай, когда защитный ОПН на ВЛ отсутствует).

Кроме того, на рис.3 указан уровень допустимых для оборудования грозových перенапряжений, который принят равным

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

где $U_{\text{исп}}$ - амплитуда испытательного импульса для оборудования, $U_{\text{ном}}$ - номинальное напряжение оборудования. При $U_{\text{исп}} = 1550$ кВ и $U_{\text{ном}} = 500$ кВ получим $U_{\text{доп}} = 1430$ кВ.

На основе рис.3 можно найти вероятность $P(U > U_{\text{доп}})$ превышения напряжения на оборудовании (на КС) допустимого значения при одном ударе молнии в фазный провод на расстоянии 1 км от ПС. Число лет безаварийной работы ПС при грозových перенапряжениях напрямую определяется найденной вероятностью $P(U > U_{\text{доп}})$.

В табл.4 показано, как меняется вероятность $P(U > U_{\text{доп}})$ при изменении импульсной прочности изоляции ВЛ 500 кВ.

Таблица 4

Оценка результатов расчетов методом Монте-Карло, приведенных на рис.3.

$L_{\text{из}}, \text{ м}$	$P(U > U_{\text{доп}}), \text{ о.е.}$	о.е.
3	0,15	1
3,5	0,5	3,3
4	0,7	4,7

Из табл.4 видно, что изменение импульсной прочности гирлянды линейных изоляторов (неточность в ее задании) будет приводить к очень сильному изменению числа лет безаварийной работы ПС. Такой же вывод был получен при использовании методики построения КОВ.

Анализ грозových перенапряжений при помощи метода Монте-Карло, так же как и при помощи КОВ, не может быть применен в условиях ОРУ 500 кВ ПС «Металлургическая». В сложившейся ситуации требуется применение «детерминистского» метода выбора схемы защиты оборудования ПС от грозových перенапряжений.

4. «Детерминистский» метод выбора схемы грозозащиты ПС

Суть метода заключается в том, чтобы выбрать схему защиты оборудования ПС от перенапряжений такой, что перенапряжения на оборудовании в 100 % случаев (если такое возможно) были бы допустимыми для изоляции.

На рис.4 (удар молнии в фазный провод, $L_{\text{из}} = 3.5$ м, на ПС установлен только один ОПН у АТ) показаны вероятности превышения грозových перенапряжений на оборудовании (конденсатор связи, трансформатор тока, автотрансформатор) заданных значений.

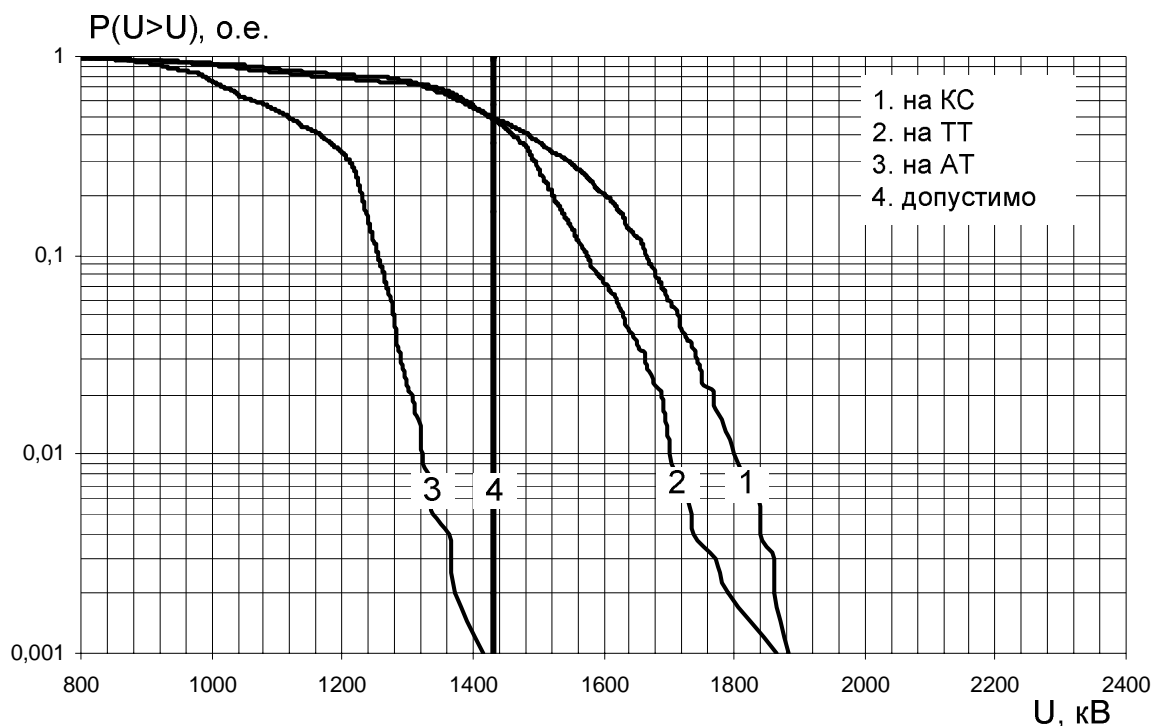


Рис.4. Результаты расчетов грозовых перенапряжений на различном оборудовании ОРУ 500 кВ, полученные методом Монте-Карло (случай, когда защитный ОПН на ВЛ отсутствует).

Каждая из кривых получена по результатам моделирования $k = 1000$ ударов молнии. Если считать, что опасными могут быть удары молнии в примыкающий к ПС участок ВЛ 500 кВ длиной $l_x = 10$ км (значение выбрано с заметным запасом, т.е. «по максимуму»), то за каждый год эксплуатации потенциально опасными могут быть 0.023 ударов молнии:

$$X = \frac{T_u}{100} \cdot \frac{N}{100} \cdot P_{np} \cdot l_x = 0.023.$$

Число потенциально опасных ударов молнии $k = 1000$ наберется только через $k/X \approx 40 \cdot 10^3$ лет эксплуатации. Таким образом, моделирование 1000 ударов молнии в фазный провод воспроизводит не менее $40 \cdot 10^3$ лет эксплуатации, что достаточно для оценок «детерминистского» метода.

Из рис.4 видно, что АТ надежно защищен от грозовых перенапряжений имеющимся ОПН-500 кВ: ни один из 1000 ударов молнии не привел к возникновению опасных перенапряжений. Этот вывод сделан для рассмотренного случая удара молнии в фазу на расстоянии 1 км от ПС, при $L_{из} = 3.5$ м. Моделирование большого числа $k = 1000$ ударов молнии позволяет экстраполировать полученный вывод на случаи других значений L и мест удара молнии в ВЛ.

Из рис.4 также видно, что перенапряжения на отдаленном от ОПН оборудовании (КС, ТТ) больше перенапряжений на защищенном АТ и могут заметно превосходить допустимые для изоляции значения.

На рис.5 показаны вероятности превышения грозовых перенапряжений на оборудовании (конденсатор связи, трансформатор тока,

автотрансформатор) допустимых значений в случае установки ОПН 500 кВ в ячейке линейного разъединителя ВЛ «Старый Оскол – Metallургическая» (недалеко от КС, как показано на схеме рис.1).

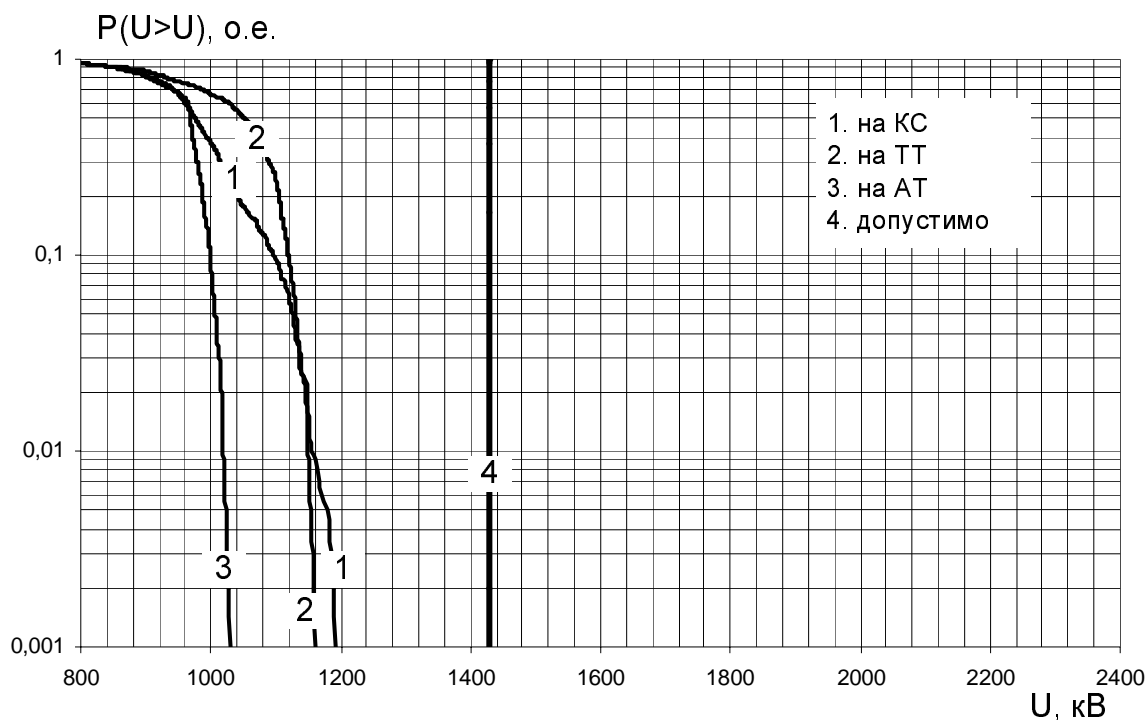


Рис.5. Результаты расчетов грозовых перенапряжений на оборудовании ОРУ 500 кВ, полученные методом Монте-Карло в схеме рис.1.

Как видно, установка ОПН в ячейке линейного разъединителя ВЛ 500 кВ позволяет надежно защитить все оборудование ОРУ 500 кВ ПС «Старый Оскол» от грозовых перенапряжений.

Схема защиты, когда по ходу набегающей грозовой волны установлены два защитных аппарата (один – у КС, второй – у АТ), называется «каскадной» и, как показывают исследования, является очень эффективной для защиты оборудования от грозовых перенапряжений.

Допустимые для изоляции оборудования 500 кВ перенапряжения, определенные на основе данных ГОСТ 1516.3-96 по рекомендациям [4], указаны табл.5.

Таблица 5

Испытательные напряжения полного грозового импульса оборудования класса 500 кВ по ГОСТ 1516.3-96 и допустимые грозовые перенапряжения, определенные по рекомендациям [4].

Оборудование	Напряжение полного грозового импульса, кВ			
	Испытательное		Допустимое	
	Класс изоляции			
	А	Б	А	Б
силовые трансформаторы	1300	1550	1155	1430

шунтирующие реакторы	1425	1675	1293	1568
НДЕ, ТТ, аппараты	1425	1550	1293	1430

Анализ рис.5 совместно с данными табл.5 для случая установки дополнительного ОПН 500 кВ на ВЛ 500 кВ показывает, что в ОРУ 500 кВ ПС «Металлургическая» по условиям грозозащиты достаточно использовать оборудование класса изоляции «А» (облегченная изоляция по ГОСТ 1516.3-96).

5. Выводы по ПС «Металлургическая»

- расстояние от КС, ТТ, ТН 500 кВ ПС «Металлургическая» до защитного аппарата ОПН 500 кВ, установленного у автотрансформатора, велико;
- большое расстояние приводит к тому, что результаты расчетов по методике построения КОВ оказываются крайне чувствительными к заложенным в расчеты исходным данным;
- в сложившихся условиях будет неверным применение методики построения КОВ или метода Монте-Карло и оценка числа лет безаварийной работы оборудования ОРУ 500 кВ ПС «Металлургическая»;
- «детерминистский» подход свидетельствует о необходимости установки ОПН 500 кВ в ячейке линейного разъединителя ВЛ 500 кВ.

6. Заключение

- современные компьютерные программы позволяют проводить расчеты в схемах практически любой сложности, однако следует понимать, что полученный результат может существенно зависеть от исходных данных, достоверное знание и задание которых, особенно в задачах грозозащиты, затруднено;
- расчеты грозовых перенапряжений не могут быть сведены только к определению числа лет безаварийной работы оборудования ПС при грозовых перенапряжениях и сравнением получаемого значения с рекомендуемыми [1] уровнями надежности;
- расчеты грозовых перенапряжений должны носить характер исследований;
- использование программ, единственным результатом расчетов по которым является число лет безаварийной работы оборудования ПС при грозовых перенапряжениях, может, как было показано на примере ПС «Металлургическая», приводить к принятию недостаточно обоснованного или вовсе ошибочного решения по выбору схемы защиты оборудования от грозовых перенапряжений;
- в некоторых случаях расчеты защищенности оборудования ПС от грозовых перенапряжений необходимо проводить, опираясь на идеологию «детерминистского» метода, который, к сожалению, в России малоизвестен.

Литература

- [1] РАО “ЕЭС России”. “Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений”. Санкт-Петербург, Издательство ПЭИПК, 1999.
- [2] Правила устройства электроустановок. 7-е издание.
- [3] Костенко М.В., Ефимов Б.В., Зархи И.М., Гумерова Н.И. “Анализ надежности грозозащиты подстанций”. – Л.: «Наука», 1981.
- [4] В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов. “Перенапряжения в электрических системах и защита от них”. Учебник для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение. 1995.