III Российская конференция по молниезащите

Методические аспекты оценки эффективности применения ОПН для повышения грозоупорности ВЛ

Матвеев Даниил Анатольевич,
старший преподаватель
кафедры ТЭВН МЭИ

Гилязов Марат Закирзянович,
младший научный сотрудник
кафедры ТЭВН МЭИ

Эффективность применения ОПН на ВЛ

Критериями эффективности применения ОПН в качестве средства повышения грозоупорности ВЛ являются следующие факторы:

– установка ОПН на ВЛ позволяет существенно сократить число отключений линии, вызванных грозовыми поражениями линии (требуется метод расчета числа грозовых отключений ВЛ с ОПН);

– обеспечение малой повреждаемости самих ОПН на ВЛ (требуется метод расчета числа повреждений ОПН при грозовых поражениях линии)

Метод статистической оценки числа грозовых отключений ВЛ с ОПН

Для расчета вероятности перекрытий линейной изоляции, приводящих к грозовых отключениям ВЛ существуют два основных подхода:

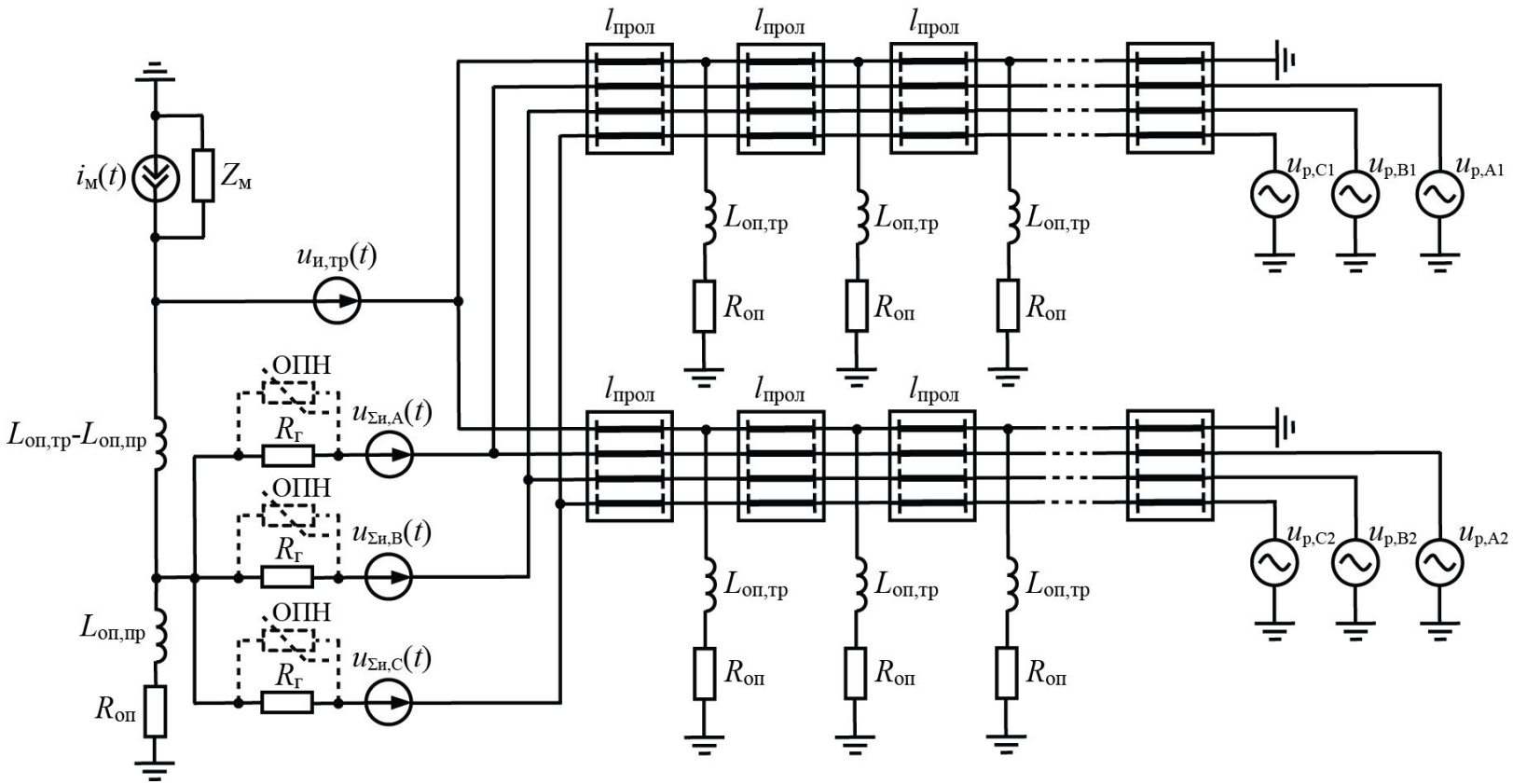
1) использование кривой опасных параметров;
2) использован метода статистических испытаний Монте-Карло

Случайными параметрами при расчете грозоупорности ВЛ принимаются:

1) амплитуда тока молнии;
2) крутизна фронта тока молнии;
3) фаза рабочего напряжения

С увеличением размерности задачи (числа случайных влияющих факторов) увеличивается эффективность метода Монте-Карло.

Метод статистической оценки числа грозовых отключений ВЛ с ОПН



Расчетная схема замещения ВЛ с одним тросом при ударе молнии в опору

Метод статистической оценки числа грозовых отключений ВЛ с ОПН

В качестве расчетной среды авторы используют связку ATP-Matlab. Выбор ATPв качестве расчетного инструмента обусловлен ее высокой скоростью счета и исключительной устойчивостью. Входные данные для ATP формируются в текстовых файлах по определенному в [3] формату. Для изменения этих данных в ходе серийных статистических расчетов нами разработаны программные скрипты на m-языке, исполняемые в среде Matlab.

В настоящее время на кафедре ТЭВН МЭИ ведется разработка специализированной программы расчета грозоупорности ВЛ, основанной на расчетном ядре программы EMTLab (также кафедральной разработки). Программа разрабатывается как удобный инструмент проектировщика, позволяющий выполнять многовариантные расчеты с применением различных технических решений по обеспечению требуемой грозоупорности ВЛ.

Метод оценки импульсной электрической прочности линейной изоляции

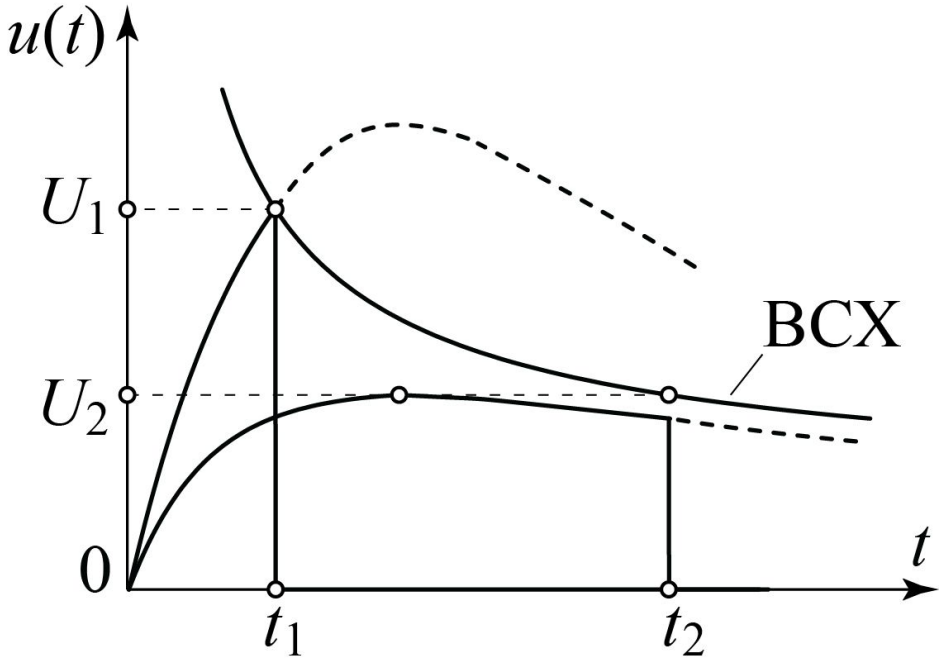
Подходы к представлению линейной изоляции при расчете грозовых перенапряжений:

- использование вольт-секундных характеристик;
- метод развивающегося лидера – применим для длинных воздушных промежутков, в которых отсутствует возможность развития разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика;
- метод эквивалентных площадей – применим для коротких воздушных промежутков и для воздушных промежутков (в том числе и длинных), в которых развитие разряда происходит вдоль поверхности твердого диэлектрика **(Working Group 07 – Dielectric strength of external insulation under transients voltage. G. Baldo, B. Hutzler, A. Pigini, E. Garbagnati«Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation».1992).**

Метод оценки импульсной электрической прочности линейной изоляции

Применение вольт-секундных характеристик в расчетах грозоупорности имеет следующие недостатки:

- ВСХ при расчетах грозовых перенапряжений не позволяют учесть зависимость импульсной электрической прочности от формы воздействующего напряжения (увеличение прочности при увеличении длительности фронта импульса напряжения);
- ВСХ не позволяют корректно учесть перекрытия изоляции на спаде импульса
- ВСХ затруднительно применять для гирлянд удаленных от места удара молнии, так как это требует введения сдвига по времени при расчете значений



Метод оценки импульсной электрической прочности линейной изоляции

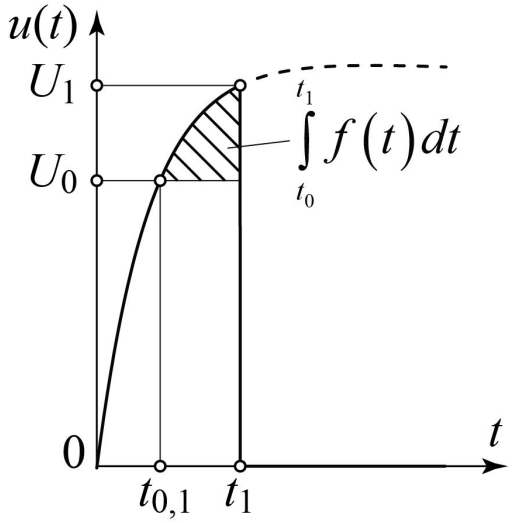
Метод эквивалентных площадей (МЭП)

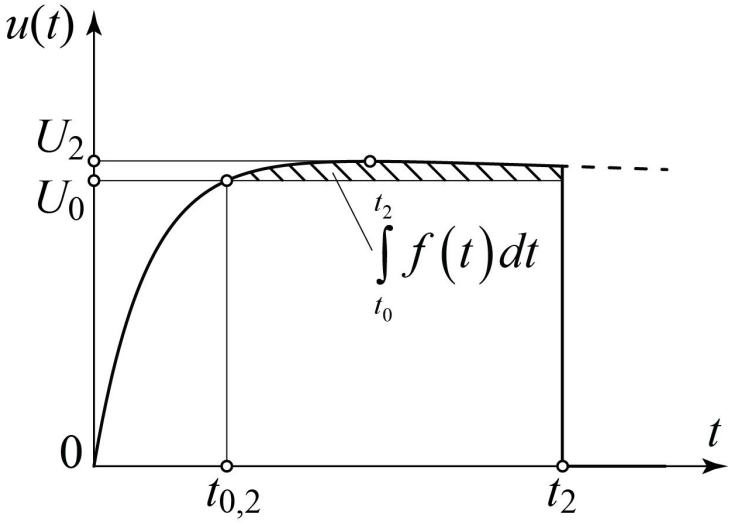
Критерием нарушения электрической прочности по МЭП является выполнение следующего условия:

$$\int_{t_0}^{t_p} \left(u(t) - U_0 \right) dt \geq DE$$

$u(t)$ – воздействующее напряжение;

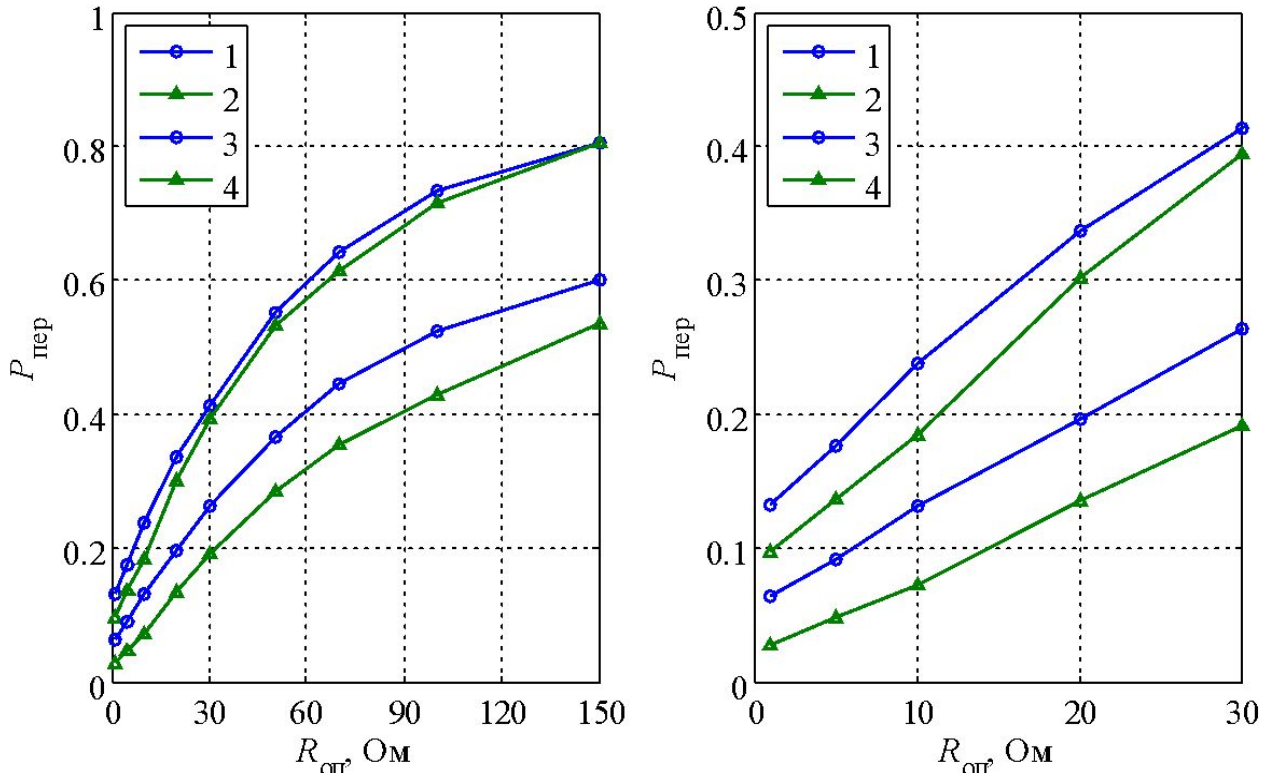
U_0, DE – параметры методы, определяемые по ВСХ для ПГИ.





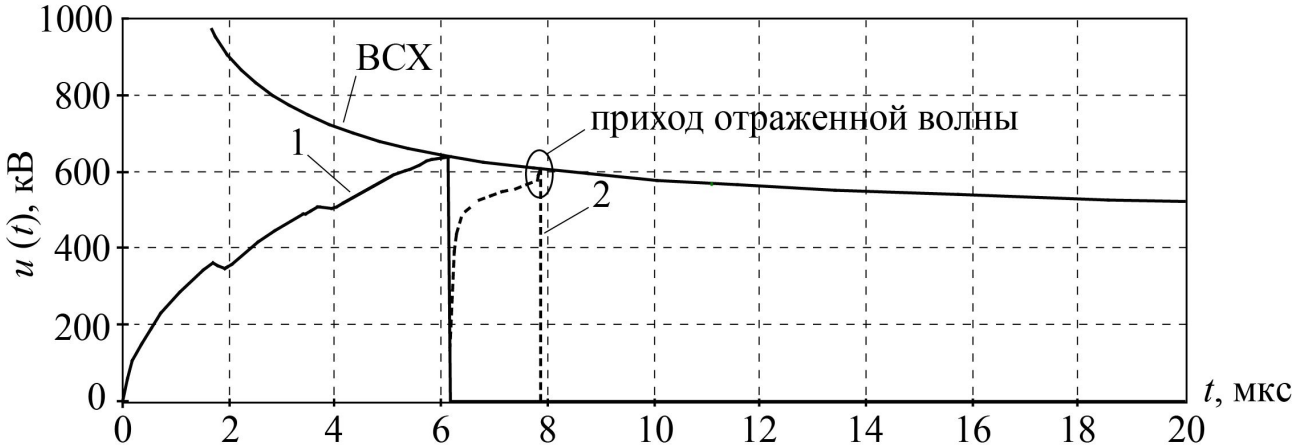
Метод оценки импульсной электрической прочности линейной изоляции

Сравнение результатов расчета вероятностей обратных перекрытий при ударе в опору двухцепной ВЛ с использование ВСХ и МЭП

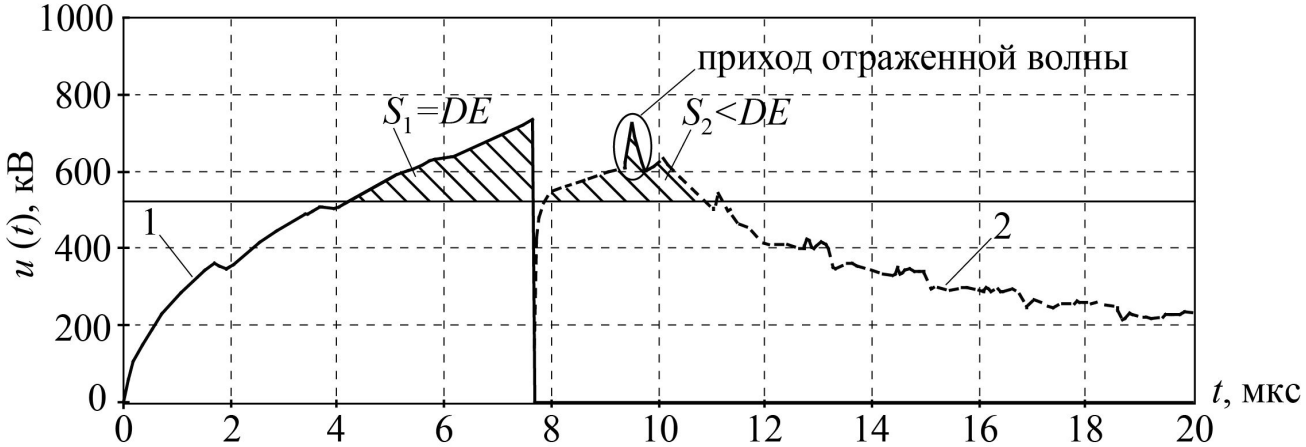


1,3 и 2,4 – расчетные вероятности при использовании ВСХ и МЭП;
1,2 и 3,4 – вероятности перекрытий, приводящих к отключению одной и двух цепей, соответственно.

Метод оценки импульсной электрической прочности линейной изоляции



а) при определении импульсных перекрытий с помощью ВСХ

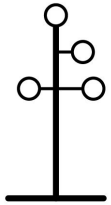
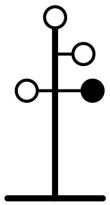
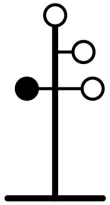
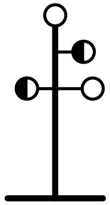
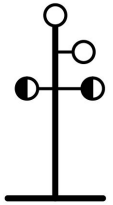
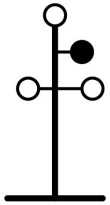


б) при определении импульсных перекрытий по методу эквивалентных площадей

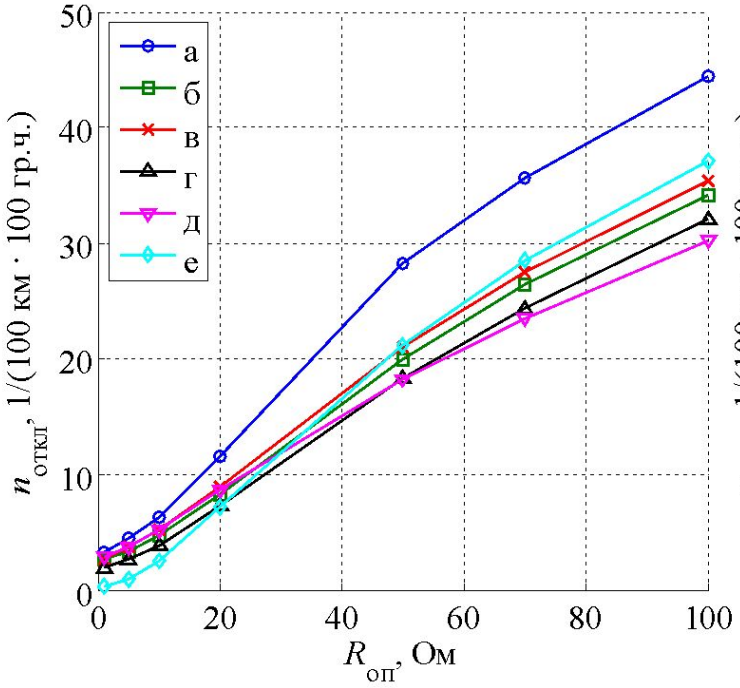
Расчетные осциллограммы воздействующих напряжений

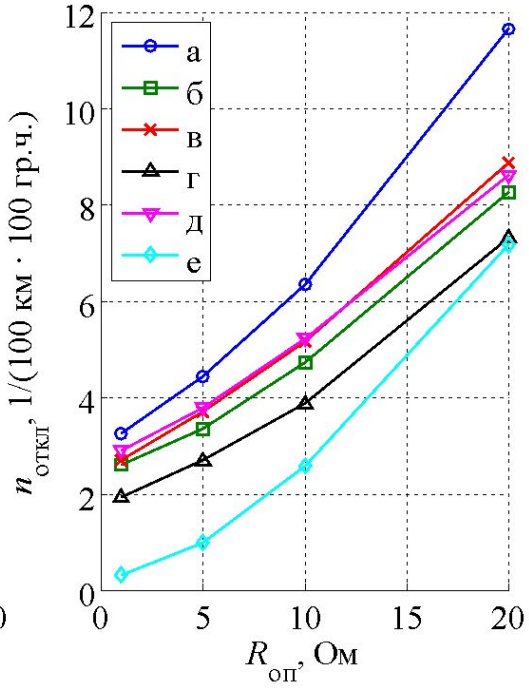
Оптимальные места установки подвесных ОПН

Сравнение схем расстановки ОПН на одноцепной ВЛ с тросом (варианты использования 1 ОПН на опору)

Вариант защиты	а	б	в	г	д	е
Схема расстановки						
Число ОПН на опору	0	1	1	1	1	1

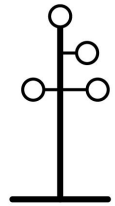
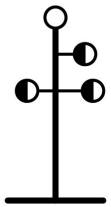
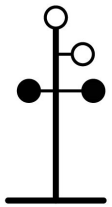
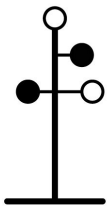
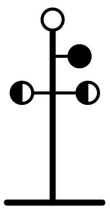
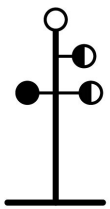
○ – ОПН отсутствует; ● – ОПН установлен; ◐ – ОПН установлен через опору



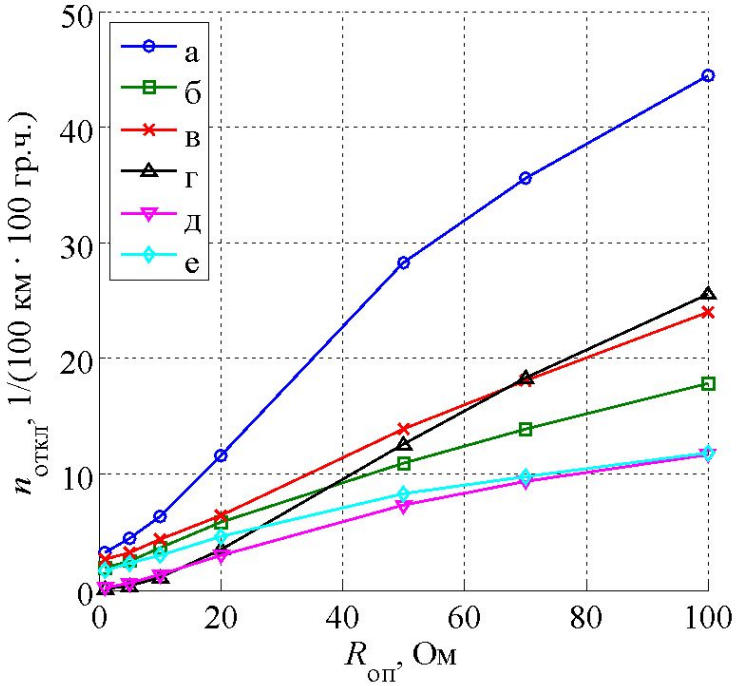


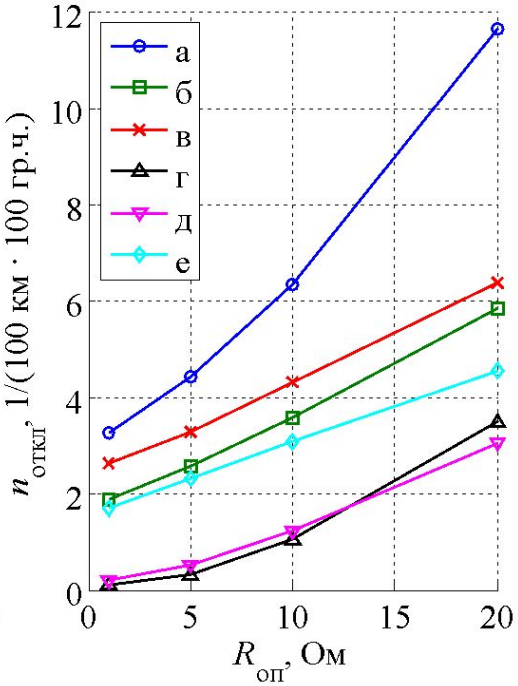
Оптимальные места установки подвесных ОПН

Сравнение схем расстановки ОПН на одноцепной ВЛ с тросом (варианты использования 1,5–2 ОПН на опору)

Вариант защиты	а	б	в	г	д	е
Схема расстановки						
Число ОПН на опору	0	1,5	2	2	2	2

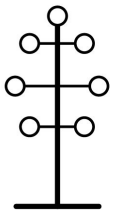
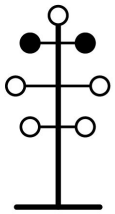
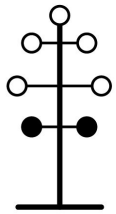
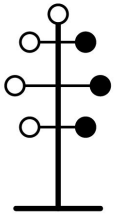
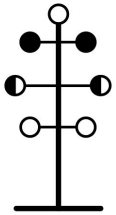
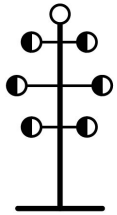
○ – ОПН отсутствует; ● – ОПН установлен; ◐ – ОПН установлен через опору



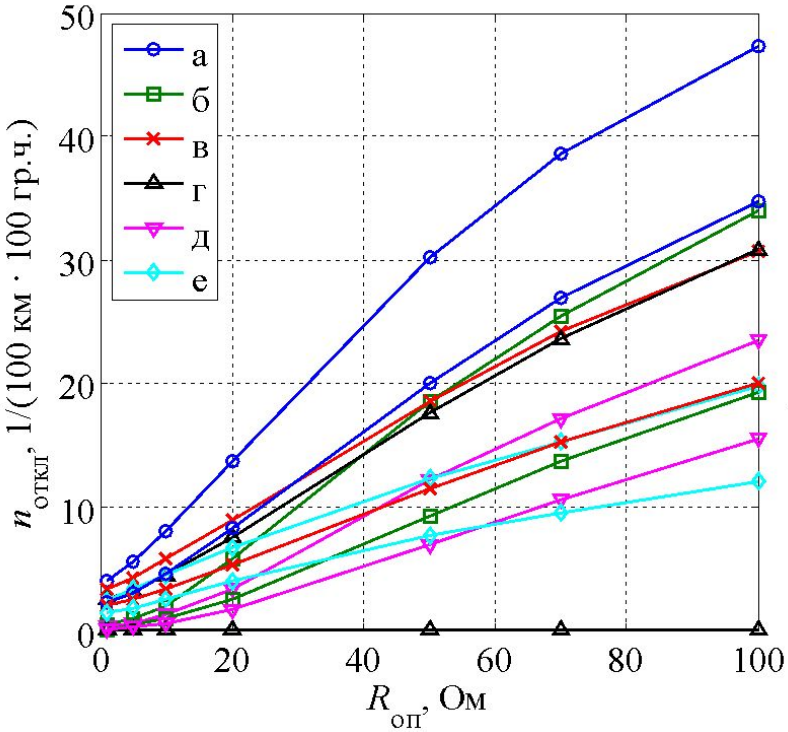


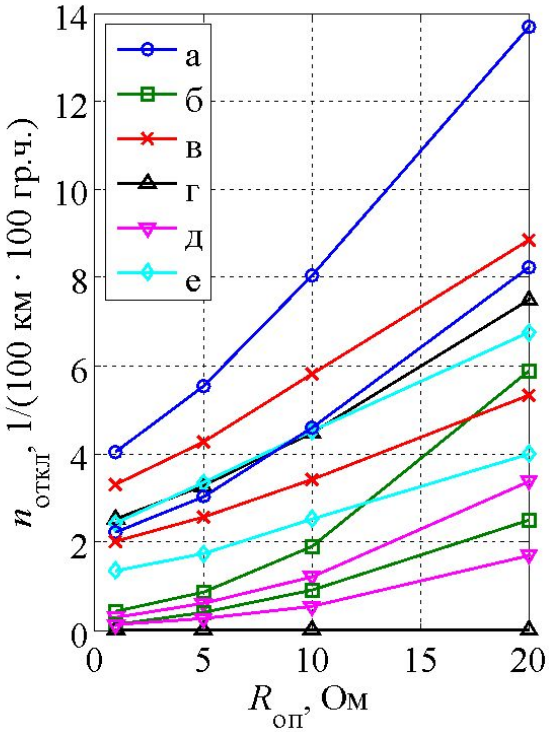
Оптимальные места установки подвесных ОПН

Сравнение схем расстановки ОПН на двухцепной ВЛ с тросом (варианты использования 2 и 3 ОПН на опору)

Вариант защиты	а	б	в	г	д	е
Схема расстановки						
Число ОПН на опору	0	2	2	3	3	3

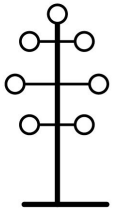
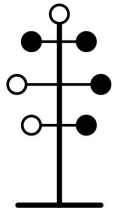
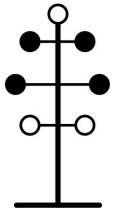
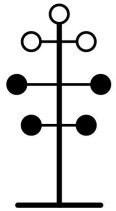
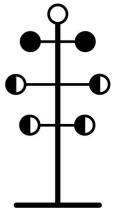
○ – ОПН отсутствует; ● – ОПН установлен; ◐ – ОПН установлен через опору



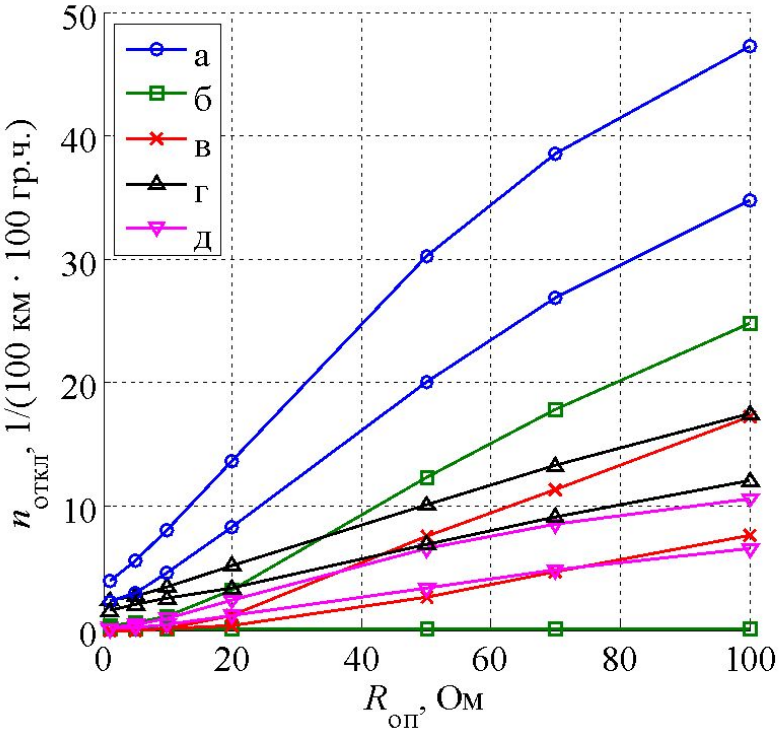


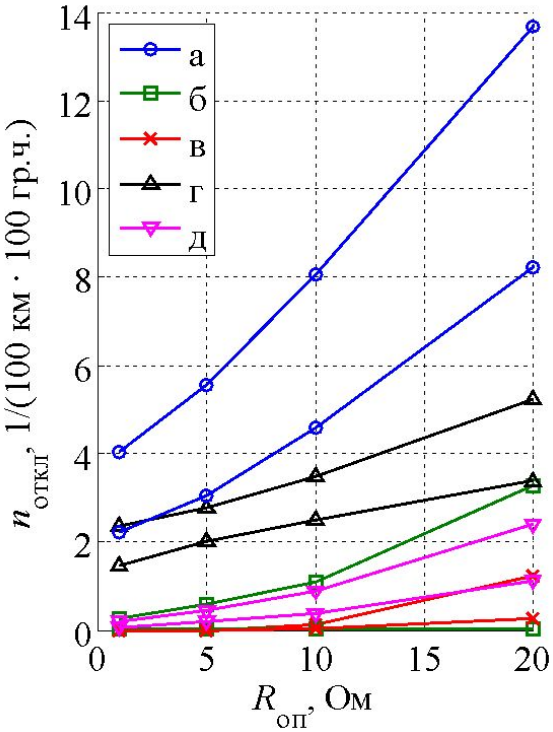
Оптимальные места установки подвесных ОПН

Сравнение схем расстановки ОПН на двухцепной ВЛ с тросом (варианты использования 4 ОПН на опору)

Вариант защиты	а	б	в	г	д
Схема расстановки					
Число ОПН на опору	0	4	4	4	4

○ – ОПН отсутствует; ● – ОПН установлен; ◐ – ОПН установлен через опору





Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

При грозовом поражении ВЛ с подвесными ОПН, определённая часть тока молнии (в зависимости от места удара) протекает через ОПН, в результате чего в нём выделяется тепловая энергия $W_{опн.}$ В случае превышения выделяемой энергий допустимого значения $W_{доп}$ происходит термическое разрушение аппарата

Основным показателем надежности работы ОПН на ВЛ является удельное число лет его повреждений:

$$n_{повр} = N_{ВЛ,ОПН} P(W_{ОПН} > W_{доп})$$

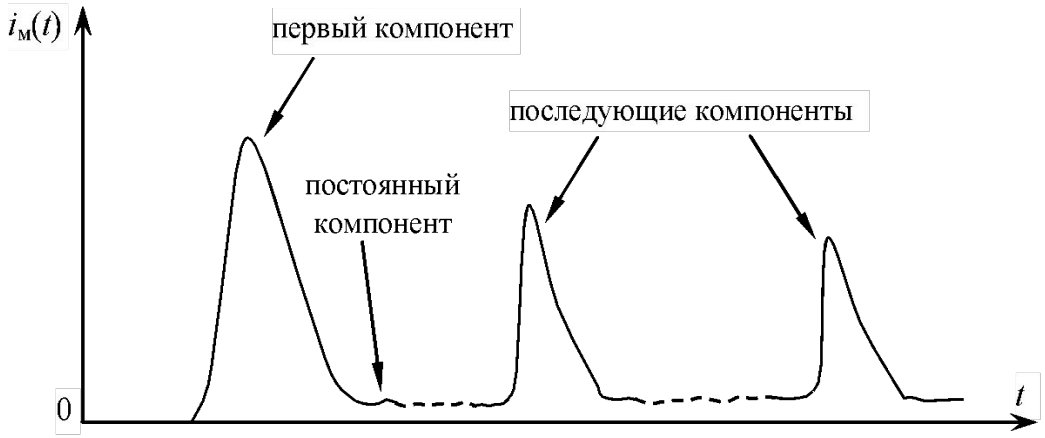
$P_w(W_{опн} > W_{доп})$ – вероятность превышения выделяемой в ОПН энергией значения его энергоемкости;

$N_{вл,опн}$ – число ударов молнии в участок линии с ОПН в год.

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

При расчете энергетических воздействий на подвесные ОПН необходимы учитывать, что молния представляет собой многокомпонентный разряд, который характеризуется следующим набором случайных параметров:

- амплитуда, крутизна и длительность каждого импульса;
- заряд переносимый каждым импульсом тока на землю;
- число импульсов в разряде молнии.



Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

Вероятности числа компонент в разряде молнии

В расчетах принимается, что среднестатистические параметры последующих компонент разряда молнии одинаковые

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

Энергия, рассеиваемая в ОПН от одной компоненты тока молнии, определяется как интеграл мгновенной активной мощности:

$$W_{\text{опн}} = \int_0^{\tau} u_{\text{опн}}(t)\, i_{\text{опн}}(t)\, dt$$

В режиме ограничения перенапряжений, остающиеся напряжения на ОПН изменяются в сравнительно небольшом диапазоне, поэтому формулу для расчета энергий можно представить в виде:

$$W_{\text{опн}} = U_{\text{ост}} \int_0^{\tau} i_{\text{опн}}(t)\, dt = U_{\text{ост}} Q_{\text{опн}}$$

$Q_{\text{опн}}$ – часть импульсного заряда одной компоненты молнии, протекающая через ОПН.

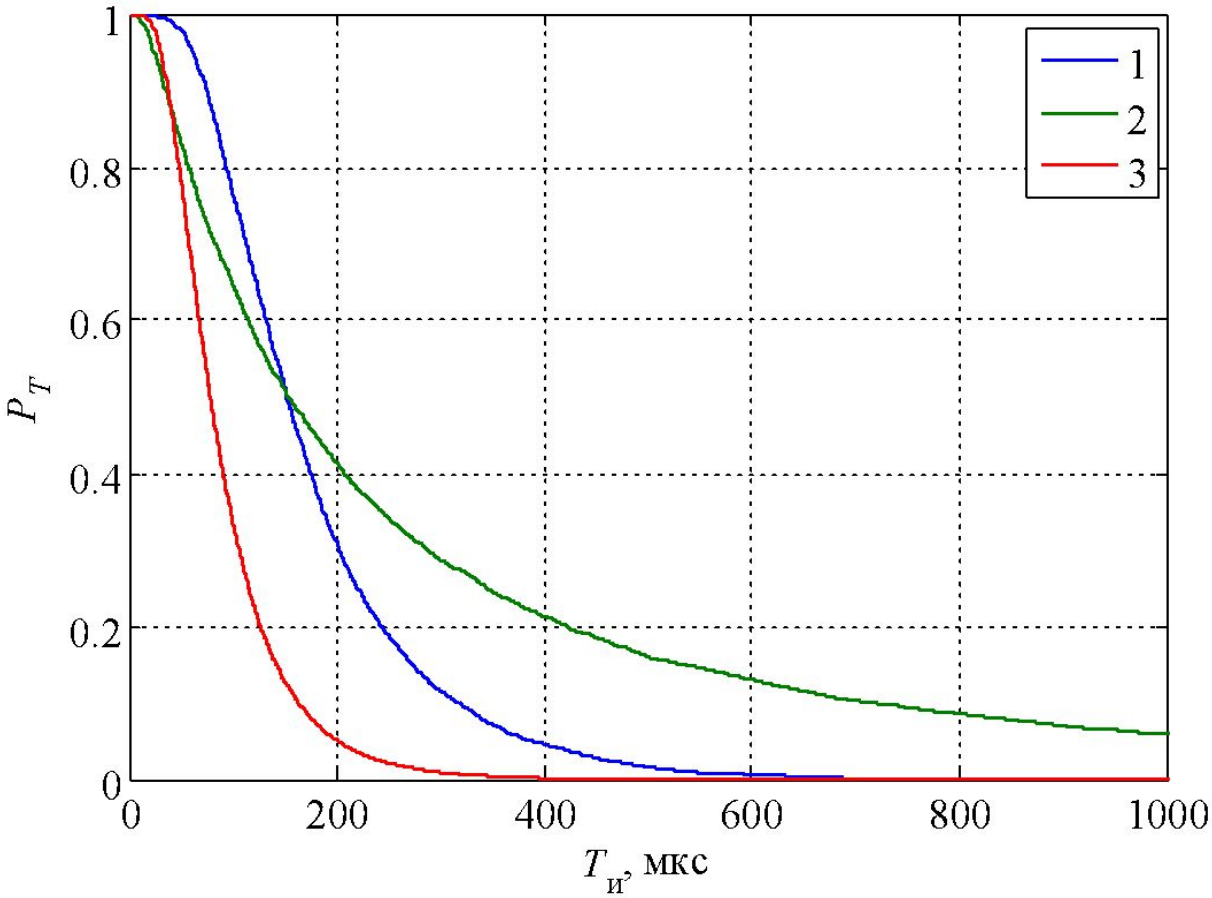
Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

Энергия, выделяющаяся в ОПН при растекании импульсного заряда компоненты молнии, определяется формой тока компоненты разряда. Форма тока молнии как и при расчете грозоупорности рассчитывается с помощью функции СИГРЭ.

Параметрами данной функции являются амплитуда, крутизна фронта и длительность импульса. При известных значениях импульсного заряда, амплитуды и крутизны фронта значение длительности импульса определяется при решении уравнения:

$$Q_{\text{имп}} = \int_{0}^{5\tau_{\text{и}}} i_{\text{м}}(t)\,dt$$

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ



Распределения вероятностей $\tau_и$ для первой компоненты
1– расчетное, с учетом корреляции заряда и амплитуды тока молнии;
2 – расчетное, без учета корреляции; 3 – по данным измерений [11]

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

Интервалы времени между повторными разрядами молнии не превышают нескольких сотен милисекунд, поэтому процесс нагрева ОПН можно считать **адиабатическим** и результирующее значение энергии, рассеиваемой в ограничителе, определяется **суммой энергий** от каждой компоненты разряда молнии.

Определяющими параметрами при расчете энергий в ОПН являются суммарный заряд, переносимый импульсами тока первой $Q_{имп,1}$ и последующих $Q_{имп,2}$ компонент разряда молнии, амплитуды токов первой $I_{м.1}$ и последующих $I_{м.2}$ компонент и число компонент $N_к$ в разряде молнии. Так как все перечисленные величины являются случайными, то энергии в ОПН являются случайными величинами, что требует проведения статистических расчетов.

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

Интегральная функция распределения рассеиваемых энергий в ОПН, установленных на ВЛ с молниезащитным тросом, при ударах молнии в фазный провод, в опору и в трос в середине пролёта рассчитывается по формуле:

$$P_{w\,\text{опн}}(W > W) = \Delta_{\text{пр}}\, P^{\text{пр}}_{\text{опн}}(W > W) + \Delta_{\text{оп}}\, P^{\text{оп}}_{\text{опн}}(W > W) + \Delta_{\text{тр}}\, P^{\text{тр}}_{\text{опн}}(W > W)$$

$P_w^{\text{пр}}$, $P_w^{\text{оп}}$, $P_w^{\text{тр}}$ – функции распределения энергий, рассеиваемых в ОПН от всех компонент при ударе в провод, в опору и в трос в середине пролета соответственно.

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

Функция распределения суммарной энергии (от всех компонент), рассеиваемой в ОПН при ударе в провод (аналогично и для ударов в опору и в трос), рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{опн}}^{\text{пр}}(W > W) = \sum_{i=1}^{N_к} P_i P_{\text{w1},i}^{\text{пр}}(W > W)$$

P_i – вероятность того, что разряд молнии содержит i компонент;

$P_{\text{w1},i}^{\text{пр}}$ – функции распределения энергий при воздействии i компонент;

$N_к$ – максимальное число компонент в разряде молнии.

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

Функция распределения вероятностей энергий поглощаемых ОПН при воздействии *i* компонент, определяется следующим образом

- С помощью расчетной модели в серии статистических расчетов (с объемом выборки ***N*=5000**) по методу Монте-Карло проводится расчет энергий в ОПН при воздействии импульса тока (например, в случае удара в провод) с параметрами первой и второй компонент, в результате формируются две выборки случайных значений энергий W_1 и W_2. При этом метод Монте-Карло позволяет сгенерировать выборку случайных значений импульсных зарядов и амплитуд тока с учетом корреляционной связи между ними.

- Для полученных выборок случайных значений энергий W_1 и W_2 рассчитываются функции распределения $P_{w1}^{пр}$ и $P_{w2}^{пр}$, а также соответствующие функции плотностей распределения $p_{w1}^{пр} = P_{w1}^{пр}/dW$ и $p_{w2}^{пр} = P_{w2}^{пр}/dW$.

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

Функция распределения вероятностей энергий поглощаемых ОПН при воздействии *i* компонент, определяется следующим образом:

- Функция плотности распределения суммы энергий при воздействии первой и одной последующей компонент определяется как интеграл свертки функций плотностей распределения $p_{w1}^{пр}$ и $p_{w2}^{пр}$, результатом которой является плотность распределения $p_{w1,2}^{пр}$, а при воздействии первой и двух последующих компонент плотность распределения определяется интегралом свертки $p_{w1}^{пр}$ и $p_{w1,2}^{пр}$:

$$p_{w1,2}^{пр}(W) = \int_0^W p_{w1}^{пр}(\omega)\, p_{w2}^{пр}(W-\omega)\, d\omega,$$

$$p_{w1,3}^{пр}(W) = \int_0^W p_{w1,2}^{пр}(\omega)\, p_{w2}^{пр}(W-\omega)\, d\omega,$$

$$p_{w1,i}^{пр}(W) = \int_0^W p_{w1,i-1}^{пр}(\omega)\, p_{w2}^{пр}(W-\omega)\, d\omega.$$

Метод расчета числа повреждений ОПН на ВЛ

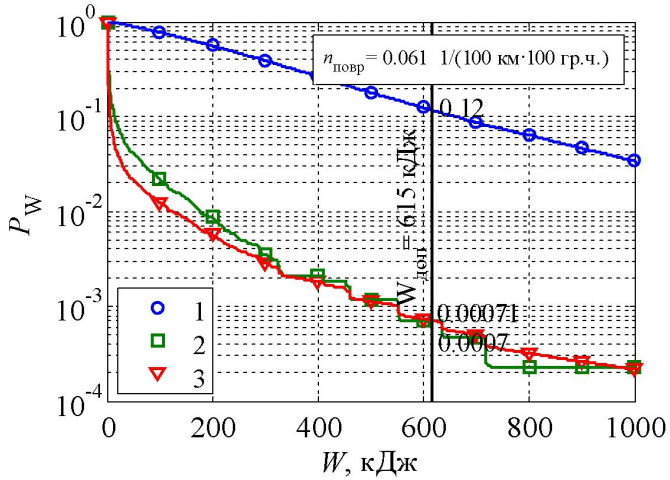
Функция распределения вероятностей энергий поглощаемых ОПН при воздействии *i* компонент, определяется следующим образом:

- Для полученных функций плотностей распределения определяются функции распределения энергий, рассеиваемых в ОПН, при воздействии *i* компонент разряда молнии *P*:

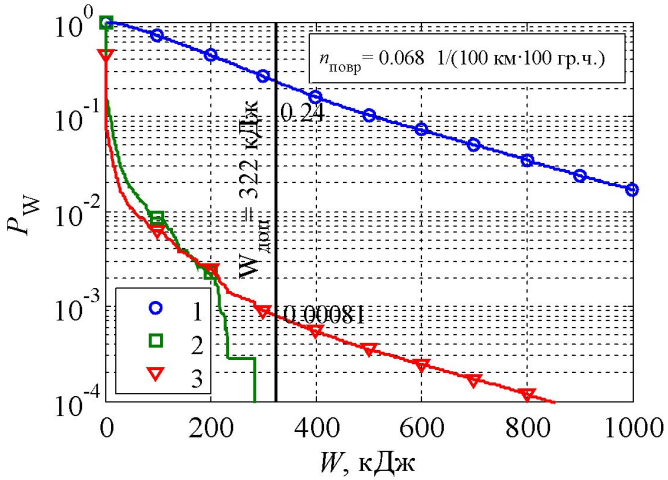
$$P^{\text{пр}}_{\text{w1,i}}\left(W > W\right) = \int_{W}^{\infty} p^{\text{пр}}_{i}\left(\omega\right) d\omega$$

В случаях удара молнии в опору или в трос, процедура определения функций распределения энергий при воздействии *i* компонентов $P_{\text{w1,i}}^{\text{оп}}$, $P_{\text{w1,i}}^{\text{тр}}$ полностью аналогична.

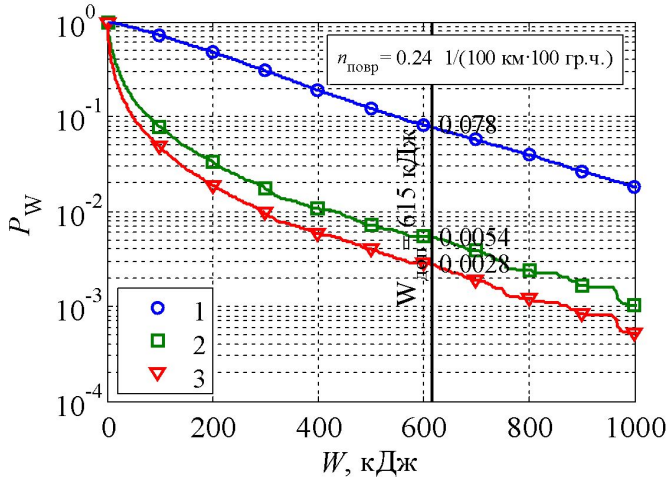
Пример расчета чисел повреждений ОПН на ВЛ



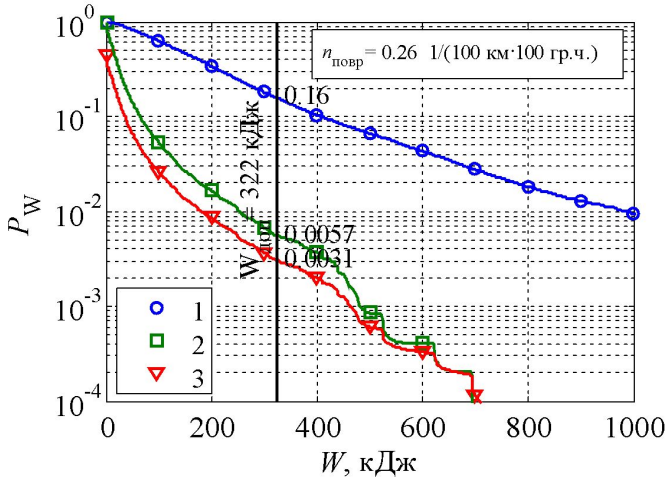
а)



б)



в)



г)

Расчетные распределения энергии в ОПН ВЛ 110 кВ с тросовой защитой при полной защите фаз *а* – ОПН без ИП, *R*оп = 10 Ом; *б* – ОПН с ИП, *R*оп = 10 Ом; *в* – ОПН без ИП, *R*оп = 100 Ом; *г* – ОПН с ИП, *R*оп = 100 Ом; 1 – распределение энергии при ударе молнии в провод; 2 – при ударе в опору; 3 – с учетом распределения ударов в провод и опору

Выводы

1. Применение метода статистических испытаний Монте-Карло позволяет оценивать как среднее число грозовых отключений ВЛ, так и число повреждений ОПН на линии, с учетом законов распределения влияющих случайных факторов и корреляции между ними.

2. Расчет электрической прочности гирлянд изоляторов и искровых промежутков ОПН рекомендуется проводить с помощью метода эквивалентных площадей, позволяющего учитывать нестандартную форму воздействующих напряжений и не допускающего перекрытий при воздействии сверхкоротких импульсов напряжения.

3. Для уточнения параметров метода эквивалентных площадей применительно к гирляндам типовых изоляторов и полимерным линейным изоляторам необходимо проведение экспериментальной работы.

4. Для выбора оптимального способа расстановки ОПН на ВЛ рекомендуется сопоставлять варианты с одинаковым числом ОПН на опоре. На выбор оптимального варианта влияет сопротивление заземления опоры, поэтому, если ограничители применяются для защиты ВЛ по всей длине, целесообразно варьировать схемы расстановки ОПН вдоль трассы в зависимости от значений *R*оп на отдельных ее участках.

Выводы

5. При сопротивлениях ЗУ опор менее 20 Ом предпочтительна установка ОПН в верхних фазах ВЛ. Это объясняется влиянием индуктированных каналом молнии составляющих напряжения на линии, что обуславливает необходимость их учета в расчетных моделях.

7. Для статистической оценки энергетических воздействий на ОПН рекомендуется в качестве случайных параметров принимать амплитуду и импульсный заряд тока первой и последующих компонент тока молнии. При этом, учет корреляционной связи между амплитудой тока и зарядом обязателен.

8. В докладе изложен подход к оценке энергетических воздействий на ОПН с учетом многокомпонентного состава разряда молнии. В качестве сопоставительного критерия надежности работы ограничителей на линии предлагается использовать удельное число повреждений ОПН на 100 км длины линии за 100 грозовых часов.

9. Для одноцепной ВЛ 110 кВ с тросовой защитой и полной защитой фаз с помощью ОПН результаты расчетов позволяют сделать прогноз о достаточно малой повреждаемости ограничителей. Так, при $R_{оп}$ = 100 Ом $n_{повр}$ составляет примерно 0,25 повреждений на 100 км длины линии за 100 грозовых часов.

Спасибо за внимание!