

**С.К.БЕРЕЗКА**, зав. лабораторией, НТУ "ХПИ"  
**А.А. МИНЧЕНКО**, канд.техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

### УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ И ВЫШЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЁ ИСПЫТАНИЙ

Розглянуті математичні аспекти удосконаленої моделі грозозахисту повітряних ліній електропередачі напругою 110 кВ і вище та результати, що отримані при її випробуванні.

Рассмотрены математические аспекты усовершенствованной модели грозозащиты воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше и результаты, полученные при её испытании

Mathematics realization of lightning defense model of overhead transmission lines of 110 kV and more high voltage and its test results are discussed.

**Постановка проблемы.** Расчет ожидаемого числа грозовых отключений воздушных линий (ВЛ) электропередачи напряжением 110 кВ и выше, отвечающий условиям физики процесса при разряде молнии, для которых независимые случайные величины амплитуда и максимальная крутизна волны тока молнии достигаются в различные моменты времени при условии нулевой производной тока молнии в начальный момент времени, требует разработки соответствующей методики или совершенствования существующих. Совершенствование математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом ведется с использованием современных вычислительных операций и должно базироваться на результатах соответствующих численных экспериментов.

**Анализ публикаций.** Наиболее полная методика расчета грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом изложена в "Руководстве" [1]. Постановка задачи совершенствования этой методики путем представления в ней формы волны тока молнии, отвечающая условиям физики процесса при разряде молнии, была отображена в работах [2,3]. В работах [3,4] предложена аппроксимация формы волны тока молнии, отвечающая условиям процесса при разряде молнии в ВЛ, а в работе [5] изложен подход к решению задачи совершенствования моделирования грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом при условии указанной выше аппроксимации.

**Цель статьи.** Изложение основных положений совершенствования моделирования грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом и результатов вычислительных экспериментов.

#### Основная часть.

Принимаем взаимно независимыми амплитуду и максимальную крутизну тока молнии для предложенной в работах [3,4] аппроксимации формы волны импульса. Используем логарифмически нормальное распределение токов молнии [1,6]. Плотность вероятности распределения амплитуды тока молнии:

$$f(I_M) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg I} \sqrt{2\pi} I_M} \exp \left[ -\frac{(\lg I_M - \overline{\lg I_M})^2}{2\sigma_{\lg I}^2} \right], \quad (1)$$

где  $\overline{\lg I_M}$  – математическое ожидание логарифма амплитуды тока молнии;

$\sigma_{\lg I}$  – среднее квадратическое отклонение логарифма амплитуды.

Аналогично [1,6] для максимальной крутизны импульсов тока молнии:

$$f(A_{M \max}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg A} \sqrt{2\pi} A_{M \max}} \exp \left[ -\frac{(\lg A_{M \max} - \overline{\lg A_{M \max}})^2}{2\sigma_{\lg A}^2} \right], \quad (2)$$

где  $\overline{\lg A_{M \max}}$  – математическое ожидание логарифма максимальной крутизны тока молнии;

$\sigma_{\lg A}$  – среднее квадратическое отклонение логарифма максимальной крутизны.

Тогда вероятность попадания значений амплитуды тока молнии в интервал  $[I_{M i-1}, I_{M i}]$  будет равна [7]:

$$P(I_{M i-1} \leq I_M < I_{M i}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg I} \sqrt{2\pi}} \int_{I_{M i-1}}^{I_{M i}} \frac{1}{I_M} \exp \left[ -\frac{(\lg I_M - \overline{\lg I_M})^2}{2\sigma_{\lg I}^2} \right] dI_M. \quad (3)$$

Аналогично, вероятность попадания значений максимальной крутизны тока молнии в интервал  $[A_{M \max i-1}, A_{M \max i}]$  будет равна

$$P(A_{M \max i-1} \leq A_{M \max} < A_{M \max i}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg A} \sqrt{2\pi}} \int_{A_{M \max i-1}}^{A_{M \max i}} \frac{1}{A_{M \max}} \exp \left[ -\frac{(\lg A_{M \max} - \lg A_{M \max i})^2}{2\sigma_{\lg A}^2} \right] dA_{M \max} \cdot (4)$$

Определяя вероятности по выражениям (3) и (4) для каждого из задаваемых интервалов  $[I_{M i-1}, I_{M i}]$  и  $[A_{M \max i-1}, A_{M \max i}]$  на принятых интервалах вариаций значений величины  $I_M$  и  $A_{M \max}$ , производим, тем самым, аппроксимацию кривой логарифмически нормального распределения дискретной ступенчатой функцией. При этом длины указанных задаваемых интервалов равны соответствующим шагам дискретизации  $\Delta I_M = I_{M i} - I_{M i-1} = \text{const}$  и  $\Delta A_{M \max} = A_{M \max i} - A_{M \max i-1} = \text{const}$  ( $i = \overline{1, n}$ ). Тогда количество попаданий из общего числа испытаний  $N$  в каждый из интервалов  $[I_{M i-1}, I_{M i}]$  и  $[A_{M \max i-1}, A_{M \max i}]$  будет равно соответственно:

$$N_{\Delta I_M} = P(I_{M i-1} \leq I_M < I_{M i})N, \quad (5)$$

$$N_{\Delta A_{M \max}} = P(A_{M \max i-1} \leq A_{M \max} < A_{M \max i})N. \quad (6)$$

Таким образом в задаваемом числе статистических испытаний  $N$  стохастической модели перекрытия гирлянды изоляторов ВЛ имеем на каждом шаге дискретизации величин  $I_M$  и  $A_{M \max}$  вполне определенное число значений  $I_M$  (аналогично и  $A_{M \max}$ ), т.е.  $N_{\Delta I_M}$  и  $N_{\Delta A_{M \max}}$ , обеспечивая тем самым используемую плотность вероятности распределения токов молнии.

Моделирование процесса перекрытия линейной изоляции производится следующим образом. На ЭВМ организуется генерация пары значений  $I_M$  и  $A_{M \max}$ . Из базы данных ЭВМ выбираются соответствующие этой паре значения  $I_0$ ,  $T_1$  и  $T_2$ , позволяющие воспроизвести предложенную в работах [3,4] модель волны тока молнии; для отмеченной совокупности значений величин известны также  $\tau_\phi$  (длительность фронта) и  $t_{AM}$  (момент времени, при котором крутизна тока молнии максимальная). Эта модель следующая [3,4]:

$$i_M(t) = I_0 \left[ e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} - \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \frac{t}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right], \quad (7)$$

где  $I_0$  – постоянная, определяемая амплитудой тока;  
 $T_1, T_2$  – постоянные, определяемые возрастом и спадом волны тока.

Момент перекрытия линейной изоляции при  $t=t_{\text{пер}}$  устанавливается по критерию выполнения известного условия, что сумма импульсного напряжения  $U_{\text{имп}}(t)$  и рабочего напряжения провода  $u_p(\phi)$  достигает разрядного напряжения линейной изоляции  $U_{\text{разр}}^+(t)$  [1].

В усовершенствованной математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи 110 кВ и выше требуется, как и в исходной методике [1], решение детерминированной задачи распределения тока молнии между опорой и тросом как при прямых ударах в опору, тока и в трос в середине пролета. Здесь используются те же схемы замещения, что и в работе [1], но модель волны тока молнии отвечает условиям уравнения (7). Тогда при каждом статистическом испытании стохастической модели перекрытия гирлянды изоляторов ВЛ установление распределения тока молнии в соответствии с моделью (7) между опорой и тросом производится путем решения дифференциальных уравнений явным одношаговым методом первого порядка, предложенным Эйлером.

Следует отметить, что разрядное напряжение линейной изоляции  $U_{\text{разр}}^+(t)$  определяется вольт-секундной характеристикой в соответствии с работой [8] как

$$U_{\text{разр}}^+(t) = \frac{U_{50\%}^+}{1,145} \sqrt{1 + \frac{3,1}{t_{\text{пред}}}}, \quad (8)$$

где  $U_{50\%}^+$  – 50%-ное импульсное разрядное напряжение гирлянды при полной волне для положительной полярности на проводе (приблизительно соответствующее  $\tau_{\text{пред}} = 20$  мкс), кВ;  
 $t_{\text{пред}}$  – предразрядное время, мкс.

Расчет 50%-ного разрядного напряжения для импульса положительной полярности с длительностью фронта  $\tau_\phi$  более длительности фронта стандартного импульса (1,2/50 мкс) производится в соответствии с работой [1] по выражению

$$U_{50\%}^+(\tau_\phi) = U_{50\%}^+ \left( 0,45 + \frac{9}{\tau_\phi^{0,9} + 15} \right). \quad (9)$$

При генерации из базы данных ЭВМ значений  $I_M, A_{M \max}, I_0, T_1$  и  $T_2$  известны также значения  $\tau_\phi$  и  $t_{AM}$ . Принимая допущение, что вольт-секундная характеристика линейной изоляции определяется по выражению (8) не только для случаев с  $U_{50\%}^+$ , но и при  $U_{50\%}^+(\tau_\phi)$ , производится вычисление по выражению (9) 50%-ного разрядного напряжения с длительностью фронта  $\tau_\phi$ , значение которого генерировано

из базы данных ЭВМ в составе указанных ранее значений. Далее, по выражению (8) в процессе пошагового наращивания времени  $t = t_{\text{пред}}$  определяется вольт-секундная характеристика линейной изоляции и проверяется выполнение условия ее перекрытия.

Таким образом в усовершенствованной математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше, в отличие от работы [1], используется одна и та же разрядная характеристика как при прямых ударах в опору, так и в трос в середине пролета. В работе [1] в первом случае используется вольт-секундная характеристика гирлянд изоляторов для разрядов на косоугольном фронте, которая получена с использованием 50%-ных разрядных напряжений при испытательном импульсе стандартной формы, а во втором – 50%-ное разрядное напряжение для импульса положительной полярности. Учитывая то, что в усовершенствованной модели грозозащиты ВЛ определение длительности фронта импульса тока молнии производится по выполнению условия  $i_M(t)|_{t=\tau_{\text{ф}}} = I_M$ ,

отличающегося от определения длительности фронта косоугольного импульса в работе [1], использование разрядного напряжения  $U_{\text{разр}}^+(t)$  в соответствии с выражениями (8) и (9) представляется обоснованным.

Выполненное совершенствование модели грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом предполагается использовать при выборе наибольшего значения сопротивления растеканию заземляющих устройств опор ВЛ. Поэтому совершенствование не коснулось рассмотрения прорывов молнии через тросовую защиту на провода ВЛ; число прорывов от значения указанного выше сопротивления не зависит.

Необходимое число статистических испытаний математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше установлено на основе вычислительного эксперимента. По исходным данным ВЛ 110 кВ на опорах ПБ110-8 при ударе молнии в опору в зависимости от числа испытаний получен разброс вероятности перекрытия изоляции на опоре (см. рис. 1).

Из вычислительного эксперимента следует, что число статистических испытаний при моделировании грозозащиты ВЛ напряжением 110 кВ и выше должно быть не менее  $10^5$ .

#### Выводы.

Усовершенствованная математическая модель грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше с тросом реализуется на основе современных вычислительных операций и, по сравнению с исходной моделью, более адекватно отображает процессы при поражениях молнией ВЛ.

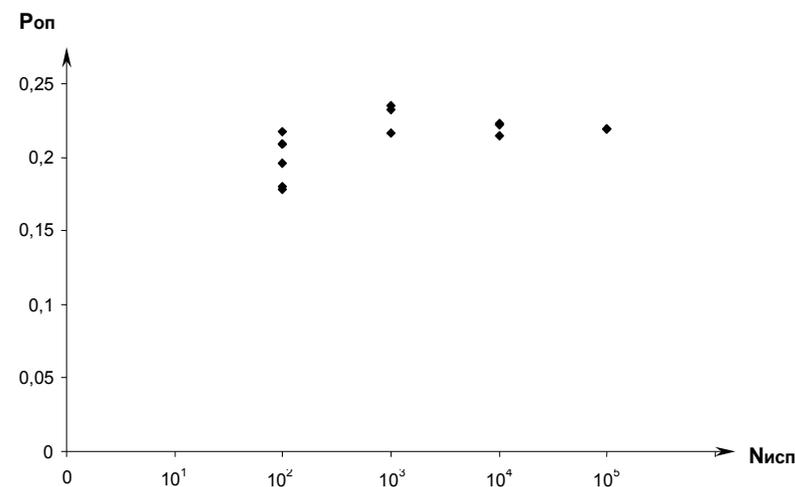


Рис. 1 – Разброс вероятности перекрытия изоляции на опоре

#### Список литературы:

1. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений, РД 153-34.3-35.125-99. – М.: РАО «ЕЭС России», 1999. – 184 с.
2. Кадомская К.П. Моделирование волны тока молнии при расчётах грозоупорности электрических сетей / К.П. Кадомская, А.А. Рейхердт // Электричество. – 2006. – №11. – С.17–23.
3. Гуль В.И. Моделирование грозовых перекрытий на воздушных линиях электропередачи с использованием метода статистических испытаний / В.И. Гуль, С.К. Березка // Энергетика и электрификация. – 2007. – №6. – С. 35–39.
4. Березка С.К. Модель волны тока молнии при расчетах грозоупорности воздушных линий электропередачи / С.К. Березка, А.А. Минченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 11 (186), Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». – 2011. – С. 41-43.
5. Березка С.К. Удосконалення моделювання грозозахисту повітряних ліній електропередавання напругою 110 кВ та вище / С.К. Березка, А.А. Минченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, ч. II ,01-03 червня 2011. - Харків, НТУ "ХП". – 2011. –195 с.
6. Костенко М.В. Грозозащита подстанций и электрических машин высокого напряжения. Серия "Электрические станции и сети" (Итоги науки и техники) / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов // М.:ВИНИТИ,1987. – №13.– 112 с.
7. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев // – М.: Наука, 1965. – 524 с.
8. Руководящие указания по расчету грозозащиты воздушных линий электропередачи 3–750 кВ, 10890тм-Т1 (проект). Л: НИИПТ, 1982 – 187с.

Поступила в редколлегию 06.10.2011