

УДК621.316.93

С. К. БЕРЕЗКА, А. А. МИНЧЕНКО (канд.техн.наук, доц.)

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
chip@kpi.kharkov.ua

## МОДЕЛЬ ВОЛНЫ ТОКА МОЛНИИ ПРИ РАСЧЕТАХ ГРОЗОУПОРНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

*Рассмотрена реализация модели формы импульса тока молнии, отвечающая физике разряда молнии и позволяющая совершенствовать методику расчета ожидаемого числа грозовых отключений воздушных линий электропередачи 110 кВ и более высокого напряжения.*

*Модель формы импульса тока молнии, ожидаемое число грозовых отключений, воздушные линии электропередачи.*

**Постановка проблемы.** Аппроксимация формы волны тока молнии, наиболее полно отвечающая физике происходящего при разряде молнии в воздушную линию (ВЛ) электропередачи процесса, соответствует условиям, при которых амплитуда и максимальная крутизна волны тока молнии, являясь независимыми случайными величинами, достигаются в различные моменты времени, причем имеет место нулевая производная тока молнии в начальный момент времени. Расчет ожидаемого числа отключений ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом, отвечающей указанным выше условиям физики процесса при разряде молнии, требует разработки соответствующей методики или совершенствования существующих. Анализ показал, что наиболее полной методикой такого расчета из числа существующих является методика, изложенная в "Руководстве" [1], и, стало быть, можно отказаться от разработки новой методики, поставив задачу совершенствовать данную методику путем представления в ней формы волны тока молнии, наиболее полно отвечающей условиям физики процесса при разряде молнии. В условиях численного решения задачи расчета ожидаемого числа грозовых отключений ВЛ такое совершенствование методики следует вести опираясь на использование возможностей современных вычислительных операций; с учетом этих возможностей должно производиться и соответствующее представление формы волны тока молнии.

**Анализ публикаций.** На основе регистрации форм волн тока молнии исследователями предложены аппроксимации, наиболее приближенные к форме реальных импульсов. До последнего времени наиболее распространенной среди них была биэкспоненциальная аппроксимация [2]. Однако осциллографирование первой компоненты волны тока молнии показало [3] несоответствие формы фронта волны моделируемого биэкспонентой реальным зарегистрированным осциллограммам, которые характеризуются нулевой производной в начальный момент времени. В связи с этим впоследствии было предложено несколько моделей [3], воспроизводящих нулевую производную волны тока молнии в начальный момент времени. Известна также наиболее простая модель волны тока молнии в виде полукосинусоиды, имеющая максимальную крутизну в середине фронта и легко аппроксимируемой на косоугольную с постоянной крутизной, как в работе [1]. В работе [5] предложена аппроксимация формы волны тока молнии близкая к известному выражению испытательного импульса третьего порядка [6], воспроизводящая нулевую производную тока молнии в начальный момент времени, и изложен подход к решению задачи, ограниченный рассмотрением модели отдельной опоры ВЛ при грозовом поражении.

**Цель статьи.** Реализация модели волны тока молнии при расчетах грозоупорности ВЛ 110 кВ и выше с тросом.

**Основная часть.** С точки зрения объема вычислений, которые необходимо производить в случае биэкспоненциальной аппроксимации волны тока молнии, и с учетом требования о нулевой производной в начальный момент времени предложено в качестве модели известное выражение испытательного импульса третьего порядка [5]. Уравнение такого импульса следующее:

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

где  $I_0$  – постоянная, определяемая амплитудой тока;

$T_1, T_2$  – постоянные, определяемые возрастанием и спадом волны тока.

Рассмотрим возможное решение задачи моделирования формы волны импульса тока молнии в соответствии с выражением (1). Искомые неизвестные величины  $I_0, T_1$  и  $T_2$  находим из следующих положений.

В момент времени  $t = \tau_{\phi}$  ток молнии принимает свое максимальное значение

$$i_M(t) \Big|_{t=\tau_\phi} = I_0 \left[ e^{-\frac{\tau_\phi}{T_1}} - e^{-\frac{\tau_\phi}{T_2}} - \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \frac{\tau_\phi}{T_2} e^{-\frac{\tau_\phi}{T_2}} \right] = I_M, \quad (2)$$

а его производная, т.е. крутизна тока молнии равна нулю

$$\frac{di_M(t)}{dt} \Big|_{t=\tau_\phi} = I_0 \left[ \frac{1}{T_1} \left( e^{-\frac{\tau_\phi}{T_2}} - e^{-\frac{\tau_\phi}{T_1}} \right) + \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \frac{\tau_\phi}{T_2^2} e^{-\frac{\tau_\phi}{T_2}} \right] = 0. \quad (3)$$

Кроме того, в некоторый момент времени  $t = t_{AM}$  в диапазоне значений  $t = \overline{0, \tau_\phi}$  крутизна тока молнии принимает своё максимальное значение

$$A_M(t) \Big|_{\substack{t=t_{AM}, \\ 0 < t < \tau_\phi}} = I_0 \left[ \frac{1}{T_1} \left( e^{-\frac{t_{AM}}{T_2}} - e^{-\frac{t_{AM}}{T_1}} \right) + \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \frac{t_{AM}}{T_2^2} e^{-\frac{t_{AM}}{T_2}} \right] = A_{M \max}, \quad (4)$$

а её производная при этом будет равна нулю

$$\frac{A_M(t)}{dt} \Big|_{\substack{t=t_{AM}, \\ 0 < t < \tau_\phi}} = I_0 \left[ \frac{1}{T_1} \left( \frac{1}{T_1} e^{-\frac{t_{AM}}{T_1}} - \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t_{AM}}{T_2}} \right) + \left( \frac{1}{T_2} - \frac{t_{AM}}{T_2^2} \right) \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) e^{-\frac{t_{AM}}{T_2}} \right] = 0. \quad (5)$$

Учитывая сложности решения системы трансцендентных уравнений (2-5), предлагается к реализации следующий подход. В памяти ЭВМ заполняется база данных значений  $I_M$ ,  $A_M$ ,  $I_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\tau_\phi$  и  $t_{AM}$  для моделирования формы волны импульса тока молнии в соответствии с выражением (1). Для этого используем метод Монте-Карло [7], в соответствии с которым производятся статистические испытания искусственной стохастической модели для детерминированной задачи решения системы уравнений (2-5).

Задаем в уравнениях (2) и (4) системы (2-5) значение  $I_0 = 1$  при  $t = var$ .

Будем варьировать величины  $I_M$ (кА),  $A_{M \max}$ (кА/мкс),  $T_1$ (мкс),  $T_2$ (мкс),  $\tau_\phi$ (мкс) и  $t_{AM}$ (мкс) на интервалах соответственно: ]0;220,0], ]0;77,0], ]0;100,0], ]0;10,0], ]0;25,0] и ]0;7,1].

С помощью генератора случайных чисел генерируется пара значений  $T_1$  и  $T_2$ . Для этой пары значений, последовательно наращивая время  $t$  (с шагом дискретизации  $\Delta t \ll \tau_\phi$ ) в диапазоне  $0 < t \leq \tau_\phi$ , проверяется достижение током  $i_M(t) \Big|_{I_0=1}$  по выражению (2) амплитудного значения  $I_M \Big|_{I_0=1}$  в соответствии с признаком перехода интервала возрастания функции в интервал убывания (по смене знака  $di_M(t)/dt$  в окрестности  $I_M \Big|_{I_0=1}$ ).

Значение  $t = \tau_\phi = n_i \Delta t$  ( $n_i$  – число решений уравнения до смены знака), при котором достигнуто  $I_M \Big|_{I_0=1}$ , и является длительностью фронта импульса тока молнии. В диапазоне значений  $0 < t < \tau_\phi$ , аналогично определению значения  $\tau_\phi$ , но с использованием выражения (4), устанавливается значение  $t_{AM}$ . Если для пары сгенерированных значений  $T_1$  и  $T_2$  найдены длительности  $\tau_\phi$  и  $t_{AM}$ , то принимается, что значения  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\tau_\phi$  и  $t_{AM}$  определены. В противном случае процесс определения  $\tau_\phi$  и  $t_{AM}$  повторяется с генерации другой пары случайных значений  $T_1$  и  $T_2$ . После определений значений  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\tau_\phi$  и  $t_{AM}$ , имея интервал вариаций значений амплитуды тока молнии  $I_M$ , получим вариации значений  $I_0$ .

Используем для этого предложенную модель формы волны импульса тока молнии по выражению (1). После подстановки в это выражение определенных ранее значений  $T_1$ ,  $T_2$  и  $\tau_\phi$  получаем некоторое значение амплитуды импульса известной формы  $I_M|_{I_0=1}$ . При сохранении этой формы импульса варьируя амплитуду  $I_M$  в выражении (1) получим вариации  $I_0 = I_M / I_M|_{I_0=1}$ ; значения этой постоянной будут соответствовать значениям  $I_M$  на каждом шаге дискретизации. На этих же шагах получаем и дискретные значения вариаций максимальной крутизны тока молнии  $A_{Mmax}$  при подстановке в выражение (4) сгенерированных значений  $T_1$  и  $T_2$ , определенного значения  $t_{AM}$  и вариаций  $I_0$ .

Полученные композиции значений  $I_M$ ,  $A_{Mmax}$ ,  $I_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\tau_\phi$  и  $t_{AM}$  заносятся в память ЭВМ. После этого процесс заполнения базы данных продолжается. Цикл расчетов повторяется с генерации пары случайных значений  $T_1$  и  $T_2$ .

Изложенный подход к статистическим испытаниям искусственной стохастической модели для детерминированной задачи решения системы уравнений (2–5) фактически сведен к решению уравнений (2) и (4) из этой системы и проверке тождественного равенства нулю в уравнениях (3) и (5); последние при  $t \neq \tau_\phi$  и  $t \neq t_{AM}$  в окрестностях  $\tau_\phi$  и  $t_{AM}$  позволяют проконтролировать переход интервала возрастания функции в интервал убывания. Процесс заполнения базы данных для моделирования предложенной формы волны импульса тока молнии с использованием метода Монте-Карло достаточно длительный, поэтому полученный массив данных может сохраняться на жестком диске ЭВМ для использования в дальнейших расчетах.

Вариации величин, используемых при аппроксимации предложенной формы импульса тока молнии и составляющих базу данных для расчета ожидаемого числа грозовых отключений ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом, приведены на рис. 1 и 2.

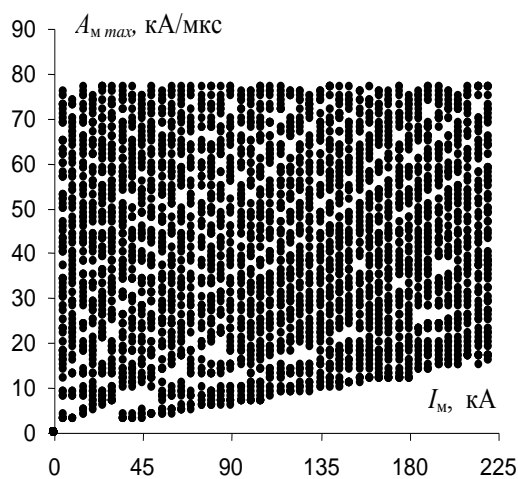


Рисунок 1 – Массив данных амплитуды  $I_M$  и максимальной крутизны  $A_{Mmax}$  импульса тока молнии

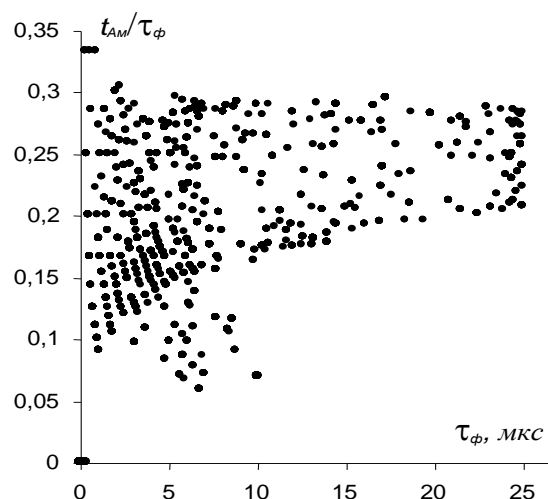


Рисунок 2 – Корреляция длительности фронта импульса тока молнии  $\tau_\phi$  и соотношения  $t_{AM}/\tau_\phi$

### Выводы.

Реализованная модель формы импульса тока молнии, отвечающая физике разряда молнии, позволит совершенствовать методику расчета ожидаемого числа грозовых отключений ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения.

### ЛИТЕРАТУРА

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. Golde R.H. Lightning. – London: Academic Press Inc. 1977, vol.1.
3. Кадомская К.П. Моделирование волны тока молнии при расчётах грозоупорности электрических сетей / Кадомская К.П., Рейхердт А.А. // Электричество. –2006. – №11. – С.17-23.
4. Мельников Н.А. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ / Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н.; под общ. ред. С.С. Рокотяна. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.

5. Гуль В.И. Моделирование грозových перекрытий на воздушных линиях электропередачи с использованием метода статистических испытаний / Гуль В.И., Березка С.К. // Энергетика та електрифікація. – 2007. – №6. – С. 35-39.
6. Смирнов С.М. Генераторы импульсов высокого напряжения / Смирнов С.М., Терентьев П.В. – М-Л, Энергия, 1964. – 239 с.
7. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики / Перхач В.С. – 3-є вид., перероб. і доп. – Львів: Вища шк., 1989. – 464 с.

Надійшла до редколегії 28.03.2011

Рецензент: С.Ф.Артюх

С.К. БЕРЕЗКА, А.А. МІНЧЕНКО  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

S. BEREZKA, A. MINCHENKO  
National Technical University  
«Kharkiv Polytechnic Institute»

**Модель хвилі струму блискавки при розрахунках грозостійкості повітряних ліній електропередачі.** Розглянута реалізація моделі форми імпульсу струму блискавки, що відповідає фізиці розряду блискавки і що дозволяє удосконалювати методику розрахунку очікуваного числа грозových відключень повітряних ліній електропередачі 110 кВ та вищої напруги.  
*Модель форми імпульсу струму блискавки, очікуване число грозových відключень, повітряні лінії електропередачі.*

**Lightning Current Wave Model at the Calculations of Lightning Strength of Overhead Transmission Lines.** Realization lightning current wave model is considered. The model corresponds to physics of lightning and allows to perfect the method of calculation of the expected number of a lightning disconnecting of overhead transmission lines of 110 kV and more high voltage.  
*Lightning current wave model, an expected number of a lightning disconnections, overhead transmission lines.*