

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 , τ_ϕ 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), τ_ϕ (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 τ_ϕ , но с использованием выражения (4), устанавливается значение t_{AM} . Если для пары сгенерированных значений T_1 и T_2 найдены длительности τ_ϕ и t_{AM} , то принимается, что значения T_1 , T_2 , τ_ϕ и t_{AM} определены. В противном случае процесс определения τ_ϕ и t_{AM} повторяется с генерации другой пары случайных значений T_1 и T_2 . После определений значений T_1 , T_2 , τ_ϕ 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 τ_ϕ 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 , τ_ϕ 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 τ_ϕ 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.

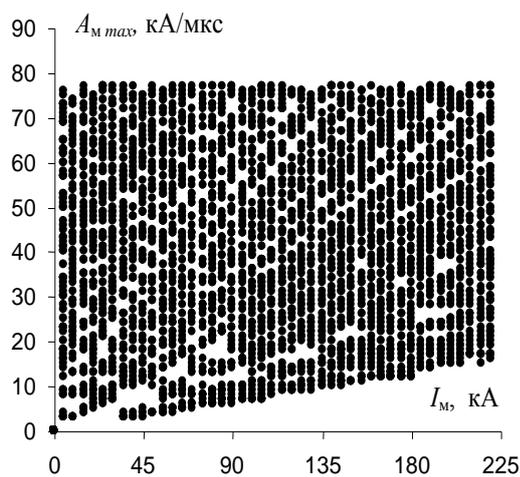


Рисунок 1 – Массив данных амплитуды I_M и максимальной крутизны A_{Mmax} импульса тока молнии

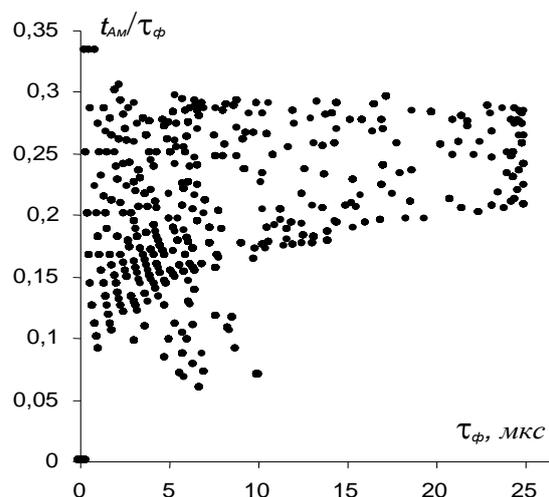


Рисунок 2 – Корреляция длительности фронта импульса тока молнии τ_ϕ и соотношения t_{AM}/τ_ϕ

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.