

**А.А.ПЕТКОВ**, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»

## **АППРОКСИМАЦИЯ ФОРМЫ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ ПРИ ЗАДАНИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ И ИНТЕГРАЛА ДЕЙСТВИЯ**

У роботі розглянуто задачу апроксимації форми імпульсу струму, заданого набором амплітудно-часових параметрів та інтегралом дії. Отримано вирази для опису А-компоненти імпульсу струму блискавки.

The paper considers the problem of current pulse form approximation for the pulse specified by a combination of amplitude-time parameters and action integral. Expressions for the description of an lightning current impulse A-components are obtained.

**Постановка проблемы.** Одной из основных задач проектирования высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ) является синтез их разрядных цепей. Решение задачи синтеза, в свою очередь, требует математического описания формы воспроизводимого испытательного импульсного воздействия (ИИВ). Имеется два основных способа описания ИИВ: контролируемые параметрами и аналитическим выражением. В силу ограниченности ИИВ во времени и свойств формирующих их электрических цепей, одним из возможных вариантов аналитического описания ИИВ является использование экспоненциальных полиномов.

**Анализ публикаций.** Задача описания ИИВ с использованием экспоненциальных полиномов имеет ряд решений, применение которых диктуется практическими аспектами.

В [1] рассмотрен вопрос об аппроксимации биэкспоненциальной функцией (БЭФ) импульсных волн напряжения атмосферного происхождения, приведены методика расчета и графические материалы для определения коэффициентов БЭФ при аппроксимации импульсов стандартной формы.

Общая методика аппроксимации формы ИИВ с помощью БЭФ при использовании контрольных точек приведена в [2].

Особое место занимают вопросы аппроксимации импульсов тока молнии, так как наряду с амплитудно-временными параметрами они характеризуются интегралом действия и переносимым зарядом [3-5]. Это нашло отражение в проводимых исследованиях. Например, в [6] приведены различные аналитические выражения с той или иной степенью точности, описывающие амплитудно-временные параметры импульса тока молнии. В [7] предложена аппроксимирующая БЭФ для импульса тока молнии, совпадающая с импульсом по длительности фронта и интегралу по времени от 0 до  $\infty$ .

Проведенный анализ показывает, что имеется ряд частных решений задачи аппроксимации импульса тока молнии, которые, однако, не охватывают всех практических случаев, имеющих место в процессе проведения испытаний.

**Целью** настоящей работы является развитие метода аппроксимации испытательных импульсов тока для варианта его идентификации контролируемые параметрами и интегралом действия.

**Материалы и результаты исследований.** В [4, 5] А-составляющая тока молнии описана следующим образом: максимальное значение тока молнии  $i_{\max} = 200 \pm 20$  кА; интеграл действия  $J = 2 \cdot 10^6 \pm 4 \cdot 10^5$  А<sup>2</sup>·с; время достижения на спаде уровня 0,01 от максимального значения  $T_{C\ 0,01} \leq 500$  мкс; время нарастания импульса от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения  $T_{H(0,1;0,9)} < 50$  мкс. D-составляющая тока молнии описана следующим образом:  $i_{\max} = 100 \pm 10$  кА;  $J = 2,5 \cdot 10^5 \pm 5 \cdot 10^4$  А<sup>2</sup>·с;  $T_{C\ 0,01} \leq 500$  мкс;  $T_{H(0,1;0,9)} < 25$  мкс.

Проведем аппроксимацию А-составляющей тока молнии БЭФ вида

$$i(t) = I_{nr} \left( e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t} \right), \quad (1)$$

где  $I_{nr}$ ,  $\beta_2 > \beta_1 > 0$ , с использованием общей методики, изложенной в [2]. Характеристиками процедуры аппроксимации в нашем случае являются:

- эквивалентруемые параметры:
  - контролируемые параметры, характеризующие амплитудно-временные параметры импульса:  $T_{H(0,1;0,9)}$ ,  $T_{C\ 0,01}$ ,  $i_{\max}$ ;
  - интеграл действия  $J$ .
- критерий близости – максимальное значение модуля абсолютного отклонения эквивалентруемых параметров от заданных значений.

Задачу аппроксимации сформулируем следующим образом.

Требуется найти параметры выражения (1)  $I_{nr}$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , при которых максимальное значение модуля абсолютного отклонения тока  $|i_{\max\ \text{расч}} - i_{\max}|$  будет наименьшим при выполнении следующих ограничений:

$$1,6 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \leq J_{\text{расч}} \leq 2,4 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}, \quad (2)$$

$$50 \cdot 10^{-6} \text{ с} < T_{C\ 0,01\ \text{расч}} \leq 500 \cdot 10^{-6} \text{ с}, \quad (3)$$

$$0 < T_{H(0,1;0,9)\ \text{расч}} < 50 \cdot 10^{-6} \text{ с}. \quad (4)$$

Использование общей методики, приведенной в [2] для решения задачи в данной постановке, имеет ряд особенностей.

- 1 Границы интервала поиска значений параметров не фиксировались. Модификации подвергались лишь границы интервала генерирования случайных значений параметров. Это позволяет подпрограмме поиска локального минимума выходить за интервал генерирования

случайных значений.

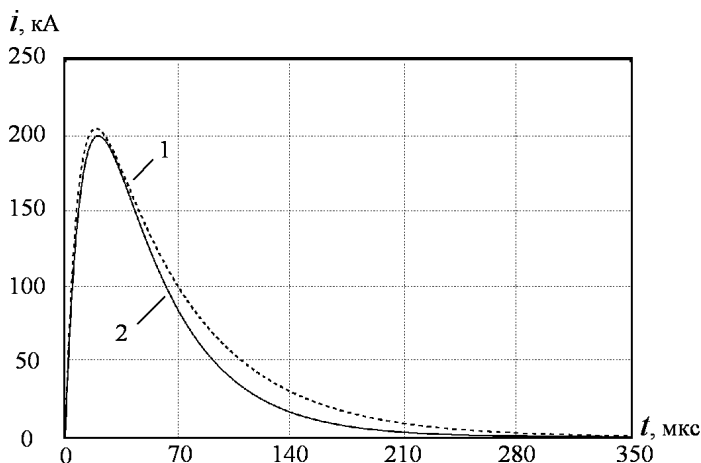
- 2 Метод штрафных функций применялся не только для удовлетворения свойств коэффициентов выражения (1), но и для выполнения ограничений (2)-(4).
- 3 Расчеты контролируемых параметров производились по методике, изложенной в [8], интеграл действия вычислялся по формуле:

$$J(t) = I_{nr}^2 \left\{ \frac{1}{2\beta_1} \left( 1 - e^{-2\beta_1 t} \right) + \frac{2}{\beta_1 + \beta_2} \left[ e^{-(\beta_1 + \beta_2)t} - 1 \right] + \frac{1}{2\beta_2} \left( 1 - e^{-2\beta_2 t} \right) \right\}, \quad (5)$$

которая при  $t = \infty$  принимает вид

$$J = I_{nr}^2 \left\{ \frac{1}{2\beta_1} - \frac{2}{\beta_1 + \beta_2} + \frac{1}{2\beta_2} \right\}. \quad (6)$$

Результаты решения поставленной задачи показали, что, в силу широких допусков на амплитудно-временные характеристики импульса тока, имеется ряд соотношений параметров выражения (1), которые удовлетворяют условиям задачи. Примеры формы испытательных импульсов, обеспечивающие предъявляемые требования, показаны на рисунке.



Импульсы вида (1), удовлетворяющие требованиям к А-составляющей тока молнии.

$$1 - I_{nr} = 333,5 \cdot 10^3 \text{ А}; \beta_1 = 1,725 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}; \beta_2 = 1,105 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1};$$

$$2 - I_{nr} = 445,5 \cdot 10^3 \text{ А}; \beta_1 = 1,939 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}; \beta_2 = 1,179 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$$

Расчетные значения параметров импульса для данных, соответствующих импульсу тока вида 1 составляют:  $i_{\max \text{ расч}} = 204,8 \text{ кА}$ ;  $J_{\text{расч}} = 2,049 \cdot 10^6$

$A^2 \cdot c$ ;  $T_{C,0,01 \text{ расч}} = 295,2 \text{ мкс}$ ;  $T_{H(0,1;0,9) \text{ расч}} = 10,3 \text{ мкс}$ . Для импульса тока вида 2 соответственно  $i_{\text{max расч}} = 199,96 \text{ кА}$ ;  $J_{\text{расч}} = 1,75 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ ;  $T_{C,0,01 \text{ расч}} = 228,3 \text{ мкс}$ ;  $T_{H(0,1;0,9) \text{ расч}} = 11,4 \text{ мкс}$ .

### **Выводы.**

- 1 В работе приведены результаты дальнейшего развития метода аппроксимации импульсных воздействий применительно к описанию импульса тока набором контролируемых параметров и интегралом действия.
- 2 Показана многовариантность решения задачи аппроксимации А-составляющей полного тока молнии, регламентированного нормативными документами в области испытания технических средств.
- 3 Получены коэффициенты биэкспоненциального описания А-составляющей полного тока молнии.

Материалы статьи могут быть использованы для оптимизации устройств, формирующих испытательные импульсы тока молнии.

**Список литературы:** 1. Лоханин А.К., Иванова Н.С. Соотношения между расчетными параметрами импульсной волны // Электричество. – 1968. – № 12. – С. 80-81. 2. Петков А.А. Аппроксимация формы импульсных электромагнитных воздействий биэкспоненциальной функцией // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – № 49. – 2005. – С. 52-61. 3. MIL-STD-464A. Department of defense interface standard. Electromagnetic environmental effects requirements for systems – AMSC F7489, Area EMCS. – 2002. – 121 P. 4. Баранов М.И., Колушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85. 5. Квалификационные требования России. КТР-ВВФ /DO-160D/ED-14D/. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 23.0 Прямое воздействие молнии. С. 258-273. 6. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с. 7. Коломиец Е.В. Оценка электромагнитных полей внутри здания при поражении его молнией // Сборник докладов седьмой научно-технической конференции по электромагнитной совместимости ЭМС-2002. – Санкт-Петербург, 2002. – С.67-72. 8. Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – № 1. – С. 65-69.

*Поступила в редколлегию 20.11.2008.*