

А.А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

АППРОКСИМАЦИЯ ФОРМЫ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ ПРИ ЗАДАНИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ И ИНТЕГРАЛА ДЕЙСТВИЯ

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

In work the problem of the form current impulse approximation specified by a combination of amplitude-time parameters and action integral is considered. Expressions for the description A-components of an lightning current impulse are received.

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 ∞ .

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 $J = 2 \cdot 10^6 \pm 4 \cdot 10^5$ А²·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; $J = 2,5 \cdot 10^5 \pm 5 \cdot 10^4$ А²·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:

– эквивалентные 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 эквивалентных параметров от заданных значений.

Задачу аппроксимации сформулируем следующим образом.

Требуется найти параметры выражения (1) I_{nr}, β_1 и β_2 , при которых максимальное значение модуля абсолютного отклонения тока $\left| i_{\max \text{дан}} - i_{\max} \right|$ будет наименьшим при выполнении следующих ограничений:

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

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

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

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:

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

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 рис. 1.

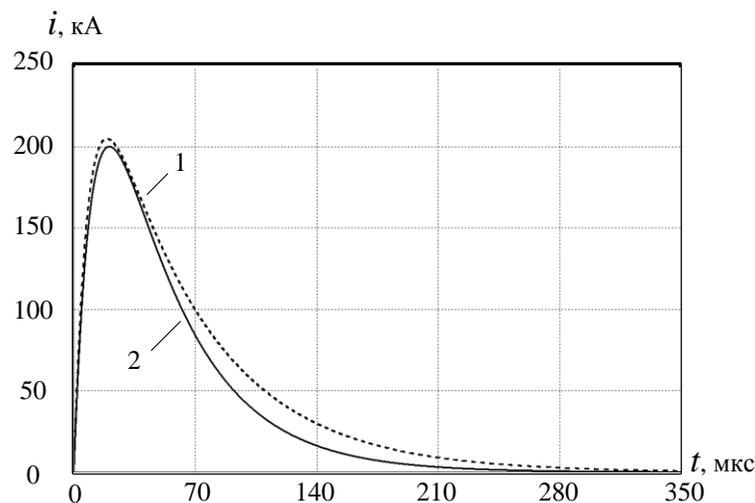


Рис. 1. Импульсы вида (1), удовлетворяющие требованиям к А-составляющей тока молнии.

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

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

Расчетные значения параметров импульса для данных, соответствующих импульсу тока вида 1 составляют: $i_{\max \text{ расч}} = 204,8 \text{ кА}$; $J_{\text{расч}} = 2,049 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$; $T_{C \ 0,01 \text{ расч}} = 295,2 \text{ мкс}$; $T_{H \ (0,1;0,9) \text{ расч}} = 10,3 \text{ мкс}$. Для импульса тока вида 2 соответственно $i_{\max \text{ расч}} = 199,96 \text{ кА}$; $J_{\text{расч}} = 1,75 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$; $T_{C \ 0,01 \text{ расч}} = 228,3 \text{ мкс}$; $T_{H \ (0,1;0,9) \text{ расч}} = 11,4 \text{ мкс}$.

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 "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПИ". - №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., Колишко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных 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 аperiodической формы // Электротехника та електроенергетика. - 2005. - №1. – С. 65 - 69.

Поступила в редколлегию 20.11.2008.