

гии бумажно-касторовой изоляции, а при повышенной напряженности поля  $E > 150$  кВ/мм даже превосходят. Образцы со структурой ЗБ, ЗП, ПБП значительно уступают бумажно-касторовой изоляции по ресурсу при равной удельной энергии.

**Список литературы:** 1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / *Богатенков И.М., Бочаров Ю.Н., Гумерова Н.И., Иманов Г.М.* и др.; Под ред. *Кучинского Г.С.* – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. 2. *Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я.* и др. Прогнозирование ожидаемого среднего ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком в зависимости от режимов эксплуатации // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XII Межд.науч.школы. – Николаев: КП«Николаевская областная типография», 2005. – С. 125-126. 3. *В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 37. – С. 113-118. 4. *В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной трансформаторным маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2007. – № 20. – С. 167-174. 5. *В.В.Рудаков, О.Ю.Дубийчук, В.П.Кравченко* Предельные удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск. Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХП». – 2004. – № 7. – С. 142-147. 6. *Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В.* Экспериментальное определение показателей надежности секций конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С.71-75.

*Поступила в редколлегию 22.05.2008*

УДК 621.313

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

## **РАСЧЕТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ТОКОВ, ЗАДАННЫХ ИНТЕГРАЛОМ ДЕЙСТВИЯ**

У роботі досліджена можливість формування імпульсу струму, заданого набором амплітудно-часових параметрів та інтегралом дії. Розглянуто вибір параметрів традиційної схеми розряду ємнісного накопичувача енергії.

In work capability of the current impulse formation specified by a combination of amplitude-time parameters and action integral is investigated. The parameters selection of the traditional scheme of the energy capacitor storage discharge is considered.

**Постановка проблемы.** Интеграция Украины в мировую экономику ставит задачу проведения сертификации выпускаемой продукции в соответ-

ствии с международными нормативными документами и, в частности, проведения различных испытаний технических средств.

Одним из видов испытаний электротехнического оборудования является проверка его работоспособности в условиях грозовой деятельности и, в частности, при поражении разрядом молнии. Испытания такого рода проводятся с использованием высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), создаваемых на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), что требует постоянного усовершенствования ВИИУ, в том числе и их методов расчета.

**Анализ публикаций.** В настоящее время проведение испытаний объектов регулируется рядом международных и национальных документов [1-3]. Ток разряда молнии представляется в них в виде ряда импульсов, которые в зависимости от целей испытания и типа испытуемых объектов, должны формироваться в комплексе или раздельно.

Наибольшую опасность при поражении объектов молнией представляет первый импульс тока – так называемая А-составляющая тока молнии. Такой импульс характеризуется следующими контролируруемыми параметрами: длительностью нарастания значений импульса от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения –  $T_{H(0,1;0,9)}$ , длительностью спада значений до уровня 0,01 от максимального значения –  $T_{C0,01}$ , максимальным значением тока –  $i_{max}$ , а также интегралом действия тока, за время  $T_{C0,01}$ . Аналогичным способом нормируется также D-составляющая импульса тока молнии. Конкретные значения параметров определяются как типом составляющей, так и целью проведения испытаний (проверка на устойчивость к прямому поражению молнией или вторичным проявлениям тока молнии).

Вопросы выбора параметров разрядной цепи ЕНЭ при задании импульса тока набором амплитудно-временных параметров достаточно полно рассмотрены в [4, 5]. Соотношения для расчета интеграла действия по известным параметрам разрядной цепи ЕНЭ приведены в [6]. Однако комплексно вопрос выбора параметров разрядной цепи при комбинированном задании импульса тока в настоящее время не рассмотрен.

**Целью** настоящей работы является исследование возможности формирования в традиционной схеме разряда емкостного накопителя энергии импульса тока, заданного набором амплитудно-временных параметров и интегралом действия.

**Материалы и результаты исследований.** Рассмотрим традиционную схему разряда ЕНЭ, показанную на рис. 1.

Как известно [6], интеграл действия импульса тока определяется из соотношения

$$J = \int_0^{t_1} i^2(t) dt, \quad (1)$$

где  $t_1$  – время от начала импульса тока.

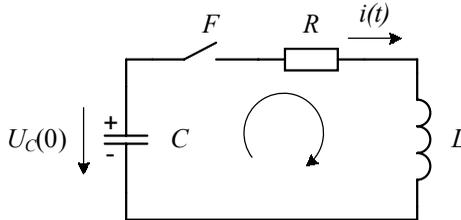


Рисунок 1 – Эквивалентная схема разряда ЕНЭ:  $U_C(0)$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $R$ , – зарядное напряжение конденсатора, емкость конденсатора, индуктивность разрядной цепи, активное сопротивление разрядной цепи

Можно показать, что при полном разряде конденсатора ( $t_1 \rightarrow \infty$ ) в последовательной  $RLC$ -цепи, интеграл действия (полный интеграл действия) равен

$$J = \frac{CU_C^2(0)}{2R} = \frac{CU_C^2(0)}{\sqrt{L/C}} j, \quad (2)$$

где  $j = \int_0^{\infty} I^2(\tau) d\tau = \frac{1}{2r}$  – безразмерный аналог интеграла действия;

$$I(\tau) = \frac{i(t)}{U_C(0)} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{– безразмерный аналог тока;}$$

$$r = \frac{R}{\sqrt{L/C}} \quad \text{– безразмерный аналог активного сопротивления разрядной цепи.}$$

Пусть заданы следующие контролируемые параметры импульса тока: время, характеризующее нарастание значений импульса тока –  $t_H$ , время, характеризующее спад значений импульса тока –  $t_C$ , максимальное значение импульса тока –  $i_{\max}$ , а также активное сопротивление нагрузки –  $R_H$  и интеграл действия  $J_Z$ , вычисляемый за время разряда конденсатора.

Если известно активное сопротивление нагрузки  $R_H$ , то с использованием соотношений из [4, 5] выражение (2) приводится к виду:

$$2\tau_H r I_{\max}^2 = \frac{i_{\max}^2 t_H}{J_Z}, \quad (3)$$

где  $\tau_H = \frac{t_H}{\sqrt{LC}}$  – безразмерный аналог времени нарастания;

$i_{\max}, I_{\max}$  – соответственно максимальное значение тока и его безразмерный аналог.

Из материалов публикаций [4, 5] следует, что левая часть (3) является однозначной функцией отношения временных параметров импульса тока:

$$F\left(\frac{t_C}{t_H}\right) = 2\tau_H r I_{\max}^2. \quad (4)$$

Таким образом, если заданы  $J_Z, i_{\max}, t_H$ , то (3) может быть удовлетворено только при единственном значении  $t_C/t_H$ , которое в общем случае может не совпадать с требуемым значением. И, наоборот, при заданных  $t_C$  и  $t_H$ , а значит и  $F\left(\frac{t_C}{t_H}\right)$  в общем случае не выполняется отношение  $\frac{i_{\max}^2 t_H}{J_Z}$ .

Для варианта униполярного апериодического импульса тока, в случае когда  $t_H = T_{H(0,1;0,9)}$  и  $t_C = T_{C0,01}$  график функции (4) имеет вид, показанный на рис. 2, и описывается выражением (5)

$$F\left(\frac{T_{C0,01}}{T_{H(0,1;0,9)}}\right) = 3,6454 \left(\frac{T_{C0,01}}{T_{H(0,1;0,9)}}\right)^{-0,861}, \quad (5)$$

где  $\frac{T_{C0,01}}{T_{H(0,1;0,9)}} \geq 13,4$ .

$F(T_{C0,9} / T_{H(0,1;0,9)})$

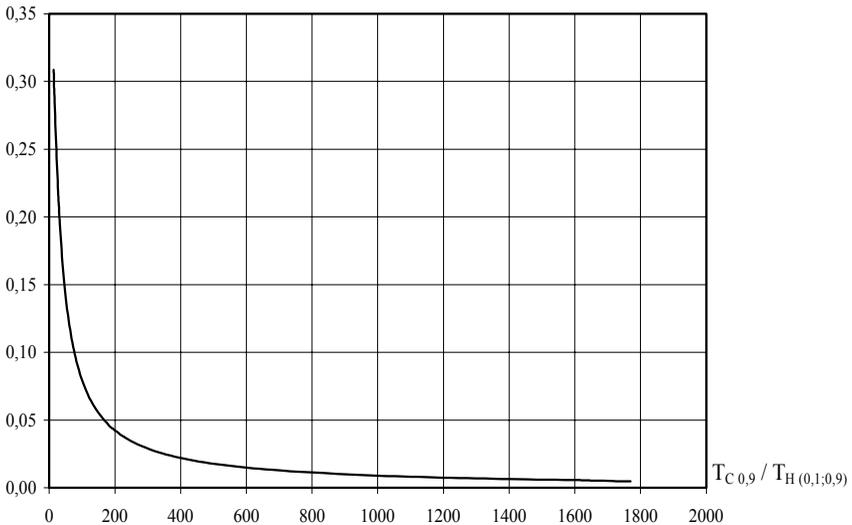


Рисунок 2 – Вид функции (4) для варианта апериодического разряда ЕНЭ

Для варианта колебательного затухающего импульса тока график функции (4) приведен на рис. 3. В этом случае время спада  $T_{H(0,1;0,9)}$  при расчетах определялось для первой полуволны тока.

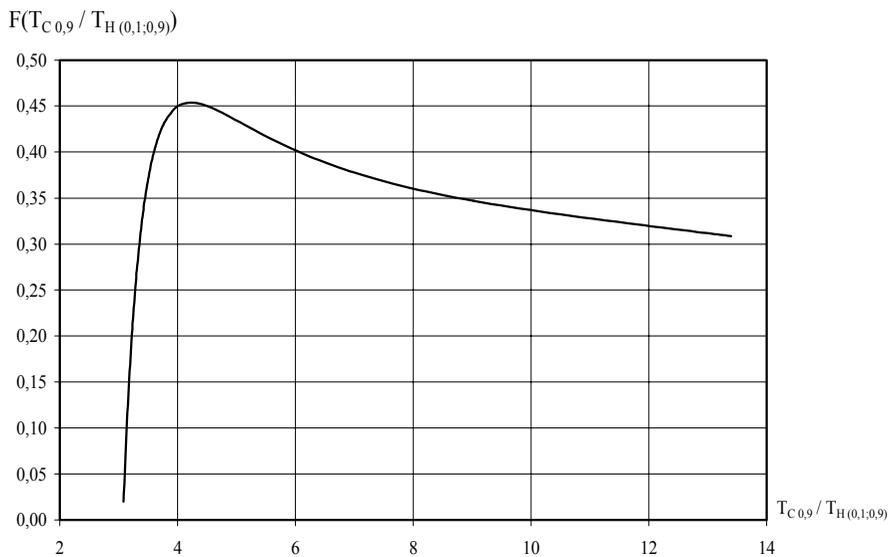


Рисунок 3 – Вид функции (4) для варианта колебательного разряда ЕНЭ

Если интеграл действия вычисляется за некоторое время  $t < \infty$ , то:

$$J(t_1) = \int_0^{t_1} i^2(t) dt = k(t_1) \frac{CU_C^2(0)}{2R_H}, \quad (6)$$

где  $k(t_1) < 1$  – коэффициент уменьшения интеграла действия.

Произведем оценку значений  $k(t_1)$ . Расчеты показывают, что коэффициент  $k(t_1)$  для аperiodического режима разряда ( $r > 2$ ) при  $t_1 = T_{C0,01}$  может быть с большой точностью принят равным 1, для колебательного режима – может быть определен с использованием графика, приведенного на рис. 4. Как видно из рисунка, для  $r \geq 1$ , коэффициент  $k(T_{C0,01})$  также близок к 1 (максимальная погрешность 3 %). То есть при  $r \geq 1$  для практических расчетов может быть принято, что интеграл действия, вычисленный за время спада значений импульса тока до уровня 0,01 от максимального значения, равен полному интегралу действия  $J(T_{C0,01}) = J(\infty)$ .

Рассмотрим возможность формирования А–составляющей тока молнии, используемой для испытаний на устойчивость технических средств к прямому поражению молнией (импульс вида 1). Данный импульс характеризуется следующими нормируемыми параметрами [2]:  $T_{H(0,1;0,9)} = 50 \pm 5$  мкс,

$T_{C0,01} = 500 \pm 50$  мкс.,  $i_{\max} = 200 \pm 20$  кА,  $J(T_{C0,01}) = 2 \cdot 10^6 \pm 4 \cdot 10^5$  А<sup>2</sup>·с. Можно показать, что для  $T_{C0,01} / T_{H(0,1;0,9)} = 10$  безразмерные параметры принимают следующие значения  $r = 1,775$ ;  $\tau_{H(0,1;0,9)} = 0,6$ ;  $I_{\max} = 0,398$ . Подставим их в (3) и при  $t_H = T_{H(0,1;0,9)}$  рассчитаем зависимость полного интеграла действия от максимального значения тока. График зависимости показан на рис. 5, кривая 1.

$k(T_{C0,01})$

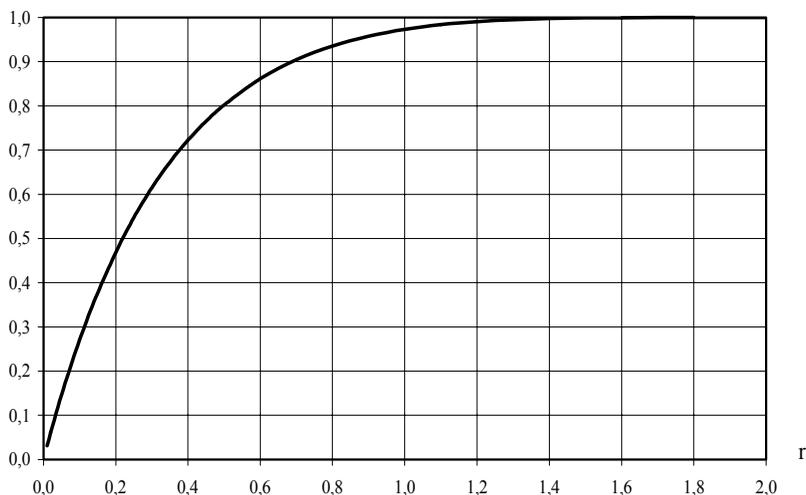


Рисунок 4 – Коэффициент уменьшения интеграла для колебательного режима разряда ЕНЭ

Аналогичная зависимость (рис. 5, кривая 2) рассчитана для А-составляющей тока молнии, используемой для испытаний на устойчивость технических средств к вторичным проявлениям тока молнии (импульс вида 2). Нормируемые параметры данного импульса имеют вид [2]:  $T_{H(0,1;0,9)} = 2,85 \pm 0,285$  мкс,  $T_{C0,01} = 500 \pm 50$  мкс.,  $i_{\max} = 200 \pm 20$  кА,  $J(T_{C0,01}) = 2 \cdot 10^6 \pm 4 \cdot 10^5$  А<sup>2</sup>·с. Безразмерные параметры для  $T_{C0,01} / T_{H(0,1;0,9)} = 175$  принимают следующие значения  $r = 8,516$ ;  $\tau_{H(0,1;0,9)} = 0,221$ ;  $I_{\max} = 0,117$ .

Как видно из рис. 5 для импульса вида 1 максимальному значению 200 кА соответствует  $J = 6 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (кривая 1), импульсу вида 2 –  $J = 2,2 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (кривая 2).

Таким образом, импульс тока вида 1 не может быть сформирован в традиционной схеме разряда ЕНЭ, показанной на рис. 1. Импульс тока вида 2 может быть сформирован с заданным интегралом действия в пределах заданных допусков.

$J \cdot 10^{-6}, A^2 \cdot c$

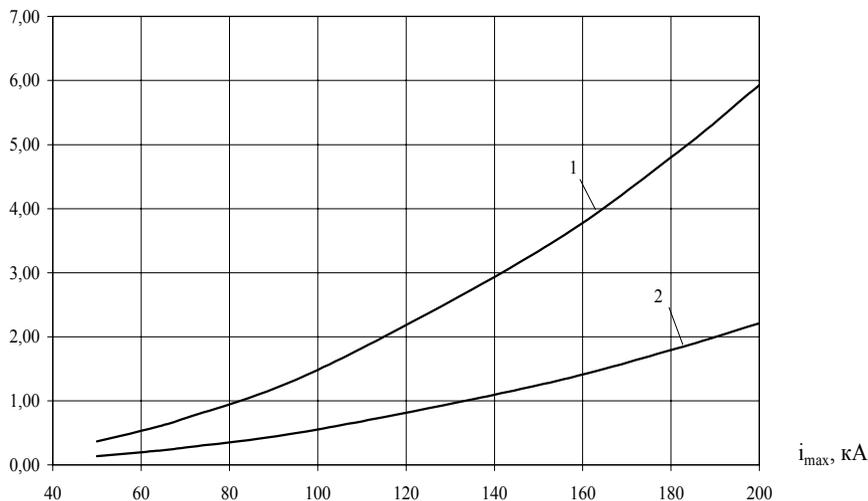


Рис. 5. Зависимость интеграла действия от максимального значения тока для А-составляющих тока молнии

В качестве примера рассмотрим формирование импульса тока вида 2 в активной нагрузке  $R_H = 0,1$  Ом с помощью генератора импульсов тока, имеющего следующие параметры: зарядное напряжение  $U_C(0) = 100$  кВ; емкость  $C = 220$  мкФ; активное сопротивление  $R = 0,05$  Ом; индуктивность  $L = 0,5$  мкГн.

Расчеты, проведенные с использованием материалов работ [4, 5], показывают, что заданный импульс может быть сформирован в традиционной схеме разряда ЕНЭ, если в цепь разряда последовательно с нагрузкой ввести формирующие элементы: активное сопротивление  $R_\Phi = 0,35$  Ом и индуктивность  $L_\Phi = 0,25$  мкГн. Техническая реализация ЕНЭ и формирующих элементов с такими параметрами не представляет сложностей [7].

Моделирование переходного процесса с помощью Micro-Cap [8] показало, что параметры формируемого импульса тока в нагрузке принимают следующие значения:  $T_{H(0,1;0,9)} = 2,87$  мкс.,  $T_{C0,01} = 508$  мкс.,  $i_{max} = 190,9$  кА,  $J(T_{C0,01}) = 2,2 \cdot 10^6 A^2 \cdot c$ . Как показывает расчет отклонение временных параметров не превышают 2 %, амплитудных – 5 %, интеграла действия – 10 % от заданных значений.

## Выводы

- 1 Получены соотношения, связывающие временные контролируемые параметры импульса тока, его наибольшее значение и интеграл действия.

- 2 Показано, что при разряде ЕНЭ для варианта соотношения параметров  $R/\sqrt{L/C} \geq 1$  для практических расчетов интеграл действия, вычисленный за время соответствующее спаду значений до уровня 0,01 может быть принят равным полному интегралу действия (погрешность не превышает 3 %).
- 3 Установлено, что импульс А-составляющей тока, используемый для имитации прямого поражения молнии не может быть сформирован в традиционной схеме с одним ЕНЭ в силу несоответствия нормированного интеграла действия реальному, имеющему место при заданных амплитудно-временных параметрах.
- 4 Определены безразмерные параметры разрядного тока ЕНЭ соответствующего временным параметрам А-составляющих тока молнии.

Приведенные материалы могут быть использованы для дальнейшего исследования схем испытательных устройств для формирования токов молнии.

**Список литературы:** 1. Aircraft Lightning environment and related test waveforms standard. ED 84. Report of Eurocae WG31 and SAE committee AE4L. 2. MIL-STD-464A. Department of defense interface standard. Electromagnetic environmental effects requirements for systems – AMSC F7489, Area EMCS. – 2002. – 121 P. 3. 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. 4. Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы аperiodической формы // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – № 1. – С. 65-69. 5. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств при различных способах задания контролируемых параметров испытательных импульсов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – № 17. – 2006. – С. 105-111. 6. Кузнецкин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с. 7. Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Хромов В.В. Методы и средства испытаний электрооборудования на стойкость к электромагнитным импульсам естественного и искусственного происхождения // Международный симпозиум по электромагнитной совместимости. ЭМС-93. (21-26 июня 1993 г.). Сборник научных докладов. Ч.3 – Санкт-Петербург: ЭЛТУ. – 1993. – С. 630-633. 8. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 368 с.

*Поступила в редколлегию 18.04.2008.*