

А.А. ПЕТКОВ, д-р техн. наук, с.н.с., проф. НТУ "ХПИ", Харьков

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ ГИТ НА МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТОКА

В работе решена задача степенного приближения с погрешностью, не превышающей 1%, зависимости максимального значения импульса тока во всей области изменения величин параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока. Полученные соотношения позволяют при любых сочетаниях значений параметров элементов разрядной цепи производить: расчеты максимальное значение импульса тока, формируемого ГИТ; определять необходимые значения одного из параметров элементов разрядной цепи ГИТ при известных значениях параметров остальных элементов и максимального значения тока, а также при модификации нагрузки. Выведены соотношения для определения проектных допусков максимального значения импульса тока.

Ключевые слова: генератор импульсов тока, емкостной накопитель энергии, максимальное значение тока

Постановка проблемы. Современные технические средства, содержащие радио- и электротехнические компоненты, проходят испытания на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов. При этом возникает необходимость формирования импульсов тока большой амплитуды и длительности. Для этой цели создаются генераторы импульсов тока (ГИТ) с большой запасаемой энергией, сооружаемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Учитывая, что испытаниям подвергаются различные объекты, к амплитудно-временным параметрам (АВП) импульсов тока предъявляются различные требования, что предопределяет необходимость постоянного совершенствования методов расчета разрядных цепей ГИТ.

Анализ публикаций. Одним из основных параметров импульса тока, нормируемых при испытаниях, является его максимальное значение. Как известно [1], в разрядной цепи (РЦ) ГИТ, эквивалентная схема которой представима RLC -контуром (см.рис.1), в зависимости от соотношения параметров контура могут протекать импульсы тока трех видов: апериодического, критического (предельного апериодического) и колебательного затухающего. В общем случае для любого соотношения параметров контура определение максимального значения импульса сводится к следующей процедуре [1]. Из решения

© А. А. Петков, 2015

дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс в RLC -контуре, определяется аналитическое выражение для тока $i(t)$. Далее из условия равенства нулю первой производной от тока, находится время достижения максимального значения тока t_{\max} , подстановка которого в общее выражение дает максимальное значения тока $I_{\max} = i(t_{\max})$.

Данная процедура многоступенчата и практически неудобна, особенно для оперативной оценки максимального значения тока. В [2] приведены соотношения для вычисления нормированного максимального значения тока, применение которых также требует определенных преобразований. Поэтому для упрощения расчетов предлагаются приближенные соотношения, получаемые из общего выражения импульса тока для предельных вариантов соотношения параметров элементов РЦ.

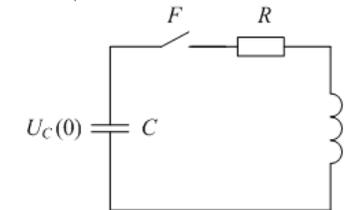


Рис. 1 – Эквивалентная схема РЦ ГИТ. $U_C(0)$, C , L , R – зарядное напряжение ЕНЭ, емкость батареи ЕНЭ, эквивалентная индуктивность РЦ, эквивалентное активное сопротивление РЦ; F – коммутатор

В [3] указано, что для апериодического импульса тока при $r = R/\sqrt{L/C} \geq 60$ максимальное значение тока определяется по соотношению

$$I_{\max} = U_C(0)/R. \quad (1)$$

Максимальное значение колебательного затухающего импульса тока, с погрешность не превышающей 1% при $r = R/\sqrt{L/C} \leq 0,012$, можно определить по выражению [4]

$$I_{\max} = U_C(0)/\sqrt{L/C}. \quad (2)$$

Для критического разряда $r = R/\sqrt{L/C} = 2$, исходя из материалов [1, 2], можно получить точную формулу для определения максимума тока в импульсе в виде

$$I_{\max} = (2/e)U_C(0)/R. \quad (3)$$

В виду того, что при изготовлении элементов РЦ неизбежны отклонения от расчетных значений параметров, реальные АВП импульса тока также будут отличаться от расчетных значений. В этом случае важен вопрос о связи допусков АВП импульса тока с допусками параметров элементов РЦ. Однако для РЦ ГИТ, применительно к определению допусков на величину максимального значения тока, имеется информация лишь для ограниченной области соотношения параметров элементов РЦ ($2 \leq r \leq 30$) [5].

Цель работы. Получение упрощенных соотношений для определения максимального значения тока в импульсе и проектных допусков на его величину в разрядной цепи испытательного устройства с емкостным накопителем энергии.

Материалы и результаты исследований. Используя общую методику определения максимального значения тока в импульсе [1] и методы аппроксимации и нелинейного программирования [6], можно показать, что с погрешностью, не превышающей 1%, максимальное значение апериодического импульса тока описывается следующим выражением

$$I_{\max} = AU_C(0)R^{B-1}L^{-0,5B}C^{0,5B}, \quad (4)$$

где при $2 \leq r \leq 4$ $A = 0,623$; $B = 0,25$; при $4 \leq r \leq 10$ $A = 0,756$; $B = 0,108$; при $10 \leq r \leq 60$ $A = 0,92$; $B = 0,021$;

для колебательного импульса тока – соотношением вида

$$I_{\max} = AU_C(0)R^B L^{-0,5(B+1)} C^{0,5(B+1)}, \quad (5)$$

где при $0,012 \leq r \leq 0,05$ $A = 0,91$; $B = -0,02$; при $0,05 \leq r \leq 0,2$ $A = 0,766$; $B = -0,079$; при $0,2 \leq r \leq 0,5$ $A = 0,621$; $B = -0,21$; при $0,5 \leq r \leq 1$ $A = 0,55$; $B = -0,38$; при $1 \leq r \leq 2$ $A = 0,551$; $B = -0,57$;

Объединяя известные (1) – (3) и полученные соотношения (4) и (5), можно предложить следующую общую формулу для определения максимального значения тока

$$I_{\max} = AU_C(0)R^\alpha L^\beta C^{-\beta}, \quad (6)$$

где значения коэффициентов A , α , β приведены в табл. 1, размерность величин $U_C(0)$, C , L , R , I_{\max} в СИ.

Соотношение (6) позволяет рассчитать с погрешностью не более 1% максимальное значение импульса тока, формируемого ГИТ при любых сочетаниях значений параметров элементов разрядной цепи. Возможно также решение обратной задачи – определения необходимого значения одного из параметров элементов РЦ ГИТ при

известных значениях параметров остальных элементов и максимального значения тока (например, сохранение максимального значения тока при изменении нагрузки). Учитывая, что ГИТ с большой запасаемой энергией содержит сотни и даже тысячи конденсаторов, которые могут в процессе эксплуатации выходить со строя и отключаться системой защиты, соотношение (6) может быть использовано для диагностики состояния конденсаторной батареи – определению емкости батареи по изменению величины тока (при исправных остальных элементах РЦ ГИТ).

Таблица 1 – Коэффициенты обобщенного выражения максимального значения тока

r	A	α	β
$0 \leq r \leq 0,012$	1	0	-0,5
$0,012 \leq r \leq 0,05$	0,91	-0,02	-0,49
$0,05 \leq r \leq 0,2$	0,766	-0,079	-0,4605
$0,2 \leq r \leq 0,5$	0,621	-0,21	-0,395
$0,5 \leq r \leq 1$	0,55	-0,38	-0,31
$1 \leq r \leq 2$	0,551	-0,57	-0,215
$2 \leq r \leq 4$	0,623	-0,75	-0,125
$4 \leq r \leq 10$	0,756	-0,892	-0,054
$10 \leq r \leq 60$	0,92	-0,979	-0,0105
$60 \leq r \leq \infty$	1	-1	0

Выражение (6) является положительной функцией четырех аргументов. Этот факт позволяет использовать соотношения для вычисления относительного отклонения функции нескольких аргументов, приведенные в [7]. Предполагая малость относительного отклонения аргументов, для определения относительного отклонения максимального значения импульса тока от его номинального значения получим соотношение:

$$\delta I_{\max} = \delta U_C(0) + |\alpha| \delta R + |\beta| (\delta L + \delta C), \quad (7)$$

где $\delta U_C(0)$, δR , δL , δC – относительное отклонение соответственно зарядного напряжения ЕНЭ, эквивалентного активного сопротивления РЦ эквивалентной индуктивности РЦ и емкости батареи ЕНЭ.

Предположим, что имеет место равенство отклонений $\delta X = \delta U_C(0) = \delta R = \delta L = \delta C$. Тогда из соотношения (7), с учетом данных табл. 1, для всего диапазона соотношения параметров РЦ имеем

$$\delta I_{\max} = \delta X(1 + |\alpha| + 2|\beta|) = 2\delta X. \quad (8)$$

Из (8) видно, что при равных отклонениях параметров элементов РЦ, отклонение максимального тока превышает их в два раза.

На практике величина отклонения R , L и C определяется конструкцией и технологией изготовления элементов РЦ, а зарядного напряжения $U_C(0)$ – погрешностью системы измерений и автоматики и, с учетом уровня современной элементной базы и технических решений, может быть достаточно малым, наперед заданным значением.

Предположим, что имеет место равенство следующих отклонений $\delta Y = \delta R = \delta L = \delta C$. Тогда из соотношения (7), с учетом данных табл. 1, для всего диапазона соотношения параметров РЦ имеем

$$\delta I_{\max} = \delta U_C(0) + \delta Y(|\alpha| + 2|\beta|) = \delta U_C(0) + \delta Y. \quad (9)$$

Соотношения (7) – (9) выведены в предположении малости $\delta U_C(0)$, δR , δL , δC . Произведем некоторую оценку применимости этих соотношений. В качестве критерия выберем отношение величин $(\delta I_{\max} - \delta U_C(0))$, определенных непосредственным расчетом и вычисленных исходя из (9).

На рис. 2 показаны результаты вычисления коэффициента $K = (\delta I_{\max} - \delta U_C(0))^* / (\delta I_{\max} - \delta U_C(0))$, где $(\delta I_{\max} - \delta U_C(0))^*$ – значение, определенное непосредственным расчетом с использованием всех возможных комбинаций отклонений δR , δL , δC при их равенстве $\delta Y = \delta R = \delta L = \delta C$, а $(\delta I_{\max} - \delta U_C(0))$ значение, определенное исходя из выражения (9).

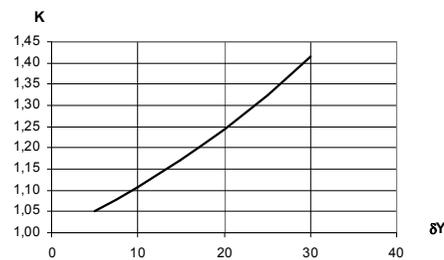


Рис. 2 – Влияние величины отклонения параметров элементов схемы на точность расчета относительного отклонения величины тока

Как видно из рисунка, при больших отклонениях параметров элементов РЦ ($\delta Y > 15\%$), отклонение максимального тока от номинального значения, рассчитанное по (9) может существенно отличаться от значений, полученных непосредственным расчетом. Полученные данные позволяют разграничить сферу применимости различных методов расчета.

Учитывая, что относительные отклонения величин элементов РЦ ГИТ являются фактически нормируемыми допусками при их изготовлении, предложенные соотношения описывают получаемые допуски максимального значения импульса тока и могут быть использованы в процессе их проектирования РЦ ГИТ.

Выводы.

1. Решена задача степенного приближения с погрешностью, не превышающей 1%, зависимости максимального значения импульса тока во всей области изменения величин параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока.

2. Полученные соотношения позволяют при любых сочетаниях значений параметров элементов разрядной цепи производить расчеты максимального значения импульса тока, формируемого ГИТ; определять необходимые значения одного из параметров элементов РЦ ГИТ при известных значениях параметров остальных элементов и максимального значения тока, а также при модификации нагрузки.

3. Выведены соотношения для определения проектных допусков максимального значения импульса тока

Материалы статьи могут быть использованы для дальнейших исследований и проектирования высоковольтных испытательных устройств.

Список литературы: 1. Теоретические основы электротехники. Том 2. / [Демирчан К.С., Неман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.]. Санкт-Петербург : Питер, 2003 – 572 с. 2. Кузюкин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении / И.П. Кузюкин – М. : Энергия, 1980. – 136 с. 3. Петков А.А. Расчет параметрической надежности генератора импульсов тока / А.А. Петков // Электротехника. – 1993. - №5. – С. 69 – 71. 4. Петков О.О. Розрахунок і проектування резистивно-індуктивних елементів високовольтних імпульсних установок : навч. посіб. / О.О.Петков. – Х. : Вид-во "Підручник НТУ "ХПІ", 2014. – 196 с. ISBN 978-617-687-010-4. 5. Петков А.А. Расчет допусков разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – №6. – С. 68 – 71. 6. Бартіш М. Я. Дослідження операцій: підручник. Ч.4 : Нелінійне програмування / М. Я. Бартіш, І. М. Дудзяний. — Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. І.Франка, 2011. — 208 с. 7. Копченова Н.В. Вычислительная математика в примерах и задачах / Н.В. Копченова, И.А. Марон. – М. : Наука, 1972. – 367 с.

Bibliography (transliterated): 1. Demirchan K.S., Neman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Vol 2.* Sankt-Peterburg, Piter. 2003. Print. 2. I.P. Kuzhekin *Ispytatelnyye ustanovki i izmereniya na vyisokom napryazhenii.* Moscow. Energiya, 1980. Print. 3. Petkov A.A. Raschet parametricheskoj nadezhnosti generatora impulsov toka. A.A. Petkov. *Elektrotehnika.* □ 1993. No 5. 69 -□ 71. Print. 4. Petkov O.O. *Rozrahunok i proektuvannya rezistivno-induktivnih elementiv visokovoltnih impulsnih ustanovok.* □ Kharkov. Vid-vo "Pidruchnik NTU "KHPI", 2014. □ Print. 5. Petkov A.A. Raschet dopuskov razryadnyh cepej vysokovoltnyh impulsnyh ispytatelnyh ustrojstv *Elektrotehnika i elektromehaniika.* – 2008. No 6. 68 – 71. Print 6. Bartish M. Ya. I. M. Dudzyanij *Doslidzhennya operacij: pidruchnik.* Ch.4 : Neliniyne programuvannya, Lviv. Vidavnichij centr LNU im. I.Franka, 2011. Print. 7. Kopchenova N.V. I.A. Maron. *Vychislitel'naya matematika v primerah i zadachah* Moscow. Nauka, 1972. Print.

Поступила (received) 29.04.2015