

УДК 621.373

Н.Н.ИГНАТЕНКО; НТУ «ХПИ»

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕНЕРАТОРАХ ТОКА МОЛНИИ С ЗАМЫКАТЕЛЯМИ НАГРУЗКИ

Запропоновано метод розрахунку амплітудно-часових параметрів аперіодичних імпульсних струмів, що формуються в RL-навантаженні генераторів великих імпульсних струмів блискавки (ГВІСБ) при спрацюванні розрядників замикачів навантаження. Показано, що застосування в розрядному колі ГВІСБ раціонально вибраних коректуючих ємностей збільшує амплітуду та тривалість сформованих в RL-навантаженні аперіодичних імпульсних струмів блискавки.

Method of calculation of amplitude-time parameters of aperiodical pulsed currents that are formed in RL-load of generators of high pulsed currents of lightning (GHPCL) during operation of load closer dischargers has been proposed. It was shown that use of rationally chosen correcting capacitances in discharging circuit of GHPCL increases amplitude and duration of lightning aperiodical pulsed currents formed in RL-load.

Введение. Для получения больших импульсных аperiodических токов в ТВН достаточно часто применяют генератор больших импульсных токов (БИТ) с использованием кроубар-замыкателя нагрузки [1,2]. Схема замещения такого классического генератора БИТ показана на рис. 1. Работает данный генератор таким образом. При срабатывании разрядника P_1 емкость накопителя C_r начинает разряжаться на активно-индуктивную нагрузку, формируя в ней фронт аperiodического импульса тока $i_n(t)$. В момент достижения током $i_n(t)$ своего максимального значения срабатывает разрядник замыкателя P_2 и в RL-нагрузке формируется спад аperiodического импульса тока.

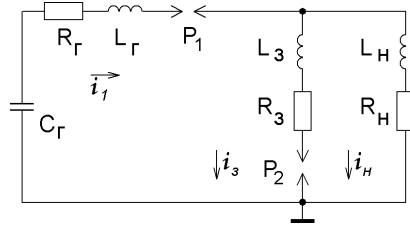


Рисунок 1 – Схема замещения генератора БИТ с замыкателем нагрузки

Максимальное амплитудное значение импульсного тока $I_{нм}$ в нагрузке генератора БИТ (рис. 1) можно определить из выражения [1]:

$$i_n(t) = \frac{U_0}{\omega L} \exp(-\delta t) \sin(\omega t), \quad (1)$$

где $L = L_c + L_H$; $\delta = 0,5(R_c + R_H)L^{-1}$; $\omega_0 = (LC_r)^{-0,5}$; $\omega = (\omega_0^2 - \delta^2)^{0,5}$; U_0 – рабочее напряжение накопителя.

При срабатывании разрядника замыкателя P_2 в момент достижения током $i_n(t)$ своего максимального значения (момент времени $t_m \approx 0,5\pi\sqrt{LC_r}$) в нагрузке генератора формируется спад аperiodического импульса тока, АВП которого находят из приближенного соотношения [2]:

$$i_n(\tau) \approx I_{нм} \left(\frac{L_3 e^{-\delta_1 \tau}}{L_H + L_3} \cos(\omega_1 \tau) + \frac{L_H e^{-\delta_2 \tau}}{L_H + L_3} \right), \quad (2)$$

где $\omega_{01}' = C_r^{-0,5} [L_r + L_H L_3 (L_H + L_3)^{-1}]^{0,5}$; $\delta_2 = (R_3 + R_H)(L_3 + L_H)^{-1}$;
 $\delta_1 = 0,5 \left(R_c + \frac{R_3 R_H}{R_3 + R_H} \right) \left(L_c + \frac{L_3 L_H}{L_3 + L_H} \right)^{-1}$; $\omega_1 = (\omega_{01}'^2 - \delta_1^2)^{0,5}$; τ – время, отсчет которого производится от момента срабатывания разрядника замыкателя P_2 .

Для обеспечения работы генератора БИТ (рис. 1) в его составе в качестве разрядника P_2 используют дорогостоящий вакуумный коммутатор, управляемый генератором высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) [2,3].

В последнее время разработаны высокоэффективные генераторы больших импульсных токов молнии (ГБИТМ) с замыкателями нагрузки, которые имеют высокий КПД разрядного контура, стабильно работают без применения ГВПИ и позволяют формировать в крупногабаритных технических объектах аperiodические импульсы тока большей амплитуды и длительности [4,5].

Расчет переходных процессов в разрядном контуре генератора ГБИТМ с одним замыкателем нагрузки и корректирующей емкостью. В работах [4, 5, 6] показано, что введение в разрядную цепь замыкателей рационально выбранных корректирующих емкостей C_k позволяет увеличить амплитудное значение тока $i_n(t)$ в ГБИТМ. При этом в данных ГБИТМ применяется воз-

душные (атмосферного давления) неуправляемые (управляемые) разрядники замыкателей нагрузки, которые срабатывают в момент времени достижения тока $i_n(t)$ своего амплитудного значения.

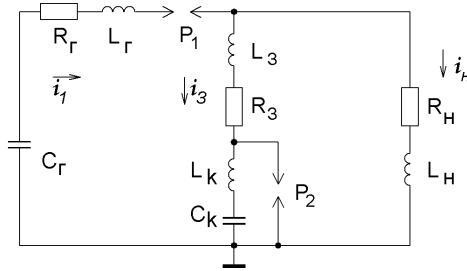


Рисунок 2 – Схема замещения генератора ГБИТМ с одним замыкателем нагрузки и корректирующей емкостью

На рис. 2 приведена схема замещения ГБИТМ с одним замыкателем нагрузки и корректирующей емкостью C_k . Проведенные расчеты показывают, что без учета влияния активных сопротивлений при несрабатывании разрядника P_2 , импульсный ток $i_n(t)$ в нагрузке можно определить как [6]:

$$i_n(t) = i_{n1}(t) - i_{n2}(t) = I_{n1} \sin(at) - I_{n2} \sin(bt), \quad (3)$$

$$\text{где } I_{n1} = \frac{U_0(L_3 + L_k)(\omega_{03}^2 - a^2)(b^2 - a^2)^{-1} a^{-1}}{(L_3 + L_n + L_k) \left[L_2 + \frac{L_n \cdot (L_3 + L_k)}{L_3 + L_n + L_k} \right]};$$

$$I_{n2} = \frac{U_0(L_3 + L_k)(\omega_{03}^2 - b^2)b^{-1}(b^2 - a^2)^{-1}}{(L_3 + L_n + L_k) \left[L_2 + \frac{L_n \cdot (L_3 + L_k)}{L_3 + L_n + L_k} \right]}; \quad \omega_{01}^2 = \left[C_r \left(L_2 + \frac{L_n(L_3 + L_k)}{L_n + L_k + L_3} \right) \right]^{-1};$$

$\omega_{02}^2 = [C_k(L_n + L_k + L_3)]^{-1}$; $\omega_{03}^2 = [C_k(L_3 + L_k)]^{-1}$; U_0 – рабочее напряжение ЕНЭ; L_k – индуктивность емкости C_k и ее подводов;

a и b – круговые частоты генератора тока молнии;

$$a = 0,707 \left\{ \omega_{02}^2 \omega_{01}^2 C_r (L_2 + L_n) + \omega_{01}^2 - \left[(\omega_{02}^2 \omega_{01}^2 C_r (L_2 + L_n) + \omega_{01}^2)^2 - 4\omega_{02}^2 \omega_{01}^2 \right]^{0,5} \right\}^{0,5};$$

$$b = 0,707 \left\{ \omega_{02}^2 \omega_{01}^2 C_r (L_2 + L_n) + \omega_{01}^2 + \left[(\omega_{02}^2 \omega_{01}^2 C_r (L_2 + L_n) + \omega_{01}^2)^2 - 4\omega_{02}^2 \omega_{01}^2 \right]^{0,5} \right\}^{0,5}.$$

Если корректирующая емкость C_k выбрана так, что выполняется условие $b = 3a$, то в разработанном генераторе ГБИТМ амплитудное значение тока $i_n(t)$ увеличивается и будет равно: $I_{шт} = I_{n1} + I_{n2}$. Для ГБИТМ (рис. 2) значение корректирующей емкости можно найти из приближенного соотношения [6]:

$$C_k \approx \frac{L_2 + L_n}{(L_n + L_3 + L_k) \left\{ 40\pi^2 T^{-2} \left[L_2 + \frac{L_n(L_3 + L_k)}{L_n + L_3 + L_k} \right] - C_r^{-1} \right\}}; \quad (4)$$

где T – период колебаний тока $i_n(t)$ в RL-нагрузке без использования C_k .

Полагая, что P_2 – идеальный коммутатор, срабатывающий в момент достижения током $i_n(t)$ своего максимума, проведем расчет операторным методом (по Карсону) переходных процессов в разрядной цепи ГБИТМ (рис. 2). Анализ полученных аналитических выражений показывает, что АВП спада аperiodического импульса тока может быть найдено из следующего приближенного соотношения:

$$i_n(\tau) \approx \frac{I_{1m}L_3}{L_n + L_3} e^{-\delta_1\tau} \cos(\omega_1\tau) + \frac{I_{nm}L_n}{L_3 + L_n} e^{-\delta_2\tau} - \frac{I_{3m}L_3}{L_3 + L_n} e^{-\delta_2\tau}, \quad (5)$$

$$\text{где } I_{nm} \approx \frac{U_0(L_3 + L_k)(\omega_{03}^2 - 3a^2) \cdot a^{-3}}{6(L_3 + L_n + L_k) \left[L_2 + \frac{L_n(L_3 + L_k)}{L_3 + L_n + L_k} \right]};$$

$$I_{3m} \approx - \frac{0,5U_0L_n \cdot a^{-1}}{(L_3 + L_n + L_k) \left[L_2 + \frac{L_n(L_3 + L_k)}{L_3 + L_n + L_k} \right]};$$

$$\delta_1 = 0,5(R_2 + \frac{R_3R_n}{R_n + R_3})(L_2 + \frac{L_nL_3}{L_n + L_3})^{-1}; \quad \omega_1 = \left[C_\tau^{-1}(L_2 + \frac{L_nL_3}{L_n + L_3})^{-1} - \delta_1^2 \right]^{0,5};$$

$I_{1m} = I_{nm} + I_{3m}$; $\delta_2 = (R_n + R_3)(L_n + L_3)^{-1}$; I_{1m}, I_{nm}, I_{3m} – амплитудные значения токов в ГБИТМ, которые соответствуют моменту времени t_m , τ – время, отсчет которого начинается от момента срабатывания разрядника P_2 .

Период колебаний T_k на спаде импульса тока, сформированного в RL-нагрузке данного ГБИТМ можно определить как:

$$T_k \approx 2\pi \left[C_\tau(L_2 + L_nL_3(L_n + L_3)^{-1}) \right]^{0,5}. \quad (6)$$

Расчет переходных электромагнитных процессов в разрядном контуре генератора ГБИТМ с двумя замыкателями нагрузки и двумя корректирующими емкостями. В состав высоковольтных генераторов ГБИТМ могут входить два замыкателя RL-нагрузки, имеющие близкие электрические параметры [6]. В этом случае значения корректирующих емкостей $C_{k1} = C_{k2}$ для ГБИТМ (рис. 3) можно определить из приближенного выражения [6]:

$$C_{k1} = C_{k2} \approx \frac{L_2 + L_n}{(2L_n + L_{31} + L_{k1}) \left\{ 40\pi^2 T^{-2} \left[L_2 + \frac{L_n \cdot (L_{31} + L_{k1})}{2L_n + L_{31} + L_{k1}} \right] - C_\tau^{-1} \right\}}, \quad (7)$$

где T – период колебаний тока $i_n(t)$ в нагрузке без использования $C_{k1} = C_{k2}$.

Пренебрегая влиянием активных сопротивлений и полагая, что разрядники P_2 и P_3 в ГБИТМ рис. 3 не срабатывают, значение импульсного тока $i_n(t)$ в нагрузке генератора токов молнии находим из выражения [6]:

$$i_h(t) = \frac{U_0(L_{31} + L_{\kappa 1})(2L_H + L_{31} + L_{\kappa 1})^{-1}}{\left[L_c + \frac{L_H(L_{31} + L_{\kappa 1})}{2L_H + L_{31} + L_{\kappa 1}} \right]} \left\{ \frac{(\omega_{06}^2 - a_1^2)\sin(a_1 t)}{a_1(b_1^2 - a_1^2)} - \frac{(\omega_{06}^2 - b_1^2)\sin(b_1 t)}{b_1(b_1^2 - a_1^2)} \right\}, \quad (8)$$

где $\omega_{04}^2 = \left[C_{\Gamma} \left(L_c + \frac{L_H(L_{31} + L_{\kappa 1})}{2L_H + L_{\kappa 1} + L_{31}} \right) \right]^{-1}$; $\omega_{05}^2 = [C_{\kappa 1}(2L_H + L_{\kappa 1} + L_{31})]^{-1}$;

$\omega_{06}^2 = [C_{\kappa 1}(L_{31} + L_{\kappa 1})]^{-1}$; U_0 – рабочее напряжение ЕНЭ; a_1 и b_1 – соответственно круговые частоты генератора токов молнии;

$$a_1 = 0,707 \left\{ \omega_{05}^2 \omega_{04}^2 C_{\Gamma} (L_c + L_H) + \omega_{04}^2 - \left[(\omega_{05}^2 \omega_{04}^2 C_c (L_c + L_H) + \omega_{04}^2)^2 - 4\omega_{04}^2 \omega_{05}^2 \right]^{0,5} \right\}^{0,5},$$

$$b_1 = 0,707 \left\{ \omega_{05}^2 \omega_{04}^2 C_{\Gamma} (L_c + L_H) + \omega_{04}^2 + \left[(\omega_{05}^2 \omega_{04}^2 C_c (L_c + L_H) + \omega_{04}^2)^2 - 4\omega_{02}^2 \omega_{01}^2 \right]^{0,5} \right\}^{0,5}.$$

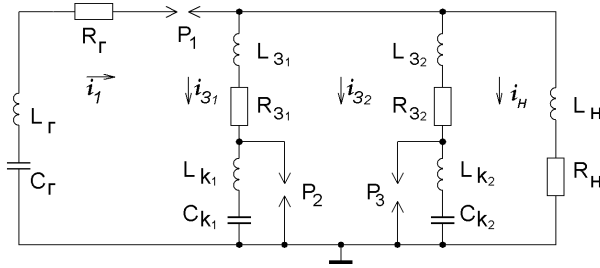


Рисунок 3 – Схема замещения генератора ГБИТМ с двумя замыкателями нагрузки и двумя корректирующими емкостями

Проведенные расчеты переходных электромагнитных процессов показывают, что при срабатывании разрядников P_2 и P_3 в момент времени t_m , амплитудно-временные параметры спада импульса тока в ГБИТМ (рис. 3) могут быть найдены из приближенного выражения:

$$i_h(\tau) \approx \frac{I_{1m} L_{31} e^{-\delta_4 \tau}}{L_{31} + 2L_H} \cos(\omega_2 \tau) + \frac{2I_{nm} L_H}{L_{31} + 2L_H} e^{-\delta_5 \tau} - \frac{2I_{31m} L_{31}}{L_{31} + 2L_H} e^{-\delta_5 \tau}, \quad (9)$$

где $\delta_4 = 0,5 \left(R_c + \frac{R_{31} R_H}{2R_H + R_{31}} \right) \left(L_c + \frac{L_H L_{31}}{2L_H + L_{31}} \right)^{-1}$;

$$\delta_5 = (2R_H + R_{31})(2L_H + L_{31})^{-1}; \quad \omega_2 = \left[C_c^{-1} \left(L_{\Gamma} + \frac{L_{31} L_H}{2L_H + L_{31}} \right)^{-1} - \delta_4^2 \right]^{0,5};$$

$$I_{1m} = I_{nm} + 2I_{31m};$$

$$I_{nm} \approx \frac{U_0(L_{31} + L_{\kappa 1})(\omega_{06}^2 - 3a_1^2)}{6(2L_H + L_{31} + L_{\kappa 1}) \left[L_c + \frac{L_H(L_{31} + L_{\kappa 1})}{2L_H + L_{31} + L_{\kappa 1}} \right] a_1^3};$$

$$I_{31m} = I_{32m} \approx -\frac{U_0 L_H (2L_H + L_{31} + L_{\kappa 1})^{-1}}{2 \left[L_r + \frac{L_H (L_{31} + L_{\kappa 1})}{2L_H + L_{31} + L_{\kappa 1}} \right] a_1}; \quad \tau - \text{ время, отсчет которого начина-}$$

ется от момента срабатывания разрядников P_2 и P_3 ; $I_{1m}, I_{2m}, I_{3m1} = I_{32m}$ – амплитуды токов в ГБИТМ в момент времени t_m .

Необходимо отметить, что введение в разрядную цепь генератора ГБИТМ (рис. 3) двух замыкателей нагрузки позволяет уменьшить амплитуду колебаний на спаде сформированного импульса тока молнии. При этом период колебаний T_k на спаде аperiodического импульса тока можно определить из приближенного соотношения:

$$T_k \approx 2\pi \left[C_r (L_e + L_H L_{31} (2L_H + L_{31})^{-1}) \right]^{0,5}. \quad (10)$$

Расчет АВП параметров импульсного тока молнии в ГБИТМ и экспериментальная проверка полученных результатов. Проведем расчет АВП импульсного тока $i_H(t)$, который может быть сформирован в активно-индуктивной нагрузке ($R_H = 0,1$ Ом, $L_H = 14$ мкГн) генератора ГБИТМ (рис. 3). Пусть в качестве ЕНЭ в таком ГБИТМ используется генератор импульсных напряжений на 3МВ (ГИН-3), имеющий емкость в ударе $C_e = 0,08$ мкФ, заряженную до напряжения $U_0 = 0,7$ МВ, собственную индуктивность $L_H = 35$ мкГн и активное сопротивление $R_e = 2$ Ом. В генераторе применены два идентичных замыкателя нагрузки, которые имеют следующие электрические параметры: $R_{31} = R_{32} = 0,1$ Ом; $L_{31} = L_{32} = 5$ мкГн; $L_{\kappa 1} = L_{\kappa 2} = 5$ мкГн; $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2} = 20,83$ нФ. Расчет проводим применяя выражения (8) и (9). На рис. 4 показана расчетная кривая аperiodического тока $i_H(t)$, сформированного в RL-нагрузке исследуемого генератора токов молнии.

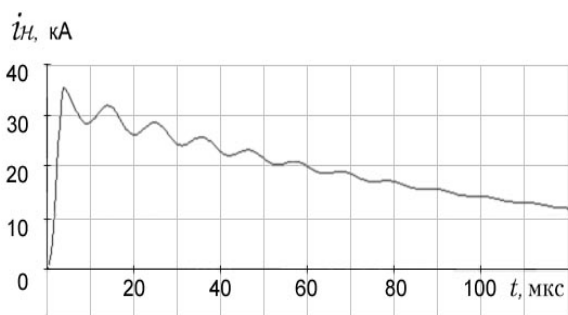


Рисунок 4 – Расчетный ток $i_H(t)$ в RL-нагрузке генератора ГБИТМ

Для проверки полученных расчетных данных на экспериментальной базе НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» были проведены соответствующие высоковольтные исследования. В состав высоковольтного генератора токов молнии входили: ГИН-3 ($C_e \approx 0,08$ мкФ, $L_H \approx 35$ мкГн, $R_e \approx 2$ Ом), два замыкателя

нагрузки с двумя корректирующими емкостями ($R_{\kappa 1} \approx R_{\kappa 2} \approx 0,1 \text{ Ом}$; $L_{\kappa 1} \approx L_{\kappa 2} \approx 5 \text{ мкГн}$; $C_{\kappa 1} \approx C_{\kappa 2} \approx 20,83 \text{ нФ}$) и RL-нагрузка ($R_n \approx 0,1 \text{ Ом}$, $L_n \approx 14 \text{ мкГн}$).

На рис. 5 приведена экспериментальная кривая тока молнии, измеренного в указанной RL-нагрузке исследуемого высоковольтного генератора ГБИТМ. Согласно рис. 5 при рабочем напряжении ЕНЭ $U_0 = 0,75 \text{ МВ}$ импульсный ток $i_n(t)$ достигает своего амплитудного значения $I_{nm} \approx 37 \text{ кА}$ в момент времени $t_m \approx 3,3 \text{ мкс}$. При этом его длительность, взятая на уровне половины амплитудного значения I_{nm} , равна $\tau_{и0,5} \approx 60 \text{ мкс}$. Необходимо отметить, что при рабочем напряжении $U_0 = 0,75 \text{ МВ}$ исследуемый генератор ГБИТМ работал стабильно, а неуправляемые воздушные стержневые разрядники замыкателей нагрузки P_2 и P_3 срабатывали в момент времени, близкий к моменту достижения током $i_n(t)$ своего максимального значения. Воздушные неуправляемые стержневые разрядники замыкатели RL-нагрузки при указанном рабочем напряжении емкостного накопителя имели рабочие зазоры $S_{21} = S_{31} = 24,5 \text{ см}$.

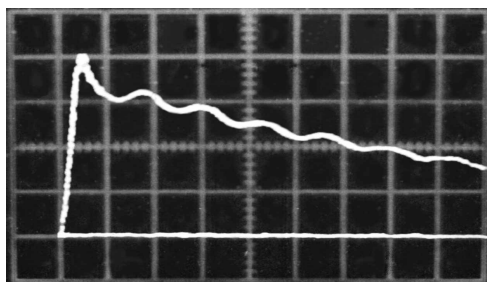


Рисунок 5 – Экспериментальная кривая тока $i_n(t)$ в RL-нагрузке ГБИТМ (масштаб по амплитуде – $9,26 \text{ кА/дел}$; масштаб по времени – 10 мкс/дел)

Проведенные исследования показали, что результаты расчета имеют хорошее совпадение с экспериментальным данным. При этом АВП сформированного в активно-индуктивной нагрузке генератора ГБИТМ импульсного тока $i_n(t)$ соответствует требованиям ГОСТ 30585-98, предъявляемых к испытательным импульсам тока молнии первой степени жесткости [7].

Выводы.

- 1 Теоретически и экспериментально установлено, что разработанные генераторы ГБИТМ с использованием корректирующих емкостей и воздушных стержневых неуправляемых (управляемых) разрядников замыкателей нагрузки могут формировать в технических объектах больших габаритов испытательные аperiodические импульсные токи молнии. Показано, что амплитуда колебаний на спаде импульса тока $i_n(t)$ в ГБИТМ меньше, чем в классическом генераторе БИТ.

Возрастание длительности спада аperiodического импульсного тока $i_n(t)$ может быть объяснено тем, что в разработанных генераторах ГБИТМ рационально используется энергия, накопленная в индуктивностях замыкателей нагрузки L_{31} и L_{32} .

2. Сравнение результатов расчета и эксперимента показывает, что полученные аналитические выражения можно применять для расчета АВП импульсных токов, формируемых ГБИТМ (рис. 2 и рис. 3) в RL- нагрузке.

Список литературы: 1. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391с. 2. *Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С.Комелькова.* – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 3. *Глебов И.А., Рутберг Ф.Г.* Мощные генераторы плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с. 4. Патент України № 6279, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор імпульсних струмів // *Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К.* – Опубл. Бюл. № 5, 16.05.2005. – 4 с. 5. Патент України №15714, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор великих імпульсних струмів блискавки // *Баранов М.І., Ігнатенко М.М.* – Опубл. Бюл. № 7, 17.07.2006. – 4 с. 6. *Баранов М.І., Ігнатенко Н.Н.* Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2005. № 49. – С. 3-14. 7. Межгосударственный ГОСТ 30585–98. Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний / Руководитель разработки *В.И.Кравченко.* – Киев: Госстандарт Украины, 1998. – 27 с.

Поступила к редколлегию 24.03.2009.