

М. И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
В. М. ЗИНЬКОВСКИЙ, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;
Н. Н. ИГНАТЕНКО, канд. техн. наук, зав. сектором, НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ ПОДЖИГА В МОЩНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ МОЛНИИ С КРОУБАР-ЗАМЫКАТЕЛЯМИ НАГРУЗКИ

Запропонована методика вибору в генераторах великих імпульсних струмів блискавки (ГВІСБ) електричних параметрів $L_n C_n$ - кіл керування. Показано, що за допомогою $L_n C_n$ - кіл керування спрацювання керованих повітряних стержньових розрядників кроубар-замикачів навантаження в генераторах ГВІСБ відбувається в момент досягнення струмом у RL - навантаженні свого максимального значення.

Procedure for choice of electric parameters of $L_n C_n$ - control circuits in generators of high pulsed currents of lightning (GHPCL) is proposed. It was shown that, with help of $L_n C_n$ - control circuits, operation of controlled air rod dischargers of crowbar-closers load in GHPCL generator occurs in the moment when current in RL - load reaches his maximal value.

Введение. Повышение стабильности работы генераторов больших импульсных токов молнии (ГБИТМ) при рабочих напряжениях порядка 1 МВ является важной и актуальной научно-технической задачей. В последние годы в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был разработан мощный генератор ГБИТМ, работающий при рабочих напряжениях емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) до 1,7 МВ [1,2]. Схема замещения такого генератора ГБИТМ с применением управляемых воздушных стержневых разрядников атмосферного давления замыкателей RL - нагрузки показана на рис. 1. В указанном генераторе импульсных токов напряжение поджига управляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL - нагрузки формируют $L_n C_n$ - цепи, подключенные к части конденсаторов, последовательное соединение которых образует корректирующие емкости $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2}$ [2]. Работает данный ГБИТМ следующим образом: после срабатывания разрядника P_1 ЕНЭ генератора разряжается на электрические цепи замыкателей и RL - нагрузку. Импульсное напряжение, снимаемое с части последовательно соединенных высоковольтных конденсаторов $C_{1\kappa} = C_{2\kappa} = \dots = C_{12\kappa}$ и $C_{13\kappa} = C_{14\kappa} = \dots = C_{24\kappa}$, образующих в рассматриваемом ГБИТМ корректирующие емкости $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2}$, дифференцируется двумя высоковольтными $L_n C_n$ - цепями, имеющими емкости $C_{n1} = C_{n2}$ и индуктивности $L_{n1} = L_{n2}$. Импульсное напряжение поджига $u_{n1}(t) = u_{n2}(t)$, формируемое индуктивностями $L_{n1} = L_{n2}$, через разделительные емкости $C_{p1} = C_{p2}$ подается на поджигающие электроды управляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL - нагрузки. Электрический пробой воздушных промежутков поджига, имеющих длину $S_{n1} = S_{n2}$, является инициирующим фактором, способствующим срабатыванию управляемых воздушных стержневых разрядников кроубар-замыкателей RL - нагрузки в ГБИТМ (рис. 1). Ра-

ациональный выбор электрических параметров $L_n C_n$ - цепей поджига позволяет скорректировать момент времени, при котором происходит пробой воздушных поджигающих промежутков и основных промежутков разрядников P_2 и P_3 . Это позволяет добиться стабильного срабатывания воздушных управляемых стержневых разрядников замыкателей в момент достижения током в активно-индуктивной нагрузке своего максимального значения. Поэтому разработка методики, позволяющей осуществлять рациональный выбор электрических параметров $L_n C_n$ - цепей поджига в генераторах ГБИТМ, является целью данной работы.

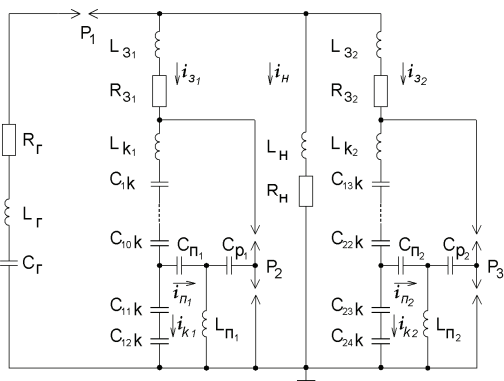


Рисунок 1 – Схема замещения ГБИТМ с применением управляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 в кроубар-замыкателях RL - нагрузки

Выбор электрических параметров $L_n C_n$ - цепей поджига в генераторе ГБИТМ. При выборе в генераторе ГБИТМ с кроубар-замыкателями RL - нагрузки параметров цепей поджига полагаем, что индуктивность конденсаторов корректирующих емкостей $C_{k1} = C_{k2}$, к которым производится подключение $L_n C_n$ - цепей, незначительна и ею при проведении расчетов можно пренебречь. При отсутствии срабатывания разрядников P_2 и P_3 импульсное напряжение их поджига $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ может быть представлено в таком виде:

$$u_{n2}(t) = u_{n3}(t) = L_{n1} \frac{di_{n1}}{dt} = L_{n2} \frac{di_{n2}}{dt}, \quad (1)$$

где $i_{n1}(t) = i_{n2}(t)$ – импульсные токи в $L_n C_n$ - цепях поджига генератора ГБИТМ.

Пренебрегая влиянием активных сопротивлений электрических цепей поджига в ГБИТМ, запишем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} i_{31} - i_{n1} - i_{k1} = 0; & i_{31} - i_{32} = 0; & i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ \frac{m}{C_{1k}} \int_0^t i_{k1} dt - \frac{1}{C_{n1}} \int_0^t i_{n1} dt - L_{n1} \frac{di_{n1}}{dt} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $i_{k1} = i_{k2}$ – импульсные токи в той части корректирующих емкостей, к кото-

рым производится подключение цепи поджига; m – число конденсаторов в корректирующих емкостях $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2}$, к которым подключены $L_n C_n$ - цепи.

Представив (2) в операторном виде по Карсону, получим операторное выражение для изображений токов в цепи замыкателей нагрузки:

$$i_{31}(p) = i_{32}(p) = i_{n1}(p) \frac{C_{\kappa 1} L_{n1}}{m} [p^2 + \omega_n^2 + \omega_\kappa^2] = i_{n1}(p) \frac{C_{\kappa 1} L_{n1}}{m} (p^2 + r^2), \quad (3)$$

где $\omega_n = (C_{n1} L_{n1})^{-0.5} = (C_{n2} L_{n2})^{-0.5}$ – собственная круговая частота цепей поджига; $\omega_\kappa = m^{0.5} (C_{n1} L_{n1})^{-0.5} = m^{0.5} (C_{n2} L_{n2})^{-0.5}$ – круговая частота электрических цепей, образованных индуктивностями $L_{n1} = L_{n2}$ и частью конденсаторов корректирующей емкости $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2}$ в данном генераторе токов молнии; $r = (\omega_n^2 + \omega_\kappa^2)^{0.5}$.

Применив полученные выражения, представим изображение напряжений поджига $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ в следующем виде:

$$u_{n2}(p) = u_{n3}(p) = \frac{c_0 U_0 p^4}{(p^2 + a_1^2)(p^2 + b_1^2)(p^2 + r^2)}, \quad (4)$$

где $c_0 = mL_n C_{1\kappa}^{-1} (2L_n + L_{s1} + L_{\kappa 1})^{-1} [L_z + L_n (L_{s1} + L_{\kappa 1}) (2L_n + L_{s1} + L_{\kappa 1})^{-1}]^{-1}$; a_1, b_1 – собственные круговые частоты колебаний импульсного тока в ГБИТМ [3,4].

Импульсное напряжение поджига $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$, соответствующее его операторному изображению (4), находим из известных таблиц оригиналов [5]:

$$u_{n2}(t) = u_{n3}(t) = \frac{U_0 c_0}{(b_1^2 - a_1^2)} \left[\frac{r^2 \cos(rt) - a_1^2 \cos(at)}{r^2 - a_1^2} - \frac{b_1^2 \cos(bt) - r^2 \cos(rt)}{b_1^2 - r^2} \right]. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что если электрические параметры сильноточного разрядного контура ГБИТМ удовлетворяют условию $3a_1 \approx b_1$, то в момент времени достижения импульсным током в нагрузке $i_n(t)$ своего максимального значения, равном $t_m \approx \pi(2a_1)^{-1} \approx 3\pi(2b_1)^{-1}$, амплитуду напряжения поджига можно определить из следующего приближенного соотношения:

$$u_{n2}(t_m) = u_{n3}(t_m) = U_{n2} = U_{n3} \approx \frac{U_0 c_0 r^2 \cos(rt_m)}{(b_1^2 - r^2) \cdot (r^2 - a_1^2)}. \quad (6)$$

Согласно (6) импульсное напряжение $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ достигает своего первого отрицательного максимального значения, вызывающего пробой промежутков поджига, при выполнении условия вида $\cos(rt_m) = -1$, где $r = 2a_1$. При этом амплитуду напряжения поджига можно определить из выражения:

$$U_{n2} = U_{n3} \approx -\frac{U_0 c_0 r^2}{(b_1^2 - r^2) \cdot (r^2 - a_1^2)} = -\frac{4U_0 c_0}{15a_1^2}. \quad (7)$$

Воспользовавшись соотношением $\cos(rt_m) = -1$, запишем приближенное выражение, позволяющее производить выбор электрических параметров $L_n C_n$ - цепей поджига в мощных генераторах ГБИТМ согласно рис. 1:

$$(C_{n1} L_{n1})^{-1} + m \cdot (C_{1\kappa} L_{n1})^{-1} \approx 4a_1^2. \quad (8)$$

Проведем оценочный расчет электрических параметров $L_n C_n$ - цепей поджига в генераторе ГБИТМ, в разрядной цепи которого используется генератор импульсных напряжений на 3 МВ (ГИН-3), собственные электрические пара-

метры которого были равны: $C_T \approx 0,08$ мкФ, $L_T \approx 35$ мкГн, $R_T \approx 2$ Ом. Отметим, что цепи кроубар-замыкателей и RL -нагрузки в данном генераторе тока молнии имеют следующие электрические параметры: $R_{31} \approx R_{32} \approx 0,1$ Ом; $L_{31} \approx L_{32} \approx 5$ мкГн; $L_{K1} \approx L_{K2} \approx 5$ мкГн; $C_{K1} \approx C_{K2} \approx 20,83$ нФ; $R_H \approx 0,1$ Ом; $L_H \approx 14$ мкГн; $a_1 = 0,4927 \cdot 10^6$ с⁻¹; $b_1 = 1,2962 \cdot 10^6$ с⁻¹. Указанные корректирующие емкости выполнены в виде последовательного соединения 12 конденсаторов типа ИК-100-0,25. Приняв $m = 2$, положим, что конденсаторы $C_{n1} = C_{n2}$ имеют электрическую емкость, равную $C_{n1} = C_{n2} = 50$ нФ (два последовательно соединенных высоковольтных конденсатора типа ИМН-100-0,1). Применяв выражение (8), находим, что значение индуктивностей $L_{n1} = L_{n2}$ в нашем случае будет приблизительно равно $L_{n1} = L_{n2} \approx 28,56$ мкГн. Выбрав $L_{n1} = L_{n2} = 30$ мкГн и $C_{n1} = C_{n2} = 50$ нФ, оценим амплитуду импульсного напряжения поджига $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ для управляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 кроубар-замыкателей нагрузки при рабочем напряжении генератора ГИН-3, равном $U_0 = 0,7$ МВ. Тогда с учетом выражения (7) находим, что амплитуда напряжения поджига в исследуемом генераторе ГБИТМ будет приблизительно равна $U_{n2} = U_{n3} \approx -60,53$ кВ. Выбор длины промежутков в управляемых воздушных стержневых разрядниках замыкателей нагрузки ГБИТМ проводим по инженерной методике, приведенной в [4]. Расчеты на ПЭВМ и проведенные эксперименты показывают, что в данном генераторе импульсных токов молнии при выбранных электрических параметрах цепей поджига импульсное напряжение $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ достигает своего отрицательного максимального значения при $t_n \approx 3,85$ мкс и имеет амплитуду, равную $U_{n2} = U_{n3} \approx -64$ кВ. Приведенная выше инженерная методика была применена и для приближенного расчета электрических параметров ГБИТМ, который в своем составе содержал модернизированный генератор импульсных напряжений на 3 МВ (ГИН-3). При проведении модернизации генератора ГИН-3 нами была увеличена его электрическая емкость C_T в «ударе», которая после проведения соответствующих монтажно-демонтажных работ в разрядной цепи этого генератора стала иметь значение, равное $C_T \approx 0,13$ мкФ. Увеличение емкости C_T генератора ГИН-3 было достигнуто путем параллельного подключения к его базовым конденсаторам типа КБКГИ-125/1,28 импульсных конденсаторов типа ИК-100-0,4. На рис. 2 приведена осциллограмма импульсного тока $i_n(t)$ имитированной молнии, измеренного в RL -нагрузке ($R_H \approx 0,1$ Ом; $L_H \approx 14$ мкГн) при применении в ГБИТМ модернизированного генератора ГИН-3 и корректирующих емкостей $C_{K1} \approx C_{K2} \approx 20,83$ нФ. В данном генераторе больших импульсных токов были применены $L_n C_n$ -цепи поджига, которые имели следующие электрические параметры: $C_{n1} = C_{n2} = 50$ нФ, $L_{n1} = L_{n2} = 30$ мкГн, $C_{p1} = C_{p2} = 50$ нФ. Согласно данным рис. 2 разрядный импульсный ток $i_n(t)$ искусственной молнии в принятой электрической нагрузке имел следующие амплитудно-временные параметры: амплитуду $I_{nm} \approx 103,4$ кА; длительность фронта $\tau_\phi \approx 2,2$ мкс; длительность импульса $\tau_{n0,5} \approx 60$ мкс. Этот импульсный ток $i_n(t)$ в нагрузке был получен при рабочем напряжении генератора ГИН-3,

равном $U_0 \approx 1,75$ МВ. Данное рабочее напряжение в ГБИТМ соответствует зарядному напряжению каскада (ступени) его генератора ГИН-3, равному $U_3 \approx \pm 58$ кВ. При проведении указанных экспериментов длины основных и поджигающих разрядных промежутков в управляемых воздушных стержневых разрядниках кроубар-замыкателей RL -нагрузки были установлены соответственно равными $S_2 = S_3 = 0,645$ м и $S_{2n} = S_{3n} = 0,132$ м, что хорошо согласуется с результатами приближенных расчетов, представленных в [4].

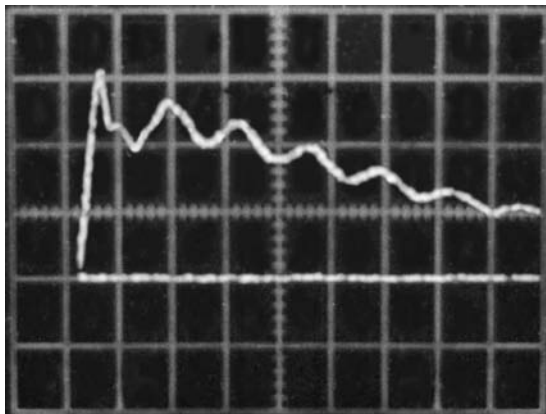


Рисунок 2. Экспериментальная кривая тока $i_n(t)$ искусственной молнии в RL -нагрузке ГБИТМ с модернизированным генератором импульсных напряжений ГИН-3 (масштаб по амплитуде – 35,1 кА/клетка; масштаб по времени – 10 мкс/клетка)

Выводы. Разработана инженерная методика для рационального выбора электрических параметров $L_n C_n$ -цепей поджига воздушных кроубар-замыкателей нагрузки в мощных генераторах ГБИТМ, формирующих большие импульсные токи искусственной молнии. Экспериментально показано, что описанный генератор импульсного тока искусственной молнии с управляемыми воздушными стержневыми разрядниками кроубар-замыкателей нагрузки может стабильно работать в мегавольтном диапазоне выходных напряжений.

Список литературы: 1. 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. 2. 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. 3. Ігнатенко Н.Н. Расчет переходных процессов в генераторах тока молнии с замыкателями нагрузки // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 11. – С. 38-45. 4. Ігнатенко Н.Н. Выбор длины воздушных промежутков разрядников замыкателей нагрузки в кроубар-генераторах импульсного тока молнии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 64-69. 5. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 466 с.

Поступила в редколлегию 28.03.2011