

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

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВЗРЫВАЮЩИХСЯ ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ РАЗРЯДНИКОВ ЗАМЫКАТЕЛЯ НАГРУЗКИ В ГЕНЕРАТОРЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА МОЛНИИ**

Наведено розрахункові і експериментальні результати застосування в схемі замкача  $RL$ -навантаження генератора великих імпульсних струмів блискавки на напругу до 1,3 МВ електрично вибухаючих провідників.

Are the calculation and experimental results of application in the chart of switchboard  $RL$ -loading generator larimpulsive the currents of lightning on voltage to 1,3 MV of electric bursting explorers.

**Введение.** В настоящее время в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработан и создан генератор больших импульсных токов молнии (ГБИТМ), содержащий мощный емкостной накопитель энергии (ЕНЭ) и два параллельно работающих замыкателя  $RL$ -нагрузки с двумя неуправляемыми воздушными стержневыми разрядниками атмосферного давления и двумя корректирующими емкостями  $C_{к1} = C_{к2}$  [1,2]. Данный ГБИТМ предназначен для проведения испытаний на молниестойкость технических объектов в соответствии с требованиями ГОСТ 30585-98 [3], электрические параметры которых по активному сопротивлению не превышают 0,1 Ом, а по индуктивности – 14 мкГн [2]. К определенным недостаткам в работе указанного генератора импульсных токов молнии следует отнести недостаточную стабильность момента срабатывания неуправляемых воздушных стержневых разрядников его замыкателей  $RL$ -нагрузки при выходном рабочем напряжении ЕНЭ от 0,75 до 1,3 МВ. С целью повышения эффективности работы неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей  $RL$ -нагрузки в ГБИТМ авторами было предложено использовать импульсное перенапряжение, возникающее в разрядной цепи ЕНЭ при электрическом взрыве в ней металлического проводника [4–6]. Схема замещения генератора импульсных токов молнии с электрически взрывающимися проводниками (ЭВП) представлена на рис. 1. Работает данный генератор следующим образом. При срабатывании отсекающего разрядника  $P_1$  электрическая емкость накопителя  $C_r$  генератора начинает разряжаться на активно-индуктивную нагрузку, формируя в ней фронт аperiodического импульса тока  $i_n(t)$  молнии. В момент достижения током  $i_n(t)$  своего максимального значения происходит электрический взрыв тонкого медного ЭВП. Импульсное перенапряжение, возникающее на ЭВП, воздействует на воздушные разрядники замыкателей нагрузки  $P_2$  и  $P_3$ , что и определяет их гарантированное срабатывание в нужный момент времени.

При этом в  $RL$ -нагрузке генератора ГБИТМ формируется спад аperiodического импульса тока молнии. Необходимо отметить, что для уменьшения шунтирующего влияния ЭВП на амплитуду импульсного тока молнии  $i_n(t)$  в составе цепи ЭВП разработанного ГБИТМ был применен токоограничивающий резистор  $R_T$  [6]. Практический интерес при использовании такого ГБИТМ представляет техническая задача, связанная с определением длины  $l_{ВП}$  и сечения  $S_{ВП}$  используемого в нем ЭВП, а также активного сопротивления токоограничивающего резистора  $R_T$  для всего диапазона изменения рабочего напряжения (от 0,75 до 1,3 МВ) ГБИТМ. Поэтому разработка инженерной методики расчета электрических параметров цепи с ЭВП и экспериментальная проверка работоспособности указанного генератора ГБИТМ (см. рис. 1) в указанном диапазоне его выходного рабочего напряжения (0,75–1,3 МВ) и является целью данной работы.

**1. Расчет длины, сечения ЭВП и активного сопротивления токоограничивающего резистора в генераторе ГБИТМ.** При решении поставленной задачи будем исходить из того, что электрический взрыв тонкого проводника в цепи ГБИТМ должен происходить в момент времени  $t_6$ , близкий к моменту достижения током нагрузки  $i_n(t)$  своего максимального значения. Задав диаметр  $d_{ВП}$  ЭВП и зная момент времени  $t_6$ , можно определить максимальное значение  $I_{6нт}$  тока  $i_{ВП}(t)$  в цепи ГБИТМ, вызывающее электровзрыв тонкого проводника. Согласно [7–9] для величины  $I_{6нт}$  приближенно имеем:

$$I_{6нт} = S_{ВП} (0,07\gamma_0 W_c / t_6)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $W_c$  – среднее значение удельной энергии взрывообразного разрушения проводника (для медного проводника  $W_c = 3,69 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> [8]);  $\gamma_0$  – удельная электропроводность материала проводника до воздействия на него тока (для меди при температуре воздушной среды  $T_0 = 20$  °С  $\gamma_0 = 5,81 \cdot 10^7$  См/м [8]).

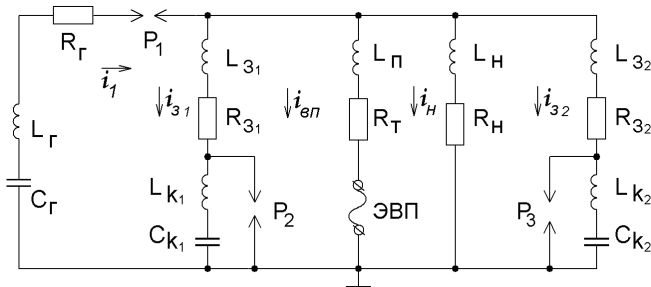


Рисунок 1 – Схема замещения генератора ГБИТМ с использованием неуправляемых воздушных стержневых разрядников  $P_2$  и  $P_3$  замыкателей  $RL$ -нагрузки, корректирующих емкостей  $C_{к1} = C_{к2}$ , электрической цепи с ЭВП и резистором  $R_T$

Проведем далее оценочный расчет значения суммы активных сопротивлений  $(R_T + R_{ВП})$  в разрядном контуре исследуемого генератора ГБИТМ. При этом воспользуемся следующим приближенным выражением:

$$(R_T + R_{ВП}) = a_1 (I_{нм}^2 I_{енм}^2 L_n^2 - L_{П}^2)^{0,5}, \quad (2)$$

где  $R_{ВП}$  – активное сопротивление ЭВП в момент времени, непосредственно предшествующий его электровзрыву;  $a_1$  – круговая частота в схеме генератора ГБИТМ без использования цепи с ЭВП;  $L_{П}$  – полная индуктивность цепи с ЭВП;  $I_{нм}$  – максимальное значение импульсного тока  $i_n(t)$  в  $RL$ -нагрузке рассматриваемого генератора импульсного тока молнии.

В [10] было показано, что величину активного сопротивления тонкого медного ЭВП в момент времени, непосредственно предшествующий его электровзрыву, можно оценить из следующего приближенного выражения:

$$R_{ВП} = \rho_{\kappa} l_{ВП} S_{ВП}^{-1}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\kappa} = [9,1 + 9 \cdot 10^{-3}(T_{\kappa} + 273,16)] \cdot 10^{-8} = 34,84 \cdot 10^{-8}$  Ом  $\cdot$  м – удельное электрическое сопротивление меди при температуре ее кипения, равной  $T_{\kappa} = 2587$  °С [11].

Применив (3), определим активное сопротивление медного проводника, имеющего диаметр  $d_{ВП} = 0,2$  мм и длину  $l_{ВП} = 1$  м в момент времени  $t_{\theta}$ , практически соответствующий его электровзрыву. Для указанных геометрических размеров активное сопротивление  $R_{ВП}$  будет приближенно равным 11,09 Ом. Используя (1)–(3), проведем оценочные расчеты искомых электрических параметров в исследуемом ГБИТМ, в составе которого в качестве ЕНЭ применен накопитель генератора ГИН-3 ( $C_{Г} = 0,08$  мкФ,  $L_{н} = 35$  мкГн,  $R_{Г} = 2$  Ом). Цепи замыкателей и  $RL$ -нагрузка в данном генераторе токов молнии 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;  $R_{н} = 0,1$  Ом;  $L_{н} = 14$  мкГн;  $a_1 = 0,4927 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>. При отсутствии цепи ЭВП и рабочем напряжении ГИН-3  $U_0 = 700$  кВ максимальное расчетное значение импульсного тока  $i_n(t)$  в  $RL$ -нагрузке данного ГБИТМ будет равным  $I_{нм} = 35,87$  кА. Согласно (1) расчетная амплитуда импульсного тока  $i_{ен}(t)$ , необходимая для электровзрыва выbranного медного проводника диаметром  $d_{ВП} = 0,2$  мм в момент времени  $t_{\theta} = 3,7$  мкс, будет равна  $I_{енм} = 6,27$  кА. Задав индуктивность  $L_n = 12$  мкГн, из (2) находим, что сумма активных сопротивлений  $(R_T + R_{ВП})$  в разрядном контуре генератора ГБИТМ будет приближенно равна 33,6 Ом. Уточняющие расчеты на ПЭВМ показывают, что при амплитуде тока  $I_{енм} = 6,27$  кА численное значение суммы активных сопротивлений  $(R_T + R_{ВП})$  в цепи ЭВП будет равно 27,35 Ом. Полагая  $R_T = 24$  Ом, из (3) находим, что электрически взрываемый медный проводник диаметром  $d_{ВП} = 0,2$  мм должен иметь расчетную длину, приближенно равную  $l_{ВП} = 0,3$  м.

Применив предложенную методику, проведем расчет длины ЭВП и величины активного сопротивления  $R_T$  в генераторе ГБИТМ (см. рис.1) при разных рабочих напряжениях его ЕНЭ, равных:  $U_{01} = 750$  кВ,  $U_{02} = 1$  МВ,

$U_0 = 1,3$  МВ. Длину  $S_2 = S_3$  разрядных промежутков неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателя  $RL$ -нагрузки определим в нашем случае по методике, приведенной в [12]. Данные этого расчета сведены в табл.1.

Таблица 1 – Расчетные параметры цепи с ЭВП и  $R_T$  в генераторе ГБИТМ

Рабочее напряжение ГИН-3 $U_0$ , кВ	Амплитуда тока в нагрузке $I_{нт}$ , кА	Длина разрядного промежутка $S_2 = S_3$ , см	Длина ЭВП $l_{вп}$ , см	Амплитуда тока в цепи ЭВП $I_{эмт}$ , кА	Резистор $R_T$ , Ом
750	32,92	20,8	49	6,27	24
1000	45,23	30,7	31,6	6,27	40
1300	60,57	41,6	28	6,27	56

**2. Результаты экспериментального исследования электромагнитных процессов в разрядной цепи генератора ГБИТМ.** Проверка полученных выше расчетных данных проводилась на экспериментальной базе НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», где и был создан генератор ГБИТМ с применением ЭВП в его разрядной цепи. В состав исследуемого ГБИТМ входили: генератор ГИН-3, два замыкателя  $RL$ -нагрузки с неуправляемыми воздушными стержневыми разрядниками  $P_2$  и  $P_3$ , параллельно которым были включены емкости  $C_{к1} = C_{к2} = 20,83$  нФ и активно-индуктивная нагрузка ( $R_n = 0,1$  Ом;  $L_n = 14$  мкГн). Электрическая цепь, содержащая ЭВП и токоограничивающий резистор  $R_T$ , была подключена параллельно  $RL$ -нагрузке. Токоограничивающий резистор  $R_T$  был выполнен в виде последовательно соединенных секций из резисторов типа ТВО–60–24 Ом, каждая из которых была выполнена из шести параллельно соединенных аналогичных резисторов суммарным активным сопротивлением в 4 Ом. Указанная секционная конструкция резистора  $R_T$  позволяла при проведении экспериментов выбирать его значение согласно данным, приведенным в табл. 1. В генераторе ГБИТМ индуктивность цепи подвода к ЭВП была определена цифровым измерителем индуктивности типа Е7-8 и принята равной  $L_{п} = 12$  мкГн. Эксперименты с указанным ГБИТМ были проведены при следующих значениях рабочего напряжения генератора ГИН-3:  $U_{01} = 750$  кВ,  $U_{02} = 1000$  кВ и  $U_{03} = 1300$  кВ. В качестве ЭВП был выбран медный провод марки ПЭВ-2 с наружным диаметром  $d_{вп} = 0,2$  мм. Межэлектродное расстояние  $S_2 = S_3$  разрядников  $P_2$  и  $P_3$  было установлено согласно расчетным данным, приведенным в табл. 1. В процессе проведения опытных работ на генераторе ГБИТМ изменялась длина ЭВП  $l_{вп}$  и длины разрядных промежутков  $S_2 = S_3$  таким образом, чтобы пробой неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей  $RL$ -нагрузки происходил в момент времени, примерно равный  $t_e = (3,5–3,8)$  мкс. Результаты экспериментального исследования работы генератора

ГБИТМ с использованием в цепи ЭВП электрически взрывааемых тонких медных проводников приведены ниже в табл. 2.

Таблица 2. –Результаты экспериментального исследования работы генератора ГБИТМ с электрической цепью ЭВП и резистором  $R_T$

Рабочее напряжение ГИН-3 $U_0$ , кВ	Амплитуда тока в нагрузке $I_{nm}$ , кА	Длина разрядного промежутка $S_2 = S_3$ , см	Длина ЭВП $l_{ВП}$ , см	Амплитуда тока в цепи ЭВП $I_{вмп}$ , кА	Резистор $R_T$ , Ом
750	31,5	21,2	55	6,27	24
1000	44,6	31	32	6,27	40
1300	60	41,3	30	6,27	56

На рис. 2 представлена осциллограмма импульсного тока  $i_n(t)$  в  $RL$ -нагрузке рассматриваемого генератора ГБИТМ. При этом измерение тока  $i_n(t)$  в нагрузке созданного ГБИТМ было проведено при рабочем напряжении генератора ГИН-3, равном  $U_{01} = 750$  кВ. Согласно рис. 2 импульсный ток  $i_n(t)$  достигает своего амплитудного значения  $I_{nm} = 32$  кА примерно в момент времени  $t_{nm} = 3,3$  мкс. При этом его длительность, взятая на уровне половины амплитуды тока  $I_{nm}$ , равна около  $\tau_{0,5} = 60$  мкс. Амплитудно-временные параметры сформированного в  $RL$ -нагрузке ГБИТМ соответствуют испытаниям по 1-ой степени жесткости согласно ГОСТ 30585-98 [3]. Отметим, что применение ЭВП в разрядном контуре ГБИТМ повышает стабильность работы неуправляемых воздушных стержневых разрядников  $P_2$  и  $P_3$  замыкателей  $RL$ -нагрузки. Однако, при этом снижается электрический КПД  $\eta_p$  разрядной цепи данного ГБИТМ. Численное значение величины  $\eta_p$  в нашем случае оказывается примерно равным  $\eta_p = 0,32$  (без ЭВП значение  $\eta_p$  составляет около 0,44).

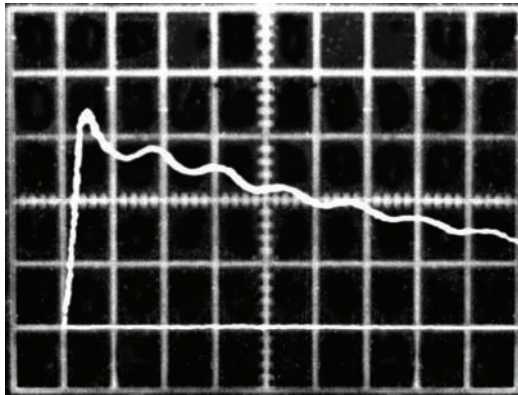


Рисунок 2 – Осциллограмма импульсного тока молнии  $i_n(t)$  в  $RL$ -нагрузке генератора ГБИТМ при использовании в его разрядной цепи ЭВП и резистора  $R_T$  (масштаб по амплитуде – 9,26 кА/дел; масштаб по времени – 10 мкс/дел)

## Выводы

- 1 Показано, что усовершенствованный генератор ГБИТМ на рабочее напряжение до 1,3 МВ с применением цепи ЭВП может надежно формировать испытательные импульсы тока молнии в крупногабаритных объектах.
- 2 Предложена методика выбора электрических параметров ЭВП (длины и его сечения) и токоограничивающего резистора в созданном генераторе импульсного тока молнии. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность данной методики и возможность ее применения при разработке генераторов ГБИТМ мегавольтного диапазона на импульсные токи до 100 кА.

**Список литературы:** 1. Патент України №63747, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор імпульсних струмів // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. №8, 15.08.2005. – 4 с. 2. Баранов М.І., Ігнатенко Н.Н. Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 49. – С. 3–14. 3. Межгосударственный ГОСТ 30585-98. Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний. – Киев: Госстандарт Украины, 1998. – 27 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 № 8362, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор великих імпульсних струмів // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. № 8, 15.08.2005. – 4 с. 6. Патент України № 12376, МПК НОЗКЗ/53. Установа для отримання імпульсного струму блискавки // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. № 2, 15.02.2006. – 4 с. 7. Баранов М.І. Упрощенная математическая модель электрического взрыва проводников под воздействием больших импульсных токов // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 3. – С. 59–64. 8. Баранов М.І., Ігнатенко Н.Н., Колобовський А.К. Экспериментально-аналитическое определение удельной энергии электротеплового разрушения медных проводников под воздействием больших импульсных токов // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 70–73. 9. Баранов М.І. Приближенный расчет времени до электровзрыва проводника под воздействием больших импульсных синусоидальных токов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 5. – С. 3–7. 10. Столович Н.Н., Милицкая Н.С. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов. – Минск: Наука и техника, 1975. – 160 с. 11. Баранов М.І., Ігнатенко Н.Н. Приближенный расчет времени электрического взрыва проводников под воздействием больших импульсных токов // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 6. – С. 14–18. 12. Ігнатенко Н.Н. Выбор длины воздушных промежутков разрядников замыкателей нагрузки в кробоар-генераторах импульсного тока молнии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 39. – С. 64–69.

*Поступила в редколлегию 19.03.2010*