

Н.Н.ИГНАТЕНКО, канд. техн. наук, зав. сектором, НТУ «ХПИ»

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИСКРОВОГО КАНАЛА В ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ РАЗРЯДНИКОВ ЗАМЫКАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ МОЛНИИ

Запропоновано наближений метод розрахунку в високоефективних генераторах великих імпульсних струмів блискавки (ГВІСБ) швидкості руху іскрового каналу, який розвивається в робочих проміжках некерованих повітряних стержневих розрядників замкачів RL-навантаження під дією високої імпульсної напруги.

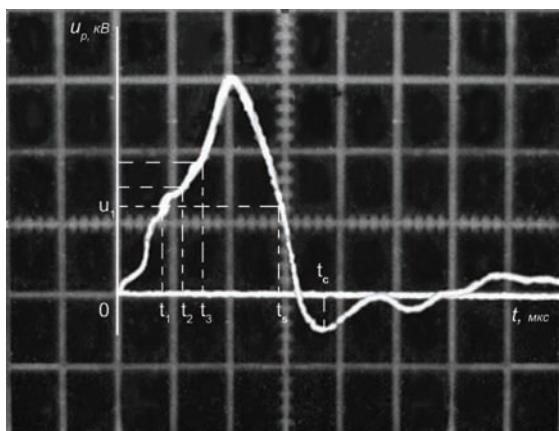
For high-efficiency generators of high pulsed currents of lightning (GNPCL), an approximate method of calculation of speed of motion of spark channel which is developing in working gaps of uncontrolled air rod dischargers of RL-load closers under high pulsed voltage is proposed.

1 Введение. В последнее время в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработаны высокоэффективные генераторы больших импульсных токов молнии (ГБИТМ). Указанные генераторы ГБИТМ позволяют отказаться от применения мощных генераторов поджигающих импульсов и достаточно стабильно работают при рабочих напряжениях емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) до 1МВ [1-3]. Схема замещения высоковольтного генератора ГБИТМ с применением неуправляемых воздушных (атмосферного давления) стержневых разрядников замыкателей RL-нагрузки и его работа описана в [3-4]. Для рационального выбора длины разрядных промежутков неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей нагрузки в указанных генераторах ГБИТМ был использован метод «равных площадей» [5-6]. Согласно [6], метод «равных площадей» может быть применен для определенного участка конкретной вольт-секундной характеристики (ВСХ) неуправляемого воздушного стержневого разрядника замыкателя нагрузки. Данное утверждение позволяет разработать методику расчета, при помощи которой можно оценить скорости движения искрового канала в разрядниках замыкателей нагрузки мощных генераторов ГБИТМ, что представляет определенный теоретический и практический интерес.

Таким образом, цель работы состоит в разработке приближенного метода расчета скорости движения искрового канала, который развивается в рабочих промежутках неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей RL-нагрузки ГБИТМ под действием высокого напряжения.

2. Решение задачи. На рисунке приведена типовая форма импульсного напряжения $u_p(t)$, действующего на неуправляемые воздушные стержневые разрядники замыкателей нагрузки генератора ГБИТМ. На данном рисунке

приняты следующие обозначения: U_I – амплитуда импульсного напряжения $u_p(t)$, при которой в воздушных зазорах неуправляемых стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL-нагрузки ГБИТМ появляются эффективные электроны, вызывающие начало развития искрового стримерного канала; t_1 – время, соответствующее амплитудному значению напряжения U_1 , t_s – момент времени, при котором движущийся искровой канал достигает противоположного электрода; t_c – время, при котором происходит электрический пробой воздушных промежутков разрядников замыкателей RL-нагрузки генератора ГБИТМ. Для разработанных генераторов тока молнии $t_c \approx 3,7$ мкс; t_2 , t_3 , ... t_n – моменты времени, соответствующие амплитудным значениям U_2 , U_3 , ... U_n импульсного напряжения $u_p(t)$.



Типовая форма ВСХ импульсного напряжения $u_p(t)$ на разрядниках замыкателях нагрузки генератора ГБИТМ

При решении настоящей задачи участок ВСХ импульсного напряжения $u_p(t)$, ограниченный моментами времени t_1 и t_s (рис. 1), был разбит на n временных интервалов, равных $\Delta t = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \dots = (t_s - t_1)/n$. Скорость движения искрового канала исследуемого высоковольтного разряда для каждого временного интервала Δt принималась постоянной и была соответственно равна $v_1, v_2, \dots, v_n$. При принятом допущении можно определить длины участков развивающегося искрового канала импульсного разряда, которые для указанного временного интервала будут соответственно равны: $x_1 = v_1 \Delta t$; $x_2 = v_2 \Delta t$; $x_n = v_n \Delta t$. Для нахождения длины участков $x_1; x_2; \dots; x_n$ исследуемого искрового канала высоковольтного разряда воспользуемся основным соотношением метода «равных площадей» [5-6]:

$$\frac{A_1}{x_1} = \frac{A_2}{x_2} = \dots = \frac{A_n}{x_n} = c = \text{const}, \quad (1)$$

где

$$A_1 = \int_{t_1}^{t_2} [u_p(t) - U_1] dt, \quad A_2 = \int_{t_2}^{t_3} [u_p(t) - U_1] dt, \dots, \quad A_n = \int_{t_s - \Delta t}^{t_s} [u_p(t) - U_1] dt,$$

– соответствующие площади участков ВСХ (рис. 1).

При рабочей длине $S_{2n} = S_{3n}$ воздушных промежутков неуправляемых разрядников замыкателей нагрузки генератора тока молнии значение константы c можно найти из соотношения:

$$A_1 + A_2 + \dots + A_n = \int_{t_1}^{t_s} [u_p(t) - U_1] dt = c S_{2n}, \quad (2)$$

где $U_1 \approx 5 + k_E^{-1} S_{2n}$; $k_E = 0,19$ см/кВ [4,7].

В [4] показано, что форма импульсного напряжения $u_p(t)$, действующего на разрядники замыкателей нагрузки до момента их электрического пробоя, может быть представлена в виде:

$$u_p(t) = B_1 U_0 \cos(a_1 t) - B_2 U_0 \cos(b_1 t), \quad (3)$$

где B_1, B_2 – безразмерные коэффициенты, определяемые электрическими параметрами схемы замещения генератора ГБИТМ; a_1, b_1 – собственные круговые частоты колебаний в ГБИТМ [3,4]; U_0 – рабочее напряжение ЕНЭ в исследуемом генераторе тока молнии.

Определим момент времени t_s . Из выражения (1) следует, что в момент достижения развивающимся искровым каналом импульсного разряда противоположного электрода элемент площади вольт-секундной характеристики A_{n+1} должен стремиться к нулю. Применив метод трапеций для приближенного вычисления значения определенного интеграла [8], запишем выражение для нахождения элемента площади A_{n+1} :

$$A_{n+1} = \int_{t_s}^{t_s + \Delta t} [u_p(t) - U_1] dt \approx 0,5 [u_p(t_s + \Delta t) + u_p(t_s)] \Delta t - U_1 \Delta t = 0. \quad (4)$$

Используя (3) можно показать, что из выражения (4) следует $u_p(t) \approx U_1$, а момент времени t_s может быть приближенно определен как:

$$t_s \approx t_m + t_m - t_1 = 2t_m - t_1, \quad (5)$$

где $t_1 \approx 1,41(U_1/U_0 - B_1 + B_2)^{0,5} (B_2 b_1^2 - B_1 a_1^2)^{-0,5}$ – время появления в рабочих промежутках разрядников замыкателей нагрузки генератора ГБИТМ эффективных электронов [4]; t_m – время, при котором напряжение $u_p(t)$ достигает своей максимальной величины.

Применив полученные выражения, проведем расчет скорости движения искрового канала в воздушных неуправляемых стержневых разрядниках замыкателей нагрузки генератора ГБИТМ. Расчет проводим при рабочем напряжении генератора импульсных напряжений ГИН-3, равном $U_0 = 750$ кВ. В рассматриваемом случае круговые частоты ГБИТМ имеют значения $a_1 = 0,4927 \cdot 10^6$ с⁻¹ и $b_1 = 1,2962 \cdot 10^6$ с⁻¹, а коэффициенты в выражении (3) будут соответственно равны $B_1 = 0,31$ и $B_2 = 0,26$. При указанном рабочем напряжении ЕНЭ, экспериментально установленная длина рабочих зазоров

неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей нагрузки исследуемого генератора тока молнии, была равна $S_{22} = S_{32} = 24,5$ см. Используя (2) и соотношение (5) находим, что в рассматриваемом случае амплитудное значение напряжения $u_p(t_1)$ будет примерно равно $U_1 \approx 134$ кВ. При этом момент времени появления эффективных электронов t_1 и время достижения искровым каналом противоположного электрода t_s , будут соответственно равны $t_1 \approx 0,85$ мкс и $t_s \approx 3,1$ мкс. Применив выражение (2) и проводя интегрирование (3), находим значение константы c , которая в нашем случае будет равна $c = 9,3$ кВ·мкс·см⁻¹. Временной интервал, ограниченный моментами времени t_s и t_1 , разбиваем на $n = 10$ равных частей. Расчет значений элементарных площадей $A_1, A_2, \dots, A_n$ проводим методом трапеций [8]. Скорости движения искрового канала $v_1, v_2, \dots, v_n$ находим из соотношения: $v_n = A_n \cdot c^{-1} \cdot \Delta t^{-1}$ при $\Delta t = 0,225$ мкс. Результаты расчетов представим в таблице.

Расчетная скорость движения искрового канала в разрядных промежутках разрядников замыкателей RL-нагрузки генератора ГБИТМ

t , мкс	$u_p(t)$, кВ	A_n , кВ·мкс	v_n , см/мкс	x_n , см
0,85	134			
1,075	166,32	3,636	1,74	0,391
1,3	208,73	12,04	5,75	1,295
1,525	247,1	21,14	10,1	2,27
1,75	276,66	28,42	13,58	3,05
1,975	293,73	34,02	16,25	3,66
2,2	295,61	36,15	17,27	3,9
2,425	280,34	34,64	16,56	3,725
2,65	247,42	29,22	13,96	3,15
2,875	205,4	20,79	9,94	2,23
3,1	134	8,032	3,84	0,86

Согласно таблице, средняя скорость движения искрового канала v_{cp} в разрядных промежутках воздушных стержневых разрядников замыкателей нагрузки генератора ГБИТМ составляет $v_{cp} = 10,9$ см/мкс, что хорошо соответствует экспериментальным данным [6,7].

3. Выводы. Разработан приближенный метод расчета скорости движения искрового канала в воздушных промежутках неуправляемых стержневых разрядников замыкателей нагрузки генераторов ГБИТМ. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. Отмечено, что искровой стримерный канал высоковольтного разряда достигает противоположного электрода воздушного разрядника замыкателя нагрузки за время, примерно равное 2,25 мкс. Показано, что далее под действием импульсного напряжения искровой канал за время, примерно рав-

ное 0,6мкс, развивается в устойчивую электрическую дугу. При этом наблюдается надежное срабатывание неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей, а в RL-нагрузке исследуемого генератора ГБИТМ формируется аperiodический импульс тока молнии.

Список литературы: 1. Патент України № 6279, МКІ НОЗК3/53. 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 НОЗК3/53. 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. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с. 6. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / М.Бейер, В.Бек, К.Меллер, В.Цаенгель; Под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с. 7. Техника высоких напряжений / Под ред. Л.И.Сиротинского. – Ч. 1. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 292 с. 8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1964. – 608 с.

Надійшла до редколегії 09.03.2010