

Н.Н. ИГНАТЕНКО, канд. техн. наук, зав. сектором, НТУ "ХПИ"

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ
ТОКА РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ИСКРОВОГО КАНАЛА В
ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ КРОУБАР-
ЗАМЫКАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ ГЕНЕРАТОРОВ ТОКА
МОЛНИИ**

Запропоновано наближений метод розрахунку щільності струму іскрового каналу, який розвивається в робочих проміжках некерованих повітряних стержневих розрядників замикачів активно-індуктивного навантаження генератора великих імпульсних струмів блискавки.

Предложен приближенный метод расчета плотности тока искрового канала, который развивается в рабочих промежутках неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей активно-индуктивной нагрузки генератора больших импульсных токов молнии.

Введение. Высоковольтные генераторы больших импульсных токов находят широкое применение в народном хозяйстве и технике высоких напряжений. В настоящее время в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" разработаны мощные генераторы больших импульсных токов молнии (ГБИТМ) с высоким КПД разрядного контура. Неотъемлемой частью указанных генераторов импульсных токов молнии являются высоковольтные емкостные накопители энергии (ЕНЭ). В состав данных генераторов ГБИТМ входят и неуправляемые воздушные (атмосферного давления) стержневые разрядники кроубар-замыкателей RL-нагрузки [1-3]. Благодаря рациональному выбору межэлектродных расстояний, электрический пробой неуправляемых воздушных стержневых разрядников кроубар-замыкателей наступает в момент времени, близкий к моменту достижения током в нагрузке своего максимального значения [1-4]. При этом в момент срабатывания неуправляемых воздушных разрядников кроубар-замыкателей нагрузки амплитудное значение импульсного напряжения $u_p(t)$ на них близко к нулю [3]. Модель развития искрового канала в воздушных промежутках разрядников замыкателей RL-нагрузки генераторов ГБИТМ описана в [5], где удалось расчетным путем показать динамику изменения скорости движения искрового канала в электродной системе "стержень-

стержень". Однако приведенная расчетная модель является неполной, так как не позволяет определить плотность тока и геометрию искрового канала, изменяющуюся под действием импульсного напряжения. Поэтому целью данной работы является расчетная оценка изменения плотности тока развивающегося искрового канала в неуправляемых воздушных стержневых разрядниках кругбар-замыкателей RL-нагрузки мощных генераторов импульсного тока молнии.

1. Основная часть. На рис.1 приведено изображение воздушной (атмосферного давления) электродной системы "стержень-стержень", имеющую медные электроды. Определим в момент времени t_0 (время появления в рассматриваемой электродной системе эффективных электронов и начала формирования искрового канала [4-8]) собственную емкость C_0 данного воздушного промежутка на землю. Для этого применим выражение [9]:

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{2l}{d} - D_2}, \quad (1)$$

где l и d – длина и диаметр медного электрода; D_2 – коэффициент, зависящий от отношения длины электрода l к длине воздушного разрядного промежутка; $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

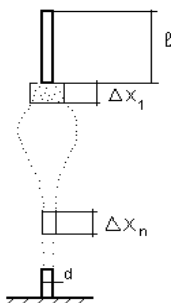


Рис. 1. Воздушная электродная система "стержень-стержень" в момент развития искрового канала.

токов [3-4]; U_0 – рабочее напряжение ЕНЭ.

Считая, что в начальный момент времени t_0 ток $i_p(t_0)$ равномерно распределяется по поперечному сечению электрода, находим, что начальная плотность тока j_0 в данной электродной системе будет равна $j_0 = 4 i_p(t_0) / \pi d^2$. При дальнейшем развитии искрового канала в момент времени t_1 в принятой расчетной модели как бы увеличивается попе-

Полагая, что в данной электродной системе ток проводимости значительно меньше тока смещения [10-11], определим амплитудное значение импульсного тока $i_p(t)$ через воздушный промежуток в момент времени t_0 :

$$i_p(t_0) = C_0 \left. \frac{du_p}{dt} \right|_{t=t_0}, \quad (2)$$

где $u_p(t) = U_0 B_1 \cos(a_1 t) - U_0 B_2 \cos(b_1 t)$ – импульсное напряжение, действующее на разрядные промежутки; B_1, B_2 – безразмерные коэффициенты, определяемые из схемы замещения ГБИТМ, a_1, b_1 – собственные круговые частоты в генераторе

речное сечение и длина верхнего электрода, которая в нашем случае будет равна: $l_1 = l + \Delta X_1$. Это приводит к росту емкости электродной системы на землю и, следовательно, к изменению величины импульсного тока через разрядный промежуток. Для определения плотности тока j_n искрового канала и нахождения площади поперечного сечения S_n искрового канала применим соотношение [10-11]:

$$\frac{di_p}{dS} = \frac{d}{dt} \left[\frac{dq}{dS} \right] = \epsilon_0 \frac{dE}{dt}, \quad (3)$$

где q – переносимый заряд; E – напряженность электрического поля в рассматриваемой электродной системе "стержень-стержень".

Индукцию электрического поля D на расстоянии $R = \pi^{0.5} S^{0.5}$ от оси электродной системы можно определить с помощью теоремы Гаусса в виде: $D = 0,5q \Delta X^{-1} R^{-1}$ [11]. Данные соображения позволяют из выражения (3) получить простое соотношение:

$$\frac{dq}{dS} = D = \epsilon_0 E = \frac{q}{2\pi^{0.5} S^{0.5} \Delta X}. \quad (4)$$

Соотношение (4) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными [12]. Интегрируя левую часть данного дифференциального уравнения в пределах q_1 и q_0 , а правую в пределах S_1 и S_0 для элементарного участка ΔX_1 получим:

$$\ln \frac{q_1}{q_0} = \frac{S_1^{0.5} - S_0^{0.5}}{\pi^{0.5} \Delta X_1}. \quad (5)$$

Нетрудно видеть, что для достаточно малого участка длиной ΔX_n решение дифференциального уравнения (4) можно записать как:

$$\ln \frac{q_n}{q_{n-1}} = \frac{S_n^{0.5} - S_{n-1}^{0.5}}{\pi^{0.5} \Delta X_n}. \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что при достаточно малой длине участка ΔX_n численное значение емкостей C_n и C_{n-1} будет очень близко. Для указанного случая решение дифференциального уравнения (4) может быть представлено в следующем приближенном виде:

$$\ln \frac{U_{pn}}{U_{p_{n-1}}} \approx \frac{S_n^{0.5} - S_{n-1}^{0.5}}{\pi^{0.5} \Delta X_n}. \quad (7)$$

Проведем расчет изменения плотности тока в воздушных разрядных промежутках крочбар-замыкателей нагрузки мощного генератора ГБИТМ при рабочем напряжении ЕНЭ, равном $U_0 = 0,75 \text{ МВ}$ [3-5]. Пусть рассматриваемая электродная система "стержень-стержень" имеет медные электроды диаметром $d = 0,01 \text{ м}$ и длиной $l = 0,1 \text{ м}$. При междуэлектродном расстоянии $S_{22} = S_{32} = 0,245 \text{ м}$ емкость C_0 данного воздушного

промежутка на землю, согласно (1), будет равна $C_0=2,13\text{пФ}$. Из выражения (2) находим, что в начале развития искрового канала ток $i_p(t_0)$ в данной электродной системе равен $i_p(t_0)=0,381\text{А}$. При этом начальная плотность тока j_0 будет равна $j_0=4853,5\text{А/м}^2$. Используя данные работы [5], находим, что при напряжении $u_p(t_1)=166,32\text{кВ}$ за время $\Delta t=0,225\text{мкс}$ искровой канал в воздушных разрядных промежутках кроубар-замыкателей нагрузки пройдет расстояние $\Delta X_1=0,00391\text{м}$. Применяв соотношение (7), находим, что площадь поперечного сечения развивающегося искрового канала в данном случае будет приблизительно равна $S_1\approx 107,23\cdot 10^{-6}\text{м}^2$. Зная S_1 и эффективную длину верхнего электрода $l+\Delta X_1$, из выражения (1) находим, что электрическая емкость рассматриваемой электродной системы в момент времени t_1 будет приблизительно равна $C_1\approx 2,32\text{пФ}$. Из соотношения (2) следует, что импульсный ток $i_p(t_1)$ через промежуток будет иметь значение, равное $i_p(t_1)\approx 0,4433\text{А}$. При этом плотность тока j_1 на элементарном участке ΔX_1 будет приблизительно равна $j_1\approx 4134\text{А/м}^2$. Пользуясь разработанной методикой, будем по мере развития и продвижения искрового канала определять площадь его поперечного сечения S_n и плотность тока j_n в воздушных разрядных промежутках кроубар-замыкателей нагрузки. Расчетные данные представим в табл. 1.

Анализ приведенных в табл. 1 расчетных данных показывает, что по мере увеличения импульсного напряжения $u_p(t)$ в разрядных промежутках наблюдается рост поперечного сечения S_n канала искрового разряда. При этом величина импульсного тока $i_p(t)$ через промежуток зависит от скорости нарастания напряжения $u_p(t)$. В момент достижения напряжением $u_p(t)$ своего максимума ($t\approx 2,2\text{мкс}$) ток через разрядный промежуток имеет свое минимальное значение, которое в нашем случае будет равно $i_p(t=2,2\text{мкс})=0,2657\text{А}$. Для указанного момента времени поперечное сечение S_n искрового канала будет наибольшим и составит: $S_6\approx 1073,24\cdot 10^{-6}\text{м}^2$. Из таблицы видно, что за время $\Delta t=t_6-t_0=1,35\text{мкс}$ площадь поперечного сечения развивающегося искрового канала увеличивается в $S_6/S_0\approx 13,7$ раза. Это приводит к увеличению емкости рассматриваемой электродной системы "стержень-стержень" на землю (примерно в 2,6 раза) и, следовательно, к росту величины переносимых развивающимся искровым каналом зарядов. Далее по мере спада напряжения $u_p(t)$ в искровом канале разряда происходит изменение направления движения импульсного тока $i_p(t)$ и увеличение его амплитудного значения. Так, при $t=3\text{мкс}$ импульсное напряжение $u_p(t)$ будет иметь амплитудное значение, равное $U_p=164,6\text{кВ}$. При величине поперечного сечения искрового канала $S_n\approx 168,4\cdot 10^{-6}\text{м}^2$ и емко-

сти $C_n=8,07$ пФ электродной системы на землю амплитуда импульсного тока $i_p(t)$ искрового канала будет примерно равна $I_p=2,31$ А. Полученные расчетные результаты хорошо соответствуют известным экспериментальным данным [6-8].

Таблица 1 – Расчетные значения плотности тока j_p и площадь поперечного сечения S_n развивающегося искрового канала

t_n , мкс	$U_p(t)$, кВ	ΔX_n , см	dU_p/dt , МВ/мкс	C_n , пФ	i_p , А	$S_n \cdot 10^{-6}$, м ²	j_p , А/м ²
$t_0=0,85$	134		0,1788	2,13	0,381	78,5	4853,5
$t_1=1,075$	166,32	0,391	0,1908	2,32	0,4433	107,23	4134
$t_2=1,3$	208,73	1,295	0,1826	2,989	0,546	242,15	2254,11
$t_3=1,525$	247,1	2,27	0,154	3,93	0,605	499,08	1214,22
$t_4=1,75$	276,66	3,05	0,1068	5,16	0,551	808,9	681,39
$t_5=1,975$	293,73	3,66	0,04414	6,03	0,2663	1044,49	254,95
$t_6=2,2$	295,61	3,9	0,0289	6,878	0,2657	1073,24	247,6
$t_7=2,425$	280,34	3,725	-0,1069	7,08	-0,757	856,3	883,86
$t_8=2,65$	247,42	3,15	-0,1836	7,203	-1,322	497,08	2660,47
$t_9=2,875$	205,4	2,23	-0,2527	7,73	-1,953	223,4	8743,82

Необходимо отметить, что по мере роста тока импульсного тока $i_p(t)$ искровой канал в воздушных неуправляемых стержневых разрядниках кроубар-замыкателей нагрузки переходит в устойчивую электрическую дугу, которая при $t \approx 3,7$ мкс надежно замыкает разрядный промежуток и обеспечивает работоспособность высоковольтного генератора токов молнии.

Выводы. Предложена расчетная модель развития искрового канала в длинных воздушных промежутках разрядников кроубар-замыкателей нагрузки мощных генераторов ГБИТМ. Показано, что, используя полученные расчетные соотношения, можно оценить динамику изменения импульсного тока при развитии искрового канала в длинных воздушных промежутках. Отмечено, что полученные расчетные результаты соответствуют известным экспериментальным данным.

Список литературы: 1. Патент України №6279, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор імпульсних струмів // Баранов М. І., Ігнатенко М. М., Колобовський А. К. – Оpubл. 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. – Оpubл. Бюл. №7, 17.07.2006. – 4 с. 3. Ігнатенко. Н.Н. Расчет переходных процессов в генераторах тока молнии с замыкателями нагрузки // Вісник

Национального технического университета "ХПИ". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2009. – №11. – С. 38-45. **4. Игнатенко. Н.Н.** Выбор длины воздушных промежутков разрядников замыкателей нагрузки в кроубар-генераторах импульсного тока молнии // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Техніка та електрофізика високих напруг.– Харків: НТУ "ХПИ".– 2009. №39. – С. 64-69. **5. Игнатенко. Н.Н.** Приближенный расчет скорости движения искрового канала в воздушных промежутках разрядников замыкателей нагрузки генераторов импульсных токов молнии // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Техніка та електрофізика високих напруг.– Харків: НТУ "ХПИ".– 2010. – №18. – С. 80-84. **6.** Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / М. Бейер, В. Бёк, К. Мёллер, В. Цаенгель; Под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с. **7. Кремнев В.В., Месяц Г.А.** Методы умножения и трансформации импульсов в силовоточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 224 с. **8.** Техника высоких напряжений / Под ред. Л.И. Сиротинского. Часть первая – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 292 с. **9. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струтинский М.Г.** Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с. **10. Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с. **11. Сукачев А.П.** Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Физические основы электротехники. Харьков: Издательство ХГУ, 1959 – 460 с. **12. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике. – М.: Наука, 1964. – 608 с.

*Поступила в редколлегию 4.01.2011
Рецензент д.т.н., проф. Рудаков В.В.*