

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДУГИ
В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ В ВОДЕ РАЗРЯДОМ
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ
ПРИ ПИТАНИИ ДУГИ НИЗКОВОЛЬТНЫМ
УДАРНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ**

Б. А. ФРАНКОВСКИЙ, К. А. ХОРЬКОВ, Ю. Г. ШМИГИРИЛОВ

Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники

Одним из способов увеличения энергии, передаваемой от ударного генератора в дуговую нагрузку в воде, является подготовка межэлектродного водного промежутка разрядом высоковольтного источника энергии. Условия надежного перехвата дуги и согласования параметров дугового канала с параметрами обмотки статора во многом определяются выбором напряжения и емкости иницирующей конденсаторной батареи. Для обеспечения надежного перехвата дуги ударным генератором желательно длительное горение дуги при разряде емкости. В то же время по условиям мобильности устройства на конденсаторную батарею накладываются ограничения по габаритам и весу.

Переходный процесс в цепи разрядного контура конденсаторной батареи описывается дифференциальным уравнением

$$L \frac{di_c}{dt} + ri_c + R_d(t) \cdot i_c + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = U_0, \quad (1)$$

где L, r — суммарные индуктивность и активное сопротивление разрядного контура, равные сумме соответствующих параметров передающего коаксиального кабеля, коммутирующего разрядника (тригatrona) и конденсаторной батареи;

$R_d(t)$ — нелинейное активное сопротивление межэлектродного промежутка электрогидравлического излучателя (ЭГИ);

C — емкость конденсаторной батареи;

i_c — ток разряда;

U_0 — начальное напряжение конденсаторной батареи.

Для связи конденсаторной батареи с ЭГИ принимается малоиндуктивный магистральный коаксиальный кабель типа МКПВМ-1/30 длиной 30 м. Конденсаторная батарея набрана из малоиндуктивных импульсных конденсаторов типа КМК30-10. Амплитуда напряжения принята равной 15 кв. Емкость конденсаторной батареи в процессе расчетов изменялась от 5,33 до 53,3 мкф в соответствии с изменением энергии батареи от 600 до 6000 дж.

Расчеты переходного процесса в цепи разрядного контура проведены на ЦВМ БЭСМ-4. При расчетах приняты следующие параметры разрядного контура, табл. 1.

Длина межэлектродного промежутка ЭГИ изменялась от $l_0 = 0,005$ до 0,02 м. В момент подачи высокого напряжения на электроды ЭГИ сопротивление водного межэлектродного промежутка принималось

Таблица 1

W_0 дж	U_0 кв	C мкф	$L_c \cdot 10^{-9}$ гн	$R_c \cdot 10^{-3}$ ом	$L_p \times 10^9$ гн	$R_p \times 10^{-3}$ ом	$L_{\pi} \times 10^{-6}$ гн	$R_{\pi} \times 10^{-2}$ ом	$L \times 10^{-6}$ гн	$r \times 10^{-2}$ ом
600	15	5,33	3,75	7,60	45	5,0	3	4,9	3,049	6,16
1200	15	10,7	1,88	4,45	45	2,5	3	4,5	3,047	5,20
1800	15	18,0	1,30	3,30	45	1,7	3	4,0	3,046	4,50
3000	15	26,7	0,80	2,50	45	1,0	3	3,3	3,046	3,65
4200	15	36,4	0,54	2,03	45	0,7	3	2,9	3,0455	3,17
5400	15	48,0	0,44	1,60	45	0,6	3	2,7	3,0454	2,93
6000	15	53,3	0,38	1,40	45	0,5	3	2,6	3,0454	2,80

равным 2020 ом. Механизм пробоя водного межэлектродного промежутка под воздействием высокого напряжения заключается в образовании и развитии лидеров вплоть до замыкания одним из них межэлектродного промежутка. Сопротивление межэлектродного промежутка в лидерной стадии (по Петриченко В. Н.) определяется выражением

$$R_{дл}(t) = \rho_{вн} \frac{I_3 a}{U^n} \left(\frac{1}{t_1 + t_i} + x_0 \right), \quad (2)$$

где $\rho_{вн}$ — удельное сопротивление межэлектродного промежутка в момент подачи высокого напряжения на электроды, для водопроводной воды $\rho_{вн} = 1,09 \cdot 10^3$ ом/см;

a — константа, равная $1,06 \cdot 10^{10} \frac{В^{3,7} сек}{см}$;

U — напряжение, приложенное к электродам;

n — степень напряжения;

t_1 — время от момента приложения напряжения до начала формирования лидера;

t_i — время от начала формирования лидера до рассматриваемого мгновения;

x_0 — поправка, равная $0,1 \cdot 10^{-6} сек^{-1}$.

К моменту образования канала сопротивление межэлектродного промежутка оказывается равным значениям, представленным в табл. 2.

Таблица 2

l_3 м	0,005	0,010	0,015	0,020
$R_{д}(t_1)$ ом	7,5	15	22,5	30

Сопротивление дугового канала определяется по Е. В. Кривицкому [1] как

$$R_{д}(t) = I_3 \sqrt{\frac{A t^{4\alpha(\gamma-1)}}{2 \int_0^t i_c^2 t^{4\alpha(\gamma-1)} dt}}, \quad (3)$$

где $A = 10^5$ в сек/м² — искровая постоянная,

$\alpha = 0,8 \div 1,2$ — коэффициент,

$\gamma = 1,2 \div 1,26$ — эффективный показатель адиабаты плазмы в канале.

На рис. 1 представлены типичные зависимости напряжения, тока, сопротивления дугового канала и энергии, полученные при расчете (вариант $l_3 = 0,02$ м, $W_0 = 600$ дж). Для сравнения на рис. 2 представлены

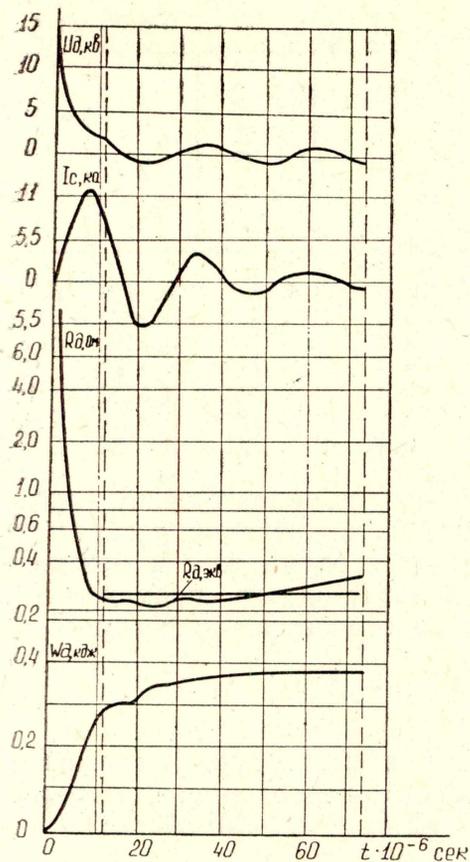


Рис. 1. Кривые изменения напряжения на дуге U_d , тока i_c , сопротивления дугового канала R_d и энергии, введенной в дугу W_d

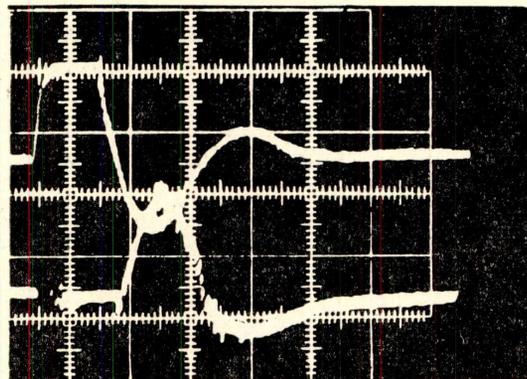


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока дуги при разряде емкости с запасом энергии 600 дж на межэлектродный промежуток 0,02 м

осциллограммы напряжения и тока, полученные на экспериментальной установке при тех же значениях параметров схемы. Результаты расчета удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными. На рис. 1 предполагаемый момент включения ударного генератора на дуговой промежуток обозначен индексом t_0 . Перехват дуги генератором должен осуществляться в течение времени t_n , когда генератор и емкость работают совместно. При затухании разряда конденсаторной батареи активное сопротивление дугового канала несколько возрастает по сравнению с минимальным значением, имеющим место при достижении максимума тока разряда.

Величину активного сопротивления дугового канала в течение времени перехвата дуги удобно характеризовать средним значением сопротивления на этом отрезке времени, обозначенном $R_{d экв}$ [2].

Энергия, вводимая в канал разряда, определяется как сумма средних значений на каждом шаге расчета

$$W_d = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t}{8} [i_c(t_i) + i_c(t_{i+1})]^2 \cdot [R_d(t_i) + R_d(t_{i+1})]. \quad (4)$$

График энергии (рис. 1) отражает ступенчатый ввод энергии в канал разряда. Каждая ступень соответствует своему полупериоду тока разряда. Передача энергии в дуговой канал существенна лишь в первые 3 полупериода разряда.

Результаты расчета на ЦВМ обработаны и представлены в табл. 3—6.

В таблицах приведены следующие параметры:

- I_{m1} — амплитуда тока разряда первого полупериода;
 $R_{д\ min}$ — минимальное сопротивление сформированного канала разряда;
 t_m — момент времени, соответствующий $R_{д\ min}$;
 $U(t_m)$ — напряжение на дуге в момент времени t_m ;
 $W(t_m)$ — энергия, введенная в канал разряда к моменту времени t_m ;
 τ_c — длительность разряда конденсаторной батареи;
 $W(\tau_c)$ — полная энергия, введенная в канал разряда;
 $R_{д}(\tau_c)$ — сопротивление канала разряда в момент времени τ_c ;
 $R_{д\ экв}$ — среднее сопротивление канала разряда при $t > t_m$;
 t_n — время совместной работы ударного генератора и конденсаторной батареи;
 η — коэффициент полезного действия конденсаторной батареи, равный отношению $\frac{W(\tau_c)}{W_0}$.

Таблица 3

Межэлектродный промежуток $l_3 = 0,02$ м

№ п.п.	Параметры	W_0 дж						
		600	1200	1800	3000	4200	5400	6000
1	I_{m1} а	10781	17075	20453	27476	32624	37726	40080
2	$R_{д\ min}$ ом	0,2006	0,1081	0,0819	0,0541	0,0424	0,0343	0,0315
3	$t_m \cdot 10^{-6}$ сек	12,4	17,0	20,4	25,8	29,8	34,0	35,6
4	$U(t_m)$ в	1266	1066	1000	888	827	766	753
5	$W(t_m)$ дж	289	541	713	1071	1380	1716	1869
6	$\tau_c \cdot 10^{-6}$ сек	73,2	139,2	169,7	275,2	354,2	406,2	427,7
7	$W(\tau_c)$ дж	370	732	980	1549	2022	2530	2769
8	$R_{д}(\tau_c)$ ом	0,3095	0,1755	0,1303	0,0884	0,0709	0,0567	0,0517
9	$R_{д\ экв}$ ом	0,2551	0,1418	0,1061	0,0713	0,0566	0,0455	0,0416
10	$t_n \cdot 10^{-6}$ сек	60,8	122,2	159,3	249,4	324,4	372,2	392,1
11	η	0,616	0,610	0,545	0,516	0,480	0,469	0,461

Таблица 4

Межэлектродный промежуток $l_3 = 0,015$ м

№ п.п.	Параметры	W_0 дж						
		600	1200	1800	3000	4200	5400	6000
1	I_{m1} а	9443	14074	17625	23588	27918	32361	34238
2	$R_{д\ min}$ ом	0,1741	0,0993	0,0720	0,0477	0,0374	0,0303	0,0279
3	$t_m \cdot 10^{-6}$ сек	11,8	16,4	19,8	25,2	29,2	33,2	35,0
4	$U(t_m)$ в	991	835	761	670	622	585	564
5	$W(t_m)$ дж	191	334	461	692	890	1104	1199
6	$\tau_c \cdot 10^{-6}$ сек	85,2	149,5	191,2	309,2	394,2	443,2	466,7
7	$W(\tau_c)$ дж	254	465	656	1036	1343	1680	1829
8	$R_{д}(\tau_c)$ ом	0,2705	0,1542	0,1143	0,0731	0,0590	0,0493	0,0452
9	$R_{д\ экв}$ ом	0,2223	0,1268	0,0932	0,0604	0,0482	0,0398	0,0366
10	$t_n \cdot 10^{-6}$ сек	73,4	133,1	171,4	284,0	365,0	410,0	437,7
11	η	0,423	0,387	0,366	0,345	0,320	0,311	0,305

Межэлектродный промежуток $l_0 = 0,01$ м

№ п.п.	Параметры	W_0 дж						
		600	1200	1800	3000	4200	5400	6000
1	I_{m1} а	9420	13786	17118	22706	26740	30869	37820
2	$R_{д min}$ ом	0,1196	0,0690	0,0504	0,0336	0,0265	0,0214	0,0198
3	$t_m \cdot 10^{-6}$ сек	11,0	15,6	19,0	24,2	28,0	32,0	33,8
4	$U(t_m)$ в	690	562	505	452	426	397	382
5	$W(t_m)$ дж	124	217	298	446	561	700	759
6	$\tau_c \cdot 10^{-6}$ сек	109,7	173,2	233,7	357,7	414,2	517,7	545,2
7	$W(\tau_c)$ дж	188	334	465	728	926	1153	1248
8	$R_{д}(\tau_c)$ ом	0,1705	0,095	0,0743	0,495	0,0385	0,0326	0,0302
9	$R_{д экв}$ ом	0,1451	0,0843	0,0624	0,0426	0,0325	0,0270	0,0250
10	$t_n \cdot 10^{-6}$ сек	98,7	157,6	214,7	333,5	386,2	485,7	511,4
11	η	0,313	0,278	0,258	0,242	0,220	0,213	0,208

Таблица 6

Межэлектродный промежуток $l_0 = 0,005$ м

№ п.п.	Параметры	W_0 дж						
		600	1200	1800	3000	4200	5400	6000
1	I_{m1} а	11667	16655	20439	26733	31227	35885	37820
2	$R_{д min}$ ом	0,0497	0,0293	0,0216	0,0146	0,0115	0,0094	0,0087
3	$t_m \cdot 10^{-6}$ сек	10,4	14,6	17,8	23,0	28,0	30,6	32,2
4	$U(t_m)$ в	340	294	267	232	215	205	198
5	$W(t_m)$ дж	76	129	175	258	329	405	438
6	$\tau_c \cdot 10^{-6}$ сек	196,7	279,7	342,2	505,2	614,7	705,7	730,2
7	$W(\tau_c)$ дж	147	243	328	499	627	762	820
8	$R_{д}(\tau_c)$ ом	0,0579	0,0368	0,0276	0,0191	0,0155	0,0129	0,0112
9	$R_{д экв}$ ом	0,0538	0,0331	0,0246	0,0168	0,0136	0,0112	0,0099
10	$t_n \cdot 10^{-6}$ сек	186,3	265,1	324,4	482,2	587,9	675,1	697,8
11	η	0,245	0,203	0,182	0,167	0,150	0,141	0,137

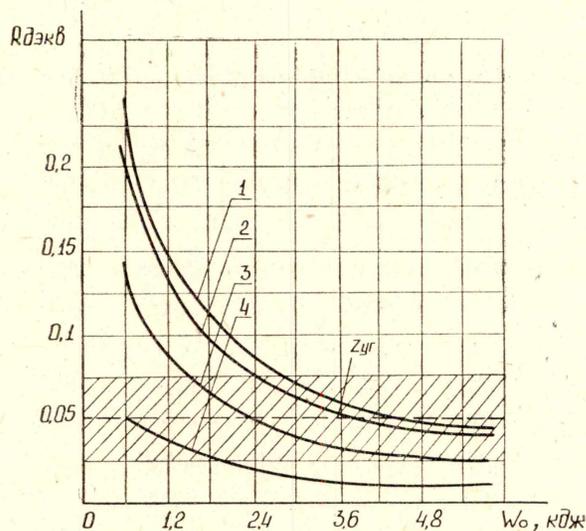


Рис. 3. Изменение сопротивления дуги при различных энергиях конденсаторной батареи для 1) $l_0 = 0,02$ м; 2) $l_0 = 0,015$ м; 3) $l_0 = 0,01$ м; 4) $l_0 = 0,005$ м

На рис. 3 представлены кривые изменения среднего значения сопротивления дуги $R_{д экв}$ в зависимости от начальной величины энергии для различных межэлектродных промежутков ЭГИ.

В выделенном (штриховкой) диапазоне сопротивления $R_{д экв}$ соответствует диапазону согласования параметров генератора и дуги. Длительность разряда конденсаторной батареи при постоянной длине межэлектродного промежутка возрастет с увеличением начального заряда батареи.

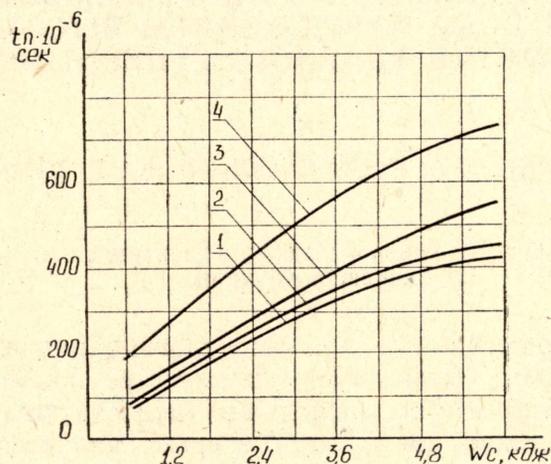


Рис. 4. Зависимость длительности разряда от энергии конденсаторной батареи для 1) $l_0=0,02$ м; 2) $l_0=0,015$ м; 3) $l_0=0,01$ м; 4) $l_0=0,005$ м

На рис. 4 представлена зависимость времени t_n от энергии конденсаторной батареи W_0 для различных межэлектродных промежутков l_0 .

Таким образом, в результате расчета переходного процесса в цепи разряда инициирующей высоковольтной конденсаторной батареи найдены важные характеристики инициированного межэлектродного промежутка, а именно $R_{д экв}$ и t_n , необходимые для анализа условий перехвата дуги ударным генератором. Получены кривые, по которым можно выбрать необходимую величину энергии конденсаторной батареи для обеспечения оптимальных значений $R_{д экв}$ и t_n . Показано, что среднее сопротивление дугового канала может быть доведено до уровня полного сверхпереходного сопротивления ударного генератора, порядка 0,05 ом, а время разряда емкости доведено до 300÷500 мксек, достаточного для надежного перехвата дуги ударным генератором. При этом энергия, запасаемая инициирующей конденсаторной батареей, не превышает 1% от энергии, которую должен обеспечить ударный генератор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кривицкий. Исследование сопротивления канала подводного искрового разряда. Журнал технической физики. Т. 40, вып. 11, 1972.
2. И. З. Окунь. Исследование электрических характеристик импульсного разряда в жидкости. Журнал технической физики. Т. 39, вып. 5, 1969.