

**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 (тригатрона) 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

$$R_{дл}(t) = \rho_{вн} \frac{l_3 a}{U^n} \left( \frac{1}{t_1 + t_i} + x_0 \right), \quad (2)$$

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
$R_d(t_1)$ ом	7,5	15	22,5	30

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

$$R_d(t) = l_3 \sqrt{\frac{A t^{4\alpha(\gamma-1)}}{2 \int_0^t i_c^2 t^{4\alpha(\gamma-1)} dt}}, \quad (3)$$

где  $A = 10^5$  в сек/м<sup>2</sup> — 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

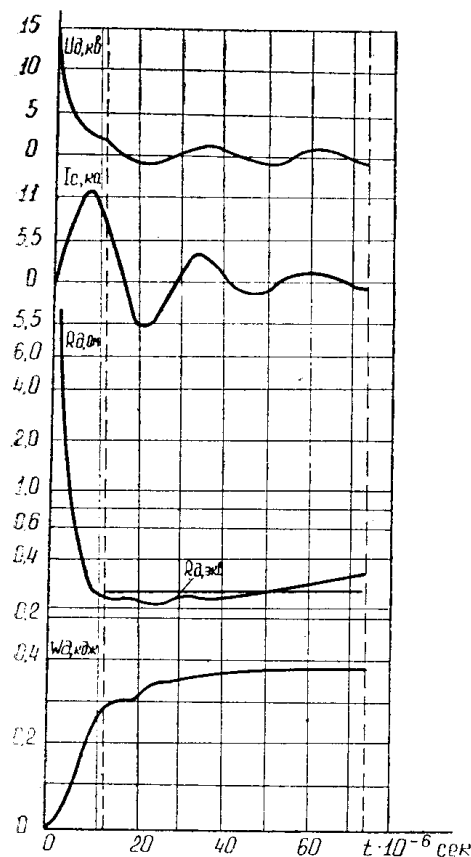


Рис. 1. Кривые изменения напряжения на дуге  $U_d$ , тока  $i_c$ , сопротивления дугового канала  $R_d$  и энергии, введенной в дугу  $W_d$

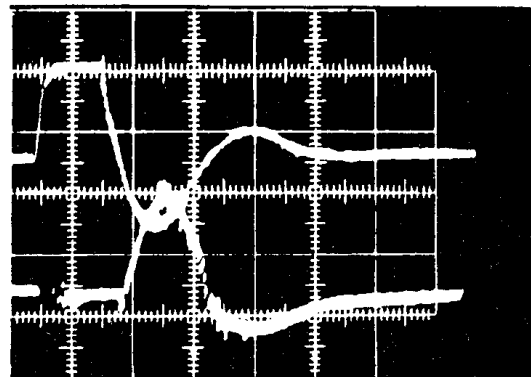


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока дуги при разряде емкости с запасом энергии 600 дж на межэлектродный промежуток 0,02 м

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  $R_{д экв}$  [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  $t_m$ ;  
 $\tau_c$  — длительность разряда конденсаторной батареи;  
 $W(\tau_c)$  — полная энергия, введенная в канал разряда;  
 $R_{д}(\tau_c)$  — сопротивление канала разряда в момент времени  $\tau_c$ ;  
 $R_{д\ экв}$  — среднее сопротивление канала разряда при  $t > t_m$ ;  
 $t_n$  — время совместной работы ударного генератора и конденсаторной батареи;  
 $\eta$  — коэффициент полезного действия конденсаторной батареи, равный отношению  $\frac{W(\tau_c)}{W_0}$ .

Таблица 3

Межэлектродный промежуток  $l_0 = 0,02$  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	$\eta$	0,616	0,610	0,545	0,516	0,480	0,469	0,461

Таблица 4

Межэлектродный промежуток  $l_0 = 0,015$  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	$\eta$	0,423	0,387	0,366	0,345	0,320	0,311	0,305

Межэлектродный промежуток  $l_3 = 0,01$  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	$R_d(\tau_c)$ 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	$\eta$	0,313	0,278	0,258	0,242	0,220	0,213	0,208

Т а б л и ц а 6

Межэлектродный промежуток  $l_3 = 0,005$  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	$R_d(\tau_c)$ 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	$\eta$	0,245	0,203	0,182	0,167	0,150	0,141	0,137

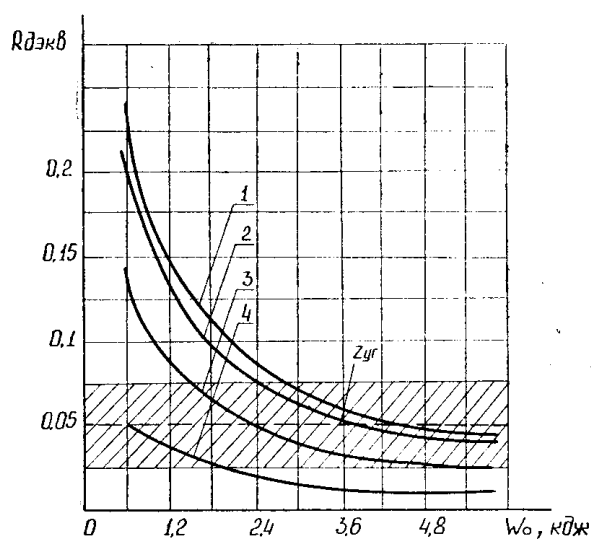


Рис. 3. Изменение сопротивления дуги при различных энергиях конденсаторной батареи для 1)  $l_3 = 0,02$  м; 2)  $l_3 = 0,015$  м; 3)  $l_3 = 0,01$  м; 4)  $l_3 = 0,005$  м

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.

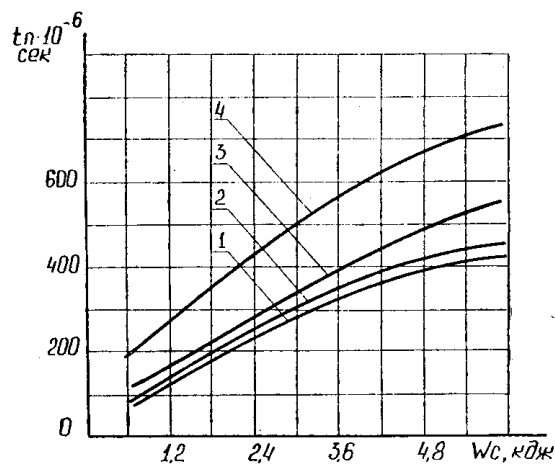


Рис. 4. Зависимость длительности разряда от энергии конденсаторной батареи для 1)  $l_0=0,02$  м; 2)  $l_0=0,015$  м; 3)  $l_0=0,01$  м; 4)  $l_0=0,005$  м

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. Окунов. Исследование электрических характеристик импульсного разряда в жидкости. Журнал технической физики. Т. 39, вып. 5, 1969.