

## К ОЦЕНКЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ИЗОЛЯЦИИ В КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ ПРИ РАБОТЕ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ИСКРУ

И. И. КАЛЯЦКИЙ, А. Т. ЧЕПИКОВ, А. А. ДУЛЬЗОН

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института высоких напряжений)

В настоящее время область применения генераторов импульсных напряжений (ГИН) очень велика. Они используются в радиолокации, для питания импульсных источников света, для генерирования ударных волн в жидкой среде, для кинетики химических реакций и т. д.

При передаче высоковольтных импульсов с амплитудой до 200—300 кВ, предназначенных для технологического использования их энергии, возникает острая необходимость оценки напряжения, воздействующего на изоляцию коаксиальной линии. Это необходимо для обоснованного конструирования изоляции и определения срока ее службы.

### К расчету напряжения на изоляции коаксиальной линии

Расчетная схема представлена на рис. 1. Нами приняты следующие основные допущения:

1. Активное сопротивление проводников и искровых промежутков ГИНа  $R_1 = \text{const}$ . Принято потому, что оно сравнительно мало влияет

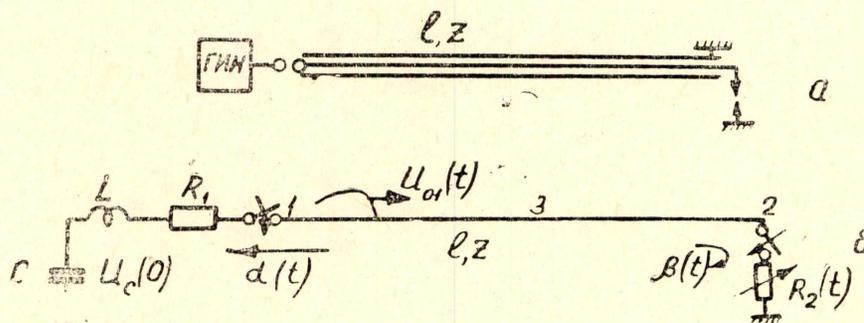


Рис. 1: а — Расчетная схема; б — Схема замещения;  $C$  — емкость ГИНа в ударе;  $L$  — паразитная индуктивность ГИНа;  $R_1$  — полное сопротивление контура (с учетом сопротивления искровых промежутков);  $R_2(t)$  — сопротивление искровой нагрузки;  $Z_B$  — волновое сопротивление линий;  $l$  — длина линии.

на переходный процесс до момента прихода отраженной от конца линии волны, а за это время даже при длине линии 10—20 м сопротивление искровых промежутков ГИНа устанавливается примерно постоянным.

2. Сопротивление искровой нагрузки  $R_2(t)$  принято только как функция времени, а не напряжения.

3. Потери в линии не учитываются. Учет затухания импульсов в линии не меняет ход расчета, но сильно усложняет вычисления.

Операционное изображение закона Кирхгофа (по Карсону) для схемы рис. 1, б:

$$U_C(p) + U_L(p) + U_{R_1}(p) + U_{x=0}(p) = 0. \quad (1)$$

Ток в начале линии без потерь длиной  $l$  [1]

$$I_{x=0}(p) = U_{x=0}(p) \cdot \frac{R_2(p) \cdot \operatorname{sh} \frac{l}{v} + z_B \cdot \operatorname{ch} \frac{l}{v}}{z_B \left[ R_2(p) \operatorname{ch} p \frac{l}{v} + z_B \operatorname{sh} p \frac{l}{v} \right]}. \quad (2)$$

С другой стороны

$$i(t) = C \cdot \frac{dU_C}{dt} \doteq CpU_C(p) - pCU_C(0) = I(p) = I_{x=0}(p), \quad (3)$$

$$U_L(t) = L \frac{di}{dt} \doteq p^2LCU_C(p) - p^2CLU_C(p), \quad (4)$$

$$U_{R_1} = I(p) \cdot R_1. \quad (5)$$

На основании (1)–(5) можно получить

$$U_{x=0}(p) = -U_C(0) \cdot \frac{pCZ(p)}{p^2LC + pR_1C + pCZ(p) + 1}, \quad (6)$$

где

$$Z(p) = \frac{z_B \left[ R_2(p) \operatorname{ch} p \frac{l}{v} + z_B \operatorname{sh} p \frac{l}{v} \right]}{R_2(p) \operatorname{sh} p \frac{l}{v} + z_c \operatorname{ch} p \frac{l}{v}}. \quad (7)$$

Тогда напряжение в любой точке  $x$  длиной линии [1]

$$U_x(p) = U_{x=0}(p) \cdot \frac{R_2(p) \operatorname{ch} p \left( \frac{l}{v} - \frac{x}{v} \right) + z_B \operatorname{sh} p \left( \frac{l}{v} - \frac{x}{v} \right)}{R_2(p) \operatorname{ch} p \frac{l}{v} + z_B \operatorname{sh} p \frac{l}{v}}. \quad (8)$$

Оригинал выражения (8) найти в общем случае не представляется возможным. При работе ГИНа на согласованную линию, т. е. при  $R_2 = z_B$ ,

$$U_x(p) = U_{01}(p) = -U_C(0) \cdot \frac{z_B}{L} \frac{p}{p^2 + p \frac{R_1 + z_B}{L} + \frac{1}{LC}} \quad (9)$$

или при

$$\frac{1}{LC} > \frac{(R_1 + z_B)^2}{4L^2}$$

$$U_{01}(t) = U_C(0) \cdot \frac{z_B}{L} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot e^{-\frac{a}{2}t} \cdot \sin \omega t, \quad (10)$$

где

$$a = \frac{R_1 + z_B}{L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{a^2}{4}}.$$

Для расчета напряжения на изоляции коаксиальной линии конечной длины нами был использован метод бегущих волн [2]. Коэффициент отражения в конце линии

$$\beta(t) = \frac{R_2(t) - z_B}{R_2(t) + z_B}. \quad (11)$$

Коэффициент преломления в начале линии

$$\alpha(p) = \frac{2Z_1(p)}{Z_1(p) + z_B}, \quad \text{где } Z_1(p) = pL + \frac{1}{pC} + R_1. \quad (12)$$

Время двойного пробега волны по линии

$$2t_{\text{пр}} = \frac{2l}{v},$$

где  $l$  — длина линии,

$v$  — скорость распространения электромагнитных волн.

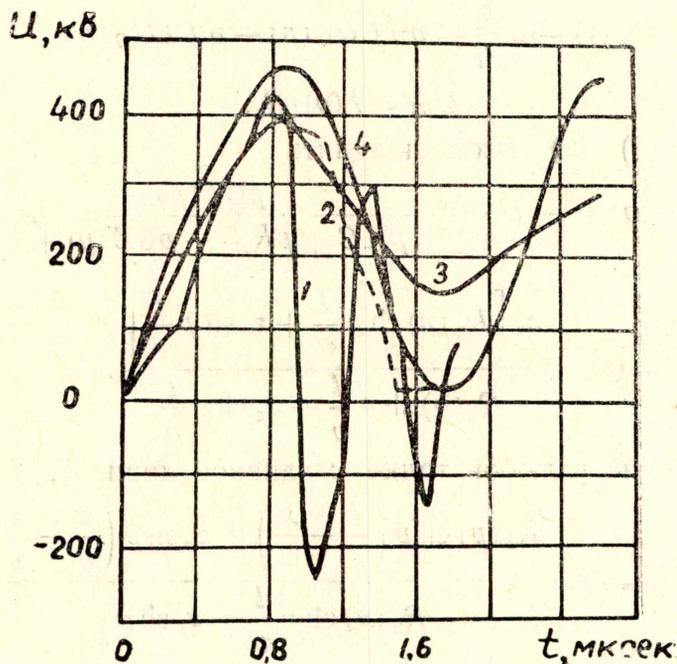


Рис. 2. Напряжение на изоляции коаксиальной линии в точке 1

Напряжение в начале линии (точка 1) определяется как сумма преломленных волн

$$U_1(t) = U_{01}(t) + U_{21}^{\text{пр}}(t), \quad (13)$$

где  $U_{21}^{\text{пр}}(t)$  — волна, преломленная в точке 1 после отражения от точки 2.

$$U_{21}^{\text{пр}}(t) = U'_{21}(p) \cdot \alpha(p), \quad (14)$$

где

$$U'_{21}(p) \doteq U'_{21}(t) = U_{21}(t - 2t_{\text{пр}}),$$

причем

$$U_{21}(t) = \beta(t) \cdot U_{12}(t), \quad (15)$$

где  $U_{12}(t)$  — суммарная волна, движущаяся от точки 1 к точке 2.

Величина  $U_{21}^{np}$  может быть вычислена приближенно на основании следующих соображений.

Если положить  $U'_{21}(p) = 1$ , то  $U_{21}^{np}(p) = \alpha(p)$ .

Следовательно,  $\alpha(p)$  представляет собой переходную функцию для точки 1. Тогда, найдя  $h(t) \doteq \alpha(p)$ , можно вычислить  $U_{21}^{np}(t)$ , воспользовавшись интегралом Дюамеля [1].

$$U_{21}^{np}(t) = \int_0^t \frac{dU'_{21}(\tau)}{d\tau} \cdot h(t-\tau) \cdot d\tau. \quad (16)$$

Заменяя интеграл суммой, приближенно получим [3]

$$U_{21}^{np}(t) \approx \sum_{i=1}^N \Delta U'_{21i} \cdot h(t-\tau_i), \quad (17)$$

где  $N$  — количество интервалов, на которые разбивается интересующая нас часть волны  $U'_{21}(t)$ ,

$\Delta U'_{21i}$  — приращение волны за время  $i$ -ого интервала.

Найдя по (13)–(17)  $U_1$  можем получить

$$U_{12}(t) = U_1(t) - U'_{21}(t). \quad (18)$$

Тогда напряжение на конце линии (точка 2)

$$U_2(t) = U_{12}(t) + U_{21}(t). \quad (19)$$

Напряжение в середине линии (точка 3)

$$U_3(t) = U_{12}(t) + U''_{21}(t), \quad (20)$$

где

$$U''_{21}(t) = U_{21}(t - t_{np}).$$

Аналогично может быть найдено напряжение в любой промежуточной точке.

Пример: Найти напряжение на изоляции коаксиальной системы длиной  $l = 30$  м, с волновым сопротивлением  $z_3 = 54$  ом. Емкость ГИНа в ударе  $C = 20000$  пкф, паразитная индуктивность  $L = 25$  мкГн, активное сопротивление проводов и искровых промежутков  $R_1 \approx 2$  ома,  $n U_3 = 240$  кВ ( $n$  — число ступеней,  $U_3$  — зарядное напряжение).

В соответствии с (10)

$$U_{01}(t) = 605 \cdot e^{-1,12 t} \cdot \sin 0,857 t,$$

где  $t$  — время в мксек.

При емкостях ГИНа в ударе порядка 10000–30000 пкф и напряжениях 100–300 кВ ход временной зависимости сопротивления искры в жидком или твердом диэлектрике может быть ориентировочно выражен формулой [4]:

$$R(t) = 10 + \frac{0,6}{t-t_0}, \quad (t \geq t_0), \quad (21)$$

где  $t_0$  — момент пробоя диэлектрика, мксек.

Примем, что пробой происходит в момент, когда напряжение в точке 2 достигает максимума. При этом имеют место наибольшие перенапряжения. Коэффициенты преломления и отражения

$$\beta(t) = \frac{0,6 - 44(t-t_0)}{0,6 + 64(t-t_0)}; \quad \alpha(t) = 2(1 - 2,54 \cdot e^{-1,12 t} \cdot \sin 0,857 t).$$

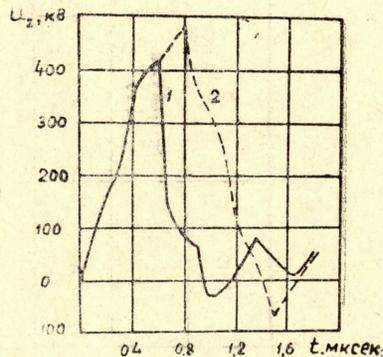


Рис. 3. То же, в точке 2.

Таблица 1

$t$	$U_{01}$	$U_{21}^{np}$	$U_1$	$U'_{21}$	$U_{12}$	$\beta$	$U_{21}$	$U_2$	$U''_{21}$	$U_3$
мксек	Формула (10)	Таблица 2	$A_1 + A_2$	$A_3(t-0,3)$	$A_4 - A_5$	Формула (11)	$A_6 \cdot A_7$	$A_6 + A_8$	$A_8(t-0,15)$	$A_6 + A_{10}$
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$	$A_{11}$
0	0	—	0	—	0	1	0	0	—	0
0,15	65	—	65	—	65	1	65	130	0	65
0,3	110	0	110	0	110	1	110	220	65	175
0,45	137	117	254	65	189	1	189	378	110	299
0,6	153	165	318	110	208	1	208	416	189	397
0,75	156	266	422	189	233	-0,59	-138	95	208	441
0,9	153	234	387	208	179	-0,64	-114	65	-138	41
1,05	145	-388	-243	-138	-105	-0,65	68,2	-37	-114	-219
1,2	135	-221	-86	-114	28	-0,66	-18,5	9,5	68,2	96
1,35	123	176	299	68	231	-0,67	-154	77	-18,5	212,5
1,5	108	-21	87	-18,5	106	-0,67	-71	35	-154	-48
1,65	94	-231	-137	-154	17	-0,67	-11,4	5,6	-71	-54
1,8	80	0,8	80,8	-71	151,8	-0,67	-102	50	-11,4	140,4

Таблица 2

$i$	$\tau_i$	$\Delta U'_{21i}$	Переходная функция $h(t - \tau_i)$ при $t$ , равном										$\Delta U'_{21i} \cdot h(t - \tau_i)$ при $t$ , равном									
			0,75	0,6	0,75	0,9	1,05	1,2	1,35	1,5	1,65	1,8	0,45	0,6	0,75	0,9	1,05	1,2	1,35	1,5	1,65	1,8
1	0,35	24	1,62	1,2	0,91	0,76	0,69	0,69	0,74	0,84	0,94	1,06	38,9	28,8	21,8	18,2	16,5	16,5	17,8	20,2	22,6	25,4
2	0,40	21	1,8	1,31	0,99	0,80	0,70	0,69	0,72	0,80	0,90	1,02	37,8	27,5	20,8	16,8	14,7	14,5	15,1	16,8	18,9	21,4
3	0,45	20	2,0	1,44	1,08	0,85	0,72	0,69	0,70	0,83	0,87	0,98	40,0	28,8	21,6	17,9	15,1	14,5	14,7	16,6	17,4	19,6
4	0,50	17		1,62	1,2	0,91	0,76	0,69	0,69	0,74	0,84	0,94		27,6	20,4	15,5	12,9	11,7	11,7	12,6	14,3	16
5	0,55	15		1,8	1,31	0,99	0,80	0,70	0,69	0,72	0,80	0,90		27	19,7	14,9	12,0	10,5	10,4	10,8	12	13,5
6	0,60	13		2,0	1,44	1,08	0,85	0,72	0,69	0,70	0,83	0,87		26	18,7	14,0	11,1	9,4	9,0	9,1	10,8	11,3
7	0,65	28			1,62	1,2	0,91	0,76	0,69	0,69	0,74	0,84			45,3	33,6	25,4	21,2	19,3	19,3	20,7	23,5
8	0,70	27			1,8	1,31	0,99	0,80	0,70	0,69	0,72	0,80			49,6	35,4	26,7	21,6	18,9	18,6	19,4	21,6
9	0,75	24			2,0	1,44	1,08	0,85	0,72	0,69	0,70	0,83			48	34,6	26	20,4	17,3	16,6	16,8	19,9
10	0,80	9				1,62	1,2	0,91	0,76	0,69	0,69	0,74				14,6	10,8	8,2	6,9	6,2	6,3	6,7
11	0,85	5				1,8	1,31	0,99	0,80	0,70	0,69	0,72				9,0	6,6	4,9	4,0	3,5	3,5	3,8
12	0,90	5				2,0	1,44	1,08	0,85	0,72	0,69	0,70				10,0	7,2	5,4	4,2	3,6	3,5	3,5
13	0,95	-283					1,62	1,2	0,91	0,76	0,69	0,69					-458	-3,40	-257	-215	-195	-195
14	1,00	-53					1,8	1,31	0,99	0,80	0,70	0,69					-95,3	-69,4	-52,5	-42,4	-37,1	-36,6
15	1,05	-10					2,0	1,44	1,08	0,85	0,72	0,69					-20	-14,4	-10,8	-8,5	-7,2	-6,9
16	1,10	6						1,62	1,2	0,91	0,76	0,69						9,7	7,2	5,5	4,6	4,1
17	1,15	9						1,8	1,31	0,99	0,80	0,70						16,2	11,8	8,9	7,2	6,3
18	1,20	9						2,0	1,44	1,08	0,85	0,72						18,0	13,0	9,7	7,7	6,5
19	1,25	100							1,62	1,2	0,91	0,76							162	120	91	76,5
20	1,30	54							1,8	1,31	0,99	0,80							97,2	70,7	53,4	43,2
21	1,35	28							2,0	1,44	1,08	0,85							56	40,3	30,2	23,8
22	1,40	-18								1,62	1,2	0,91								-29,2	-21,6	-16,4
23	1,45	-25								1,8	1,31	0,99								-45	-32,8	-24,8
24	1,50	-45								2,0	1,44	1,08								-90	-64,8	-48,6
25	1,55	-40									1,62	1,20									-65	-48
26	1,60	-50									1,8	1,31									-90	-65,5
27	1,65	-39									2,0	1,44									-78	-56,1
28	1,70	19										1,62										30,8
29	1,75	30										1,8										54
30	1,80	34										2,0										68
			$U'_{21}(t) = \sum_{i=1}^N \Delta U'_{21i} \cdot h(t - \tau_i):$										117	165	266	234	-388	-221	176	-21	-231	0,8

Время двойного пробега по линии

$$2t_{\text{пр}} = \frac{2l}{v} = \frac{2 \cdot 30}{200} = 0,3 \text{ мксек.}$$

Расчет напряжений  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$  и  $U_3(t)$  ведется табличным способом (табл. 1), причем последовательно заполняется строчка за строч-

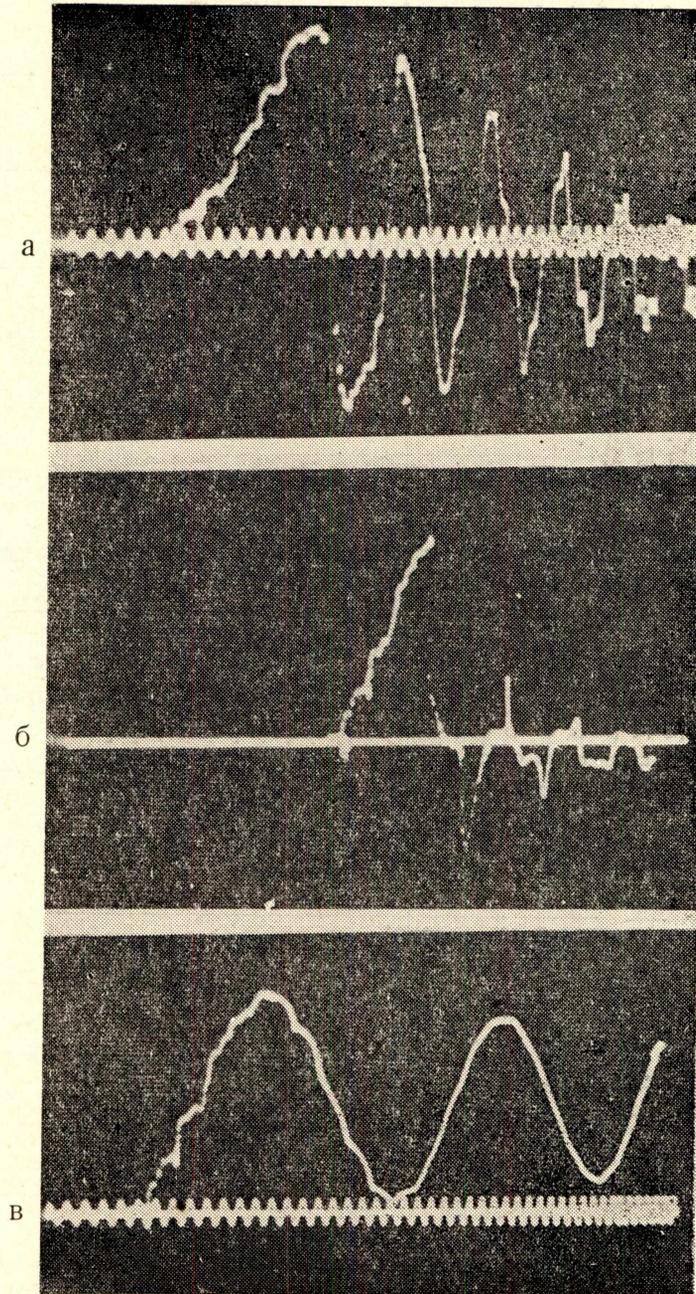


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на изоляции линии:  
а — в начале линии, б — в конце линии, в — в начале  
линии при отсутствии пробоя в конце. Градуировочная  
частота 11 Мгц

кой. Расчет величины  $U_{21\text{пр}}$  с помощью интеграла Дюамеля сведен  
в табл. 2.

Полученные в результате расчета кривые напряжения в начале и конце коаксиальной линии приведены на рис. 2 (кривые 1). Там же представлено напряжение (кривые 2) для случая, когда искровой промежуток в конце линии не пробился. В случае холостого хода линии при  $2t_{пр}$ , значительно меньшем длины исходного импульса  $U_{01}(t)$ , напряжение может быть ориентировочно определено, если в схеме рис. 1, б заместить линию сосредоточенной емкостью порядка  $100 \text{ нкФ/м}$  (кривая 3 при  $R_1 = 2 \text{ ом}$  и кривая 4 при  $R_1 = 30 \text{ ом}$ ).

Для контроля расчетов схема рис. 1, б была смоделирована, причем  $U_c(0)$  принято равным  $18 \text{ кв}$ . В конце линии был включен искровой промежуток в изоляционном масле. Полученные осциллограммы представлены на рис. 4. Разница между кривыми напряжения в конце линии (рис. 4 б и 4 в) объясняется тем, что искровой промежуток в смоделированной схеме во много раз меньше, чем в натуре, в связи с чем меньше и остаточное напряжение на искре.

### Выводы

1. Рассмотрена методика определения напряжений, воздействующих на изоляцию в различных точках высоковольтной коаксиальной передающей системы с учетом многократных отражений импульса.
2. При аperiodических импульсах с длиной волны, сравнимой с временем двойного пробега, изоляция коаксиальной системы подвергается воздействию напряжений сложной знакопеременной формы с большим числом пиков, превышающих амплитуду исходного импульса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Гинзбург. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. «Сов. радио», 1959.
2. М. В. Костенко. Атмосферные перенапряжения и грозозащита высоковольтных установок. ГЭИ, 1949.
3. И. И. Теумин. Экспериментальный анализ переходных процессов в линейных электрических цепях. «Сов. радио», 1956.
4. А. И. Гаврилин, И. И. Каляцкий, А. Г. Синябрюхов. Исследование энергетических характеристик импульсного пробоя твердых диэлектриков. Пробой диэлектриков и полупроводников. Труды IV Межвузовской конференции. г. Томск. «Энергия», 1964.