

**РАСЧЕТ ЗАТУХАНИЯ И ИСКАЖЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
УНИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В КОАКСИАЛЬНОЙ  
ПЕРЕДАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ НА ЭЦВМ «МИНСК-1»**

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

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института  
высоких напряжений)

В предыдущей работе нами был рассмотрен графоаналитический расчет затухания и искажения в коаксиальной передающей системе. В силу громоздкости расчетов затруднительно провести анализ различных вариантов исполнения коаксиальной системы с точки зрения искажения и затухания импульсов. В связи с этим нами была использована для расчетов электронная цифровая вычислительная машина «Минск-1». Был произведен расчет шести основных вариантов (табл. 1) при длинах коаксиальной системы от 1 до 6000 м.

Сопротивление, индуктивность и емкость коаксиальной системы для всех рассматриваемых случаев определялись по формулам, приведенным в предыдущей работе, причем удельное сопротивление немагнитных труб было принято равным  $\rho = 0,03 \text{ ом}\cdot\text{м}/\text{мм}^2$ , что представляет собой некоторую среднюю величину для возможных материалов труб (дюраль, медь, латунь и др.).

Активная проводимость коаксиальной системы определялась по формуле

$$G = \frac{2\pi}{\rho_V \ln \frac{r_2}{r_1}} + \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (1)$$

Для случая, когда изоляцией служит техническая вода, было принято  $\rho_V = 3 \cdot 10^3 \text{ ом}\cdot\text{см}$ . Зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от частоты для воды, приведенная в [1], в области частот  $10^5 - 10^7 \text{ гц}$  аппроксимирована формулой

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{4 \cdot 10^4}{f}.$$

Для смесей трансформаторного масла с водой использованы известные соотношения

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 V_1 + \varepsilon_2 V_2}{V_1 + V_2}, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1 V_1 + \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 V_2}{\varepsilon_1 V_1 + \varepsilon_2 V_2}, \quad (3)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — объемы диэлектриков,  
 $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость смеси и ее составляющих,

$\operatorname{tg} \delta$ ,  $\operatorname{tg} \delta_1$ ,  $\operatorname{tg} \delta_2$  — тангенс угла потерь смеси и ее составляющих.

Таблица 1

Расчетные случаи	Материал труб		Изоляция	Эл. и магн. свойства труб						Свойства изоляции		
	внешн.	внутрен.		внешняя		внутренняя		$\epsilon_r$	$\rho_V$ Ом·см	$\operatorname{tg} \delta$		
				$\mu_{r2}$	$\rho_2 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2}$	$\mu_{r1}$	$\rho_1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2}$					
1	Ст. 40X	Ст. 3	Трансформ. масло	50	0,225	75	0,157					
2	Ст. 40X	немагн.	"	50	0,225	1	0,03		2,19		$5 \cdot 10^{-4}$	
3	немагн.	немагн.	"	1	0,03	1	0,03					
4	Ст. 40X	Ст. 3.	Вода	50	0,225	75	0,157		78		$\frac{4 \cdot 10^4}{f}$	
5	Ст. 40X	Ст. 3	0,1% воды в трансф. масле	50	0,225	75	0,157		2,27		$1,42 \cdot 10^{-2} - 6,55 \cdot 10^{-4}$	
6	Ст. 40X	Ст. 3	1% воды в трансф. масле	50	0,225	75	0,157		2,95		$0,105 - 1,42 \cdot 10^{-3}$	

Как показано в [2], для расчета удельной проводимости смеси двух диэлектриков можно воспользоваться соотношением, аналогичным (2):

$$\gamma = \frac{\gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2}{V_1 + V_2}, \quad (4)$$

где  $\gamma$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  — удельная проводимость смеси и ее составляющих.

### К расчету переходных характеристик коаксиальной системы

Для расчета переходных характеристик на вычислительной машине нами были использованы наиболее общие выражения для коэффициента затухания и коэффициента фазы:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2}(RG - \omega^2 LC) + \frac{1}{2}\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}}, \quad (5)$$

$$\alpha = \sqrt{-\frac{1}{2}(RG - \omega^2 LC) + \frac{1}{2}\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}}. \quad (6)$$

Переходные характеристики вычислялись по выражению

$$h(l, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\beta l} \cdot \cos(\alpha l - l\omega\sqrt{LC}) \cdot \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega. \quad (7)$$

Вычисление интеграла (7) производилось на ЭЦВМ „Минск-1“

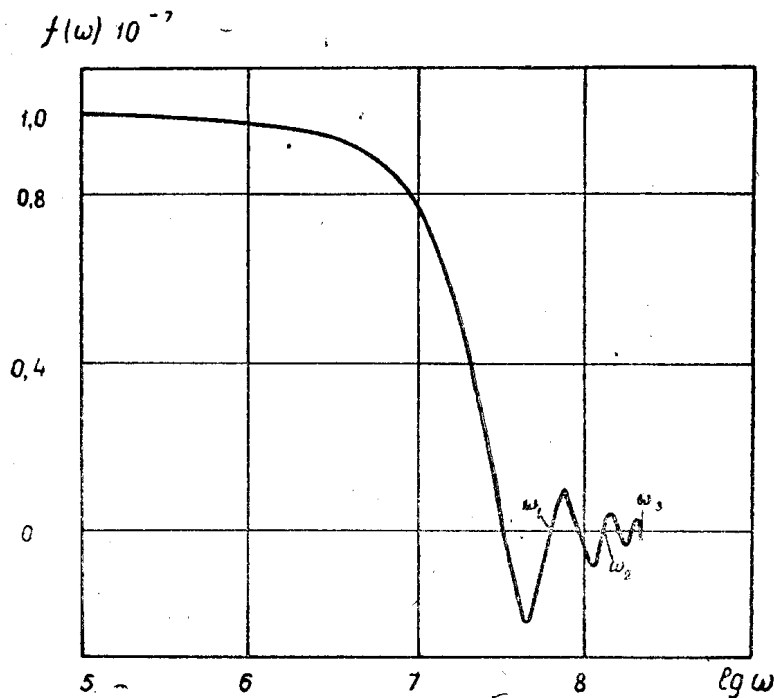


Рис. 1. Подынтегральная функция  $f(\omega)$ . Расчетный случай 3,  $l = 300$  м,  $t = 10^{-7}$  сек,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  — четные корни функции.

методом Симпсона. Вид подынтегральной функции  $f(\omega, t)$  приведен на рис. 1.

Вычисление интеграла  $I = \int_0^{\infty} f(\omega, t) \cdot d\omega$  сводится к вычислению

суммы

$$I = \int_0^{\omega_1} f(\omega, t) d\omega + \int_{\omega_1}^{\omega_2} f(\omega, t) d\omega + \int_{\omega_2}^{\omega_3} f(\omega, t) d\omega + \dots,$$

где  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  и т. д. — четные корни подынтегральной функции  $f(\omega)$  (рис. 1).

Корни  $f(\omega)$  находятся из выражения  $f(\omega, t) = 0$  или  $\sin \omega t = 0$ ,

откуда  $\omega_{i+1} = \frac{2\pi(i+1)}{t}$ ,

где  $i = 0, 1, 2, \dots$

Точность вычисления интеграла (7) задавалась равной  $\xi = 0,005$ . Для обеспечения такой точности достаточно трех-четырех корней  $\omega_{i+1}$ , то есть  $i \leq 3$ .

Для вычисления интеграла вида  $I = \int_a^b f(x) \cdot dx$  используется формула Симпсона [3]:

$$I = \frac{h}{3} [(y_0 + y_{2n}) + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{2n-1}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{2n-2})],$$

где  $y_k = f(a + kh)$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots, 2n$ .

Здесь шаг  $h = \frac{b-a}{2n}$

( $2n$  — число разбиений).

Начальное число разбиений интервала  $[ab]$  задавалось равным 8, то есть  $n = 4$ .

Далее последовательно вычислялся интеграл  $I(h)$  и  $I\left(\frac{h}{2}\right)$  и производи-

лась проверка  $|I(h) - I\left(\frac{h}{2}\right)| \leq \xi$ .

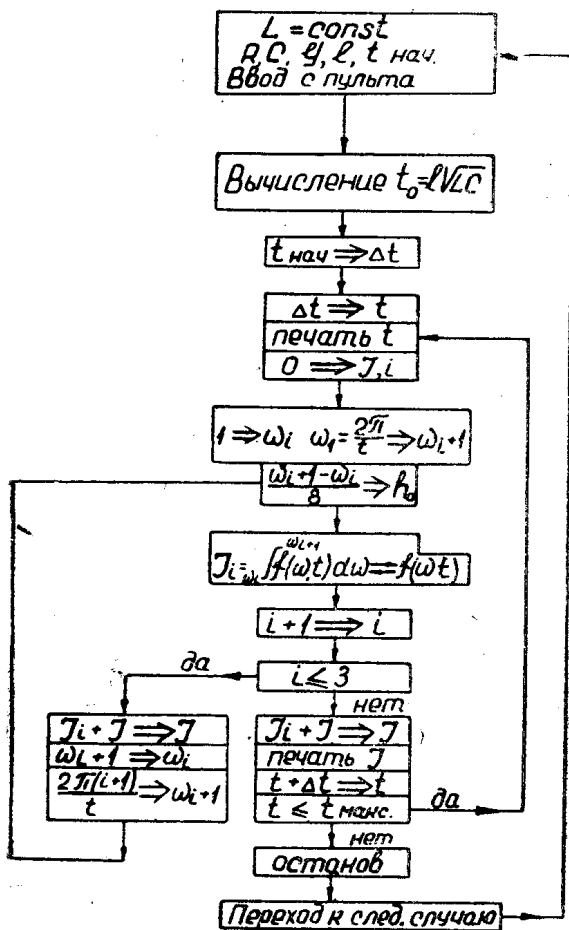


Рис. 2. Блок-схема программы вычислений переходных функций

В случае, если это неравенство не удовлетворяется, шаг автоматически делится пополам и процедура повторяется, пока не будет достигнута нужная точность.

Программа вычислений была составлена по блок-схеме, приведенной на рис. 2.

Основные результаты расчетов приведены на рис. 3—6.

На рис. 3 представлены переходные функции  $h(l, t)$  для коаксиальной системы из стальных труб, заполненных трансформаторным маслом, при длинах системы от 30 до 6000 м. Как видно из рис. 3, при передаче импульсов длительностью в несколько микросекунд, они будут претер-

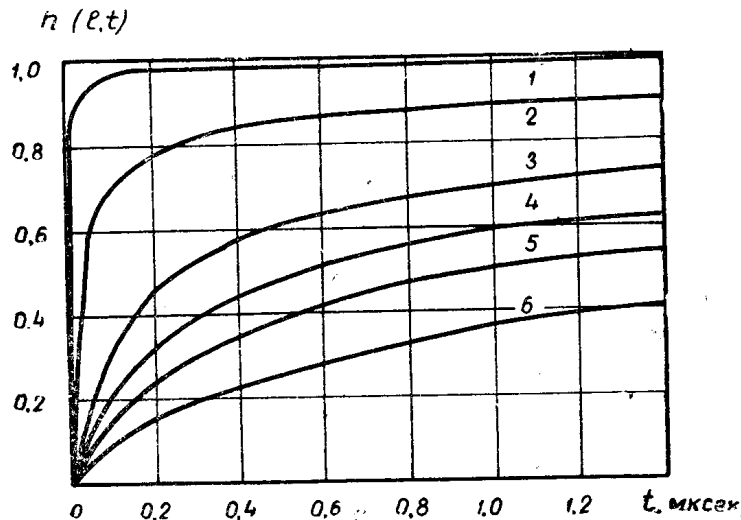


Рис. 3. Переходные функции  $h(l, t)$  для расчетного случая 1 (стальные трубы, заполненные трансформаторным маслом). 1— $l=30$  м, 2— $l=300$  м, 3— $l=1000$  м, 4— $l=1500$  м, 5— $l=2000$  м, 6— $l=3000$  м.

певать существенное затухание, а форма их будет значительно искажаться.

На рис. 4 сопоставлены переходные функции  $h(l, t)$  для 1, 2 и 3 расчетных случаев при длинах системы 300 м и 3000 м. Из сопоставления

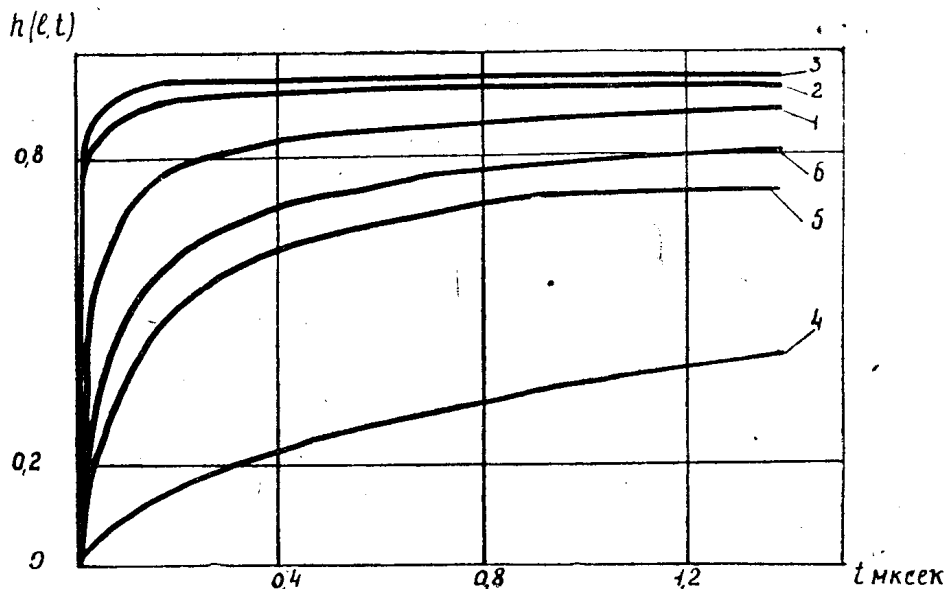


Рис. 4. Переходные функции  $h(l, t)$  для 1, 2 и 3 расчетного случая при длинах 300 и 3000 м. 1, 2, 3—соответственно расчетные случаи 1, 2 и 3 при  $l=300$  м, 4, 5, 6—соответственно расчетные случаи 1, 2, 3 при  $l=3000$  м.

ясно, что замена внутренней трубы на немагнитную существенно снижает затухание и искажение импульса. Замена второй трубы на немаг-

нитную дает уже значительно меньший эффект и при длинах до сотен метров вряд ли целесообразна.

На рис. 5 представлена переходная функция для четвертого расчетного случая (изоляция — вода) при длине коаксиальной системы  $l = 1$  м. Очевидно, что использование технической воды в качестве изоляции в коаксиальной передающей системе невозможно даже при длине системы в несколько метров.

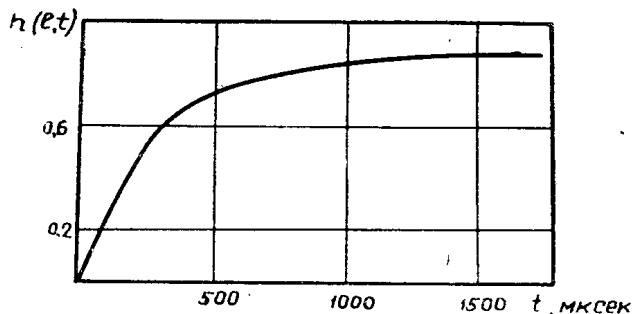


Рис. 5. Переходная функция  $h(l, t)$  для 4 расчетного случая (трубы стальные, изоляция — вода).

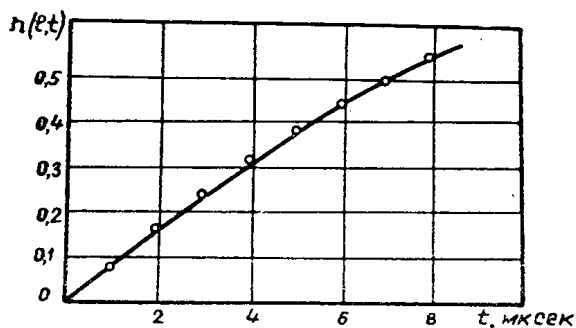


Рис. 6. Переходные функции  $h(l, t)$  для 5 расчетного случая (трубы стальные, изоляция — смесь: «0,1% воды в трансформаторном масле»). Сплошная кривая — расчет на ЭЦВМ.

На рис. 6 представлена переходная функция для пятого расчетного случая (изоляция — трансформаторное масло с 0,1% воды) при длине системы  $l = 1$  м.

Из рис. 6 видно, что при передаче прямоугольного импульса на расстояние  $l = 1$  м длина фронта импульса составит более 10 мксек. Однако это противоречит некоторым косвенным экспериментальным данным. В связи с этим нами была проведена проверка правильности расчета на ЭЦВМ графоаналитическим методом, изложенным в предыдущей нашей работе. Полученные расчетные точки нанесены на рис. 6. Они хорошо совпадают с результатами расчета на ЭЦВМ.

Отсюда следует вывод, что, по-видимому, неправомерно подстановка в (1) значений  $\rho_V$ , измеренных на постоянном напряжении. Их следует определять при импульсном воздействии. Кроме того, вызывает сомнение справедливость использования при импульсах выражения (4).

#### К расчету потерь энергии в коаксиальной системе

На рис. 7 приведена форма импульса в начале коаксиальной системы (кривая 1). С помощью интеграла Дюамеля и приведенных выше переходных характеристик системы можно рассчитать форму импульса в конце коаксиальной системы. На рис. 7 приведены результаты расчета при длине коаксиальной системы  $l = 300$  м при обеих стальных трубах (кривая 2) и для случая, когда внутренняя труба заменена на немагнитную (кривая 3).

Определяя графоаналитическим способом энергию импульсов по формуле

$$\mathcal{E} = \int_0^t \frac{U^2(t)}{z_b} \cdot dt,$$

найдем, что потери энергии импульса в коаксиальной системе при обеих стальных трубах составляют 20%, а при замене внутренней трубы на немагнитную — 8% от энергии исходного импульса.

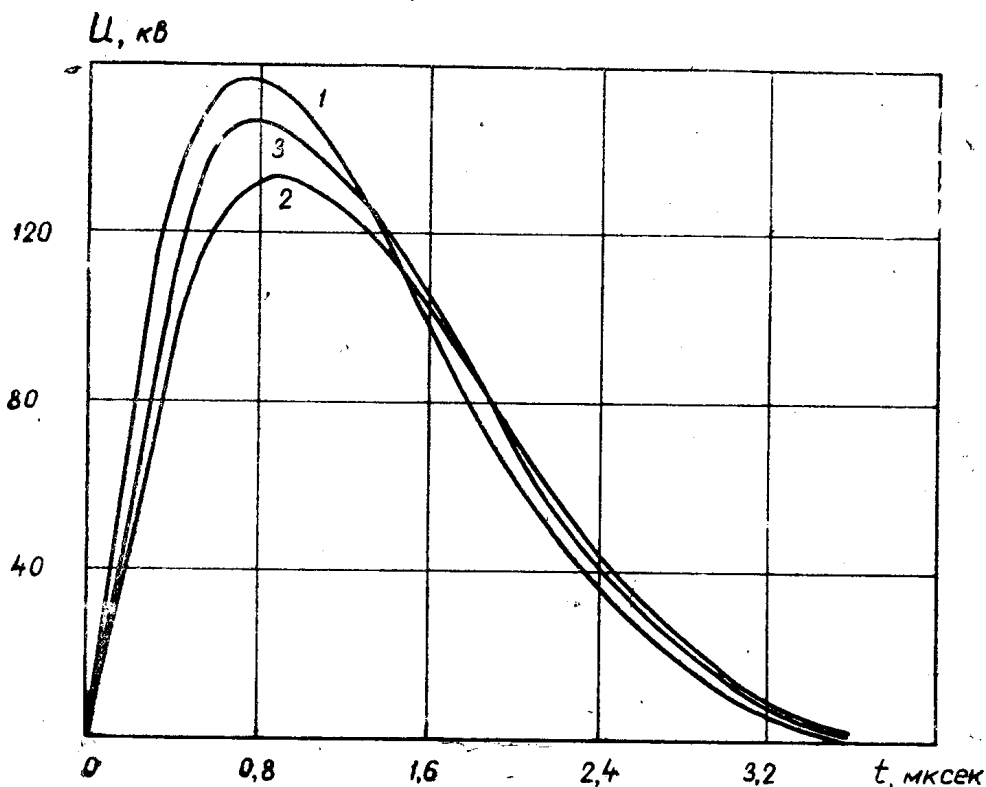


Рис. 7. Затухание и искажение импульса в коаксиальной системе. 1 — форма импульса в начале коаксиальной системы. 2 — форма импульса после пробега 300 м по коаксиальной системе из стальных труб, заполненных трансформаторным маслом, 3 — то же, внутренняя труба заменена на немагнитную.

### Выводы

1. При передаче мощных высоковольтных импульсов на расстояние в сотни и тысячи метров с точки зрения уменьшения искажения потерь энергии целесообразно использовать вместо внутренней ферромагнитной трубы трубу из немагнитного материала. Замена внешней трубы на немагнитную дает незначительный эффект.

2. Использование технической воды с удельным сопротивлением на постоянном токе порядка  $\rho_v = 3 \cdot 10^3 \text{ ом}\cdot\text{см}$  в качестве изоляции в передающей коаксиальной системе невозможно даже при передаче импульса на несколько метров.

3. Для получения надежных расчетных данных по затуханию импульсов для случаев, когда в качестве изоляции используются смеси изоляционного масла с водой, необходимо провести экспериментальные исследования импульсной проводимости воды и смесей изоляционных масел с водой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Р. Хиппель. Диэлектрики и их применение. ГЭИ, 1959.
2. В. И. Обухов, Т. Ю. Могилевская. Об определении удельной проводимости смеси диэлектриков. Изв. ТПИ, том 149, 1966.
3. И. С. Березин, Н. П. Жидков. Методы вычислений. Физматгиз, 1959.