ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 159 1967 г.

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 $\rho = 0{,}03$ *ом·м/мм²*, что представляет собой некоторую среднюю величину для возможных материалов труб (дюраль, медь, латунь и др.).

Активная проводимость коаксиальной системы определялась по формуле

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

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

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

Для смесей трансформаторного масла с водой использованы известные соотношения

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

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

где V_1 и V_2 — объемы диэлектриков,
ε, ε_1 и ε_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		
				внешняя		внутренняя				
	внешн.	внутрен.		μ_{r2}	$\rho_2 \frac{ом \cdot м}{мм^2}$	μ_{r1}	$\rho_1 \frac{ом \cdot м}{мм^2}$	ε_r	ρ_V ом·см	tg δ
1	Ст. 40Х	Ст. 3	Трансформ. масло	50	0,225	75	0,157			
2	Ст. 40Х	немагн.	„	50	0,225	1	0,03	2,19	10^{12}	$5 \cdot 10^{-4}$
3	немагн.	немагн.	„	1	0,03	1	0,03			
4	Ст. 40Х	Ст. 3.	Вода	50	0,225	75	0,157	78	$3 \cdot 10^3$	$\frac{4 \cdot 10^4}{f}$
5	Ст. 40Х	Ст. 3	0,1% воды в трансф. масле	50	0,225	75	0,157	2,27	$3 \cdot 10^6$	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$—$6{,}55 \cdot 10^{-4}$
6	Ст. 40Х	Ст. 3	1% воды в трансф. масле	50	0,225	75	0,157	2,95	$3 \cdot 10^5$	$0{,}105$—$1{,}42 \cdot 10^{-3}$

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

$$\gamma = \frac{\gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2}{V_1 + V_2}, \tag{4}$$

где γ, γ_1, γ_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:

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

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

Переходные характеристики вычислялись по выражению

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

Вычисление интеграла (7) производилось на ЭЦВМ „Минск—1“ методом Симпсона. Вид подынтегральной функции $f(\omega, t)$ приведен на рис. 1.

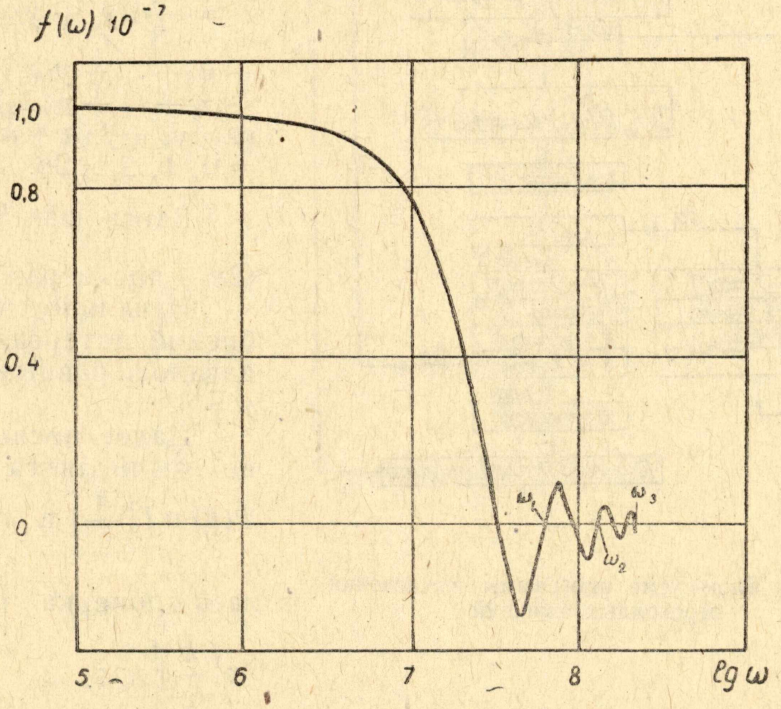

Рис. 1. Подынтегральная функция $f(\omega)$. Расчетный случай 3, $l = 300$ *м*, $t = 10^{-7}$ *сек*, ω_1, ω_2, ω_3 — четные корни функции.

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

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

где ω_1, ω_2, ω_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 $i=0, 1, 2,\ldots$

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

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

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

где $y_\kappa=f(a+\kappa h)$, где $\kappa=0, 1, 2,\ldots,2n$.

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 производилась проверка $\left|I(h)-Ix\,x\left(\frac{h}{2}\right)\right|\leqslant\xi$.

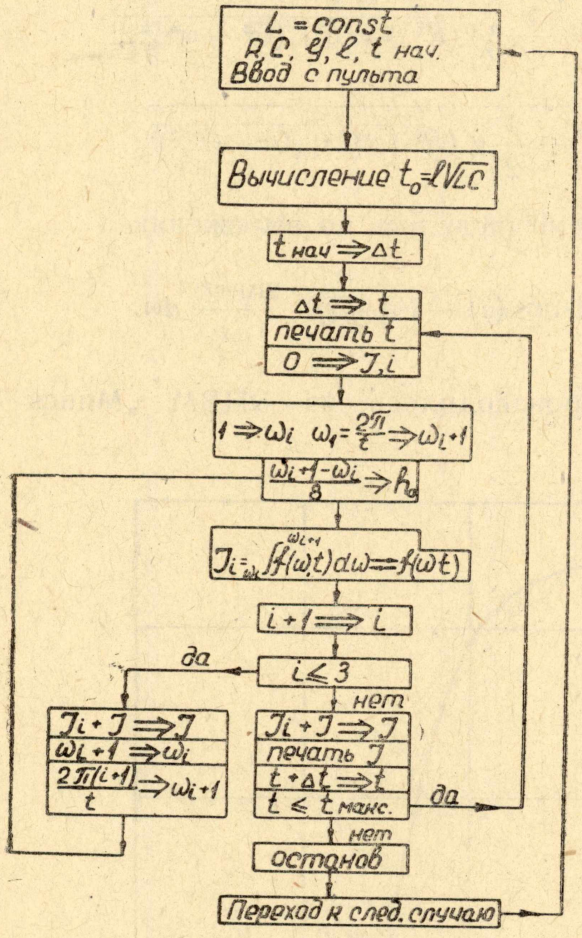

Рис. 2. Блок-схема программы вычислений переходных функций

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-

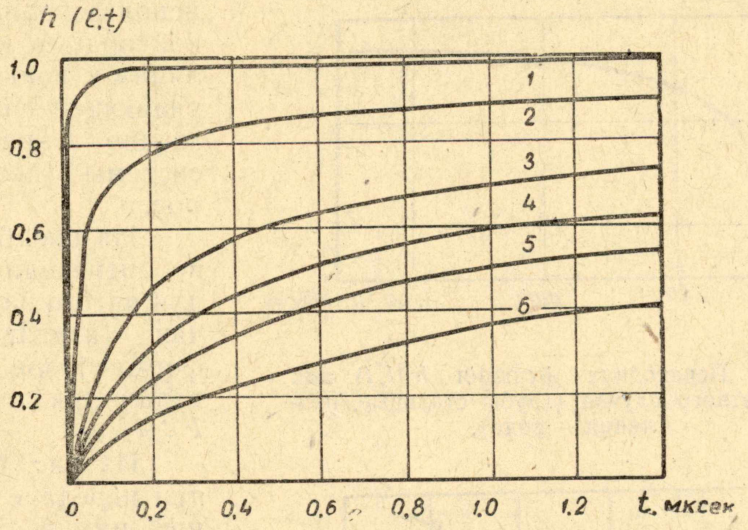

Рис. 3. Переходные функции $h(l, t)$ для расчетного случая 1 (стальные трубы, заполненные трансформаторным маслом). 1—$l = 30$ *м*, 2—$l = 300$ *м*, 3—$l = 1000$ *м*, 4—$l = 1500$ *м*, 5—$l = 2000$ *м*, 6—$l = 3000$ *м*.

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

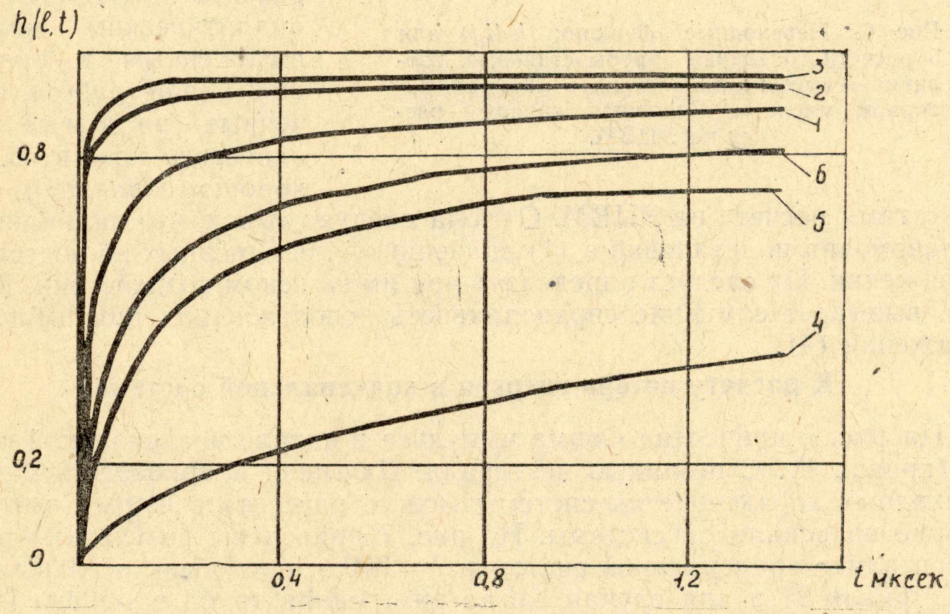

Рис. 4. Переходные функции $h(l, \tau)$ для 1,2 и 3 расчетного случая при длинах 300 и 3000 *м*. 1, 2, 3 — соответственно расчетные случаи 1, 2 и 3 при $l = 300$ *м*, 4, 5, 6 — соответственно расчетные случаи 1, 2, 3 при $l = 3000$ *м*.

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.

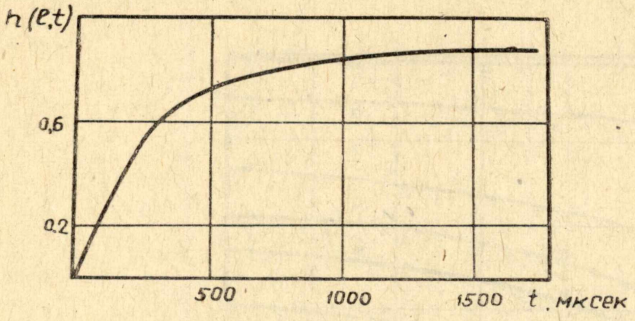

Рис. 5. Переходная функция $h(l, t)$ для 4 расчетного случая (трубы стальные, изоляция — вода).

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

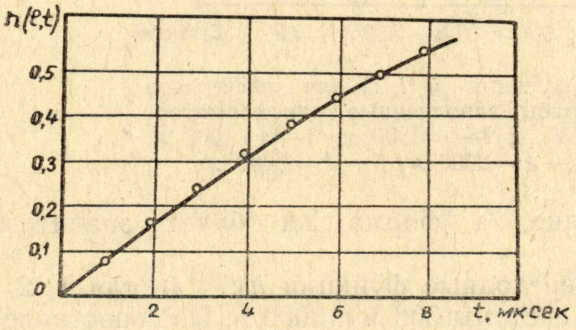

Рис. 6. Переходные функции $h(l,t)$ для 5 расчетного случая (трубы стальные, изоляция — смесь: «0,1% воды в трансформаторном масле»). Сплошная кривая — расчет на ЭЦВМ.

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, неправомочна подстановка в (1) значений ρ_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

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

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.

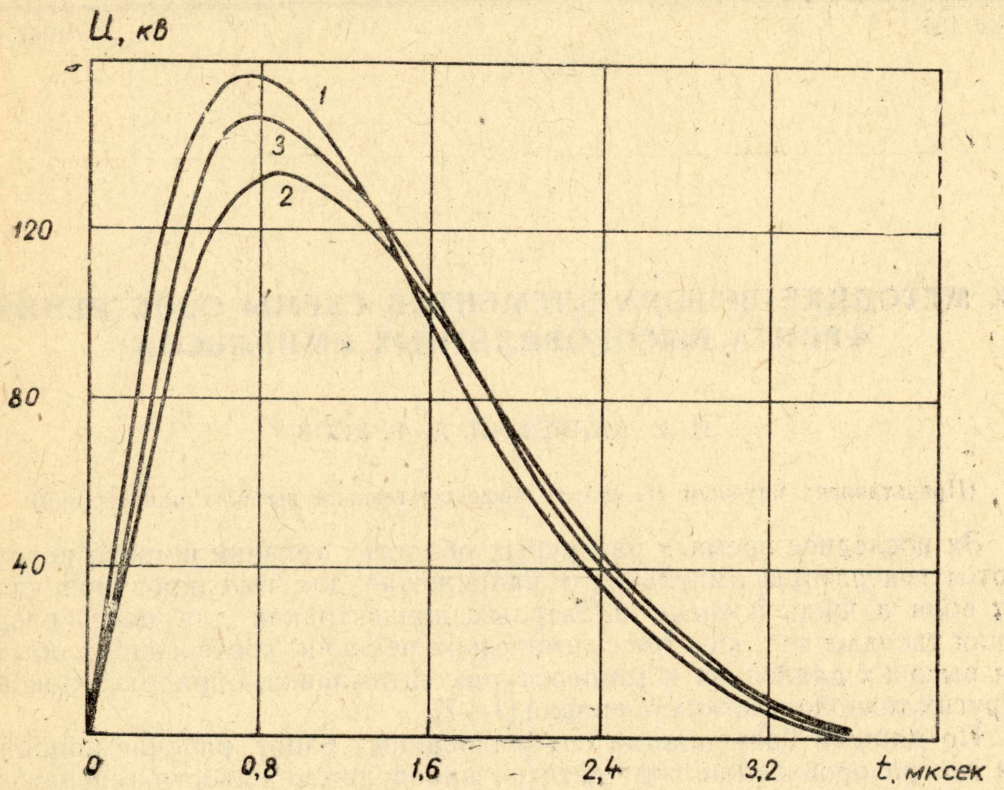

Рис. 7. Затухание и искажение импульса в коаксиальной системе. 1 — форма импульса в начале коаксиальной системы, 2 — форма импульса после пробега 300 *м* по коаксиальной системе из стальных труб, заполненных трансформаторным маслом, 3 — то же, внутренняя труба заменена на немагнитную.

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 $\rho_V = 3.10^3$ *ом.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.