

ДЕЛИТЕЛЬ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Г. А. МЕСЯЦ

Емкостный делитель, встроенный в кабель, используется для регистрации высоковольтных импульсов с длительностью фронта 10^{-9} сек [1], [2], [3]. Однако в известной нам литературе [4], [5], [6] и др. нет анализа работы таких делителей. Схематически конструкция делителя приведена на рис. 1.

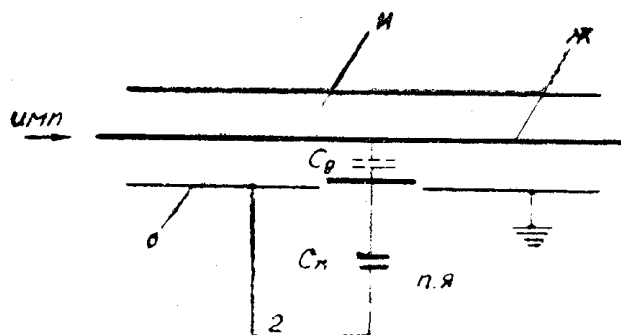


Рис. 1. Устройство разрядника; и — изоляция кабеля, ж — жила, о — оплетка.

На полиэтиленовую изоляцию кабеля накладывается металлическая пластина, которая образует емкость C_0 с жилой кабеля. Второй емкостью является собственная емкость пластин осциллографа C_n . Коэффициент деления такого делителя определяется из выражения

$$K = \frac{C_n + C_0}{C_0}. \quad (1)$$

Рассчитаем, при каких условиях такой делитель будет воспроизводить минимальный фронт при допустимых искажениях.

Схема замещения делителя представлена на рис. 2. Здесь емкость $C = \frac{C_n}{K}$, R — волновое сопротивление кабеля, индуктивность $L = L_n + L_0$, где L_n — индуктивность подводящих проводников 1 и 2

(рис. 1), L_0 — собственная индуктивность вводов трубки. Пусть $L = k_L \cdot L_0$, где $k_L \gg 1$ — коэффициент индуктивности. Предполагаем, что напряжение на фронте импульса изменяется по закону

$$U_n = 1 - e^{-at}, \quad (2)$$

Так как для получения высоковольтных импульсов с фронтом порядка 10^{-9} сек чаще всего используют искровой разрядник, а характеристика коммутации разрядника близка к экспоненте [4]. Длительность фронта импульса t_ϕ , определяемая между значениями 0 и 0,9, составит

$$t_\phi = \frac{2,3}{a}. \quad (3)$$

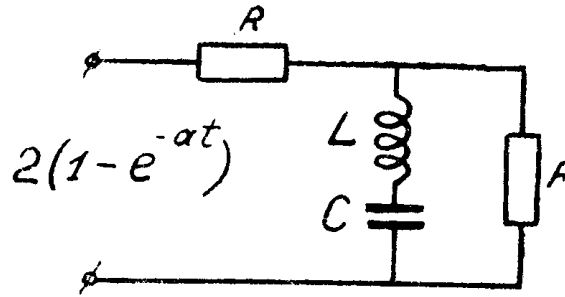


Рис. 2. Схема замещения.

Напряжение на пластинах осциллографа в операторной форме запишется так:

$$U_{oc}(p) = \frac{1}{K_g} \cdot \frac{2a}{(p+a)(2LCp^2 + RCp + 2)}. \quad (4)$$

Введением нового оператора $p' = \frac{p}{a}$ сократим число независимых параметров уравнения (4) с 4 до 2. При этом получим

$$U_{oc}(p') = \frac{1}{K} \cdot \frac{2}{(p'+1)(2Bbp'^2 + Bp' + 2)}, \quad (5)$$

где $B = aRC$, $b = a \frac{L}{R}$.

Для случая колебательного заряда емкости C получим

$$U_{oc}(x) = \frac{1}{K_g} \cdot \left[1 - \frac{1}{Bb} \cdot \frac{\frac{B}{2} - 1}{\frac{B}{2} + 1} \cdot e^{-x} + \frac{Bb - \frac{B}{2}}{\left(Bb - \frac{B}{2} + 1 \right) \sin \varphi} \cdot e^{-\frac{x}{2b}} \cdot \sin(\omega x + \varphi) \right], \quad (6)$$

$$\text{где } \omega = \sqrt{\frac{1}{Bb} - \frac{1}{16b^2}}; \quad \sin \varphi = \frac{\omega \left(bB - \frac{B}{2} \right)}{\sqrt{Bb - \frac{B}{2} + 1}}; \quad x = at.$$

Ошибка F , вносимая делителем:

$$F = \frac{1}{K} (1 - e^{-x}) \cdot U_{\text{ош}} = \frac{1}{K_g} \left[\frac{Bb - \frac{B}{2}}{1 + Bb - \frac{B}{2}} e^{-x} + \frac{Bb - \frac{B}{2}}{1 + Bb - \frac{B}{2}} \cdot e^{-\frac{x}{16b}} \sin(\omega x + \varphi) \right]. \quad (7)$$

Величина F меняется во времени, причем при $t=0$, $F=0$. Из уравнения следует, что искажения, вносимые делителем, будут малыми, если будет малой величина

$$m = Bb - \frac{B}{2} \ll 1 \quad (8)$$

и амплитуда синусоиды

$$A = \frac{Bb - \frac{B}{2}}{\left(Bb - \frac{B}{2} + 1 \right) \sin \varphi} \ll 1. \quad (9)$$

При соблюдении (8) условие (9) запишется:

$$\frac{\sqrt{x} + \sqrt{x + 16m}}{\sqrt{16 - x}} \ll 1, \quad (10)$$

где $x = \frac{B}{b}$.

Таким образом, выбором соответствующих величин m и x можно получить малые искажения фронта импульса.

Определим величину ошибки F при задачной погрешности Δx в длине фронта импульса

$$F = 0,1 - e^{-(x \pm \Delta x)}. \quad (11)$$

При погрешности $\pm 10\%$ величина $\Delta x = 0,23$ и ошибка $F = +0,02$ — $-0,026$. Для того, чтобы искажения были малыми, необходимо уменьшать амплитуду наложенных колебаний. Влияние колебаний будет несущественным, если будет мала амплитуда A . Пусть

$$A = \frac{\sqrt{x} + \sqrt{x + 16m}}{\sqrt{m + 1} \cdot \sqrt{16 - x}} = 0,1. \quad (12)$$

Фактически амплитуда будет меньше в $e^{\frac{\alpha}{4b}}$ раз.

Так как $m \ll 1$, $\alpha z \ll 16$, то уравнение (12) упростится и примет вид

$$\sqrt{z} + \sqrt{z + 16m} = 0,4. \quad (12')$$

Из (12') определим $m = f(z)$

$$m = 0,01 - 0,05 \sqrt{z}. \quad (13)$$

При значениях m , рассчитанных по (13), первый член выражения (7) для ошибки F будет много меньше второго, поэтому

$$F \approx \frac{1}{4} (\sqrt{z} + \sqrt{z + 16m}) e^{-\frac{\alpha}{4b}} \sin(\omega t + \varphi). \quad (14)$$

При значениях $\alpha \gg 0,04$ максимальное значение F при $x = x_{\varphi} \pm \Delta x$ лежит в пределах, указанных для $\Delta x = \pm 10\%$.

Таким образом, условие (13) при высказанных выше соображениях является необходимым и достаточным, чтобы погрешность в регистрируемом фронте импульсов не превышала 10% , а амплитуда колебаний на фронте была меньше 10% .

Из уравнения (8) определим длительность фронта t_{φ} в зависимости от m и z , учитывая (3)

$$t_{\varphi} = \frac{9,2 R C_n}{K(1 + \sqrt{1 + 16mz})}. \quad (15)$$

Вместо m подставим его значения из (13)

$$t_{\varphi} = \frac{9,2 C_n}{K(1 + \sqrt{1 + 0,16z - 0,8z\sqrt{z}})}. \quad (15')$$

Выразим z через коэффициент деления K , волновое сопротивление кабеля R и параметры электронно-лучевой трубки.

$$\text{Так как } B = a \cdot \frac{R C_n}{K}, \quad b = a \cdot \frac{\kappa_L \cdot L_n}{R} \quad \text{и} \quad L_n = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C_n},$$

где f_0 — резонансная частота отклоняющей системы трубки, то

$$z = \frac{4\pi^2 R^2 C_n^2 f_0^2}{K \kappa_L}. \quad (16)$$

Подставляя z в (15'), получим зависимость минимального фронта импульса, который может быть зарегистрирован данным делителем без существенных искажений от всех параметров регистрирующей системы.

В качестве примера рассчитаем t_{φ} для трубки 13-ЛО-5А и кабеля с волновым сопротивлением 75 ом .

Для этой трубки $f_0 = 600 \cdot 10^6 \text{ гц}$, $C_n = 5 \cdot 10^{-12} \text{ ф}$. При тщательной компоновке устройства можно получить $\kappa_L \approx 1$.

Подставляя все эти величины в (16), получим

$$\tau \approx \frac{2}{K_g}.$$

Таким образом, для данной трубки и кабеля t_{ϕ} зависит только от коэффициента деления K_g . Зависимость t_{ϕ} от K_g приведена на рис. 3.

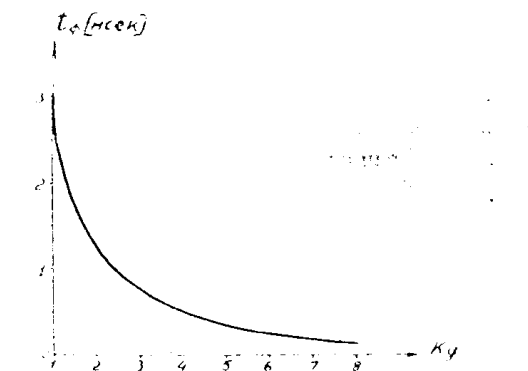


Рис. 3. Зависимость длительности фронта импульса от коэффициента деления.

Из графика рис. 3 следует, что теоретически при больших K_g можно регистрировать импульсы с фронтом менее 10^{-9} сек. Практически минимальная величина t_{ϕ} будет ограничиваться временем пролета электрона в поле отклоняющих пластин трубки [4].

Таким образом, в результате расчетов доказано, что емкостный делитель, встроенный в кабель, может воспроизводить без существенных искажений импульсы с длительностью фронта 10^{-9} сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. C. Fletcher, „Rev. Sci. Instr.“ 20 № 12, p. 124, 1949.
2. Н. А. Протопопов, В. М. Кульгавчук. ПТЭ, №1, 1960.
3. Г. А. Месяц. „Труды III межвузовской конференции по электронным ускорителям“, г. Томск, 1961.
4. И. С. Стекольников. „Импульсная осциллография и ее применение“, Изд-во АН СССР, 1949.
5. Б. Геллер, А. Веверка. „Волновые процессы в электрических машинах“, Госэнергоиздат, 1960.
6. И. Льюис, Ф. Уэлс. Миллимикросекундная импульсная техника, Из-во иностранной литературы, 1956.