

ОБ ОДНОМ ИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСА

Т. Ю. Могилевская

(Представлено профессором, доктором Воробьевым А. А.)

Преобразование Лапласа $F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$, широко используемое для определения операторных изображений функций при расчете переходных процессов, может быть представлено наглядно при помощи очень несложной схемы [1], изображенной на рис. 1. Операторное изображение напряжения $u(t)$, являющегося функцией времени:

$$U(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} u(t) dt. \quad (1)$$

Если обмотка напряжения счетчика включена на исследуемое напряжение, а токовая обмотка — в цепь разряда конденсатора C , то показание счетчика будет равно:

$$W = \int_0^{\infty} i_1 u(t) dt. \quad (2)$$

При U_1 , численно равном R , ток разряда конденсатора будет:

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = e^{-\frac{t}{RC}} = e^{-pt}, \quad (3)$$

где $p = \frac{1}{RC}$ — коэффициент затухания.

Показание счетчика при этом будет:

$$W = \int_0^{\infty} e^{-pt} u(t) dt. \quad (4)$$

На основании равенств (1) и (4)

$$W = \int_0^{\infty} e^{-pt} u(t) dt = U(p), \quad (5)$$

что дает возможность проверить правильность найденного изображения при любой форме функции-оригинала, подставив в найденное изображение вместо оператора p величину $\frac{1}{RC}$. Полученное при такой подстановке числовое значение должно оказаться равным показанию счетчика, включенного по схеме рис. 1.

При помощи указанной связи энергии и операторного изображения функции может быть решена и обратная задача — определение энергии

импульса при помощи интеграла Лапласа, так как энергия одиночного короткого импульса часто оказывается очень малой, и ее трудно измерить не только обычным счетчиком, но даже более совершенными методами (например, при помощи термисторов). Определение же энергии импульса по осциллограммам напряжения и тока [2] требует или двухлучевого осциллографа, или повторения импульсов, что не всегда удобно.

Предлагаемый способ заключается в следующем:

Если напряжение исследуемого импульса изменяется по закону: $u(t) = U_0 e^{-at}$ (почти так изменяется напряжение между электродами после пробоя искрового промежутка), то энергия этого импульса

$$W = \int_0^{\infty} u(t) i(t) dt = U_0 \int_0^{\infty} e^{-at} i(t) dt = U_0 I(p)_{p=a}. \quad (6)$$

В практике сильных токов (для испытания изоляции, исследования разряда и т. п.) обычно используется получаемый от генератора импульсных напряжений импульс с экспоненциальными фронтами типа

$$u(t) = U_0 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (7)$$

В этом случае, считая параметры цепи линейными, можно использовать принцип наложения и применить преобразование Лапласа для каждой из составляющих функции поочередно. Энергия такого импульса определяется выражением:

$$W = U_0 [I(p)_{p=-p_1} - I(p)_{p=-p_2}]. \quad (8)$$

Кривая тока $i(t)$ может быть получена расчетным путем или взята по осциллограмме и выражена аналитической функцией, что представляет некоторую трудность, но почти всегда возможно.

Если характер математического выражения зависимости $i(t)$ неизвестен, то надо сначала подобрать вид формулы, удовлетворяющей опытным данным [3], а затем определить входящие в нее коэффициенты. Формула в этом случае получается чисто эмпирической. Если же предварительно в результате проведенных ранее расчетов или исследований определен характер математической связи тока и времени, то остается только найти из опыта коэффициенты связывающего их уравнения (получается полуматематическая формула).

В ряде случаев (в частности, при линейных параметрах импульсного генератора и объекта, на который подается импульс, и при отсутствии индуктивности) кривая $i(t)$ оказывается результатом наложения экспонент с теми же коэффициентами затухания, что и составляющие напряжения. В частном случае математическое выражение $i(t)$ может иметь вид:

$$i(t) = Ae^{p_1 t} + Be^{p_2 t}. \quad (9)$$

Коэффициенты A и B могут быть определены из осциллограммы, вид которой показан на рис. 2.

Начальное значение тока

$$i(0) = m_i N, \quad (10)$$

где N — максимальная ордината кривой,
 m_i — масштаб тока.

Время t_1 , когда ток $i=0$, можно определить, сняв на эту же осциллограмму напряжение от калиброванного генератора высокой частоты.

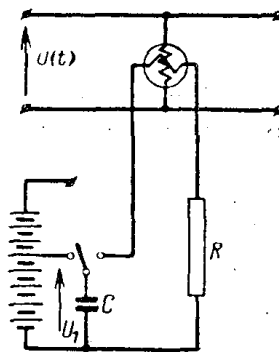


Рис. 1. Схема электрической цепи для наглядного представления преобразования Лапласа.

Последняя кривая не только даст масштаб времени, но и позволит достаточно точно провести нулевую линию (ось времени).

Для определения A и B достаточно двух уравнений:

$$A + B = i(0) = m_I N; \quad (11)$$

$$Ae^{p_1 t_1} + Be^{p_2 t_1} = 0. \quad (12)$$

Из уравнения (12)

$$B = -Ae^{(p_1 - p_2)t_1}. \quad (13)$$

Тогда

$$i(0) = m_I N = A[1 - e^{(p_1 - p_2)t_1}]. \quad (14)$$

Из (13) и (14) получим выражения коэффициентов:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{m_I N}{1 - e^{(p_1 - p_2)t_1}}; \\ B &= -\frac{m_I N}{1 - e^{(p_1 - p_2)t_1}} e^{(p_1 - p_2)t_1}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Как видно из (15), для определения A и B достаточно знать лишь разность коэффициентов затухания составляющих экспонент.

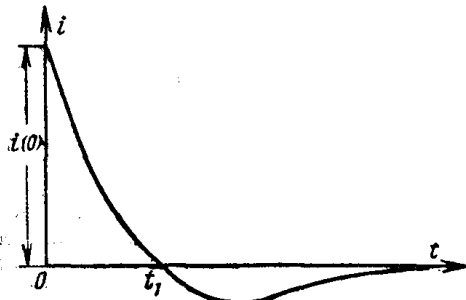


Рис. 2. Примерный вид осциллограммы тока.

Коэффициенты затухания p_1 и p_2 могут быть определены расчетным путем по параметрам импульсного генератора, как корни характеристического уравнения, или из предварительно снятой осциллограммы $u(t)$. При неизменной форме импульса эти коэффициенты не зависят от напряжения на разрядной емкости импульсного генератора.

Следует оговориться, что предлагаемый метод требует точного определения p_1 и p_2 , так как в противном случае он дает большую погрешность. Кроме того, если корни p_1 и p_2 очень сильно различаются друг от друга (в 100 раз и больше), то расчет лучше вести не по логарифмической линейке, а при помощи арифмометра.

Предлагаемый метод измерения энергии импульса применим в линейных или условно линеаризованных импульсных цепях. При несложной, типа (9), зависимости $i(t)$ этот метод дает более простое решение задачи, чем точный расчет или перемножение отдельно снятых осциллограмм $u(t)$, $i(t)$.

Литература

1. Gauster V. F., Über die Veranschaulichung der Laplace Transformation, Elektrotechnik und Maschinenbau, 71, № 9, 236, 1954.
2. Стекольников И. С., Импульсная осциллография и ее применение, ИАН СССР, 1949.
3. Блантер М. Е., Методика исследования металлов и обработки опытных данных, Metallurgizdat, 1952.