

УДК 621.314

А.А.Щерба, докт.техн.наук, И.В.Мостовяк, докт.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев), М.А.Мартыненко, докт. физ.-мат.наук (Украинский гос.ун-т пищевых технологий, Киев)

Идеальный четырехполюсник в цепи электроимпульсной системы для детерминированной нагрузки

Исследуются функциональные характеристики идеального преобразователя электроэнергии электроимпульсной системы. Получены в аналитическом виде функциональные зависимости между характеристиками идеального четырехполюсного элемента и энергетическими и режимными параметрами нагрузки, которые следует использовать при разработке электроимпульсных систем.

Досліджуються функціональні характеристики ідеального перетворювача електроенергії електроімпульсної системи. Отримано в аналітичному вигляді функціональні залежності між характеристиками ідеального чотирьохполюсного елемента та енергетичними і режимними параметрами навантаження, які треба використовувати при розробці електроімпульсних систем.

Рассмотрим электроимпульсную систему, принцип работы которой основан на возбуждении высокоэнергетических разрядных импульсов для объемной электроискровой нагрузки [2]. Основными частями таких систем являются звено постоянного напряжения с емкостным накопителем энергии, преобразователь электроэнергии и технологическая нагрузка. Одной из основных задач при разработке принципов построения электроимпульсных систем является выявление и использование статических и динамических функциональных зависимостей между характеристиками преобразователя электрической нагрузки и зарядно-разрядного контура. Предлагается в качестве преобразователя электроэнергии исследовать идеальный четырехполюсный элемент. Последний обладает свойством передавать (преобразовывать) энергию, что выражается аналитически следующим образом [1]:

$$u_1(t)i_1(t) = u_2(t)i_2(t), \quad (1)$$

где $i_i(t)$, $u_i(t)$, $i=1, 2$ — мгновенные значения токов и напряжений на входных и выходных зажимах.

К идеальным четырехполюсным элементам относятся идеальный трансформатор, вентильный преобразователь и гиратор.

На рис. 1 показана электроимпульсная система, состоящая из конденсатора емкостью C_0 , идеального четырехполюсника и нагрузки. Запишем уравнение каждого звена электроимпульсной системы. Ток i_C в емкости равен производной электрического заряда $q(t)$ по времени, т.е.

$$i_C(t) = \frac{dq(t)}{dt},$$

однако

$$q(t) = C_0 u_C(t),$$

поэтому

$$i_C(t) = C_0 \frac{du_C(t)}{dt}. \quad (2)$$

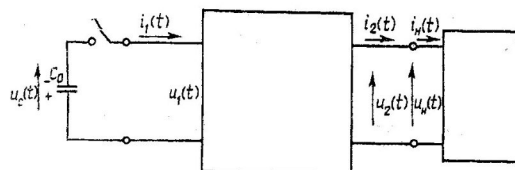


Рис. 1

Согласно (2) ток положителен, когда заряд $q(t)$ и, соответственно, напряжение $u_C(t)$ возрастают. В этом случае в емкость поступает электрическая энергия. Если энергия, ранее накопленная в электрическом поле емкости, возвращается во внешнюю цепь, то заряд положителен, но убывает, т.е. ток отрицателен.

Идеальный четырехполюсный элемент описывается системой уравнений [2]

$$u_1(t) = \rho(t) u_2(t); \quad i_2(t) = \rho(t) i_1(t), \quad (3)$$

где $\rho(t)$ — дифференцируемая функция, которая характеризует режим работы четырехполюсника. Для идеального трансформатора $\rho(t)$ может быть коэффициент трансформации, для вентильного преобразователя — коммутационной функцией.

Электроимпульсная система с учетом соединения ее частей описывается уравнениями

$$u_1(t) = u_c(t); \quad i_1(t) = -i_c(t); \quad (4)$$

$$u_2(t) = u_n(t); \quad i_2(t) = i_n(t). \quad (5)$$

С учетом (4) уравнение (2) примет вид

$$-i_1(t) = C_0 \frac{du_c(t)}{dt}. \quad (6)$$

Воспользовавшись (3), получаем

$$-\frac{i_2(t)}{\rho(t)} = C_0 \frac{d}{dt} [\rho(t) u_2(t)]. \quad (7)$$

Подставив в (7) соотношения (5), имеем

$$-\frac{i_n(t)}{\rho(t)} = C_0 \frac{d}{dt} [\rho(t) u_n(t)], \quad (8)$$

или

$$u_n(t) \frac{d\rho(t)}{dt} + \rho(t) \frac{du_n(t)}{dt} = -\frac{i_n(t)}{C_0 \rho(t)}. \quad (9)$$

Решением уравнения (9) будет функция

$$\rho(t) = \frac{1}{u_n(t)} \left(2A - \frac{2}{C_0} \int_{t_0}^t u_n(t) i_n(t) dt \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где A — произвольная постоянная.

Поскольку $u_1(t) = u_c(t)$, то

$$u_c(t) = \rho(t) u_n(t) = \left(2A - \frac{2}{C_0} \int_{t_0}^t u_n(t) i_n(t) dt \right)^{1/2} \quad (11)$$

или, с учетом того, что

$$\int_{t_0}^t u_n(t) i_n(t) dt = \int_{t_0}^t p_n(t) dt = W_n(t),$$

имеем

$$u_c(t) = \left(2A - \frac{2}{C_0} W_n(t) \right)^{1/2}, \quad (12)$$

где $p_n(t)$, $W_n(t)$ — мгновенная мощность и энергия нагрузки.

Для определения постоянной A , воспользо-

вавшись равенством

$$u_c(t) \big|_{t=t_0} = u_c(t_0),$$

получим

$$2A = u_c^2(t_0). \quad (13)$$

С учетом (13) соотношения (10) и (11) принимают вид

$$\rho(t) = \frac{1}{u_n(t)} \sqrt{u_c^2(t_0) - 2/C_0 \int_{t_0}^t p_n(t) dt}; \quad (14)$$

$$u_c(t) = \sqrt{u_c^2(t_0) - 2/C_0 \int_{t_0}^t p_n(t) dt}, \quad (15)$$

или

$$\rho(t) = \frac{u_c(t_0)}{u_n(t)} \sqrt{1 - W_n(t)/W_c(t_0)}; \quad (16)$$

$$u_c(t) = u_c(t_0) \sqrt{1 - W_n(t)/W_c(t_0)}, \quad (17)$$

где $W_c(t_0) = \frac{1}{2} C u_c^2(t_0)$ — энергия электрического поля конденсатора в момент $t = t_0$.

Согласно уравнению (2) и формуле (17) для тока емкости получаем

$$i_c(t) = -\frac{p_n(t)}{u_c(t_0)} \frac{1}{\sqrt{1 - W_n(t)/W_c(t_0)}}. \quad (18)$$

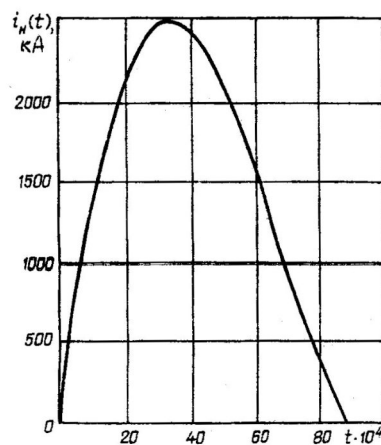


Рис. 2

Таким образом, функция идеального четырехполюсника, напряжение и ток в емкости определяются параметрами нагрузки: энергией $W_n(t)$, мощностью $p_n(t)$ и напряжением $u_n(t)$, а также начальным напряжением или энергией электрического

поля конденсатора в момент $t = t_0$.

Начальное напряжение на емкости будем выбирать исходя из того, что конденсатор в момент $t = t_k$ должен разрядиться, т.е. напряжение на нем

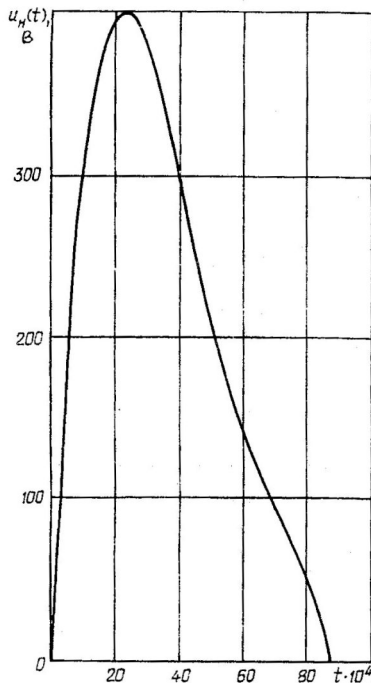


Рис. 3

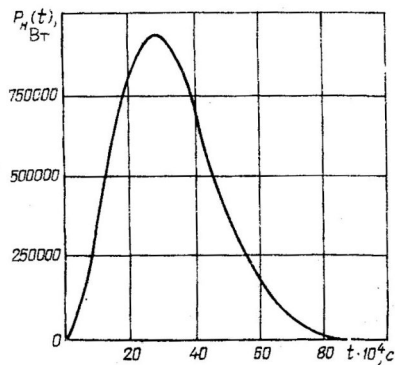


Рис. 4

$u_c(t)$ будет равняться нулю. Из выражения (15) находим

$$u_c(t_0) = \sqrt{2/C_0 \int_{t_0}^{t_k} p_n(t) dt} = \sqrt{2/C_0 W_n(t_k)} \quad (19)$$

В качестве примера были осуществлены расчеты для нагрузки, когда ток $i_n(t)$ изменяется согласно рис. 2, напряжение $u_n(t)$ — рис. 3, мгновенная мощность — рис. 4. В этом случае сопротивление нагрузки $R_n(t)$ изменяется, как показано на рис. 5,

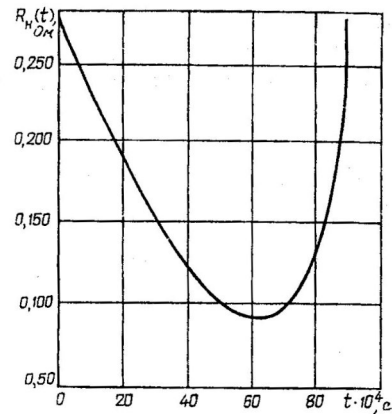


Рис. 5

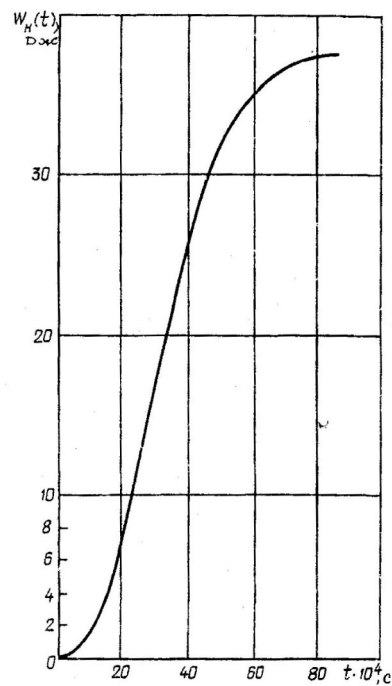


Рис. 6

энергия $W_n(t)$ — рис. 6. На рис. 7 изображен график изменения напряжения на емкости $u_c(t)$. График изменения функции идеального четырехполюсника $\rho(t)$ показан на рис. 8. Начальное напряжение на конденсаторе согласно формуле (19) $u_c(t_0 = 0) = 604,648$ В, $C_0 = 200$ мкФ.

Таким образом, в аналитическом виде выявлены функциональные зависимости между характеристиками идеального четырехполюсного элемента и энергетическими и режимными параметрами нагрузки, которые следует использовать при

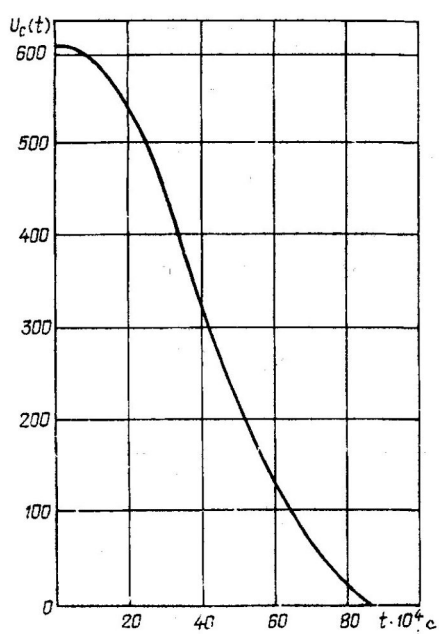


Рис. 7

разработке электроимпульсных систем.

1. Мостовяк И.В. Условия идеальности параметрических многополюсников. — К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1994. — С. 15—19. — Препринт № 5—6.

2. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизации параметров полупроводниковых электроимпульсных систем искрового диспергирования слоя токопроводящих материалов

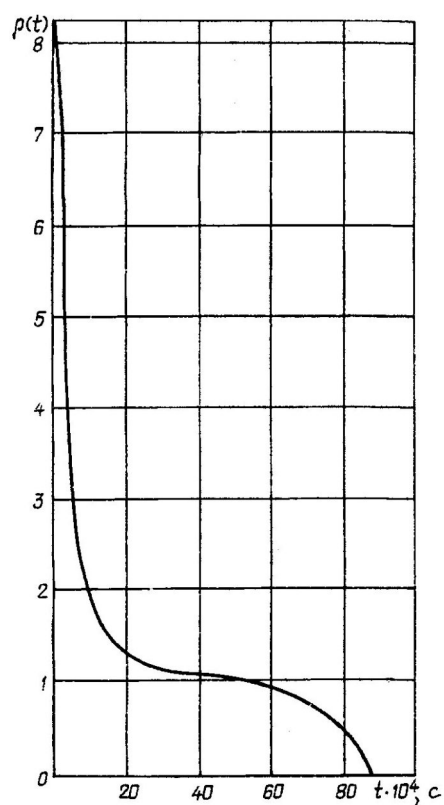


Рис. 8

//Стабилизация параметров электрической энергии: Сб.науч.тр. — К., 1992. — С. 12—29.

Надійшла 12.03.97