

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК

Д. И. АНДЕРМАН, И. Д. КУТЯВИН

В настоящее время созданы различные электронно-лучевые установки, использующие свойства электронного луча как инструмента.

В качестве источника электропитания ускорительной трубки можно использовать различные схемы. К ним относятся: трансформаторы с линейным распределением потенциала, источники на основе каскадных схем

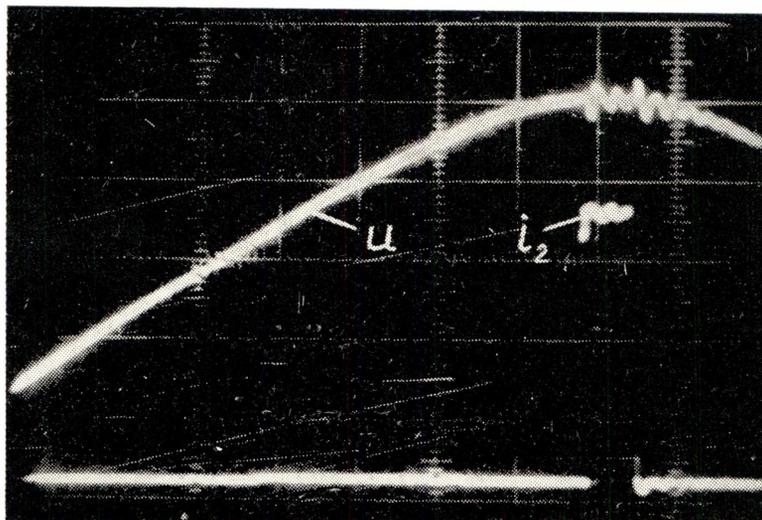


Рис. 1. Осциллограмма напряжения на нагрузке (полпериода) и тока в нагрузке в случае колебательного характера переходного процесса.

умножения, генераторы импульсного напряжения на основе параллельного заряда конденсаторов с переключением на последовательное соединение и др. Одним из возможных решений является применение высоковольтного трансформатора, работающего от сети промышленной частоты 50 гц в импульсном режиме при вторичном напряжении $u_2 = 80 - 100$ кв [1]. Основное требование, предъявляемое к такому трансформатору, следующее: чтобы сформировать луч диаметром порядка 10—50 мк, разброс электронов по энергии не должен превышать 0,01%. Следовательно, в период импульсного включения нагрузки изменение вторичного напряжения не должно быть более 0,01%. При этом время включения нагрузки желательно получить максимальным. Очевидно, и это подтверждается экспериментом, что как

при включении нагрузки, так и при ее выключении в цепи возникают переходные процессы, продолжительность и характер которых зависят от параметров самого трансформатора, от величины и характера нагрузки, емкости, включенной на выход трансформатора, и фазы напряжения в момент коммутации.

В зависимости от соотношения параметров переходный процесс может носить как колебательный характер (рис. 1), так и апериодический.

Для аналитического исследования функции напряжения от времени воспользуемся схемой замещения трансформатора, представленной на рис. 2. Здесь

L_K — индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, приведенная ко вторичной обмотке $L_K = L_1 + L_2$;

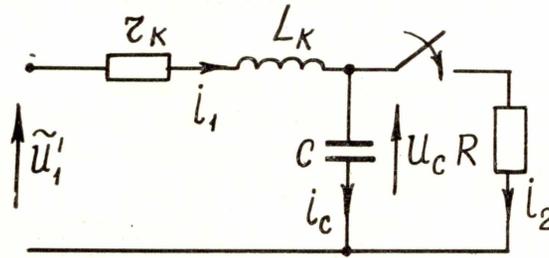


Рис. 2.

r_K — активное сопротивление обмоток, приведенное ко вторичной обмотке $r_K = r_2 + r_1$;

C — емкость, включающая в себя емкость высоковольтной обмотки на землю и дополнительно включенную емкость;

R — сопротивление ускорительной трубки. В случае, когда напряжение, поданное на катод, и отпирающий сигнал на сетке сохраняются постоянными, можно считать R также неизменной величиной.

$u_1' = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ — синусоидальное напряжение с частотой сети $f_1 = \frac{\omega}{2\pi}$, поданное на вход трансформатора и приведенное ко вторичной обмотке;

ψ_1 — фаза напряжения в момент включения нагрузки. Уравнения электрического равновесия цепи в дифференциальной форме:

$$\left. \begin{aligned} u_1' &= r_K i_1 + L_K \frac{di_1}{dt} + u_c \\ i_2 &= \frac{u_c}{R} \\ i_c &= C \frac{du_c}{dt} \\ i_1 &= i_2 + i_c \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Эту систему дифференциальных уравнений можем свести к одному дифференциальному уравнению второго порядка:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{du_c}{dt} \left(\frac{r_K}{L_K} + \frac{1}{CR} \right) + u_c \left(\frac{1}{L_K C} + \frac{r_K}{L_K CR} \right) = \frac{u_1'}{L_K C}. \quad (2)$$

Интегрируя уравнение (2), получим выражение для переходного напряжения на нагрузке. Характер переходного процесса определяется корнями характеристического уравнения (3) и зависит от параметров схемы

замещения

$$p^2 + p \left(\frac{r_k}{L_k} + \frac{1}{CR} \right) + \frac{1}{L_k C} + \frac{r_k}{L_k CR} = 0. \quad (3)$$

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{r_k}{L_k} + \frac{1}{CR} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{r_k}{L_k} + \frac{1}{CR} \right)^2 - \left(\frac{1}{L_k C} + \frac{r_k}{RCL_k} \right)}.$$

Если корни p_1 и p_2 вещественные разные числа, то переходный процесс аperiodический и уравнение напряжения $u_c(t)$ можно получить в виде

$$u_c(t) = u_{c \text{ пр } +} + u_{c \text{ св}} = u_{c \text{ пр } +} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (4)$$

где $u_{c \text{ пр } +}$ — принужденная составляющая напряжения на включенной нагрузке

$$u_{c \text{ пр } +} = \frac{U_{1m} R \sin \left(\omega t + \psi_1 - \frac{\pi}{2} = \arctg \frac{\omega^2 L_k CR - r_k - R}{\omega CR r_k + \omega L_k} \right)}{\sqrt{(\omega CR r_k + \omega L_k)^2 + (\omega^2 L_k CR - r_k - R)^2}}, \quad (5)$$

$$u_{c \text{ св}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (6)$$

$u_{c \text{ св}}$ — свободная составляющая напряжения.

A_1 и A_2 — постоянные интегрирования, которые определяются на основании законов коммутации из начальных условий схемы в момент коммутаций

$$A_1 = \frac{b_1 p_2 - \omega b_2}{p_2 - p_1}, \quad (7) \quad A_2 = \frac{\omega b_2 - b_1 p_1}{p_2 - p_1}, \quad (8)$$

где

$$b_1 = U_{1m} \left[\frac{\sin \left(\psi_1 - \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega L_k - \frac{1}{\omega C}}{r_k} \right)}{\sqrt{r_k^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 L_k C - 1)^2}} - \frac{R \cdot \sin \left(\psi_1 - \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega^2 L_k CR - r_k - R}{r_k R \omega C + \omega L_k} \right)}{\sqrt{(r_k R \omega C + \omega L_k)^2 + (\omega^2 L_k CR - r_k - R)^2}} \right], \quad (9)$$

$$b_2 = \frac{U_{1m}}{\omega C} \left[\frac{\sin \left(\psi_1 - \arctg \frac{\omega L_k - \frac{1}{\omega C}}{r_k} \right)}{\sqrt{r_k^2 + \left(\omega L_k - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} - \frac{\sin \left(\psi_1 - \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega L_k - \frac{1}{\omega C}}{r_k} \right)}{\sqrt{r_k^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 L_k C - 1)^2}} - \frac{R \omega C \sin \left(\psi_1 - \arctg \frac{\omega^2 L_k CR - r_k - R}{r_k R \omega C + \omega L_k} \right)}{\sqrt{(r_k R \omega C + \omega L_k)^2 + (\omega^2 L_k CR - r_k - R)^2}} \right]. \quad (10)$$

В случае, когда корни характеристического уравнения (3) сопряженные комплексные числа

$$p_{1,2} = -b \pm j \omega_{св},$$

где

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{r_k}{L_k} + \frac{1}{CR} \right), \quad (11) \quad \omega_{св} = \sqrt{\left(\frac{1}{L_k C} + \frac{r_k}{RCL_k} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{r_k}{L_k} + \frac{1}{CR} \right)^2}, \quad (12)$$

переходный процесс имеет колебательный характер и уравнение напряжения $u_c(t)$ можно получить в виде

$$u_c(t) = u_{c \text{ пр } +} + A_3 e^{-bt} \sin(\omega_{св} t + \varphi). \quad (13)$$

где

$$u_{c\text{св}} = A_3 e^{-bt} \sin(\omega_{\text{св}} t + \varphi) \quad (14)$$

свободная составляющая напряжения;

A_3 и φ — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий

$$\varphi = \arctg \frac{b_1 \omega_{\text{св}}}{\omega b_2 + b b_1} \quad (15) \quad A_3 = \frac{b_1}{\sin \varphi} \quad (16)$$

Постоянные интегрирования и принужденная составляющая напряжения $u_{\text{снр}+}$ зависят не только от параметров схемы замещения, но и от фазы напряжения u_1 в момент включения — от φ_1 . На рис. 3 изображена кривая напряжения $u_c(t)$ при некотором сочетании параметров. Здесь свободная составляющая напряжения имеет колебательный характер, частота свободных колебаний $\omega_{\text{св}}$ близка к частоте сети ω .

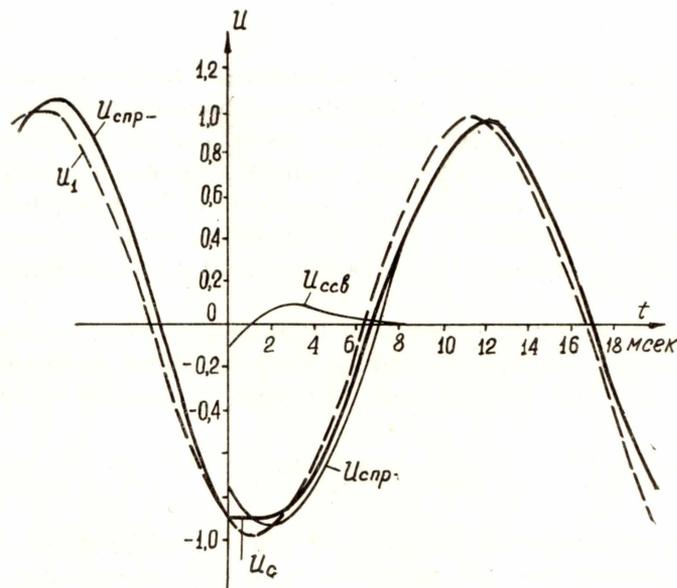


Рис. 3. Принуждение, свободное и переходное напряжение на нагрузке при включении ее в схеме рис. 2, питаемой напряжением u_1

После коммутации принужденная составляющая напряжения $u_{\text{снр}+}$ растет по абсолютной величине, а свободная составляющая $u_{\text{св}}$ уменьшается. Результирующее напряжение в течение некоторого времени остается постоянным по величине.

Из изложенного можно сделать вывод:

при правильном соотношении параметров трансформатора и нагрузки, включаемой на незначительную часть периода переменного синусоидального напряжения, возможно получить на нагрузке постоянное напряжение. В результате исследования, проведенного авторами, получены предельные и оптимальные соотношения параметров трансформатора и нагрузки, позволяющие получить импульс постоянного напряжения максимальной длительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Носков, А. Т. Соколов. Применение переменного напряжения для питания ускорительных трубок, Электронные ускорители, Труды V Межвузовской конференции, Томск, 17—21 марта 1964 г., Атомиздат, Москва, 1966.
2. Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. Основы теории цепей, Госэнергоиздат, 1963.