

ФЛЮКТУАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ЗАДЕРЖКИ ВКЛЮЧЕНИЯ

Н. Д. Колпаков, В. Ф. Никитин

Харьков

Управляемые четырехслойные переключающие диоды — тиристоры — нашли широкое применение в ряде импульсных устройств. Тиристор как ключевой элемент характеризуется запаздыванием момента его переключения по отношению к управляющему импульсу. Это запаздывание обусловлено процессами накопления зарядов в соответствующих объемах его структуры. Процессы накопления зарядов, в свою очередь, зависят от тока, протекающего через тиристор определяемого процессами генерации, рекомбинации и лавинного умножения носителей зарядов. Так как данные процессы в объемах и переходах тиристора являются процессами случайными, случайной будет и величина времени запаздывания включения.

Описанию процессов в тиристоре, происходящих при его включении и выключении, посвящено большое число работ [1, 2], однако влияние флюктуационных процессов в структуре тиристора на стабильность времени задержки включения не рассматривалось, тогда как в ряде точных устройств указанные нестабильности могут иметь принципиальное значение. Рассмотрим одну из возможных схем использования тиристора, в которой может быть измерено время задержки перехода тиристора в проводящее состояние (рис. 1).

Время включения тиристора принято разбивать на два интервала: интервал задержки включения t_z и интервал лавинного нарастания тока через прибор t_n (рис. 2). Процессы, происходящие в тиристоре на участках задержки включения, и процессы лавинного

нарастания тока существенно отличаются [1, 2]. В интервале t_n в тиристоре регенеративно нарастает ток и уменьшается падение напряжения. Можно считать, что при работе тиристора на активную нагрузку длительность интервала t_n не зависит от амплитуды напряжения управления и параметров цепи нагрузки.

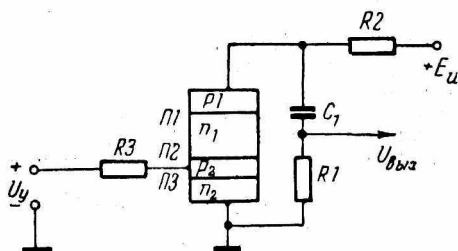


Рис. 1.

Длительность этого интервала равна некоторой постоянной величине, определяемой выражением [2]

$$t_n \approx \frac{1}{\omega} \ln 9, \quad (1)$$

где ω — параметр, зависящий от структуры прибора.

Длительность интервала задержки t_s определяется параметрами цепи управления и источника управляющих импульсов [1, 2]. Для оценки причин и характера нестабильности этого интервала рассмотрим эквивалентную схему цепи управления, изображенную на рис. 3.

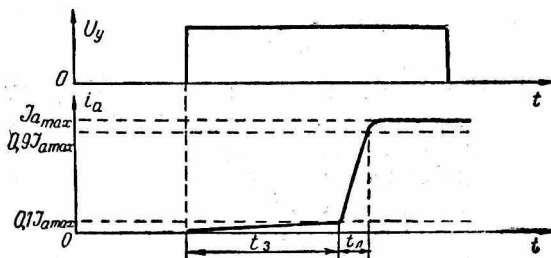


Рис. 2.

На рисунке приведены следующие обозначения:

- $r_i(t)$ — внутреннее сопротивление источника управляющих импульсов;
- $U_y = \text{const}$ — напряжение источника управляющих импульсов;
- $C_d(t)$ — диффузионная емкость цепи управления;
- $r_{ш}(t)$ — сопротивление, шунтирующее диффузионную емкость цепи управления;
- $r_s(t)$ — эквивалентное сопротивление, равное сумме объемных сопротивлений двух крайних p и n слоев тиристора (рис. 1).

Величины $r_i(t)$, $r_{ш}(t)$, $r_s(t)$, $C_d(t)$ являются флюктуирующими. Источники флюктуаций их — генерационно-рекомбинационные, фликкерные и дробовые шумы [3].

Анализ причин и характера нестабильностей интервала задержки включения тиристора проведем при условии, что элементы цепи

нагрузки (в нашем случае R_1, R_2, C_1), напряжение источника E_u и температура тиристора постоянны; сопротивление переходов П1 и П3 по сравнению с сопротивлением перехода П2 пренебрежимо мало.

В этом случае можно считать, что переключение тиристора происходит при достижении входным напряжением некоторого постоянного уровня $U_{пер}$:

$$u_{вх} = U_{пер}. \quad (2)$$

Тогда выражение для оценки времени задержки включения можно записать в виде

$$t_3 = -\tau \ln \left(1 - \frac{U_{пер}}{u_{вх}} \right) \quad (3)$$

где τ — постоянная времени цепи управления.

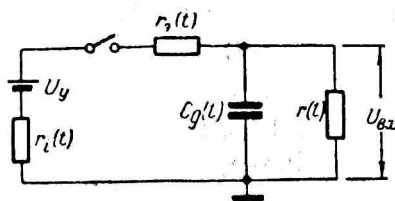


Рис. 3.

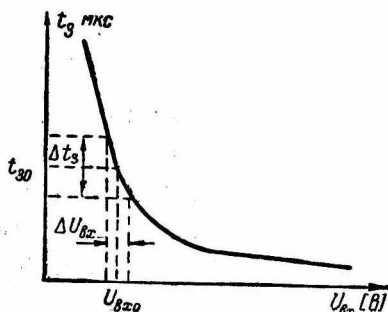


Рис. 4.

Учитывая, что постоянная времени цепи управления много больше времени задержки включения, а коэффициент корреляции между величинами $r_s(t)$ и $r_{ш}(t)$, с одной стороны, и величиной $c_g(t)$, с другой, равен $\rho \cong -1$, нестабильностями времени задержки за счет флюктуаций постоянной времени τ будем пренебрегать.

Зависимость времени задержки от входного напряжения, построенная по (3), представлена на рис. 4. Экспериментально эта зависимость подтверждается.

При $\frac{\Delta u_{вх}}{U_{вх(0)}} \ll 1$ можно принять, что

$$\Delta t_3 \approx k \Delta u_{вх}, \quad (4)$$

где $k \approx \left. \frac{dt_3}{du_{вх}} \right|_{u_{вх} = U_{вх(0)}}$.

В соответствии с эквивалентной схемой напряжение на входе тиристора находим из уравнения

$$\frac{du_{вх}}{dt} + \frac{r_i(t) + r_s(t) + r_{ш}(t) + \frac{dc_A(t)}{dt} r_{ш}(t) [r_i(t) + r_s(t)]}{r_{ш}(t) c_A(t) [r_i(t) + r_s(t)]} =$$

$$= \frac{1}{c_d(t) [r_i(t) + r_s(t)]} U_y. \quad (5)$$

При нулевых начальных условиях решение этого уравнения имеет вид

$$\begin{aligned} u_{вх}(t) &= U_y \times \\ &\times \exp \left\{ - \int_0^t \frac{r_i(t) + r_s(t) + r_{ш}(t) + \frac{dc_d(t)}{dt} r_{ш}(t) [r_i(t) + r_s(t)]}{r_{ш}(t) c_d(t) [r_i(t) + r_s(t)]} dt \right\} \times \\ &\times \int_0^t \frac{1}{c_d(t) [r_i(t) + r_s(t)]} \times \\ &\times \exp \left\{ \int_0^t \frac{r_i(t) + r_s(t) + r_{ш}(t) + \frac{dc_d(t)}{dt} r_{ш}(t) [r_i(t) + r_s(t)]}{r_{ш}(t) c_d(t) [r_i(t) + r_s(t)]} dt \right\} dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Величины $r_i(t)$, $r_s(t)$, $r_{ш}(t)$, $c_d(t)$ представим в виде

$$r_i(t) = r_{i_0} + \Delta r_i = r_{i_0} (1 + \delta r_i); \quad (7)$$

$$r_s(t) = r_{s_0} + \Delta r_s = r_{s_0} (1 + \delta r_s); \quad (8)$$

$$r_{ш}(t) = r_{ш_0} + \Delta r_{ш} = r_{ш_0} (1 + \delta r_{ш}); \quad (9)$$

$$c_d(t) = c_{d_0} + \Delta c_d = c_{d_0} (1 + \delta c_d). \quad (10)$$

Подставляя (7)–(10) в (6) и удерживая члены первого порядка малости, получаем

$$\begin{aligned} u_{вх}(t) &= \frac{U_y}{\alpha_2} \exp \{-\alpha_1 t\} \left[\int_0^t \exp \{\alpha_1 t\} dt - x_1(t) \int_0^t \exp \{\alpha_1 t\} dt + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^t x(t) \exp \{\alpha_1 t\} dt, \right. \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{r_{i_0} + r_{s_0} + r_{ш_0}}{c_{d_0} r_{ш_0} (r_{i_0} + r_{s_0})}; \quad \alpha_2 = (r_{i_0} + r_{s_0}) c_{d_0};$$

$$x(t) = x_1(t) - x_2(t); \quad x_1(t) =$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^t \frac{\delta \left(\frac{dc_d(t)}{dt} \right) c_{d_0} r_{ш_0} (r_{i_0} + r_{s_0}) - (r_{i_0} + r_{s_0}) (\delta r_{ш} + \delta c_d) -}{c_{d_0} r_{ш_0} (r_{i_0} + r_{s_0})}; \\ &\quad - r_{ш_0} \left(\frac{r_{i_0}}{r_{i_0} + r_{s_0}} \delta r_i + \frac{r_{s_0}}{r_{i_0} + r_{s_0}} \delta r_s + \delta c_d \right) dt; \end{aligned}$$

$$x_2(t) = \frac{r_{i_0}}{r_{i_0} + r_{s_0}} \delta r_i + \frac{r_{s_0}}{r_{i_0} + r_{s_0}} \delta r_s + \delta c_d.$$

Корреляционная функция входного напряжения, определенная по (11), равна

$$\begin{aligned}
 R_{u_{(вх)}}(t_1, t_2) = & \frac{U^2}{\alpha_2^2} \exp\{-\alpha_1(t_1 + t_2)\} \times \\
 & \times \left[R_{x_1}(t_1, t_2) \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \exp\{\alpha_1(t_1 + t_2)\} dt_1 dt_2 - \right. \\
 & - 2 \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \exp\{\alpha_1(t_1 + t_2)\} R_{x_1 x}(t_1, t_2) dt_1 dt_2 + \\
 & \left. + \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \exp\{\alpha_1(t_1 + t_2)\} R_x(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \right]. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Тогда в соответствии с (4) выражение для дисперсии флуктуаций времени задержки может быть представлено в виде

$$\sigma_{t_s}^2(t_s) = k^2 R_{u_{(вх)}}(t_s, t_s). \quad (13)$$

Для вычисления корреляционной функции (12) достаточно знать корреляционные функции величин $r_i(t)$, $r_s(t)$, $r_{ш}(t)$, $c_d(t)$. Методика определения последних известна [3].

Экспериментальная проверка полученных результатов подтверждает состоятельность принятой модели исследований флуктуаций времени задержки включения тиристорov.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Кузьмин, К. Я. Сенаторов. Четырехслойные полупроводниковые приборы. Изд-во «Энергия», 1967. 184 с.
2. Л. А. Меерович и др. Магнитные генераторы импульсов. Изд-во «Советское радио», 1968. 470 с.
3. Ван-дер-Зил. Флуктуационные явления в полупроводниках. Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 227 с.