

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА НЕБАЛАНСНОГО ДИОДНО-РЕГЕНЕРАТИВНОГО КОМПАРАТОРА НА ОСНОВЕ БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОРА

В. Н. Удовиченко

Харьков

Компараторы на основе различных схем релаксационных генераторов на транзисторах в настоящее время привлекают внимание инженеров, занимающихся разработкой различных контрольно-измерительных приборов.

В работе [1] предложены инженерные методы расчета пороговой разности срабатывания рассматриваемой схемы (рис. 1):

$$\Delta U_{\text{ср}} = f_1(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

где $X_1, X_2, \dots, X_n$ — параметры элементов схемы.

В технике наряду с пороговой разностью срабатывания представляет интерес пороговая разность «отпускания» схемы:

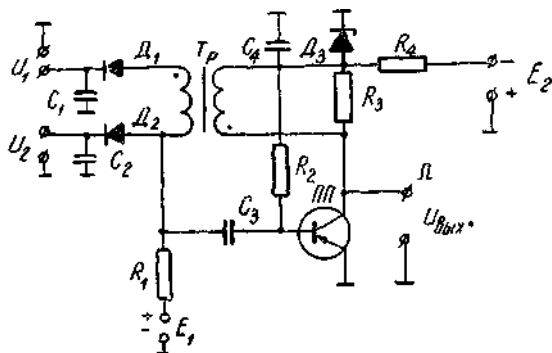


Рис. 1.

$$\Delta U_{\text{отп}} = f_2(X_1, X_2, \dots, X_m).$$

На практике удобнее пользоваться величиной разности

$$\Delta U_{\text{гист}} = \Delta U_{\text{ср}} - \Delta U_{\text{отп}}, \quad (1)$$

которую назовем гистерезисом схемы.

В статье дан вывод аналитических соотношений, позволяющих оценить величину гистерезиса, и показана зависимость величины гистерезиса от параметров элементов схемы и режима их работы.

Найдем аналитическое выражение для пороговой разности срабатывания компаратора в форме, удобной для дальнейшего изложения. Для этого воспользуемся результатами, полученными в работе [1].

Запишем очевидные соотношения для входной цепи компаратора

$$\Delta U = U_{D_1} - U_{D_2}; \quad (2)$$

$$I_1 = I_{D_1} + I_{D_2},$$

где I_{D_1}, I_{D_2} и U_{D_1}, U_{D_2} — ток и напряжение диодов D_1 и D_2 .

В работе [2] показано, что характеристики кремневых диодов могут быть удовлетворительно описаны выражением

$$U_{Di} = U_{oi} + \varphi_{si} \ln I_{Di}, \quad (3)$$

где U_{oi}, φ_{si} — параметры диода ($i = 1, 2$).

Для диодов одного наименования φ_s можно считать постоянным, а U_o — изменяющимся от диода к диоду [2].

Решая совместно выражения (2) и (3) с учетом сделанных замечаний, получим

$$\Delta U = \Delta U_o - \varphi_s \ln \left(\frac{I_1}{\varphi_s g_1} - 1 \right), \quad (4)$$

где $\Delta U_o = U_{o1} - U_{o2}$;

$g_1 = \frac{I_{o1}}{\varphi_s}$ — дифференциальная проводимость диода D_1 .

В работе [1] показано, что на этапе, предшествующем самовозбуждению компаратора, процессы в схеме могут быть удовлетворительно описаны дифференциальным уравнением второго порядка, получено и выражение для бифуркационной проводимости g_1 :

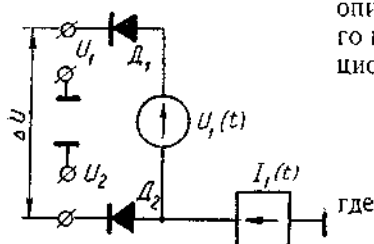


Рис. 2.

$$g_{\text{биф}} = \frac{g_n + h_{22}}{(h_{21} - 1) - (g_n + h_{22}) h_{11}}, \quad (5)$$

где g_n — проводимость нагрузки;

$$g_n = \frac{1}{R_n};$$

h_{21}, h_{22}, h_{11} — h -параметры триода.

Решая совместно равенства (4), (5), найдем аналитическое выражение для пороговой разности срабатывания компаратора:

$$\Delta U_{\text{ср}} = \Delta U_o - \varphi_s \ln \left(\frac{I_1}{\varphi_s g_{\text{биф}}} - 1 \right), \quad (6)$$

где $g_{\text{биф}}$ — определяется формулой (5).

Найдем аналитическое выражение для пороговой разности «отпускания» компаратора. На рис. 2 представлена эквивалентная схема входной цепи компаратора для момента времени, соответствующего окончанию разряда базового конденсатора C_s , обусловленного предшествующим регенеративным процессом.

В соответствии с законами Кирхгофа,

$$\Delta U - U_{D1} + u(t) + U_{D2} = 0; \quad (7)$$

$$I_{D1}(t) + I_{D2}(t) - I_1(t) = 0, \quad (8)$$

где $U_{Di} = U_{oi} + \varphi_s \ln I_{Di}(t)$;

$u(t)$ — напряжение «помехи», обусловленное переходными процессами в схеме.

Решая формулы (7), (8), получим

$$g_1(t) = \frac{I_1(t)}{\varphi_s} \left[\frac{1}{1 + \exp \left(- \frac{\Delta U - \Delta U_o + u(t)}{\varphi_s} \right)} \right], \quad (9)$$

где $g_1(t)$ — динамическая дифференциальная проводимость диода D_1 .

Решая выражение (9) совместно с (5), получим

$$\Delta U_{\text{отп}} = \Delta U_o - u(t) - \varphi_s \ln \left[\frac{I_1(t)}{\varphi_s g_{\text{биф}}} - 1 \right], \quad (10)$$

Из равенства (1) следует

$$\Delta U_{\text{гист}} = u(t) - \varphi_s \ln \left[\frac{I_1 - \varphi_s g_{\text{биф}}}{I_1(t) - \varphi_s g_{\text{биф}}} \right]. \quad (11)$$

Найдем аналитическое выражение для амплитуды импульса «помехи» $u(t)$, обусловленной переходными процессами в схеме. На рис. 3 представлена эквивалентная схема компаратора для периода между двумя релаксационными процессами в схеме. Эквивалентная схема составлена в соответствии с методикой, изложенной в работе [3] с учетом следующих допущений:

1. Обратные токи кремниевых диодов D_1 и D_2 значительно меньше 1 мка; ими можно пренебречь по сравнению с величиной тока I_1 .

Диоды D_1 и D_2 на данном этапе смещены в обратном направлении; ключ K разомкнут.

2. Емкости $p-n$ -переходов диодов D_1 , D_2 значительно меньше емкости конденсатора C_3 и ими пренебрегаем.

В эквивалентной схеме приняты следующие обозначения:

$$I_1 = E_0 G_1; \quad G_1 = \frac{1}{R_1}; \quad I_2 = E_k G_2;$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2}; \quad G_3 = \frac{1}{R_3};$$

$$E_0 = (E_1 + U_2).$$

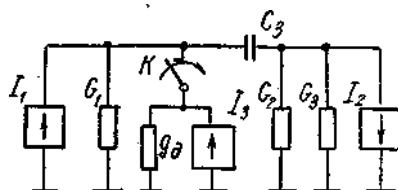


Рис. 3.

Начальные условия в схеме

$$u_1(t)|_{t=0} = -U_{co} + p; \quad u_2(t)|_{t=0} = p.$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа, для первого и второго узла

$$G_1 u_1 + C \frac{d(u_1 - u_2)}{dt} - I_1 = 0;$$

$$C \frac{d(u_2 - u_1)}{dt} + u_2 (G_2 + G_3) + I_2 = 0. \quad (12)$$

Решение системы (12) имеет такой вид:

$$u_1(t) = \frac{1}{G_1} \left[I_1 - (I_1 + U_{co} G_1) \exp \left(-\frac{t}{\tau_1} \right) \right]; \quad (13)$$

$$u_2(t) = \frac{1}{G_2} \left[-I_2 + (I_1 + U_{co} G_1) \exp \left(-\frac{t}{\tau_1} \right) \right], \quad (14)$$

где $\tau_1 = R_1 C_3$.

Выражения (13), (14) получены с учетом соотношений $G_1 \ll G_2$; $G_2 \ll G_3$; $U_{co} \gg p$, которые всегда выполняются для практических схем.

Процесс разряда емкости C_3 фактически описывается формулой (13), так как порядок величин, входящих в нее, много больше порядка величин, входящих в формулу (14).

Из условия $u_1(t)|_{t=t_1} = U_{co}$ и равенства (13) находим t_1 — момент времени, при котором начинают открываться диоды D_2 и D_1 .

Решение имеет вид

$$t_1 = \tau_1 \ln \left(1 + \frac{G_1 U_{co}}{I_1} \right), \quad (15)$$

так как $U_{co} G_1 \ll I_1$.

Определим параметры импульса «помехи» на базе триода, вызванного открыванием диодов D_2 и D_1 под воздействием $u_1(t)$ и $I_1(t)$. Воспользуемся эквивалентной схемой рис. 3. Открывание диодов D_2 и D_1 на этом рисунке отражено замыканием ключа K в момент времени t_1 .

Характеристики диодов входной цепи линеаризованы в соответствии с эквивалентной схемой диода при прямом смещении [4]

$$I_d = 0 \quad \text{для } U_d < U_{d0};$$

$$I_d = g_d(U_d - U_{d0}) \quad \text{для } U_d \geq U_{d0},$$

а их суммарная линеаризованная проводимость $g_d = \frac{I_1}{\varphi_s}$.

При этих условиях, аналогично приведенному выше, можно показать, что

$$u_2(t - t_1) = \frac{1}{G_3} \left[-I_2 + I_1 \exp\left(-\frac{t - t_1}{\tau_2}\right) \right]; \quad (16)$$

$$\text{где } \tau_2 = \frac{C(g_d + G_3)}{g_d G_3}.$$

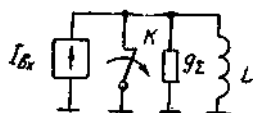


Рис. 4.

Учитывая, что формулы (14), (16) описывают поведение линеаризованных систем, для нахождения параметров импульса «помехи» на переходе база — эмиттер триода воспользуемся методом наложения

$$u_{вх}(t - t_1)|_{t > t_1} = u_2(t - t_1) - u_2(t). \quad (17)$$

Решая совместно выражения (14), (15), (16), (17) и переходя к новой переменной t ($t \geq 0$), получим

$$u_{вх}(t) = \frac{I_1}{G_3} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right]. \quad (18)$$

Так как всегда выполняется условие $\tau_1 \gg \tau_2$, то в интересующем нас интервале изменения t равенство (18) можно представить в виде

$$u_{вх}(t) = \frac{I_2}{G_3} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right]. \quad (19)$$

Найдем выражение для параметров импульса «помехи» на коллекторе триода компаратора. Задачу решаем с учетом обратной связи в компараторе при следующих допущениях:

1. Составляющая коллекторной нагрузки триода, обусловленная коллекторной емкостью триода, емкостью трансформатора и емкостью монтажа, значительно меньше активной и индуктивной составляющих.

2. Импульсный трансформатор считаем идеальным.

Эквивалентная схема компаратора на данном этапе с учетом сделанных допущений представлена на рис. 4.

Для эквивалентной схемы могут быть записаны следующие уравнения:

$$i_1 + i_2 - I = 0;$$

$$i_1 = [g_2 + g_1(t)] u(t); \quad (20)$$

$$i_2 = \frac{1}{L} \int u(t) dt;$$

$$I = [i_{вх} + g_1(t) u(t)] h_{21};$$

$$i_{вх} = I_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right]. \quad (21)$$

Решая выражение (20) с учетом (21), получим

$$[g_2 + (h_{21} - 1)g_1(t)] u + \frac{1}{L} \int u dt = I_1 h_{21} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right]. \quad (22)$$

Легко заметить, что $i_{вх} = I_1(t)$. Тогда из формулы (9) следует

$$g_1(t) = \frac{I_1(t)}{\varphi_s} \frac{1}{1 + \exp \left[-\frac{\Delta U - \Delta U_0 + u(t)}{\varphi_s} \right]}. \quad (23)$$

Таким образом, параметры импульса «помехи» на коллекторе триода компаратора $u(t)$ определяются уравнениями (22), (23) — для не расходящегося процесса.

Уравнение (22) с учетом (23) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение с периодическим коэффициентом. Регулярных методов решения такого рода уравнений в настоящее время не существует [5], поэтому обратимся к одному приближенному способу решения, суть которого состоит в замене периодических коэффициентов постоянными, равными их среднему значению за период [5].

Введем в рассмотрение $\overline{g_1(t)}$ — среднее значение динамической дифференциальной проводимости $g_1(t)$. Усреднение берется за время $\frac{\tau_u}{2}$, τ_u — длительность импульса помехи $u(t)$

$$\overline{g_1(t)} = \frac{2}{\tau_u} \int_0^{\tau_u/2} g_1[u(t)] dt. \quad (24)$$

Выражение (24) можно представить в виде

$$\frac{\overline{g_1(t)}}{g_m} = k(X_1, X_2, \dots, X_l) \quad (25)$$

где $g_m = \frac{I_1}{\varphi_s}$;

$$k = \frac{2}{\tau_u} \int_0^{\tau_u/2} \frac{1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_2} \right)}{1 + \exp \left[-\frac{\Delta u - \Delta u_0 + u(t)}{\varphi_s} \right]} dt. \quad (26)$$

Подставляя в формулу (22) вместо $g_1(t) \overline{g_1(t)}$ из выражения (25), получим линеаризованное дифференциальное уравнение

$$[g_2 + (h_{21} - 1)kg_m]u(t) + \frac{1}{L} \int u(t) dt = I_1 h_{21} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_2} \right) \right]. \quad (27)$$

Решение равенства (27) имеет вид

$$u(t) = I_1 h_{21} L F(t), \quad (28)$$

где $\tau_3 = [g_2 + (h_{21} - 1)kg_m]L$;

$$F(t) = \frac{1}{\tau_3 - \tau_2} \left[\exp \left(-\frac{t}{\tau_2} \right) - \exp \left(-\frac{t}{\tau_3} \right) \right]. \quad (29)$$

Из физики процесса можно предположить, что величина гистерезиса схемы определяется амплитудным значением функции $u(t)$.

Из формулы (28) следует, что амплитуда $u(t)$ определяется $F(t)$. Можно показать (29), что $F(t)$ достигает своего амплитудного значения в момент времени $t = t_0$:

$$t_0 = \frac{\tau_2 \tau_3}{\tau_3 - \tau_2} \ln \frac{\tau_3}{\tau_2}. \quad (30)$$

Таким образом, выражение (11) совместно с (28), (29), (30) определяет гистерезис схемы через параметры ее элементов. Интегрирование формулы (26) в предположение треугольной формы импульса дает $k = (0,1 \div 0,4)$, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ

1. Гистерезис схемы небалансного диодно-регенеративного компаратора на основе блокинг-генератора определяется переходными процессами в схеме.

2. Величина гистерезиса рассматриваемой схемы зависит от параметров элементов схемы и возрастает при

- а) увеличении коэффициента усиления триода по току;
- б) увеличении индуктивности импульсного трансформатора;
- в) увеличении тока смещения диодов входной цепи;
- г) уменьшении емкости базового компаратора;
- д) уменьшении φ_2 диодов.

3) Расчетные соотношения дают удовлетворительное совпадение с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Стахов. Исследование диодно-регенеративного компаратора со смещением рабочих точек диодов. Сб. «Приборы и системы автоматики», вып. 3. Изд-во ХГУ, Харьков, 1966.
2. А. П. Стахов. Исследование преобразователей «напряжение — код» с обратной связью, использующих в качестве сравнивающих устройств регенеративные компараторы. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1966.
3. М. Ф. Гарднер и Дж. Л. Бэрнс. Переходные процессы в линейных системах. Физматгиз, 1961.
4. И. П. Степаненко. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд-во «Энергия», 1967.
5. Е. П. Попов, И. П. Пальтов. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. Физматгиз, 1960.