

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО ДИОДНО-РЕГЕНЕРАТИВНОГО КОМПАРАТОРА С ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

А. П. Стахов

Харьковский институт горного машиностроения, автоматики
и вычислительной техники

1. Постановка задачи и методика исследования

Основной операцией автоматического контроля является сравнение уставки V с контролируемым параметром U . Если контролируемый параметр и уставка представлены в виде напряжений постоянного тока, то их сравнение осуществляется с помощью компаратора — устройства для определения знака разности двух напряжений. Математически работа идеального компаратора описывается выражением

$$Y = \text{sign}(U - V),$$

где Y — выходной сигнал компаратора, а операция $\text{sign } Z$ определена следующим образом:

$$\begin{cases} \text{sign } Z = 1; & \text{если } Z \geq 0; \\ \text{sign } Z = 0; & \text{если } Z < 0. \end{cases}$$

Будем судить о состоянии компаратора по выходному сигналу Y . Процессы перехода системы из состояния «0» в «1» и из «1» в «0» соответственно назовем срабатыванием и отпусканием компаратора. Работа реального компаратора в статическом режиме в общем случае описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} Y_1 = \text{sign}[U - (V + \Delta U_{\text{пор}})]; \\ Y_2 = \text{sign}[U - (V + \Delta U_{\text{отп}})], \end{cases}$$

где Y_1 , Y_2 соответственно описывают работу компаратора при срабатывании и отпускании;

$\Delta U_{\text{пор}}$ — минимальная разность сравниваемых напряжений, вызывающая срабатывание компаратора (пороговая разность компаратора);

$\Delta U_{\text{отп}}$ — разность сравниваемых напряжений, при которой происходит отпускание компаратора, причем $\Delta U_{\text{отп}} \leq \Delta U_{\text{пор}}$.

Динамические свойства реальных компараторов характеризуются временем срабатывания и временем восстановления. Под временем срабатывания $t_{\text{ср}}$ понимается интервал времени, заключенный между моментом приложения ко входам компаратора разности напряжений $\Delta U_{\text{пор}}$, и моментом образования сигнала $Y_1 = 1$. Интервал времени, в течение которого компаратор переходит из состояния «1» в состояние «0» после

момента приложения разности сравниваемых напряжений, меньшей $\Delta U_{отп}$, называется временем восстановления компаратора $t_{в}$.

Таким образом, работа реального компаратора характеризуется четырьмя параметрами: $\Delta U_{пор}$, $\Delta U_{отп}$, $t_{ср}$, $t_{в}$.

В настоящей статье выводится аналитическое выражение для пороговой разности, а также исследуются температурный дрейф и способы температурной компенсации пороговой разности транзисторного диодно-регенеративного компаратора, описанного в работе [1].

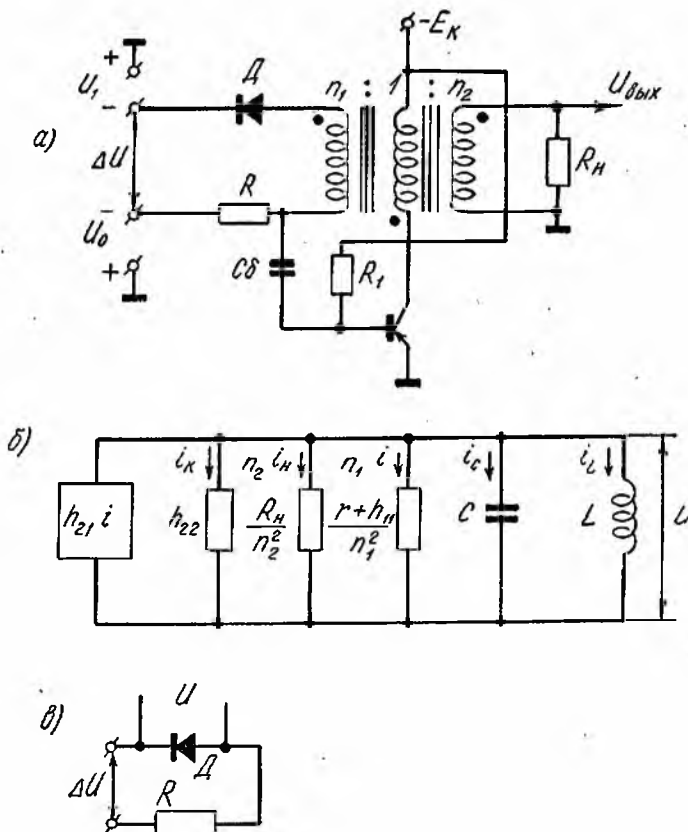


Рис. 1. Регенеративный компаратор с трансформаторной обратной связью:

а) принципиальная схема; б) эквивалентная схема компаратора на этапе предимпульсных колебаний; в) эквивалентная схема выходной цепи.

Схема компаратора изображена на рис. 1, а. Работа схемы состоит в следующем. Разность входных напряжений $\Delta U = |U_1| - |U_0|$ управляет дифференциальным сопротивлением нелинейного элемента (диод D), стоящего в цепи положительной обратной связи блокинг-генератора. При достаточно большой отрицательной разности сравниваемых напряжений ($|U_1| \ll |U_0|$) дифференциальное сопротивление r диода велико и условие самовозбуждения схемы не выполняется. При этом схема представляет собой потенциально-автоколебательную систему. Увеличение U_1 влечет за собой уменьшение r и приближает систему к границе устойчивости.

При $\Delta U = \Delta U_{\text{пор}}$ r достигает порогового значения $r_{\text{пор}}$ и в системе начинаются процессы, приводящие к формированию переднего фронта выходного импульса. Этап формирования импульса ничем существенно не отличается от этапа формирования импульса для блокинг-генератора, исследованного, например, в [2], и в настоящей работе не рассматривается.

Специфическим этапом для компаратора, на котором «формируется» его чувствительность, является этап, предшествующий формированию импульса. Исследование его целесообразно проводить по следующей методике:

1. Путем анализа динамических процессов в компараторе находим пороговое сопротивление

$$r_{\text{пор}} = f_1(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (1)$$

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

2. В результате анализа входной цепи компаратора определяем зависимость

$$r = f_2(\Delta U). \quad (2)$$

3. Так как при

$$r = r_{\text{пор}} \quad \Delta U = \Delta U_{\text{пор}},$$

то из уравнений (1), (2) находим

$$\Delta U_{\text{пор}} = f_3(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

2. Дифференциальное уравнение компаратора

Экспериментальные исследования компараторов с трансформаторной обратной связью показывают, что на этапе, предшествующем формированию переднего фронта импульса, в схеме происходят колебательные процессы. Подобное явление наблюдается также в полупроводниковых блокинг-генераторах в конце этапа разряда конденсатора и объясняется наличием паразитных емкостей и отличным от нуля коэффициентом усиления триода в запертом состоянии [2].

На рис. 1, б представлена приведенная к коллекторной обмотке эквивалентная схема компаратора для этапа, предшествующего формированию переднего фронта импульса.

Составляя эквивалентную схему, пренебрегли:

- 1) сопротивлением конденсатора C_6 для переменной составляющей;
- 2) индуктивностью рассеяния трансформатора по сравнению с индуктивностью коллекторной обмотки;
- 3) внутренней обратной связью триода по напряжению (параметр h_{12}) по сравнению с обратной связью через трансформатор;
- 4) шунтированием входного сопротивления триода (параметр h_{11}) сопротивлением $R_{\text{ш}} = \frac{R \cdot R_1}{R + R_1}$ для переменной составляющей.

Триод в схеме на рис. 1, б заменен своей эквивалентной схемой в системе h -параметров.

Обозначения на эквивалентной схеме:

r — дифференциальное сопротивление диода;

L — индуктивность коллекторной обмотки;

$C = C_k + C_{\text{тр}}$;

C_k — коллекторная емкость триода;
 $C_{тр}$ — эквивалентная емкость трансформатора;
 i — ток во входной цепи триода.
 h_{11}, h_{21}, h_{22} — параметры триода в системе
 h — параметров;
 u — напряжение свободных колебаний в системе.

Процесс в схеме описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{1}{C} \left[\frac{n_2^2}{R_H} + h_{22} - \frac{(h_{21} - n_1) n_1}{r + h_{11}} \right] \frac{du}{dt} + \frac{1}{LC} u = 0. \quad (3)$$

Нелинейность уравнения (3) вытекает из зависимости r и h_{11} от напряжения на контуре u . Так как $r = f(\Delta U)$, то уравнение (3) описывает поведение системы второго порядка, параметр которой (сопротивление r) может изменяться во времени в соответствии с законом изменения $\Delta U = \Delta U(t)$.

Анализу уравнения (3) будет посвящена специальная работа. В результате линейного анализа уравнения (3) находится условие самовозбуждения системы

$$r < r_{\delta_1} \quad (4)$$

и условие возникновения в системе релаксационного процесса

$$r < r_{\delta_2}.$$

Здесь $r_{\delta_1}, r_{\delta_2}$ — бифуркационные значения дифференциального сопротивления диода, соответствующие границе между затухающими и нарастающими колебательными движениями (r_{δ_1}) и границе между нарастающими колебательными и нарастающими апериодическими (релаксационными) движениями (r_{δ_2}). Бифуркационные сопротивления определяются выражениями:

$$r_{\delta_1} = \frac{n_1^2 R_H \left(\frac{h_{21}}{n_1} - 1 \right)}{n_2^2 + R_H h_{22}} - h_{11};$$

$$r_{\delta_2} = \frac{n_1^2 \left(\frac{h_{21}}{n_1} - 1 \right)}{\frac{n_2^2}{R_H} + h_{22} + \frac{2}{\sqrt{LC}}} - h_{11}.$$

После выполнения условия (4) амплитуда колебаний в системе начинает возрастать. Нелинейный анализ уравнения (3), который здесь опускается, показывает, что за счет нелинейности системы при достижении амплитудой автоколебаний некоторого порогового значения в системе выполняется условие возникновения релаксационного процесса. Таким образом, после достижения дифференциальным сопротивлением значения r_{δ_1} процессы в схеме далее развиваются таким образом, что это приводит к формированию переднего фронта импульса. Сопротивление r_{δ_1} , следовательно, является пороговым сопротивлением компаратора, т. е.

$$r_{\text{пор}} = r_{\delta_1} = \frac{n_1^2 R_H \left(\frac{h_{21}}{n_1} - 1 \right)}{n_2^2 + R_H h_{22}}. \quad (5)$$

После пренебрежения h_{11} и h_{22} в (5) получим приближенное выражение для порогового сопротивления:

$$r_{\text{пор}} \approx \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \left(\frac{h_{21}}{n_1} - 1 \right) R_n. \quad (6)$$

3. Анализ входной цепи

Цель анализа входной цепи — найти зависимость между ΔU и r . Для простоты анализа предполагаем, что ΔU изменяется достаточно медленно; при этом входными реактивностями схемы можно пренебречь.

Эквивалентная схема входной цепи представлена на рис. 1, в. Уравнение Кирхгофа для схемы (рис. 1, в).

$$\Delta U = IR + U(I), \quad (7)$$

где I — постоянная составляющая тока во входной цепи;
 $U(I)$ — вольт-амперная характеристика диода.

При исследовании компаратора на рис. 1, а нас будут интересовать прежде всего германиевые диоды (ввиду большой величины сопротивления в нулевой точке для кремниевых диодов, как будет показано ниже, не выполняется условие настраиваемости схемы на нулевую пороговую разность). Для математического описания вольт-амперной характеристики германиевого диода воспользуемся результатами, полученными в [3], где установлено, что на участке от $-0,1 \div +0,2$ в характеристика диода хорошо описывается выражением:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha U}{\varphi_T} \right) - 1 \right], \quad (8)$$

где I_0 — обратный ток диода;
 φ_T — температурный потенциал;
 α — некоторый коэффициент.

Обозначим $\frac{\varphi_T}{\alpha} = \varphi_3$ и назовем φ_3 экспериментальным температурным потенциалом.

Тогда (8) переписывается в виде

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{U}{\varphi_3} \right) - 1 \right]. \quad (9)$$

В [3] приводится значение коэффициента $\gamma = \frac{1}{\varphi_3}$; для германиевых диодов $\gamma = 20 \div 32$ 1/в, что соответствует $\varphi_3 \approx 30 \div 50$ мв.

Зависимость $U(I)$ получается из (9):

$$U(I) = \varphi_3 = \ln \frac{I + I_0}{I_0}. \quad (10)$$

Дифференциальное сопротивление диода

$$r = \frac{\varphi_3}{I + I_0}. \quad (11)$$

Поскольку при $r = r_{\text{пор}}$ $I = I_{\text{пор}}$, то из (11)

$$I_{\text{пор}} = \frac{\varphi_{\text{э}}}{r_{\text{пор}}} - I_0. \quad (12)$$

Подставляя (10), а затем (12) в (7), получим аналитическое выражение для пороговой разности:

$$\Delta U_{\text{пор}} = \varphi_{\text{э}} \left[R \left(\frac{1}{r_{\text{пор}}} - \frac{1}{r_0} \right) + \ln \frac{r_0}{r_{\text{пор}}} \right], \quad (13)$$

где $r_0 = \frac{\varphi_{\text{э}}}{I_0}$ — сопротивление диода в нулевой точке.

Вводя понятие расстройки схемы

$$\Delta g = \frac{1}{r_{\text{пор}}} - \frac{1}{r_0},$$

уравнение (13) можно записать следующим образом:

$$\Delta U_{\text{пор}} = \varphi_{\text{э}} [R \Delta g + \ln(1 + r_0 \Delta g)]. \quad (14)$$

Анализ выражений (13), (14) позволяет сделать следующие выводы:

А. Величина и знак пороговой разности зависят от расстройки схемы Δg .

При $\Delta g > 0$ $\Delta U_{\text{пор}} > 0$; при $\Delta g < 0$ $\Delta U_{\text{пор}} < 0$.

Б. Условие настройки схемы на нулевую пороговую разность

$$\Delta g = 0 \text{ или } r_{\text{пор}} = r_0. \quad (15)$$

Настройку схемы можно производить сопротивлением $R_{\text{н}}$.

С учетом входного сопротивления $R_{\text{вх}}$ прибора, на который нагружается компаратор, выражение (5) может быть записано так:

$$r_{\text{пор}} = \frac{n_1^2 \left(\frac{h_{21}}{n_1} - 1 \right)}{n_2^2 (g_{\text{н}} + g_{\text{вх}}) + h_{22}} - h_{11},$$

где $g_{\text{н}} = \frac{1}{R_{\text{н}}}$; $g_{\text{вх}} = \frac{1}{R_{\text{вх}}}$.

Условие настраиваемости схемы сопротивлением $R_{\text{н}}$:

$$r_{\text{пор max}} > r_0,$$

$$\text{где } r_{\text{пор max}} = r_{\text{пор}}(g_{\text{н}} = 0) = \frac{n_1^2 \left(\frac{h_{21}}{n_1} - 1 \right)}{n_2^2 g_{\text{вх}} + h_{22}} - h_{11}.$$

Если прибором нагрузки компаратора является триггер ($R_{\text{вх}} \approx 10 \text{ ком}$), то вычисление $r_{\text{пор max}}$ при следующих параметрах элементов схемы ($n_1 = n_2 = 1$; $h_{21} = 32$; $h_{22} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ом}$; $h_{11} = 1 \text{ ком}$) дает:

$$r_{\text{пор max}} = 264 \text{ ком}.$$

Численный пример показывает, что условие настраиваемости практически выполняется только для германиевых диодов.

Из (5) с учетом (15) находим величину сопротивления настройки на нулевую пороговую разность:

$$R_{\text{но}} = \frac{n_2^2 (r_o + h_{11})}{n_1^2 \left(\frac{h_{21}}{n_1} - 1 \right) - h_{22} (r_o + h_{11})}. \quad (16)$$

Приближенное значение для $R_{\text{но}}$:

$$R_{\text{но}} \approx \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{r_o}{\frac{h_{21}}{n_1} - 1}. \quad (17)$$

В. Величина пороговой разности пропорциональна R :

$$\Delta U_{\text{пор}} = \Delta U_{\text{нач}} + \theta \cdot R, \quad (18)$$

где $\Delta U_{\text{нач}} = \varphi_s \ln(1 + r_o \Delta g)$;

$$\theta = \varphi_s \Delta g.$$

Так как расстройка реального компаратора в общем случае отлична от нуля, то для уменьшения $\Delta U_{\text{пор}}$ следует стремиться к уменьшению R . С нижней стороны величина R ограничена условием шунтирования входа триода для переменной составляющей

$$R \gg h_{11}. \quad (19)$$

При $U_k = -10$ в, $I_s = 1$ ма для триодов П16 h_{11} колеблется в пределах $h_{11} = 0.8 \div 1$ ком. Неравенство (19) будет достаточно сильным при выборе $R = 8 - 10$ ком.

Уравнение (18) указывает на возможность экспериментального определения Δg . Для этого следует снять зависимость $\Delta U_{\text{пор}} = f(R)$ и определить $\theta = \frac{d(\Delta U_{\text{пор}})}{dR}$, после чего вычислить

$$\Delta g = \frac{\theta}{\varphi_s}. \quad (20)$$

§ 4. Температурный дрейф пороговой разности.

С целью анализа температурного дрейфа пороговой разности воспользуемся приближенным выражением для $r_{\text{пор}}$, определяемым из (6). Подставляя (6) в (13) и учитывая, что параметры φ_s , h_{21} и r_o являются функциями температуры, получим:

$$\Delta U_{\text{пор}}(T) = \varphi_s(T) \left\{ R \left[\frac{\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{1}{R_{\text{н}}}}{\frac{h_{21}(T)}{n_1} - 1} - \frac{1}{r_o(T)} \right] + \ln \frac{r_o(T) \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2}{\left[\frac{h_{21}(T)}{n_1} - 1 \right] R_{\text{н}}} \right\}.$$

Опуская промежуточные выкладки, запишем выражение для температурного коэффициента пороговой разности в точке $T = T_o$:

$$K(T_0) = -\varphi_3(T_0) \frac{R + r_0(T_0)}{r_0(T_0)} [|K_{1\text{отн}}(T_0)| + |K_{2\text{отн}}(T_0)|], \quad (21)$$

где T_0 — температура, при которой происходит настройка компаратора на нулевую пороговую разность;

$K_{1\text{отн}}(T_0) = \frac{K_1(T_0)}{r_0(T_0)}$; $K_{2\text{отн}}(T_0) = \frac{K_2(T_0)}{h_{21}(T_0)}$ — соответственно относительные температурные коэффициенты r_0 и h_{21} в точке $T = T_0$; $K_1(T_0)$, $K_2(T_0)$ — температурные коэффициенты r_0 , h_{21} в точке $T = T_0$.
Усредненные значения температурных коэффициентов для диодов Д9Е и триодов П16 равны:

$$K_{1\text{отн}}(T_0) = -0,05^{1/2\text{град}}; \quad K_{2\text{отн}}(T_0) = 0,014^{1/2\text{град}}. \quad (22)$$

При $R = 10 \text{ ком}$ для диода с параметрами

$$\varphi_3(T_0) = 30 \text{ мв}; \quad r_0(T_0) = 20 \text{ ком}; \\ K(T_0) = -3 \text{ мв/град}.$$

Анализ (21) с учетом (22) приводит к следующим выводам:

1. Пороговая разность обладает отрицательным температурным коэффициентом.
2. Температурный коэффициент пороговой разности пропорционален R .
3. Основной причиной температурной нестабильности $\Delta U_{\text{пор}}$ является изменение сопротивления диода в нулевой точке при изменении температуры.

Метод уменьшения температурного дрейфа $\Delta U_{\text{пор}}$ рассматривается ниже.

§ 5. Экспериментальные исследования

А. Измерение параметров диодов. Методика экспериментального определения параметров I_0 и φ_3 изложена в работе [3]. Параметр $r_0 = f(I_0, \varphi_3)$ вычисляется по формуле

$$r_0 = \frac{\varphi_3}{I_0}. \quad (23)$$

Поскольку при определении φ_3 и I_0 допускается большая погрешность, то величина r_0 , вычисленная по формуле (23), существенно отличается от действительного значения.

При проверке теории регенеративного компаратора нас будет интересовать точное значение r_0 . Методика измерения r_0 вытекает из следующих выкладок. Разлагая (10) в ряд в окрестности точки $I = 0$ и пренебрегая членами выше второго порядка, получим

$$U \approx r_0 I - \frac{r_0}{2I_0} I^2. \quad (24)$$

Из (24) сопротивление диода постоянному току

$$R_d \approx r_o - \frac{r_o}{2I_o} I. \quad (25)$$

Если измерить прямое и обратное сопротивление диода при некотором достаточно малом

$$I = |I_{пр}| - |I_{обр}|,$$

то из (25) получим $r_o = \frac{R_{пр} + R_{обр}}{2}$. В измерениях было принято $|I_{пр}| = |I_{обр}| = 0,25$ мка.

Обратный ток диода I_o измерялся при обратном напряжении $U_{обр} = 200$ мв. Экспериментальный температурный потенциал вычислялся по формуле

$$\varphi_s = r_o I_o.$$

В табл. 1 приведены параметры десяти германиевых диодов типа Д9Е, определенные по изложенной методике.

Таблица 1

Номер диода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_o [мка]	3,5	2,3	5	1,6	1,5	3,7	3,1	1,1	1,6	4
r_o [ком]	12,5	15,8	12	19,3	18,4	12,4	10,4	26,9	18	13,4
φ_s [мв]	43,7	36,3	60	30,9	27,6	46	32,2	29,6	28,8	53,6
$R_{но}^*$ [ком]	0,55	0,69	0,53	0,9	0,79	0,54	0,45	1,11	0,75	0,58
$R_{но}^p$ [ком]	0,435	0,54	0,42	0,655	0,625	0,43	0,368	0,9	0,613	0,465

Б. Проверка выражений (16), (14). Выражения (16), (14) проверялись в схеме компаратора, собранного на импульсном трансформаторе МИТ-4 ($n_1 = n_2 = 1$), триоде П16 и диодах Д9Е. В схеме компаратора триод находился в режиме: $U_k = -10$ в; $I_s = 1$ ма. Параметры триода в таком режиме: $h_{11} = 1$ ком; $h_{12} = 1,9 \cdot 10^{-4}$; $h_{22} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ 1/ом; $h_{21} = 32$. Сопротивление $R = 10$ ком.

Результаты экспериментальной проверки выражения (16) сведены в табл. 1. В строку « $R_{но}^*$ » внесены экспериментальные значения $R_{но}$, полученные при запайке в схему диодов № 1 — № 10; в строку « $R_{но}^p$ » — значения $R_{но}$, рассчитанные по формуле (16). Чтобы проверить выражение (14) при произвольных расстройках разных знаков для диода (5 из табл. 1 снимались зависимости $\Delta U_{пор} = f(R)$ (рис. 2).

По экспериментальным характеристикам для каждой из зависимостей на рис. 2 определялся коэффициент θ . Расстройки схемы вычислялись по формуле (20). Кривые на рис. 3 подтверждают теоретические

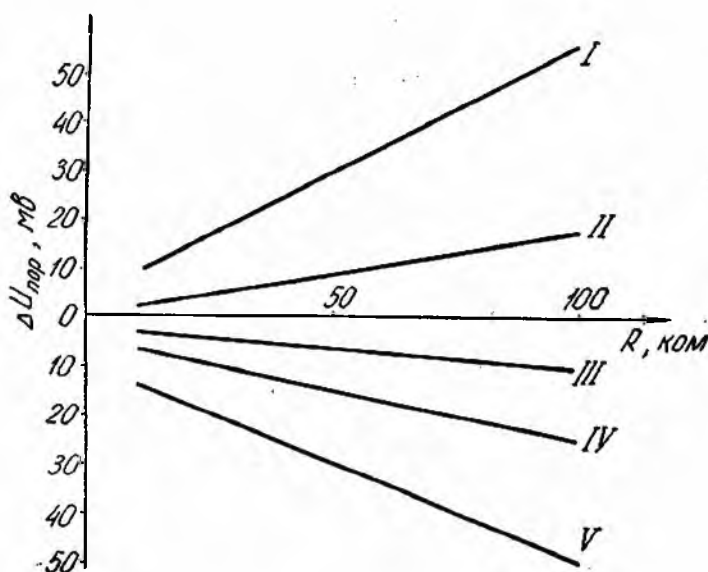


Рис. 2. Зависимость пороговой разности от сопротивления во входной цепи $\Delta U_{\text{пор}} = f(R)$ при различных расстройках:

$$\begin{aligned} I - \Delta g &= +1,81 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ком}; \\ II - \Delta g &= +0,6 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ком}; \\ III - \Delta g &= -0,26 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ком}; \\ IV - \Delta g &= -0,72 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ком}; \\ V - \Delta g &= -1,45 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ком}. \end{aligned}$$

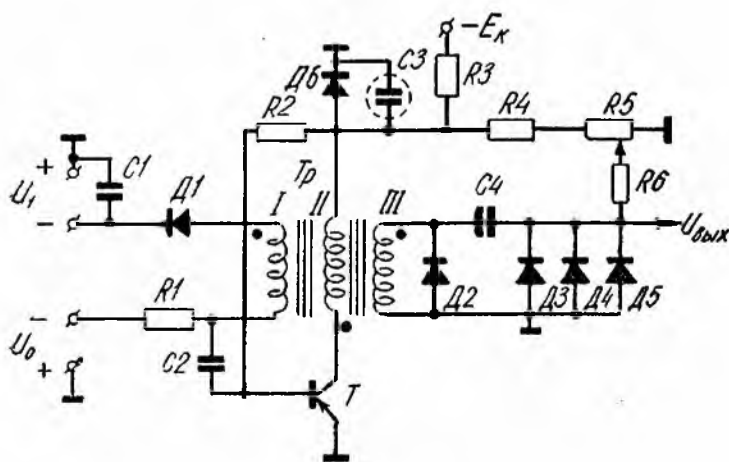


Рис. 3. Принципиальная схема компаратора с термокомпенсацией:

$D1-D5$ — диоды Д9Е; $D6$ — кремниевый стабилитрон Д811; $C1=0,01$ мкф; $C2=8200$ пф; $C3=15$ мкф; $C4=82$ мкф. $R1=10$ ком — сопротивление типа ММТ-4; $R2=180$ ком; $R3=1$ ком; $R4=82$ ком — сопротивление типа ММТ-4; $R5=15$ ком — переменное сопротивление типа ОСП; $R6=220$ ком — сопротивление типа ММТ-4; Tp — трансформатор (сердечник — $\Phi-1000$ $W_I=$ $W_{II}=100$ витков; $W_{III}=250$ витков); T — триод типа МП-106; $E_k=15$ в.

выводы о линейном характере зависимости $\Delta U_{\text{пор}} = f(R)$ и о необходимости уменьшения величины R .

В. Температурные испытания компаратора. Экспериментальная зависимость $\Delta U_{\text{пор}} = f(T)$ для нетермокомпенсированного компаратора представлена в графе 1 табл. 2.

Таблица 2

$T^{\circ}\text{C}$	21	25	27	30	35	40	
$\Delta U_{\text{пор}}$ [мВ]	1	—21	—14	—27	—42	—88	—
	2	+2	+1	0	0	—4	—10

Постоянство знака температурного коэффициента пороговой разности указывает на возможность компенсации температурного дрейфа пороговой разности. Условие полной термокомпенсации дрейфа пороговой разности записывается в виде:

$$r_{\text{пор}}(T) = r_o(T)$$

Термокомпенсацию $\Delta U_{\text{пор}}$ можно осуществить сопротивлением R_n . При том приближенный закон изменения $R_{\text{но}} = f(T)$ имеет вид:

$$R_{\text{но}}(T) \approx \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \frac{r_o(T)}{\frac{h_{21}(T)}{n_1} - 1}.$$

К сопротивлению R_n , таким образом, предъявляются два требования: оно должно быть переменным и термозависимым.

Запишем (11) следующим образом:

$$r = \frac{r_o}{1 + \frac{T}{T_o}}. \quad (26)$$

Согласно (26) при малых I зависимость $r(T)$ в основном определяется зависимостью $r_o(T)$. Таким образом, переменное термозависимое сопротивление с отрицательным температурным коэффициентом может быть реализовано на одном или нескольких параллельно включенных полупроводниковых диодах, управляемых током. Для лучшей термокомпенсации важно, чтобы ток управляющего генератора был достаточно мал, т. е. рабочие точки диодов находились вблизи точки $I = 0$.

Выполнить это условие можно при соответствующем выборе коэффициентов трансформации n_1, n_2 .

Если использовать в качестве переменного термозависимого сопротивления один полупроводниковый диод с такой же характеристикой, как у диода в цепи обратной связи, то коэффициент трансформации рассчитывается по формуле

$$n_2 = n_1 \sqrt{\frac{h_{21}}{n_1} - 1}.$$

Разброс параметров полупроводниковых элементов схемы легче учесть в схеме, где в качестве $R_{\text{н}}$ используется m параллельно включенных диодов. Коэффициент трансформации при этом рассчитывается по формуле:

$$n_2 = n_1 \sqrt{\frac{h_{21} - n_1}{n_1 m}}.$$

Принципиальная схема компаратора с переменным термозависимым сопротивлением изображена на рис. 3.

Экспериментальная зависимость $\Delta U_{\text{пор}} = f(T)$ для термокомпенсированного компаратора представлена в графе 2. табл. 2.

ВЫВОДЫ

1. В работе получено аналитическое выражение для пороговой разности транзисторного диодно-регенеративного компаратора с трансформаторной обратной связью.

2. Существенное влияние на абсолютную величину пороговой разности при ненулевых расстройках оказывает сопротивление R . Чтобы уменьшить $\Delta U_{\text{пор}}$, следует уменьшать R . Рекомендуемое значение $R = 8 \div 10 \text{ ком.}$

3. Исследован температурный дрейф пороговой разности. Показано, что температурный коэффициент пороговой разности отрицателен и примерно составляет $-3 \frac{\text{мв}}{\text{град}}$. Для уменьшения температурного дрейфа предложено использовать в качестве сопротивления настройки один или несколько параллельно включенных полупроводниковых диодов, управляемых током. При этом температурный дрейф пороговой разности в диапазоне температур $+(20 \div 35)^\circ \text{C}$ составляет $5 \div 10 \text{ мв.}$

ЛИТЕРАТУРА

1. В. З. Найденов. Полупроводниковый преобразователь непрерывной величины в цифровой эквивалент. «Известия Вузов СССР, Радиотехника, 1960, № 5.
2. Ю. М. Азьян и др. Полупроводниковые триоды в регенеративных схемах Госэнергоиздат М., 1959.
3. Engbert. Die statische Kennlinie der Germaniumdiode, Fransis — Verlag München, 1953.