

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДНО-РЕГЕНЕРАТИВНОГО КОМПАРАТОРА СО СМЕЩЕНИЕМ РАБОЧИХ ТОЧЕК ДИОДОВ

А. П. Стахов

Харьков

В работах [1, 2] описаны диодно-регенеративные компараторы с трансформаторной обратной связью. Условие настройки таких компараторов на нулевую пороговую разность записывается в виде:

$$r_{\text{пор}} = r_{\text{до}}, \quad (1)$$

где $r_{\text{пор}}$ — пороговое значение дифференциального сопротивления, нелинейного элемента (диода) в цепи положительной обратной связи; $r_{\text{до}}$ — сопротивление диода в точке $I = 0$.

В работе [2] показано, что условие (1) практически может быть выполнено только для германиевых диодов. Компараторы на германиевых диодах имеют низкую температурную стабильность. Пороговая разность компаратора на диоде Д1Е, описанного в [1], составляет ± 5 мв в диапазоне температур $20 \pm 5^\circ\text{C}$. В [2] показано, что температурный коэффициент пороговой разности нетермокомпенсированного компаратора, построенного на германиевом диоде, составляет -3 мв/град, т. е. приращение пороговой разности при изменении температуры на 5° составляет 15 мв. В [2] предложена схема термокомпенсированного компаратора, пороговая разность которого не превышает 10 мв в диапазоне температур $+20 \div 35^\circ\text{C}$.

Стремление расширить диапазон рабочих температур привело к созданию компараторов на кремниевых диодах [3]. Основной особенностью схем таких компараторов является специальное построение входной цепи, состоящее в том, что рабочие точки диодов в области, близкой к самовозбуждению, смещаются на крутой участок прямой ветви дополнительным источником напряжения.

Компаратор на рис. 1 относится к числу так называемых небалансных компараторов. Балансные компараторы отличаются от них тем, что диод D_2 ставится в цепи дополнительной отмотки отрицательной обратной связи. Схема балансного компаратора описана в работе [3].

Компараторы, описанные в [1, 2], относятся к числу небалансных. Условие самовозбуждения небалансного компаратора выполняется в тот момент, когда дифференциальное сопротивление диода в цепи положительной обратной связи достигает порогового значения $r_{\text{пор}}$. Выражение для $r_{\text{пор}}$ найдено в статье [2]:

$$r_{\text{пор}} = \frac{n^2 \left(\frac{h_{21}}{n} - 1 \right)}{\frac{1}{R_n} + h_{22}} - h_{11}, \quad (2)$$

где n — коэффициент трансформации;
 h_{21} , h_{11} , h_{22} — параметры триода в системе h — параметров.

Пренебрегая h_{11} и h_{22} , запишем приближенное выражение для $r_{\text{пор}}$:

$$r_{\text{пор}} \approx nh_{21}R_H. \quad (3)$$

Как показано в [2], основной статической характеристикой компаратора является пороговая разность. Настоящая статья посвящена выводу аналитического выражения для пороговой разности, разработке методов

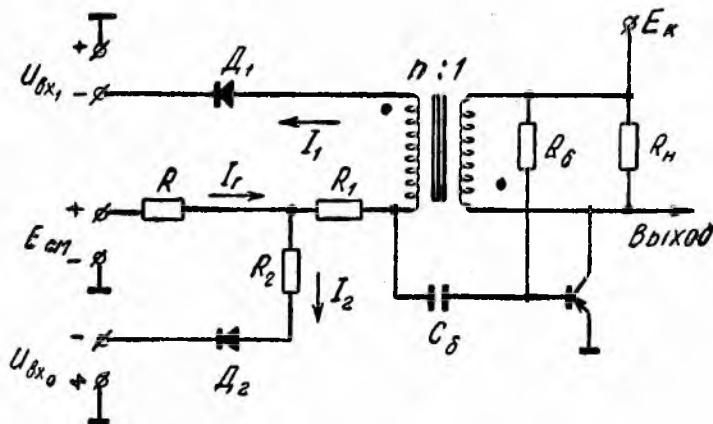


Рис. 1. Диодно-регенеративный компаратор со смещением рабочих точек диодов.

настройки и исследованию температурной нестабильности небалансного компаратора со смещением рабочих точек диодов (рис. 1). Исследование проводится по методике, предложенной в статье [2].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ПРЯМОЙ ВЕТВИ (1—4 мка)

Для десяти кремниевых диодов типа Д104 при $t = +20^\circ\text{C}$ были сняты вольтамперные характеристики в диапазоне токов 1—4 мка. Результаты эксперимента даны в столбцах «Э» (эксперимент) табл. 1.

Таблица 1

№ диода	$U_1, \text{в}$		$U_2, \text{в}$		$U_3, \text{в}$		$U_4, \text{в}$		φ_T $\times 10^{-3}, \text{в}$	γ
	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р		
1	0,38	0,38	0,41	0,415	0,435	0,435	0,45	0,45	50,5	7,53
2	0,4	0,4	0,44	0,438	0,46	0,46	0,475	0,475	54	7,3
3	0,4	0,4	0,44	0,44	0,46	0,463	0,48	0,48	57,7	6,93
4	0,35	0,35	0,4	0,4	0,43	0,429	0,45	0,45	72	4,87
5	0,39	0,39	0,42	0,425	0,44	0,445	0,46	0,46	50,5	7,7
6	0,38	0,38	0,42	0,42	0,44	0,443	0,46	0,46	57,7	6,6
7	0,38	0,38	0,43	0,425	0,45	0,451	0,47	0,47	65	5,85
8	0,38	0,38	0,42	0,42	0,44	0,443	0,46	0,46	57,7	6,6
9	0,38	0,38	0,42	0,42	0,44	0,443	0,46	0,46	57,7	6,6
10	0,37	0,37	0,41	0,41	0,43	0,433	0,45	0,45	57,7	6,4

Характеристика идеализированного диода, как известно, описывается выражением:

$$U = \varphi_T \ln \frac{I + I_T}{I_T}, \quad (4)$$

где φ_T — температурный потенциал;

I_T — теоретический тепловой ток диода.

Если I и I_T выразить в одних единицах (например, в $\mu\text{ка}$), то после соответствующих сокращений выражение (4) можно записать в виде

$$U = \varphi_T \left[\ln \frac{1}{I_T} + \ln (I + I_T) \right], \quad (5)$$

где I , I_T — числа, равные токам I , I_T , $\mu\text{ка}$.

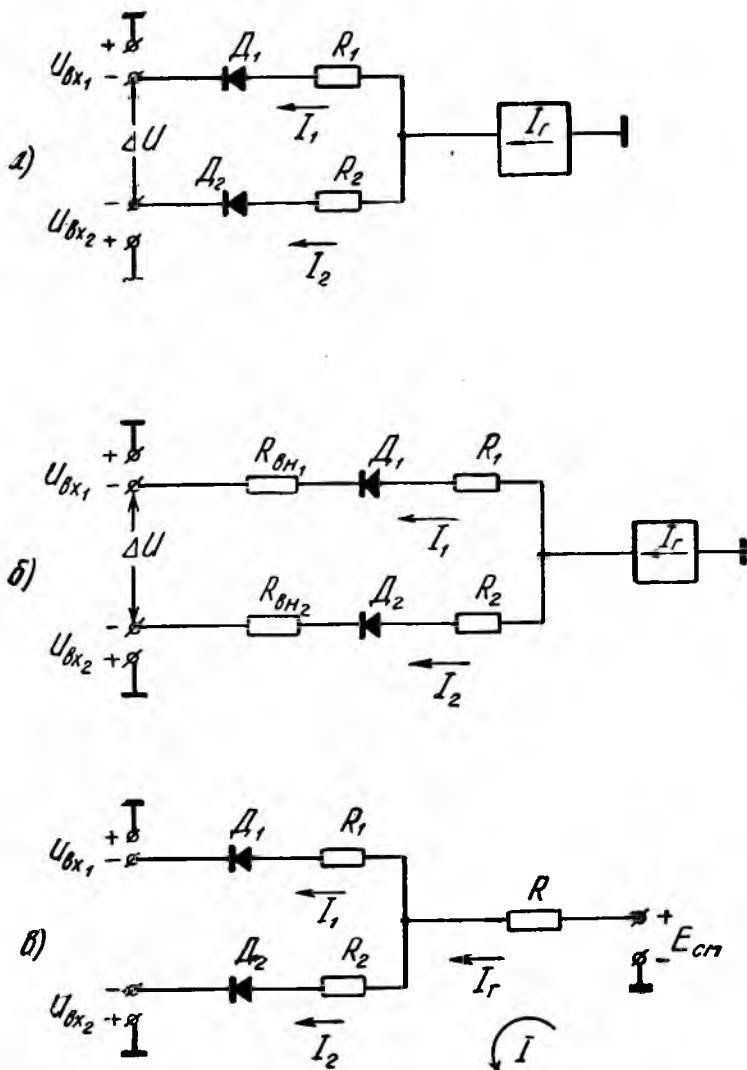


Рис. 2. Эквивалентные схемы входной цепи компаратора: а) с идеальным генератором тока; б) с учетом внутренних сопротивлений; в) с неидеальным генератором тока.

Так как в диапазоне токов $1 \div 4 \mu\text{ка}$ для кремниевых диодов $I \gg I_T$, то пренебрегая I_T по сравнению с I в выражении (4), получим приближенное выражение для U :

$$U \approx \varphi_T \gamma + \varphi_T \ln I, \quad (6)$$

где $\gamma = \ln \frac{1}{I_T}$.

Выражение (6) может быть использовано для определения параметров φ_T и γ по экспериментальной характеристике.

При $I = 1$ мка $U = U_1 = \varphi_T \gamma$;

при $I = 4$ мка $U = U_4 = \varphi_T \gamma + \varphi_T \ln 4$,

откуда

$$\begin{aligned}\varphi_T &= \frac{U_4 - U_1}{\ln 4}; \\ \gamma &= \frac{U_1}{\varphi_T}.\end{aligned}\quad (7)$$

В табл. 1 в столбцах φ_T и γ приведены параметры диодов, вычисленные по формулам (7). В столбцах «Р» (расчет) для сравнения приведены значения U , рассчитанные по (6).

АНАЛИЗ ВХОДНОЙ ЦЕПИ

а) Входная цепь с идеальным генератором тока. При достаточно больших значениях $E_{см}$ и R источник напряжения с последовательно включенным большим сопротивлением можно рассматривать как генератор тока $I_{Г}$. Эквивалентная схема входной цепи компаратора с идеальным генератором тока изображена на рис. 2а.

Обозначим номинальное значение тока генератора $I_{Гн} = 2I_0$. Отклонение тока генератора от номинального значения

$$\Delta I_{Г} = I_{Г} - I_{Гн} = I_{Г} - 2I_0. \quad (8)$$

Очевидно, что при $\Delta U = 0$, $R_1 = R_2 = 0$ через диоды с идентичными характеристиками при $I_{Г} = I_{Гн}$ будут протекать токи I_0 . Разлагая выражение (6) в ряд Тейлора в окрестности точки $I = I_0$ и ограничиваясь членами не выше второго порядка, получим приближенное выражение для характеристики диода в окрестности точки $I = I_0$:

$$U = U_0 + a\Delta I - \frac{b}{2} \Delta I^2, \quad (9)$$

где $U_0 = \varphi_T (\gamma + \ln I_0)$,

$$a = \frac{\varphi_T}{I_0};$$

$$b = \frac{\varphi_T}{I_0^2};$$

$$\Delta I = I - I_0.$$

Из (9) найдем выражение для дифференциального сопротивления диода.

$$r = \frac{dU}{d(\Delta I)} = a - b\Delta I. \quad (10)$$

Уравнение Кирхгофа для схемы на рис. 2а имеет вид:

$$I_{Г} = I_1 + I_2 = I_0 + \Delta I_1 + I_0 + \Delta I_2. \quad (11)$$

Из (11) с учетом (8)

$$\Delta I_{Г} = \Delta I_1 + \Delta I_2$$

и

$$\Delta I_2 = \Delta I_{Г} - \Delta I_1. \quad (12)$$

Для схемы на рис. 2а справедливо

$$\Delta U = U_1 - U_2 + I_1 R_1 - I_2 R_2. \quad (13)$$

После подстановки (9), (12) в выражение (13) и несложных преобразований получим

$$\Delta U = U_{01} - U_{02} + I_0(R_1 - R_2) + (a_1 + a_2 + R_1 + R_2 - b_2 \Delta I_\Gamma) \Delta I_1 - (a_2 + R_2) \Delta I_\Gamma + \frac{b_2}{2} \Delta I_\Gamma^2 + \frac{b_2 - b_1}{2} \Delta I_1^2. \quad (14)$$

Так как при $r_1 = r_{\text{пор}} \Delta I_1 = \Delta I_{1\text{пор}}$ и $\Delta U = \Delta U_{\text{пор}}$, то из (10)

$$\Delta I_{1\text{пор}} = \frac{a_1 - r_{\text{пор}}}{b_1}, \quad (15)$$

а из (14)

$$\Delta U_{\text{пор}} = U_{01} - U_{02} + I_0(R_1 - R_2) + (a_1 + a_2 + R_1 + R_2 - b_2 \Delta I_\Gamma) \Delta I_{1\text{пор}} - (a_2 + R_2) \Delta I_\Gamma + \frac{b_2}{2} \Delta I_\Gamma^2 + \frac{b_2 - b_1}{2} \Delta I_{1\text{пор}}^2. \quad (16)$$

Пренебрегая в (16) $\frac{b_2 - b_1}{2} \Delta I_{1\text{пор}}^2$, как членом второго порядка малости, получим приближенное выражение для $\Delta U_{\text{пор}}$:

$$\Delta U_{\text{пор}} \approx U_{01} - U_{02} + I_0(R_1 - R_2) + (a_1 + a_2 + R_1 + R_2 - b_2 \Delta I_\Gamma) \Delta I_{1\text{пор}} - (a_2 + R_2) \Delta I_\Gamma + \frac{b_2}{2} \Delta I_\Gamma^2. \quad (17)$$

Для диодов с идентичными характеристиками ($a_1 = a_2 = a$; $b_1 = b_2 = b$; $U_{01} = U_{02}$ (из 16))

$$\Delta U_{\text{пор}} = I_0(R_1 - R_2) + (2a + R_1 + R_2 - b \Delta I_\Gamma) \Delta I_{1\text{пор}} - (a + R_2) \Delta I_\Gamma + \frac{b}{2} \Delta I_\Gamma^2 \quad (18)$$

при $R_1 = R_2 = 0$ и $\Delta I_{1\text{пор}} = 0$

$$\Delta U_{\text{пор}} = -\frac{\varphi_T}{I_0} \Delta I_\Gamma \left(1 - \frac{\Delta I_\Gamma}{2I_0}\right). \quad (19)$$

б) Влияние внутренних сопротивлений источников сравниваемых напряжений ($R_{\text{вн1}}$, $R_{\text{вн2}}$) на точность сравнения напряжений. Эквивалентная схема входной цепи с учетом внутренних сопротивлений источников сравниваемых напряжений изображена на рис. 2, б. Заметим, что, так как источники сравниваемых напряжений обычно шунтируются по переменной составляющей достаточно большими емкостями, то выражение (2) для порогового сопротивления не изменяется.

Проведя выкладки по пункту а, получим

$$\Delta U'_{\text{пор}} = U_{01} - U_{02} + I_0(R_1 - R_2) + (a_1 + a_2 + R_1 + R_2 - b_2 \Delta I_\Gamma) \Delta I_{1\text{пор}} - (a_2 + R_2) \Delta I_\Gamma + \frac{b_2}{2} \Delta I_\Gamma^2 + \frac{b_2 - b_1}{2} \Delta I_{1\text{пор}}^2 + I_0(R_{\text{вн1}} - R_{\text{вн2}}) + (R_{\text{вн1}} + R_{\text{вн2}}) \Delta I_{1\text{пор}} - R_{\text{вн2}} \Delta I_\Gamma. \quad (20)$$

Приращение пороговой разности за счет внутренних сопротивлений источников сравниваемых напряжений может быть получено путем вычитания (16) из (20).

$$\delta U_{\text{пор}} (R_{\text{вн}} = \Delta U'_{\text{пор}} - \Delta U_{\text{пор}} = I_0(R_{\text{вн1}} - R_{\text{вн2}}) + (R_{\text{вн1}} + R_{\text{вн2}}) \Delta I_{1\text{пор}} - R_{\text{вн2}} \Delta I_\Gamma. \quad (21)$$

Из (21) можно сформулировать условия, при которых влияние $R_{\text{вн1}}$, $R_{\text{вн2}}$ на $\Delta U_{\text{пор}}$ исключается ($\delta U_{\text{пор}} = 0$):

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{вн1}} &= R_{\text{вн2}}; \\ \Delta I_{1\text{пор}} &= 0; \\ \Delta I_\Gamma &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Условие $\Delta I_{\text{пор}} = 0$ ($a_1 = r_{\text{пор}}$) можно выполнить, запаяв в схему сопротивление $R_{\text{н}} = R_{\text{но}}$, значение которого рассчитано, исходя из приближенного выражения (3) для $r_{\text{пор}}$:

$$R_{\text{но}} \approx \frac{2\varphi_{\text{Г1}}}{nh_{21}I_{\text{ГН}}}. \quad (23)$$

С учетом (22) выражение (20) можно записать в виде

$$\Delta U'_{\text{пор}} = U_{01} - U_{02} + I_0(R_1 - R_2). \quad (24)$$

Из (24) следует метод настройки схемы на нулевую пороговую разность:

1) при $R_1 = R_2 = 0$ определяется величина и знак $\Delta U'_{\text{опор}}$;

2) если $\Delta U'_{\text{опор}} > 0$ настройка производится путем запайки в схему сопротивления R_2 , вычисленного по формуле $R_2 = \frac{\Delta U'_{\text{опор}}}{I_0}$;

3) если $\Delta U'_{\text{опор}} < 0$, настройка производится путем запайки в схему сопротивления R_1 , вычисленного по формуле

$$R_1 = \frac{|\Delta U'_{\text{опор}}|}{I_0}.$$

в) Влияние входного сопротивления прибора, на который нагружается компаратор, на пороговую разность. Обычно бывает задано номинальное значение $R_{\text{вхн}}$ входного сопротивления прибора нагрузки компаратора и максимальное отклонение $\Delta R_{\text{вх. макс}}$ входного сопротивления от номинального значения.

Влияние входного сопротивления частично может быть учтено при настройке путем включения параллельно $R'_{\text{н}}$ сопротивления, равного $R_{\text{вх. н}}$. Сопротивление $R'_{\text{но}}$ рассчитывается при этом по формуле

$$R'_{\text{но}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{но}}} - \frac{1}{R_{\text{вх. н}}}},$$

где $R_{\text{но}}$ вычислено по формуле (23).

При нагрузке компаратора на прибор с входным сопротивлением $R_{\text{вх}} = R_{\text{вх. н}} + \Delta R_{\text{вх}}$ изменяется значение порогового сопротивления, что приводит к изменению $\Delta I_{\text{пор}}$ и $\Delta U_{\text{пор}}$.

Приращение

$$\begin{aligned} \delta I_{\text{пор}} &= \Delta I'_{\text{пор}} - \Delta I_{\text{пор}} = \frac{a_1 - r'_{\text{пор}}}{b_1} - \frac{a_1 - r_{\text{пор}}}{b_1} = \\ &= -\frac{r_{\text{пор}}}{b_1} \cdot \frac{\Delta R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх. н}} \left(1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R'_{\text{но}}}\right)}. \end{aligned}$$

Из приближенного выражения (17) найдем приращение пороговой разности

$$\delta U_{\text{пор}}(R_{\text{вх}}) = -(a_1 + a_2 + R_1 + R_2 - b_2 \Delta I_{\text{Г}}) \frac{r_{\text{пор}}}{b_1} \cdot \frac{\Delta R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх. н}} \left(1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R'_{\text{но}}}\right)}. \quad (25)$$

Из (25) следует, что положительное отклонение входного сопротивления прибора нагрузки компаратора от номинального значения вызывает отрицательное приращение пороговой разности.

Для дальнейшего важно отметить, что коэффициент при

$$-\frac{\Delta R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх.н}} \left(1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{но}}}\right)} b \quad (26)$$

имеет порядок $2\varphi_T$. Действительно, при $R_1 = R_2 = 0$; $\Delta I_\Gamma = 0$; $a_1 \approx a_2 = a$; $r_{\text{пор}} \approx a$, коэффициент при $-\frac{\Delta R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх.н}} \left(1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{но}}}\right)}$ равен $\frac{2a^2}{b} = 2\varphi_T$. (27)

г) **Входная цепь с неидеальным генератором тока** (рис. 2, в). Выражения (16, 17, 18, 19, 20), выведенные для схемы с идеальным генератором тока, справедливы для схемы с неидеальным генератором тока, при условии, что в последнем случае

$$\Delta I_\Gamma = f(\Delta U_{\text{вх}}), \quad (28)$$

где $\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх.н}}$ — приращение входного напряжения;

$U_{\text{вх2}}$ — текущее значение опорного напряжения;

$U_{\text{вх.н}}$ — значение опорного напряжения, при котором происходит настройка компаратора на нулевую пороговую разность.

Чтобы получить аналитическое выражение для функции (28), составим уравнение Кирхгофа для контура I на рис. 2в:

$$I_\Gamma R + I_2 R_2 + U_2 = E_{\text{см}} + U_{\text{вх2}}. \quad (29)$$

Пренебрегая членом $I_2 R_2$ и заменяя U_2 приближенным выражением $U_2 \approx \varphi_{T_2} \gamma_2$, из (29) получим выражение для I_Γ :

$$I_\Gamma \approx \frac{E_{\text{см}} + U_{\text{вх2}} - \varphi_{T_2} \gamma_2}{R}. \quad (30)$$

Обозначим через $I_{\Gamma\text{н}}$ выражение

$$I_{\Gamma\text{н}} = \frac{E_{\text{см}} + U_{\text{вх.н}} - \varphi_{T_2} \gamma_2}{R}. \quad (31)$$

Вычитая (30) из (31), получим

$$\Delta I_\Gamma = I_\Gamma - I_{\Gamma\text{н}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{R}.$$

Для схемы с сопротивлением $R_{\text{но}}$, рассчитанным по формуле (23) (при этом $\Delta I_{\text{пор}} = 0$), из (16) найдем приращение пороговой разности как функцию приращения опорного напряжения:

$$\delta U_{\text{пор}}(\Delta U_{\text{вх}}) = -(a_2 + R_2) \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{R} + \frac{b_2}{2} \left(\frac{\Delta U_{\text{вх}}}{R} \right)^2. \quad (32)$$

Напомним, что согласно предположению рабочие точки диодов на этапе предимпульсных колебаний находятся в окрестности точки $I = I_0$, т. е. $\Delta I \ll I_0$. Поэтому выражение (32) справедливо при достаточно малых значениях отношения $\frac{\Delta U_{\text{вх}}}{R}$, так что член второго порядка всегда

меньше члена первого порядка. В противном случае (при больших $\frac{\Delta U_{\text{вх}}}{R}$) необходимо учитывать члены более высокого порядка в разложении (9).

Учитывая изложенное, из (32) можно сделать вывод, что положительное приращение опорного напряжения вызывает отрицательное приращение пороговой разности.

Приближенное выражение для $\delta U_{\text{пор}}(\Delta U_{\text{вх}})$ имеет вид

$$\delta U_{\text{пор}}(\Delta U_{\text{вх}}) \approx -(a_2 + R_2) \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{R}. \quad (33)$$

Скорость изменения (32) в точке $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх.н}}$

$$S = \frac{d(\delta U_{\text{пор}})}{d(\Delta U_{\text{вх}})} = -\frac{a_2 + R_2}{R}.$$

При известных a_2 и R абсолютная величина скорости S минимальна при $R_2 = 0$.

Метод настройки компаратора, при котором $R_2 \equiv 0$, состоит в следующем:

- 1) определяется знак и величина $\Delta U_{\text{опор}}$ при $R_1 = R_2 = 0$,
- 2) если $\Delta U_{\text{опор}} > 0$, диоды D_1 , D_2 меняются местами, после чего согласно (24) знак $\Delta U_{\text{опор}}$ изменяется,
- 3) при $\Delta U_{\text{опор}} < 0$ настройка производится сопротивлением R_1 .

ТЕМПЕРАТУРНАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ПОРОГОВОЙ РАЗНОСТИ

Выражая $\Delta I_{1 \text{ пор}}$, $r_{\text{пор}}$, a_1 , a_2 , b_1 , b_2 через первичные параметры элементов схемы (φ_{T1} , h_{21} и т. д.) и подставляя полученные выражения в (20), при $\Delta I_{\Gamma} = 0$, получим

$$\Delta U_{\text{пор}} = U_{01} - U_{02} + I_0(R_1 - R_2) + M \left(\frac{\varphi_{T1}}{nR_{\text{н}}I_0} - h_{21} \right),$$

где

$$M = \frac{\varphi_{T1} + \varphi_{T2} + I_0(R_1 + R_2)}{\varphi_{T1}} nR_{\text{н}}I_0.$$

При изменении температуры за счет изменения параметров элементов схемы φ_T , U_0 , h_{21} пороговая разность получит приращение

$$\delta U_{\text{пор}}(T) = \Delta U_{\text{пор}}(T) - \Delta U_{\text{пор}}(T_0).$$

Если настройка компаратора производится при комнатной температуре T_0 ($\Delta U_{\text{пор}}(T_0) = 0$), то

$$\delta U_{\text{пор}}(T) = \Delta U_0(T) + M(T) \cdot \Delta P(T) + A,$$

где $\Delta U_0(T) = U_{01}(T) - U_{02}(T)$;

$$M(T) = \frac{\varphi_{T1}(T) + \varphi_{T2}(T) + I_0(R_1 + R_2)}{\varphi_{T1}(T)} \cdot nR_{\text{н}}I_0;$$

$$\Delta P(T) = \frac{\varphi_{T1}(T)}{nR_{\text{н}}I_0} - h_{21}(T) \text{ — температурная расстройка компаратора}$$

$$A = I_0(R_1 - R_2).$$

Так как согласно (24), $A = -\Delta U_0(T_0)$, то

$$\delta U_{\text{пор}}(T) = \Delta U_0(T) - \Delta U_0(T_0) + M(T) \Delta P(T). \quad (34)$$

Анализ выражения (34) показывает, что основными причинами температурной неустойчивости пороговой разности являются:

- 1) отклонение разности падений напряжений на диодах в точке $I = I_0$ от ее значения при $T = T_0$;
- 2) температурная расстройка компаратора.

Приращение пороговой разности, вносимое $\Delta P(T)$, тем меньше, чем меньше коэффициент M . Для диодов с идентичными характеристиками $R_1 = R_2 = 0$. При этом при прочих равных условиях $M = M_{\text{мин}}$. Кроме

того, учитывая, что для диодов с идентичными характеристиками более вероятным является выполнение условия $\Delta U_0(T) \approx \Delta U_0(T_0)$, можно сделать вывод, что самой высокой температурной стабильностью обладают компараторы на диодах с идентичными характеристиками.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ КОМПАРАТОРА

Анализ выражений (16, 17, 18) показывает, что кроме рассмотренных выше способов настройки компаратора сопротивлениями R_1 , R_2 , настройку компаратора возможно также производить изменением ΔI_Γ и $\Delta I_{\text{пор}}$ (сопротивлением R_H).

Способ настройки компаратора изменением ΔI_Γ не является универсальным. Для уменьшения влияния $\Delta U_{\text{вх}}$ на пороговую разность целесообразно выбирать $E_{\text{см}}$ максимально возможным. В этом случае положительное приращение ΔI_Γ осуществить невозможно. Поэтому изменением ΔI_Γ согласно (16) может быть настроен компаратор, пороговая разность которого перед настройкой (при $\Delta I_\Gamma = 0$) была отрицательной.

Так как диапазон изменения $\Delta I_{\text{пор}}$ не превышает по абсолютной величине I_0 , то при $\Delta I_\Gamma = 0$, согласно (16), таким способом могут настраиваться компараторы с близкими или идентичными характеристиками. Таким образом, настройке компаратора сопротивлением R_H должен предшествовать отбор пар диодов с близкими характеристиками.

Простота настройки компаратора сопротивлениями R_1 , R_2 является кажущейся. Настройка компаратора сопротивлениями R_1 , R_2 является эффективной только в тех случаях, когда сопротивление R_H выбрано равным рассчитанному по формуле (23). Для этого должны быть предварительно известны φ_{T1} и h_{21} .

Таким образом, настройке компаратора сопротивлениями R_1 , R_2 должно предшествовать определение коэффициента φ_T диода, стоящего в цепи положительной обратной связи, и коэффициента усиления триода по току h_{21} .

Сравнение способов настройки позволяет сделать вывод.

Исходя из температурной стабильности и условия уменьшения влияния внутренних сопротивлений источников сравниваемых напряжений на пороговую разность, имеет преимущество настройка компаратора сопротивлением R_H , которой должен предшествовать подбор пар диодов с близкими характеристиками.

РАСЧЕТ КОМПАРАТОРА

Расчет компаратора на кремниевых элементах со смещением рабочих точек диодов по заданному диапазону сравниваемых напряжений $U_{0\text{ мин}} \div U_{0\text{ макс}}$; входному сопротивлению прибора нагрузки компаратора $R_{\text{вх. н}} \pm \Delta R_{\text{вх. н}}$, относительной точности сравнения напряжений ϵ при номинальной нагрузке $R_{\text{вх. н}}$ и по максимальному отклонению пороговой разности при нагрузке на $R_{\text{вх. мин}} - \delta U_{\text{доп}}(R_{\text{вх. мин}})$ (обычно $\delta U_{\text{доп}} \approx (0,01 - 0,1) \Delta U_{\text{макс}}$, где $\Delta U_{\text{макс}} = \epsilon(U_{0\text{ макс}} - U_{0\text{ мин}})$), производится в следующем порядке:

1) Ток $I_{\Gamma H}$ определяется из условия, чтобы приращение пороговой разности при подсоединении прибора с входным сопротивлением, отличающимся от номинального, при наиболее неблагоприятном сочетании параметров не превышало допустимого значения.

Учитывая, что для компаратора с диодами, характеристики которых идентичны, коэффициент при $\frac{\Delta R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх. н}} \left(1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{но}}} \right)}$ в выражении (26) равен $2\varphi_T$,

и подставляя в (26) выражение для $R'_{но}$, а затем выражение (23) для $R_{но}$, после преобразований получим

$$|\delta U_{пор}(R_{вх})| = \frac{2\varphi_T |\Delta R_{вх}|}{R_{вх.н} + R_{вх} \left(\frac{R_{вх.н} n h_{21} I_{гн}}{2\varphi_T} - 1 \right)}. \quad (35)$$

Из (35) следует, что наиболее неблагоприятным сочетанием параметров является то, при котором $R_{вх} = R_{вх.мин}$;

$$h_{21} = h_{21.мин}; \quad \varphi_T = \varphi_{T.макс}.$$

Условие выбора $I_{гн}$ записывается в виде

$$I_{гн} \geq I_{г доп},$$

где

$$I_{г доп} = \frac{\left(\frac{2\varphi_{T.макс}}{\delta U_{доп}} - 1 \right) |\Delta R_{вх}|}{R_{вх.мин} R_{вх.н} n h_{21.мин}} - 2\varphi_{T.макс}$$

вычисляется из (35), если $\delta U_{пор}(R_{вх}) = \delta U_{доп}$;

$$R_{вх} = R_{вх.мин}; \quad h_{21} = h_{21.мин}; \quad \varphi_T = \varphi_{T.макс}.$$

2. В качестве напряжения настройки выбирается нижняя граница диапазона сравниваемых напряжений. При этом из (33) получим условие для выбора R :

$$R \geq \frac{2\varphi_{T.макс}}{I_{гн \epsilon}}.$$

3. После выбора R и $I_{гн}$ $E_{см}$ рассчитывается из (31):

$$E_{см} = I_{гн} R + \varphi_{T.макс} - U_{вх.мин}.$$

Пример: Рассчитать компаратор на трансформаторе МИТ-4 ($n=1$), диодах Д104 ($\varphi_{T.макс} = 72$ мВ), триоде П106 ($h_{21.мин} = 20$) при следующих исходных данных:

- диапазон сравниваемых напряжений $0 \div 10$ в;
- относительная погрешность сравнения напряжений при $R_{вх} = R_{вх.н}$ $\epsilon = 0,003$;
- нагрузкой компаратора является триггер с входным сопротивлением

$$R_{вх} = 10 \pm 0,5 \text{ ком}; \quad R_{вх.н} = 10 \text{ ком}, \quad R_{вх.мин} = 9,5 \text{ ком}.$$

Задаемся величиной $\delta U_{доп}(R_{вх.мин}) = 0,03 \Delta U_{макс} = 0,03\epsilon (U_{вх.макс} - U_{вх.мин}) \approx 1 \cdot 10^{-3}$ в

$$I_{г доп} = \frac{\left(\frac{2 \cdot 72 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) 0,5 \cdot 10^3}{9,5 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 20} \cdot 2 \cdot 72 \cdot 10^{-3} \approx 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ а}.$$

Принимаем $I_{гн} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ а}.$

$$R \geq \frac{2 \cdot 72 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 6 \cdot 10^6 \text{ ом}.$$

Выбираем $R = 8 \cdot 10^6 \text{ ом}.$

$$E_{см} = 8 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 48 \text{ в}.$$

Принимаем $E_{см} = 50 \text{ в}.$

Рассчитанный компаратор подвергался экспериментальной проверке.

Для этого кремниевые диоды из табл. 1 включались в таких комбинациях в схему компаратора на триоде П105 ($h_{11} = 1,45 \text{ ком}$; $h_{12} = 0,3 \times 10^{-3}$; $h_{22} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ом}$; $h_{21} = 35$), чтобы каждый раз в схеме были запаяны диоды с близкими характеристиками.

Настройка компаратора производилась сопротивлением R_n при $U_{вх} = 0,1 \text{ в}$. Измерение $\Delta U_{\text{пор}}$ осуществлялось автоматическим прибором для измерения пороговой разности регенеративных компараторов, разработанным в Харьковском институте горного машиностроения, автоматики и вычислительной техники [4]. Зависимости $\Delta U_{\text{пор}} = f(U_{вх})$ для различных комбинаций диодов из табл. 1 сведены в табл. 2. Как следует из табл. 2, относительная погрешность сравнения напряжений не превышает 0,3%.

Результаты испытаний компаратора в диапазоне температур $20 \div 60^\circ \text{C}$ для пятой и шестой комбинаций диодов из табл. 2 сведены в табл. 3.

Таблица 2

Номера диодов		$R_{\text{но}}, \text{ком}$		$U_{\text{вх}}, \text{в}$		
D_1	D_2			3,1	6,1	9,1
1	6	0,7	$\Delta U_{\text{пор}}, \text{мВ}$	-4	-11	-15
2	3	0,64		-6	-11	-15
5	9	0,55		-6	-12	-15
6	7	0,64		-5	-10	-14
4	10	0,97		-6	-11	-16
6	8	0,7		-5	-11	-15

Таблица 3

Номера диодов			$T^\circ \text{C}$				
D_1	D_2		20	30	40	50	60
4	10	$\Delta U_{\text{пор}}, \text{мВ}$	0	0	-1	-1	-2
6	8		-2	-2	-2	-2	-2

ВЫВОДЫ

1. Получено аналитическое выражение для пороговой разности регенеративного компаратора небалансного типа со смещением рабочих точек диодов.

2. Исследовано влияние внутренних сопротивлений источников сравниваемых напряжений на точность сравнения напряжений и сформулированы условия, при которых влияние внутренних сопротивлений на точность сравнения исключается.

3. Выяснено влияние входного сопротивления прибора, на который нагружается компаратор, на точность сравнения напряжений.

4. Получена зависимость пороговой разности от приращения опорного напряжения.

5. Исследована температурная нестабильность пороговой разности.

6. Произведено сравнение возможных методов настройки компаратора на нулевую пороговую разность. Показано, что с точки зрения температурной стабильности, а также из условия уменьшения влияния внутренних сопротивлений источников сравниваемых напряжений на пороговую разность имеет преимущество настройка сопротивлением R_n , которой должен предшествовать подбор пар диодов с идентичными характеристиками.

7. Предложен аналитический метод расчета компаратора по заданным относительной точности сравнения напряжений при номинальной нагрузке и максимальному отклонению пороговой разности при нагрузке на минимальное входное сопротивление.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. З. Найдоров. Полупроводниковый преобразователь непрерывной величины в цифровой эквивалент. Известия ВУЗов СССР. Радиотехника, 1960, № 5.
 2. А. П. Стахов. Исследование регенеративного компаратора с трансформаторной обратной связью. Сб. «Приборы и устройства», вып. II. Изд-во ХГУ, 1966.
 3. L. C. Merril. T. L. Slater. Linear sweep-voltage generator and precision amplitude comparator, using transistors, Electrical Communication, 1956, Sept., V. 33, № 3.
 4. А. П. Стахов. Автоматический прибор для измерения пороговой разности регенеративных компараторов. Ст. в наст. сборнике.
-