

ИФВЭ  
СЭФ 71-45

В.А.Кренделев, В.Я.Углеков

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОВИБРАТОРА  
С ЛИНЕЙНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ВРЕМЕН

Кренделев В.А., Углеков В.Я.

Исследование одновибратора с линейной регулировкой длительности в широком диапазоне времен. Серпухов, 1971.

16 стр. (ИФВЭ. 71-45).

Библиогр. 7.

Описан одновибратор, у которого при задержках от 3 мсек до 3 сек нелинейность регулирования задержки не превышает  $\pm 0,1\%$ , а погрешность в диапазоне температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  не превышает  $\pm 0,2\%$ .

Приводятся формулы для расчета времени задержки, относительной нелинейности регулировки длительности и температурной нестабильности.

Препринт Института физики высоких энергий.  
Серпухов, 1971.

Krendelev V.A., Uglekov V.Ya.

Investigation of a Multivibrator with Linear Adjustment of the Duration in a Wide Time Range. Serpukhov, 1971.

p. 16. (IHEP. 71-45).

Bibliog. 7.

The multivibrator, whose nonlinearity of the delay adjustment is not higher than  $\pm 0,1\%$  at delays from 3 msec up to 3 sec, and the error of less than  $\pm 0,2\%$  over a temperature range  $0^{\circ}\text{C} - +50^{\circ}\text{C}$ , is described.

The formulas to calculate the delay time, relative nonlinearity of adjusting the duration and temperature instabilities are presented.

Preprint. Institute of High Energy Physics.  
Serpukhov, 1971.

**В.А.Кренделев, В.Я.Углеков**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОВИБРАТОРА  
С ЛИНЕЙНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ВРЕМЕН**

В аппаратуре физического эксперимента, в частности, в системе управления пузырьковой камеры широко используются устройства задержки времени. Эти устройства должны работать с высокой точностью (лучше 1%) в широком интервале задержек от  $t_{в.макс.}$  до  $t_{в.мин.}$  с коэффициентом перекрытия  $K = \frac{t_{в.макс.}}{t_{в.мин.}}$  порядка  $10^3$ .

В литературе /1-4/ дано описание одновибраторов, которые при  $K = 10^3$  имеют погрешность не менее 3 . . . 5 %. Изменение времязадающего сопротивления в столь широком диапазоне влечет за собой изменение тока базы и, следовательно, изменение напряжения перехода эмиттер-база  $U_{эб}$  открытого транзистора, что обуславливает указанную погрешность. Кроме того, изменение тока базы меняет и температурный коэффициент напряжения  $U_{эб}$ , что вносит существенную температурную погрешность и делает малоэффективной диодную термостабилизацию. Введение в схему одновибратора дополнительных транзисторов  $T_3$  и  $T_4$  (рис. 1) /7/ устраняет эти недостатки и позволяет обеспечить точность  $\pm 0,2\%$  при  $K = 10^3$  и температуре окружающей среды 0 . . . + 50°C. Такие прецизионные одновибраторы уже работают в системе управления пропановой камеры СКАТ. Ниже приведены исследования этого одновибратора.

## Время задержки и его стабильность

В исходном состоянии одновибратора (рис. 1) транзистор  $T_4$  заперт, а  $T_3$  открыт и задает в базу транзистора  $T_2$  ток, не зависящий от величины времязадающего сопротивления  $R$ . Во временно устойчивом состоянии, когда транзисторы  $T_2$  и  $T_3$  закрыты, идет перезаряд конденсатора  $C$  через насыщенные транзисторы  $T_1$  и  $T_4$  и сопротивление  $R$ .

Благодаря такому включению транзисторов  $T_3$  и  $T_4$  получена малая нелинейность регулирования задержки  $t_B$  и достигнута эффективная диодная (диод  $D1$  на рис. 1) температурная стабилизация<sup>/5/</sup>. Время задержки  $t_B$  разделим на две последовательные стадии  $t_{B1}$  и  $t_{B2}$ . Во время первой стадии напряжение на конденсаторе  $C$  возрастает от  $U_{C0}$  до  $U'_C$ , при котором начинает приоткрываться транзистор  $T_2$  ( $U_{эб2} = U_{б2}$ ,  $U_{б2} = 0$ ). Вторая стадия заканчивается, когда ток базы достигает значения  $J_{б2.сраб.}$ , при котором открывается транзистор  $T_2$  и одновибратор возвращается в исходное состояние.

При анализе времени задержки пренебрежем влиянием обратных токов транзисторов  $T_2$  и  $T_3$ , а падение напряжения на диоде  $D1$ , транзисторе  $T_4$  и переходе эмиттер-база транзистора  $T_2$  примем равным<sup>/6/</sup>

$$U = E_{пр} + R_{пр} \cdot J.$$

Выражение для длительности<sup>/6/</sup>  $t_{B1}$

$$t_{B1} = (R + R'_{пр1} + R_{пр4}) \cdot C \cdot \ln A_1, \quad (1)$$

где

$$A_1 = \frac{E_K - E_{пр4} - E'_{пр1} + U_{C0}}{E_K - E_{пр4} - E'_{пр1} + U'_C},$$

$$U'_C = E'_{пр1} + \frac{(E_K - E_{пр4} - U_{б02}) \cdot R_{пр1}}{R + R_{пр4}} - U_{б02}. \quad (2)$$

$$U_{Co} = E_K - U_{6o2} - \frac{E_K}{R_{K1} + R_9} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (R_{K1} + R_{np2}), \quad (3)$$

$$E'_{np1} = \left( \frac{E_{np1}}{R_{np1}} + \frac{E_K}{R_{K1}} \right) \cdot R'_{np1},$$

$$R'_{np1} = \frac{R_{np1} \cdot R_{K1}}{R_{np1} + R_{K1}}.$$

Выражение для  $t_{B2}$  запишем аналогично выражению для  $t_{B1}$ .

$$t_{B2} = (R'' + R'_{np1}) \cdot C \ln A_2, \quad (4)$$

где

$$A_2 = \frac{E''_K - E'_{np1} + U'_C}{E''_K - E_{np1} + U''_C},$$

$U''_C$  — напряжение на конденсаторе  $C$  к моменту окончания стадии  $t_{B2}$  и начала регенеративного процесса,

$$U''_C = U'_C - J_{62.сраб.} \left[ 1 + \frac{R'_{np1}}{R + R_{np4}} \right] \cdot R_{np2} + R'_{np1}, \quad (5)$$

$$E''_K = \left( \frac{E_K - E_{np4}}{R + R_{np4}} + \frac{U_{6o2}}{R_{np2}} \right) \cdot R'', \quad (6)$$

$$R'' = \frac{(R + R_{np4}) \cdot R_{np2}}{R + R_{np4} + R_{np2}}. \quad (7)$$

Регенеративный процесс начинается после выхода транзистора  $T_1$  из насыщения, при этом ток базы открытия транзистора  $T_2$  равен:

$$J_{\text{б2.сраб.}} = \frac{1}{B_2} \left( \frac{E_K - U_{\text{эб1}}}{R_{\text{к2}}} - \frac{E_K (R + R_{\text{к1}})}{B_1 \cdot R \cdot R_{\text{к1}}} \cdot A_3 - \frac{U_{\text{эб1}} + E_{\text{см}}}{R_{\text{см}}} \cdot A_3 \right), \quad (8)$$

где

$$A_3 = \frac{R_{\text{св}} + R_{\text{к2}}}{R_{\text{к2}}},$$

$B_1$  и  $B_2$  - коэффициенты усиления транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ . Суммарная длительность времени задержки

$$t_{\text{в}} = t_{\text{в1}} + t_{\text{в2}}. \quad (9)$$

### Нелинейность регулирования задержки

Нелинейность регулирования задержки  $\Delta t_{\text{нел.}}$ ; т.е. отклонение задержки  $t_{\text{в}}$  от линейной зависимости  $t_{\text{л.}} = p \cdot R$ , где  $p$  - постоянный коэффициент размерностью сек/ом, равна

$$\Delta t_{\text{нел.}} = t_{\text{в}} - p \cdot R.$$

Относительная нелинейность регулирования

$$\delta t_{\text{нел.}} = \frac{\Delta t_{\text{нел.}}}{t_{\text{в}}}.$$

Расчет по формулам (1) . . . (9) и экспериментальные измерения (рис. 3) показывают, что величина  $\delta t_{\text{нел.}}$  в пределах изменения сопротивления  $R$  от 300 ом до 300 ком ( $K = 10^3$ ) не превышает  $\pm 0,1\%$ . Для сравнения укажем, что в тех же пределах изменения сопротивления  $R$  схема одновибратора (рис. 1) без дополнительных транзисторов  $T_3$  и  $T_4$  имеет нелинейность регулирования  $\delta t_{\text{нел.}} \geq \pm 5\%$  (рис. 3). При значениях сопротивления  $R$  больше 300 ком заметно уменьшается  $E''_{\text{к}}$  (5) и увеличивается  $t_{\text{в2}}$  (4), что приводит к увеличению  $\Delta t_{\text{нел.}}$ . При значениях сопротивления  $R$  менее 300 ом сказывается влияние сопротивления транзисто-

ра  $T_4$  ( $R_{пр4}$ ), которое, складываясь с сопротивлением  $R$ , также ведет к росту  $\Delta t_{нел.}$ . Следует отметить, что диод Д1, введенный для термокомпенсации задержки, уменьшает нелинейность  $\delta t_{нел.}$ . Действительно, пренебрегая малыми членами, не зависящими от  $R_{пр1}$  и  $R_{пр4}$ , и разлагая логарифм в ряд, преобразуем (1) к виду

$$t_{в1} \approx C \left[ (R + R_{пр4}) \cdot 0.69 - R_{пр1} \left( 0.31 + \frac{R}{2 R_{к1}} \right) \right],$$

откуда видно, что диод Д1 ( $R_{пр1}$ ) частично компенсирует влияние транзистора  $T_4$  ( $R_{пр4}$ ).

Введение в одновибратор (рис.1) составного транзистора  $T_2$  позволяет существенно снизить ток базы  $J_{б2}$ , сраб. и тем самым уменьшить нелинейность при больших значениях сопротивления  $R$ . Однако при использовании сопротивлений  $R$  больше нескольких мом заметное влияние оказывают обратные токи транзисторов  $T_2$  и  $T_3$ , что увеличивает нелинейность регулирования.

### Температурная стабильность задержки

Для оценки температурной стабильности времени задержки найдем ее относительное изменение  $\delta t_T$  при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$ . Из выражения (1) находим

$$\delta t_T = T K C_R + T K E_C + 0.72 \left( \frac{E_{пр.4}}{E_K} \cdot T K N_{пр.4} - \frac{E_{пр.1}}{E_K} \cdot T K N_{пр1} + \frac{U_{б02}}{E_K} \cdot T K N_{б02} \right), \quad (10)$$

где  $T K C_R$  -  $T K C$  сопротивления  $R$  ( $1/^\circ\text{C}$ ),  $T K E_C$  -  $T K E$  конденсатора  $C$ ,  $T K N_{пр4}$ ,  $T K N_{пр1}$ ,  $T K N_{б02}$  -  $T K N$  напряжений соответственно  $E_{пр4}$ ,  $E_{пр1}$ ,  $U_{б02}$ .



При термостабильных элементах цепи RC основная температурная погрешность задержки  $t_{в1} \delta t_T$  обусловлена влиянием ТКН<sub>б02</sub>, поскольку  $\frac{E_{пр4}}{E_k} < 0,01$ ,  $ТКН_{пр4} < 0,001 1/^\circ C$ , то первым членом в скобках выражения (10) можно пренебречь. Второй член в скобках выражения (10), определяемый ТКН диода Д1 (рис. 1), может полностью скомпенсировать влияние напряжения  $U_{б02}$ .

В одновибраторах без транзисторов  $T_3$  и  $T_4$  изменение тока базы транзистора  $T_2$  на три порядка (при изменении сопротивления R) изменяет ТКН<sub>б02</sub> в два раза (от 0,4 до 0,2 1/°C), температурная погрешность  $\delta t_T$  достигает в этом случае 0,002 1/°C, что делает диодную термокомпенсацию малоэффективной. Одновибратор с дополнительными транзисторами  $T_3$  и  $T_4$  (рис.1) лишен этого недостатка. При  $R = 300 \text{ ом} + 300 \text{ ком}$  погрешность  $\delta t_T \leq 0,008/^\circ C$ , что меньше временного дрейфа величины задержки.

При сопротивлениях  $R < 100 \text{ ком}$  величина задержки  $t_{в2} < 0,01 t_{в1}$  и ее температурной погрешностью  $\delta t_{T2}$  можно пренебречь. Когда сопротивление R возрастает до 100 ... 1000 ком и величины  $\frac{E_k}{R}$  и  $J_{б2.сраб.}$  становятся сравнимы, из выражений (4)... (8) получим

$$\delta t_{T2} = - \frac{E_k \cdot \Theta}{R \left( \frac{E_k}{R} - J_{б2.сраб.} \right)}$$

или

$$\delta t_{T2} = -(1 \dots 2) \cdot \Theta,$$

где  $\Theta$  - температурный показатель изменения коэффициента усиления транзистора  $T_2$  (1/°C). Полная температурная погрешность

$$\delta t_T = \delta t_{T1} + \delta t_{T2}.$$

### Экспериментальные данные

На рис.2 приведена полная схема одновибратора, а на рис.3-результаты её испытаний в диапазоне температур от 0°С до + 50°С. Использование

усилителя на транзисторе  $T_1$  расширяет диапазон задержек  $t_B$  и позволяет избежать зависимости начального напряжения на конденсаторе  $U_{C0}$  (см. выражение (3)) от напряжения на сопротивлении  $R_{K1}$  (рис.1). Диод Д2 (рис.2) компенсирует отрицательный ТКЕ пленочного конденсатора С типа МПО.

Транзистор  $T_7$  формирует выходной импульс, смещение в его эмиттерной цепи обеспечивает отсечку нестабильного заднего фронта импульса с транзисторов  $T_5$  и  $T_6$ .

В случае, когда необходимо учесть обратные токи транзисторов  $T_3$ ,  $T_5$  и  $T_6$  (рис.2), в скобках выражения (10) добавится член

$$- \frac{R \cdot J_{з.т}}{E_K} \cdot a,$$

где  $J_{з.т}$  -- суммарный ток закрытых транзисторов  $T_3$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ ,

$a$  - температурный показатель тока  $J_{з.т}$ .

Для уменьшения влияния тока  $J_{з.т}$  на стабильность времени задержки часто используют кремниевый диод Д3 (рис.4) с малым обратным током<sup>/6/</sup>. Однако этим влияние обратных токов на  $\delta t_T$  устранить полностью нельзя. Действительно, диод Д3 (рис.4) открывается при напряжении на конденсаторе С

$$U_C = E_{см} - J_{з.т} \cdot R_{см} - U_{д0},$$

где  $U_{д0}$  - напряжение открывания диода Д3. Последующее отпирание транзисторов  $T_5$  и  $T_6$  также зависит от тока  $J_{з.т}$  и, следовательно, от температуры, что увеличивает погрешность  $\delta t_T$ . С целью уменьшения

$\delta t_T$  в схеме (рис.4) вместо  $R_{см}$  следует использовать терморезистор. В этом случае можно приближенно записать

$$\begin{aligned} J_{з.т} \cdot R_{см} &= J_{з.т0} \cdot e^{a \Delta T} \cdot R_{см0} \cdot e^{-\beta \Delta T} = \\ &= J_{з.т0} \cdot R_{см0} \cdot e^{(a-\beta)\Delta T} \end{aligned}$$

где  $\beta$  - температурный показатель терморезистора. Отсюда видно, что зависимость запирающего напряжения на базе транзистора  $T_5$  (рис.4) от температуры существенно уменьшилась. Кроме того, термозависимое сопротив-

ление  $R_{\text{см}}$  может быть достаточно большим. Это уменьшит шунтирование времязадающего сопротивления  $R$ , что также снизит температурную погрешность  $\delta t_T$ .

На рис. 5 показана зависимость от температуры отклонения  $\delta t_B$  времени задержки  $t_B$  для одновибратора (рис. 2), где вместо транзисторов  $T_5, T_6$  использовался германиевый транзистор МП42Б с током  $J_{\text{ко}} = 2$  мка (при  $+20^\circ\text{C}$ ) и диод ДЗ типа Д223Б с током  $J_{\text{обр}} = 0,001$  мка.

Подобная термостабилизация позволяет в 7-10 раз уменьшить погрешность  $\delta t_T$ . Термозависимое сопротивление  $R_{\text{см}}$  можно использовать и в других схемах (например, триггер), где нежелательно глубокое запираание транзистора и изменение потенциала запираания с температурой.

### В ы в о д ы

1. Одновибратор с дополнительными транзисторами  $T_3$  и  $T_4$  (рис. 2) позволяет получить относительную нелинейность регулирования задержки.

$$\delta t_{\text{нел.}} \leq \pm 0,1\% \quad \text{при } K = 10^3,$$

$$\delta t_{\text{нел.}} \leq \pm 0,5\% \quad \text{при } K = 10^4.$$

2. В данном одновибраторе возможна эффективная диодная термостабилизация и температурная погрешность в диапазоне  $0 \dots +50^\circ\text{C}$  не превышает

$$\delta t_T \leq \pm 0,2\% \quad \text{при } K = 10^3,$$

$$\delta t_T \leq \pm 0,5\% \quad \text{при } K = 10^4.$$

3. Применение в одновибраторе термозависимого сопротивления позволяет существенно повысить температурную стабильность времени задержки.

## Л и т е р а т у р а

1. "Расчет и проектирование импульсных устройств на транзисторах". Под ред. М.Д.Штерка. М., "Сов. радио", 1964.
2. Е.Ф.Доронкин, В.В.Воскресенский. "Транзисторные генераторы импульсов". М., "Связь", 1968.
3. А.И.Шурыгин. "Одновибратор с плавной регулировкой длительности импульсов в широких пределах". Труды УП научно-технической конференции по ядерной электронике. М., "Атомиздат", 1970.
4. Е.П. Попечителей, Ю.М.Титов. "Стабильные схемы ждущих мультивибраторов с линейной регулировкой длительности". Изд-во вузов "Приборостроение", № 10, 1969.
5. Л.И.Компаниец, И.Ф.Огороднейчук. "Температурная стабилизация транзисторных мультивибраторов". "Приборы и системы автоматики", выпуск 10, 1969, стр. 72.
6. Л.И.Компаниец, А.М.Леновенко. "Температурная стабилизация мультивибраторов с разделительным кремниевым диодом". В сб. "Прикладная акустика и вибрационная техника". Киев, 1968.
7. G.Muller. Kippstufen mit extrem variabler Schaltzeit Internationale Elektronische Rundschau, N 7, 1967.

Рукопись поступила в издательскую группу  
20 апреля 1971 года.

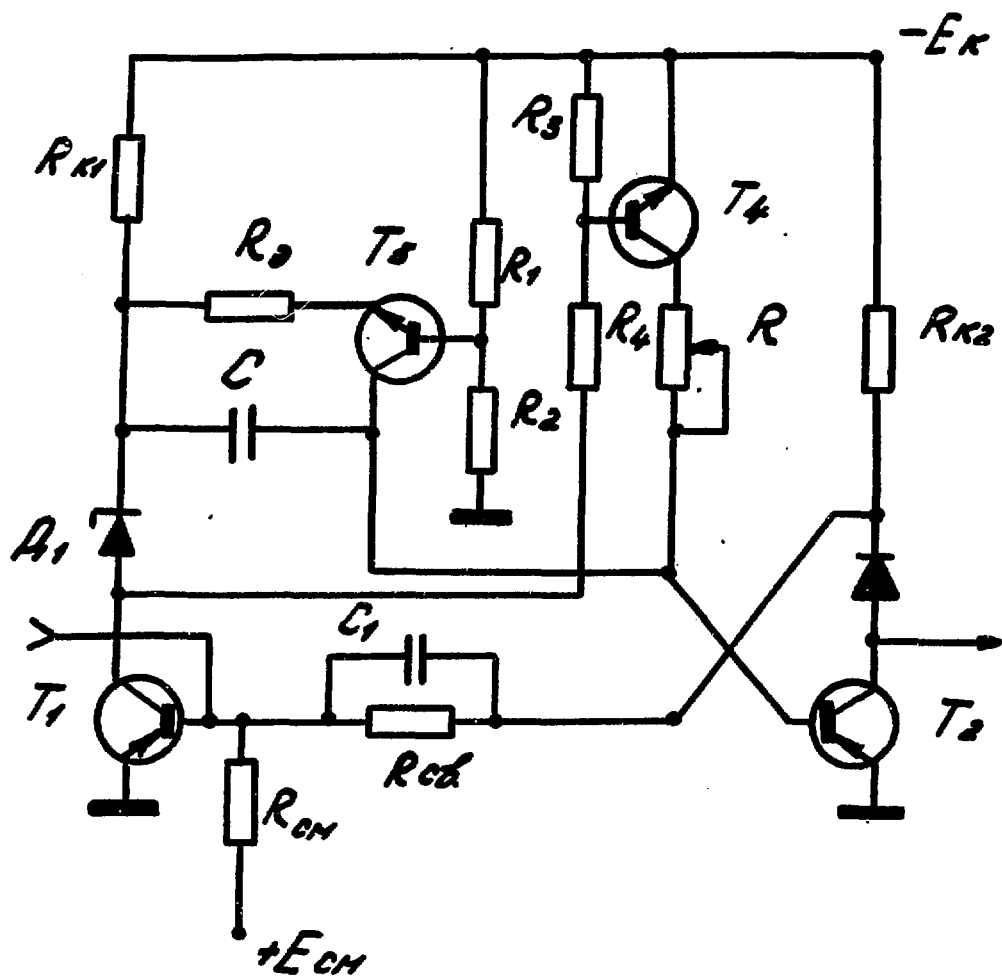


Рис. 1. Одновибратор с дополнительными транзисторами  $T_3$  и  $T_4$ .

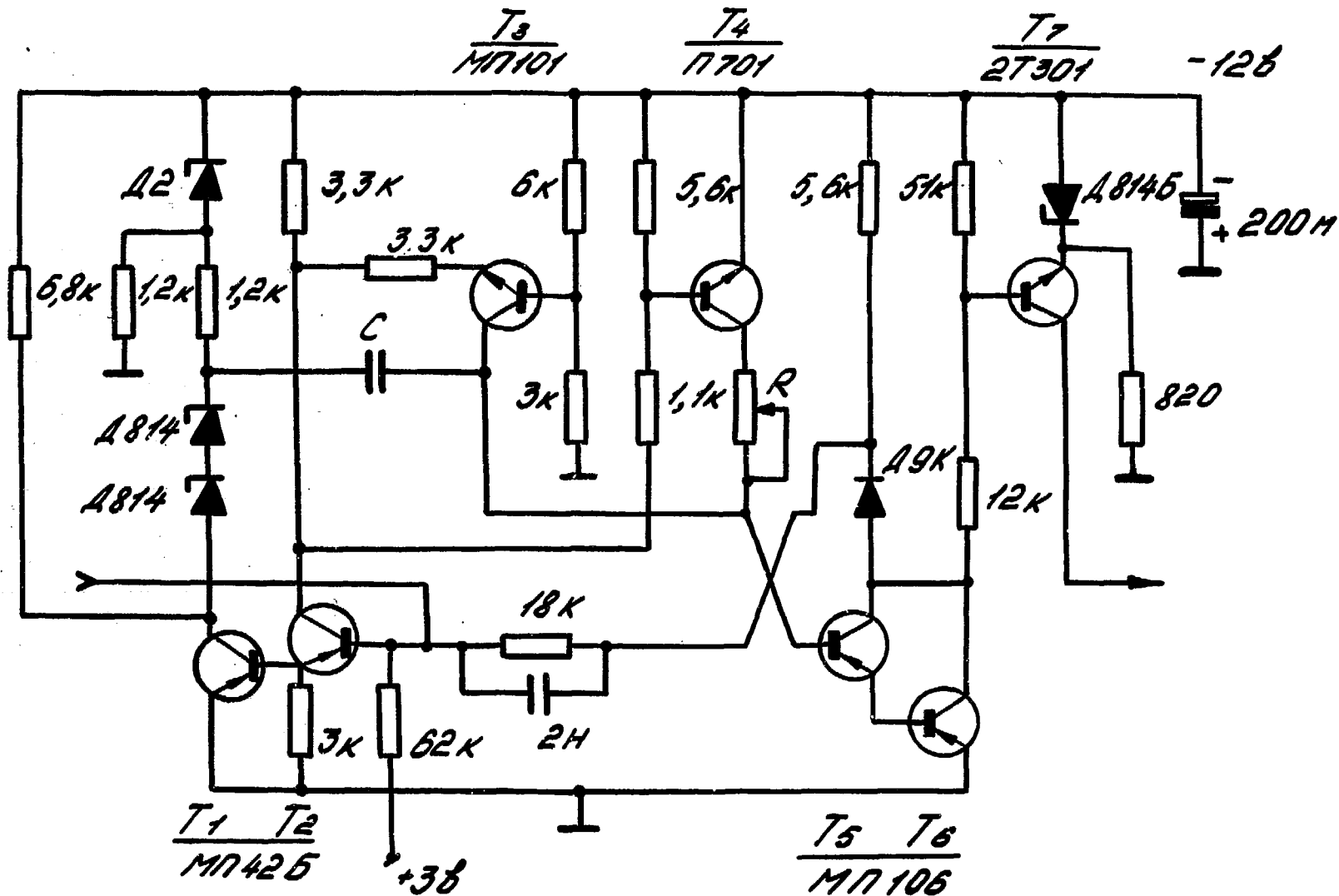
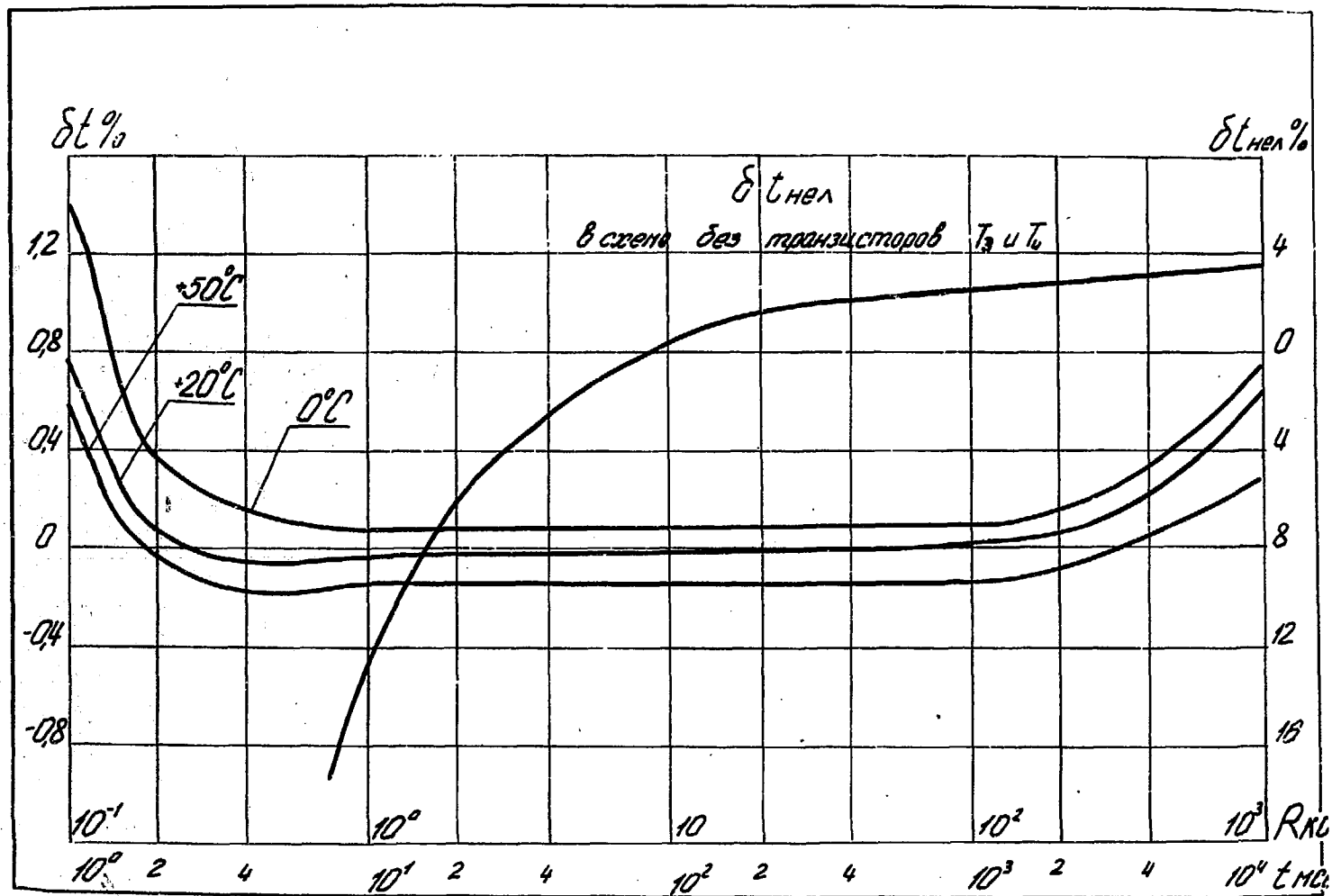


Рис. 2. Полная схема стабильного одновибратора с линейной регулировкой длительности в широком диапазоне времен.



14

Рис. 3. Зависимость относительного отклонения  $\delta t$  времени задержки от сопротивления  $R$  для одновибратора, изображенного на рис. 2.

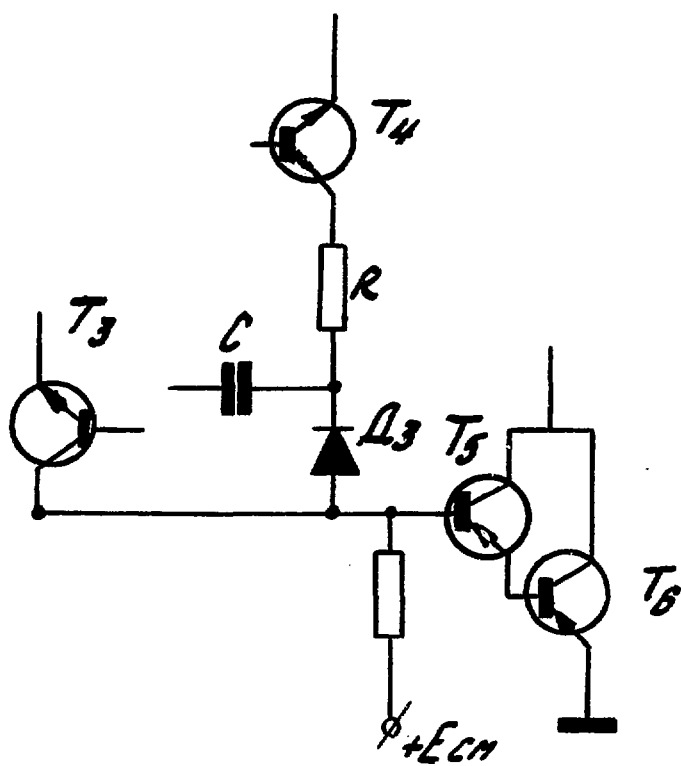


Рис. 4. Включение кремниевого разделительного диода в схему одновибратора.



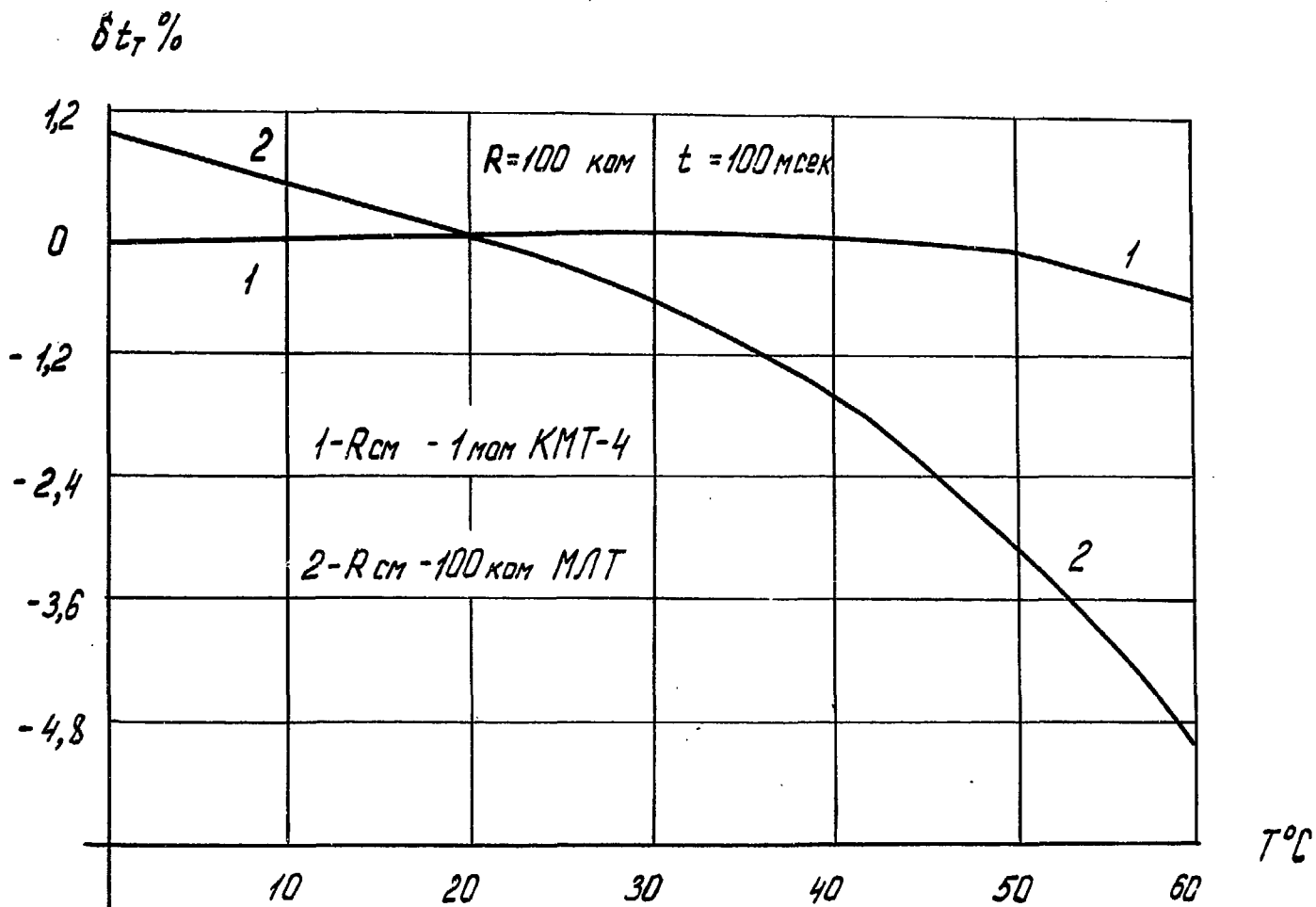


Рис. 5. Температурная погрешность  $\delta t_T$  в схеме (рис. 4) с термосопротивлением  $R_{CM}$ .