

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°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^{/5/}. 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^{/6/}

$$U = E_{пр} + R_{пр} \cdot J.$$

Выражение для длительности^{/6/} 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 δt_T при изменении температуры на 1°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 β_{02} , 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 $U_{\beta 02}$.

В одновибраторах без транзисторов T_3 и T_4 изменение тока базы транзистора T_2 на три порядка (при изменении сопротивления R) изменяет $ТКН_{\beta 02}$ в два раза (от 0,4 до 0,2 $1/^\circ C$), температурная погрешность δt_T достигает в этом случае 0,002 $1/^\circ C$, 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 δt_{T2} можно пренебречь. Когда сопротивление R возрастает до 100 ... 1000 ком и величины $\frac{E_k}{R}$ и $J_{\beta 2, \text{ср.аб.}}$ становятся сравнимы, из выражений (4)... (8) получим

$$\delta t_{T2} = - \frac{E_k \cdot \Theta}{R \left(\frac{E_k}{R} - J_{\beta 2, \text{ср.аб.}} \right)}$$

или

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

где Θ - температурный показатель изменения коэффициента усиления транзистора T_2 ($1/^\circ C$). 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 $0^\circ C$ до $+50^\circ C$. 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^{/6/}. Однако этим влияние обратных токов на δt_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 δt_T . С целью уменьшения

δt_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 β - 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 δt_T .

На рис. 5 показана зависимость от температуры отклонения δt_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 δt_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.

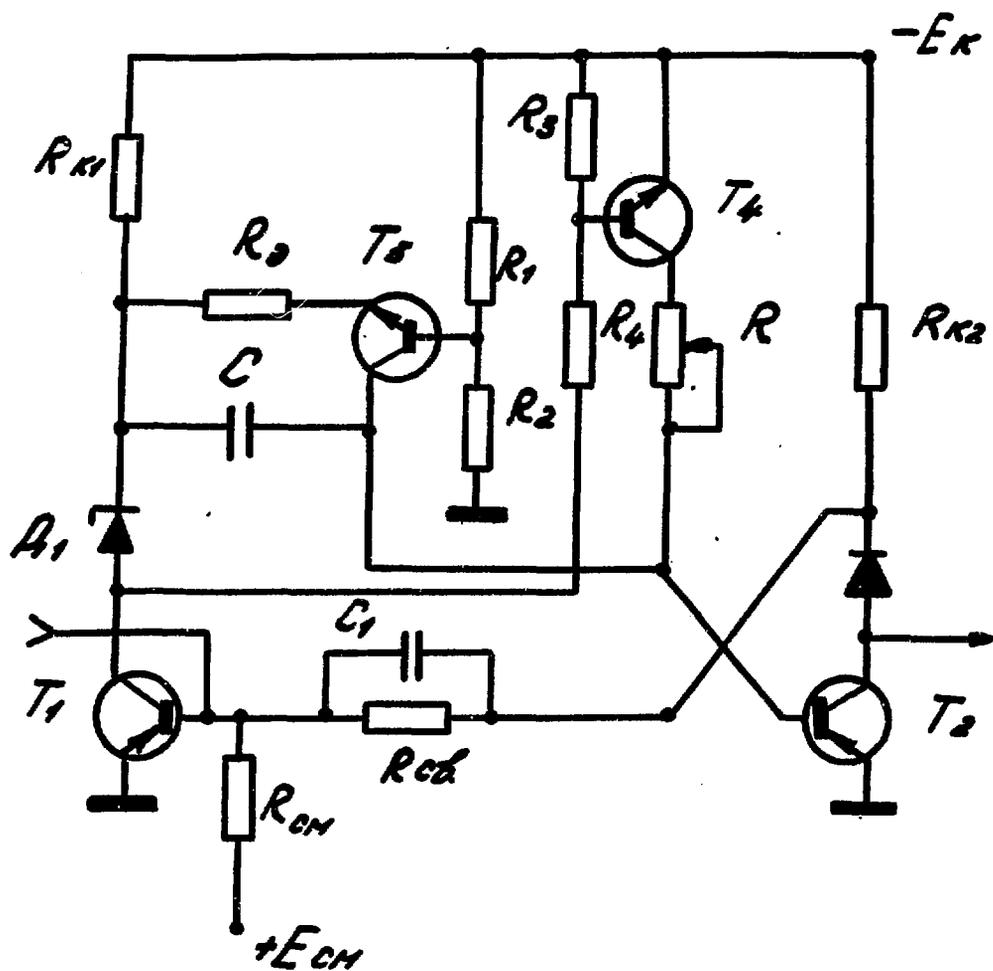


Рис. 1. Одновибратор с дополнительными транзисторами T_3 и T_4 .

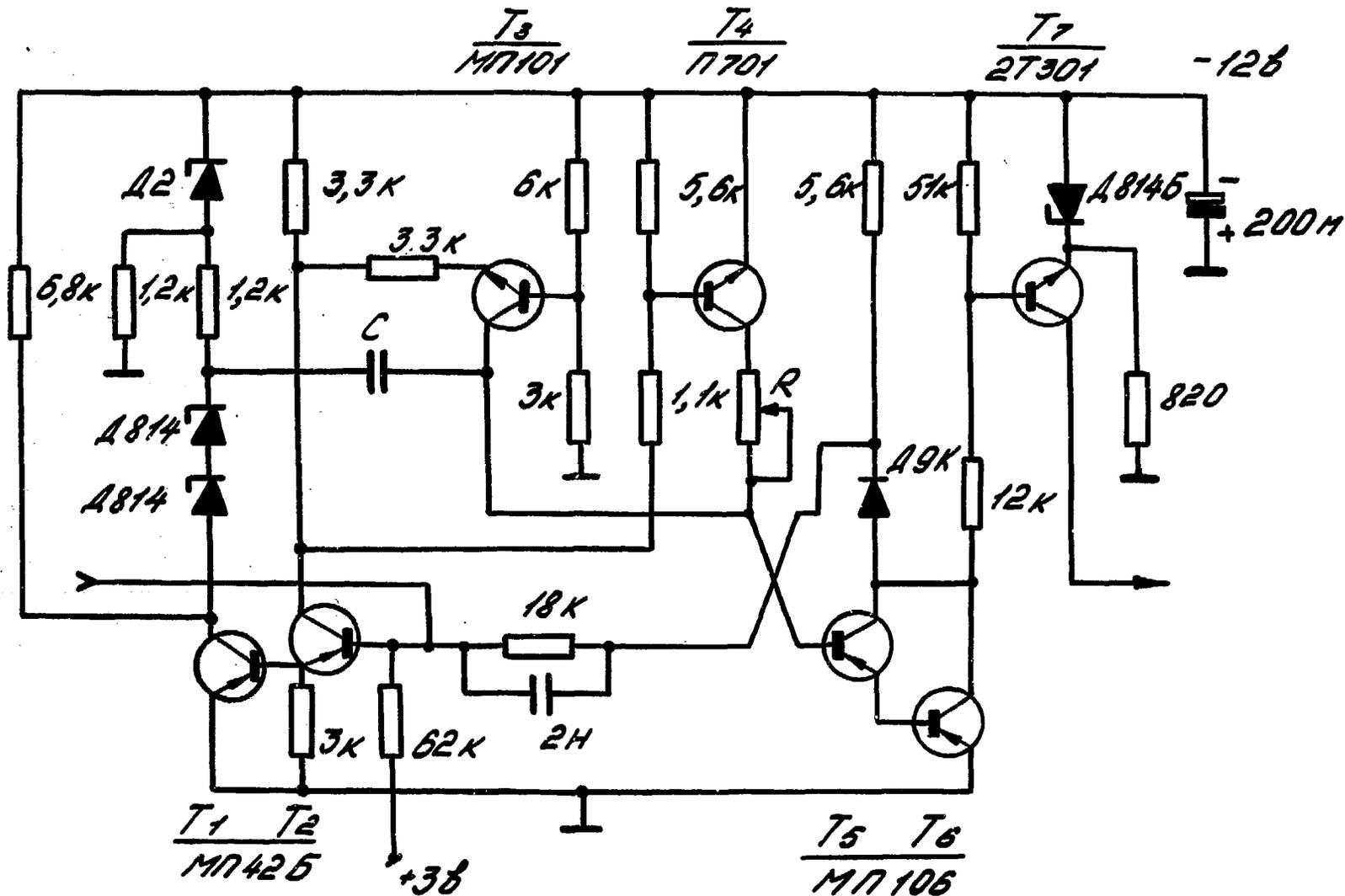
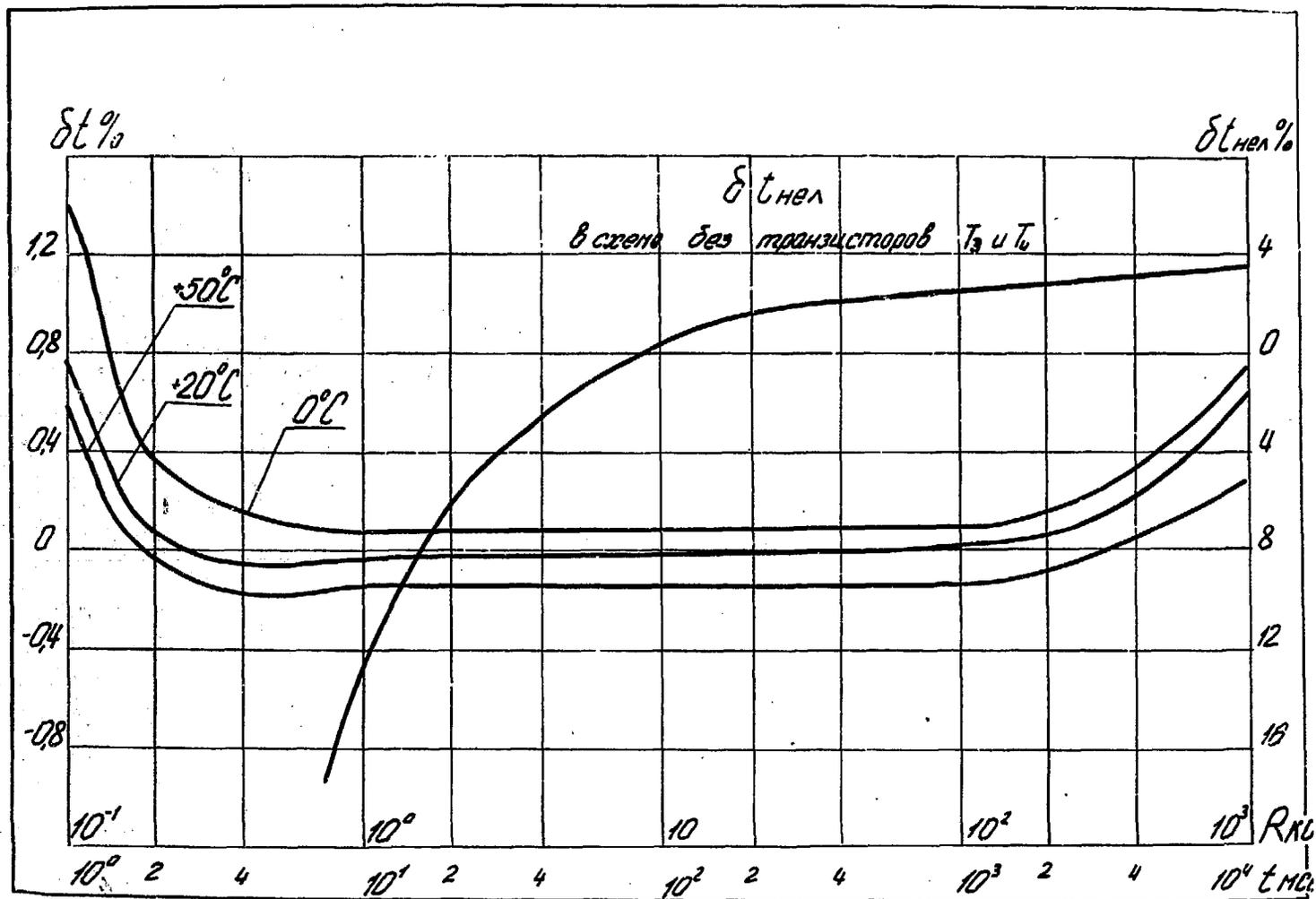


Рис. 2. Полная схема стабильного одновибратора с линейной регулировкой длительности в широком диапазоне времен.



14

Рис. 3. Зависимость относительного отклонения δt времени задержки от сопротивления R для одновибратора, изображенного на рис. 2.

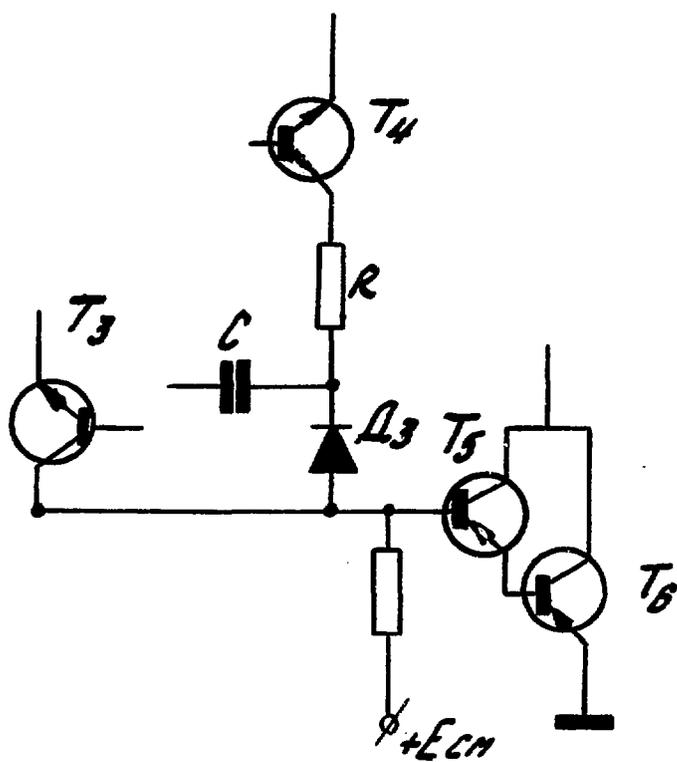


Рис. 4. Включение кремниевого разделительного диода в схему одновибратора.

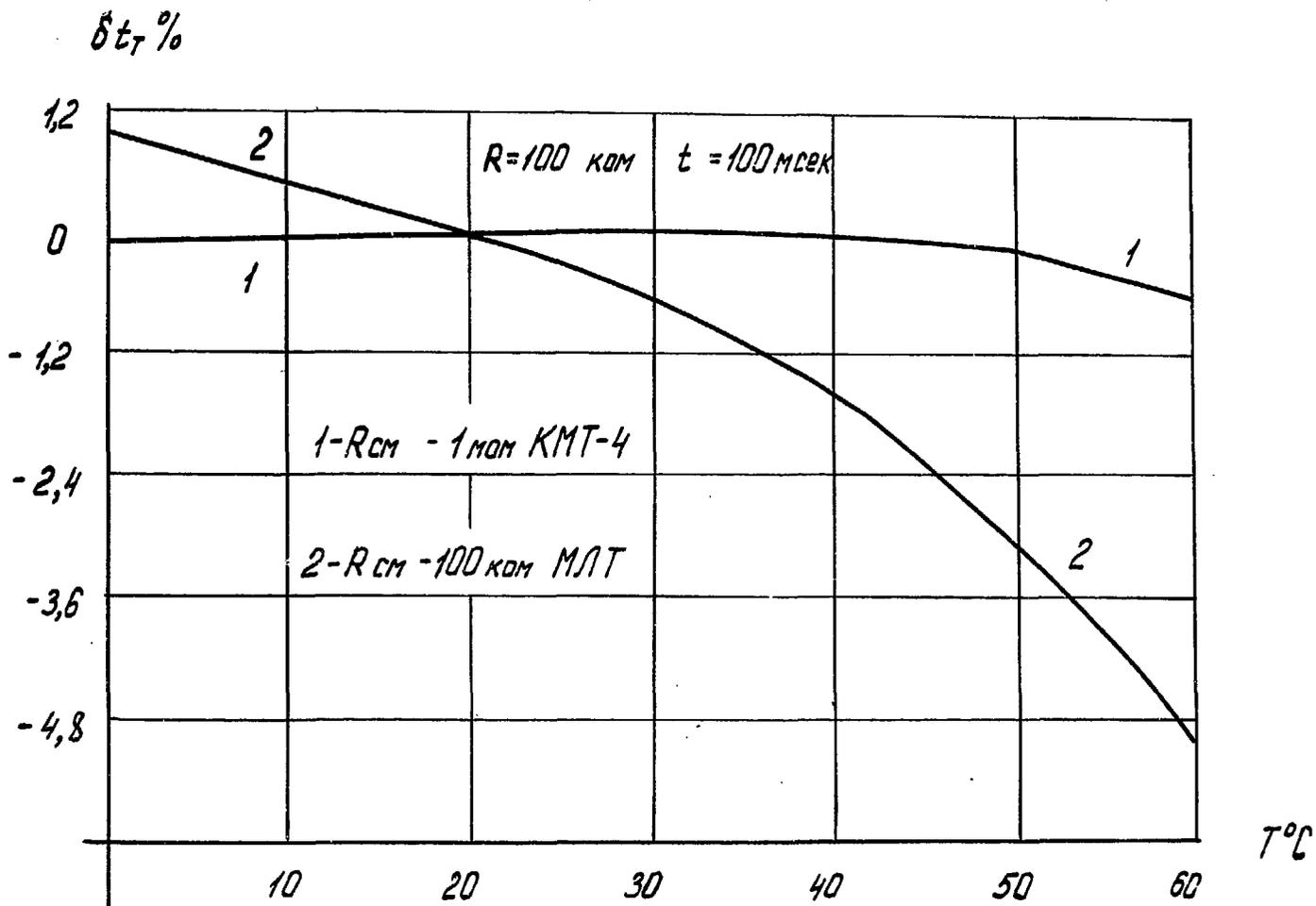


Рис. 5. Температурная погрешность δt_T в схеме (рис. 4) с термосопротивлением R_{CM} .