

**МОДУЛЯТОР МАЛЫХ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА
КРЕМНИЕВЫХ ТРИОДАХ**

М. С. РОЙТМАН, А. Г. ВАЙСБУРД

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Модуляторы малых постоянных напряжений на полупроводниковых триодах, несмотря на сравнительное обилие различных схемных исполнений, выполняются по двум путям: путем стабилизации режимов работы транзистора [1] или путем тщательного подбора триодов с целью взаимокомпенсации остаточных параметров U_p и I_p [2, 3 и др.].

В первом случае необходимо коммутацию осуществлять прямоугольным стабилизированным напряжением и жестко стабилизировать температуру триода [1], что весьма нежелательно.

Во втором — требуется проводить тщательную отбраковку триодов [2, 3], что в условиях серийного производства также нежелательно, а зачастую и недопустимо.

Очевидно, что наилучшим решением явилось бы построение модулятора с малым дрейфом нуля, большим входным сопротивлением, способного работать в широком диапазоне температур, но без необходимости стабилизации температуры триодов или их специальной отбраковки. Ниже приводится один из возможных вариантов такого построения модулятора, в частности, на базе общеизвестной схемы (рис. 1, а) [4].

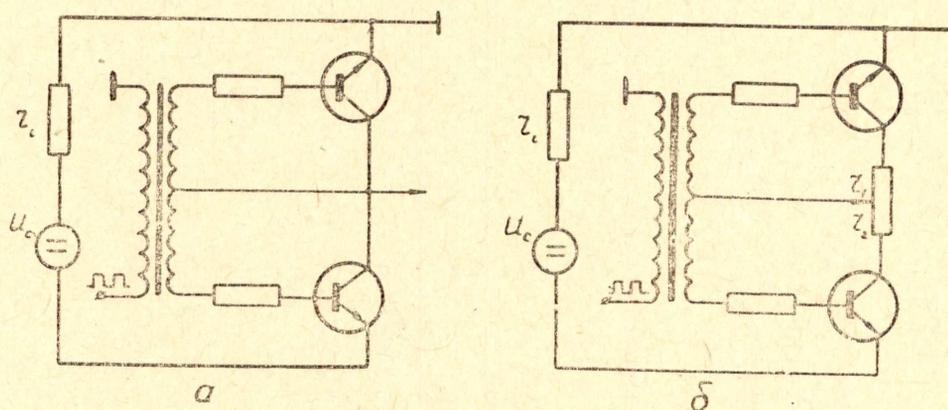


Рис. 1.

Напряжение на выходе такого модулятора при отсутствии входного сигнала равно

$$U_{\text{вых}}(t) \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_{p_1} - I_{p_2} r_i - U_{p_2}}{n} \left\{ \left[1 - 2 \left(\pi \frac{\Delta T}{T} \right)^2 \cdot \sin n \omega t + \right. \right. \\ \left. \left. + 2\pi \frac{\Delta T}{T} \cos n \omega t \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{T} \left[\int_0^{\tau_1} U_{b_1}(t) e^{-jn\omega t} dt + \right. \right. \\ \left. \left. \int_{\frac{T}{2} + \Delta T}^{\frac{T}{2} + \Delta T + \tau_2} U_{b_2}(t) e^{-jn\omega t} dt \right] \cdot e^{jn\omega t} \right\},$$

где U_{p_1} и U_{p_2} — остаточные напряжения первого и второго триодов;
 I_{p_2} — остаточный ток второго триода;
 r_i — внутреннее сопротивление источника;
 $U_{b_1}(t)$, $U_{b_2}(t)$ — напряжение выбросов, возникающих при запираии триодов;
 τ_1 , τ_2 — длительность выбросов;
 T — длительность периода;
 $\frac{\Delta T}{T}$ — относительное неравенство полупериодов.

Считая выбросы прямоугольными, $U_{b_1} = U_{b_2} = U_b$ и $\frac{\Delta T}{T} \ll 1$, можем определить напряжение первой гармоники частоты коммутации при отсутствии входного сигнала (часто это напряжение именуют „ложным сигналом“)

$$U_{\text{л.с.}} \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} (U_{p_1} - I_{p_2} r_i - U_{p_2}) \left[1 - 2 \left(\pi \frac{\Delta T}{T} \right)^2 \right] \sin \omega t + \\ + 2\pi^2 \left[\frac{\tau_1 - \tau_2}{T} \cdot \frac{\tau_1 + \tau_2}{T} - \frac{2\Delta T \tau_2}{T^2} \right] \cdot \sin \omega t \cdot U_b + 2\pi \frac{\tau_1 - \tau_2}{T} U_b \cos \omega t.$$

Остаточное напряжение U_p равно [5]

$$U_p = \frac{kT}{q} m \ln \frac{1 + \beta}{\beta} + I_b r_k,$$

где k — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура;

q — заряд электрона (для комнатной температуры $\frac{kT}{q} \approx 26$ мв);

β — усиление триода по току в схеме с общим эмиттером;

I_b — ток базы (он равен току коммутации);

r_k — сопротивление полупроводника коллектора;

m — постоянная, определяемая плотностью инжектированного тока в области базы.

Для сплавных германиевых транзисторов (П13÷П16) $m \approx 1$, $r_k < < 0,2$ ом и U_p для качественных триодов находится в пределах $0,3 \div 0,6$ мв. Для кремниевых триодов $m \approx 1,5 \div 2$, $r_k < 1,2$ ом и $U_p = = 0,6 \div 3$ мв.

Очевидно, что с точки зрения величины U_p предпочтение следует отдавать германиевым триодам. Однако у германиевых триодов $I_p \geq 2 \cdot 10^{-8}$ а (при 20°C) и дрейф нуля при сопротивлении источника большем нескольких десятков ом весьма существенно зависит от неустойчивости I_p (I_p меняется на $7 \div 8$ % на 1°C).

Влияние I_p можно исключить, осуществляя коммутацию униполярным напряжением. Но в этом случае входное сопротивление резко падает и модулятор на германиевых триодах становится непригодным для работы на повышенных температурах. Поэтому при необходимости работать в широком диапазоне температур и внутреннем сопротивлении источника больше 50 ом предпочтение следует отдавать кремниевым триодам или применять более сложные схемы модуляторов [3].

Проведенные нами исследования показали, что из отечественных кремниевых триодов наилучшими характеристиками обладают МП103А. В табл. 1 приведены данные величины α , U_p и I_p для шести штук МП103А.

Таблица 1

№ триодов	1	2	3	4	5	6	
α	0,978	0,994	0,972	0,983	0,981	0,988	$t = 20^\circ\text{C}$
$U_{p\text{мв}}$	1,4	0,8	1,3	1,2	1,2	1,1	$I_0 = 500 \text{ мка}$ $U_0 = 450 \text{ мв}$
$I_p \cdot 10^9 \text{ а}$	2	0,5	1,5	4	1	0,25	$t = 60^\circ\text{C}$ $U_0 = 450 \text{ мв}$

Зависимости U_p и I_p от коммутирующего тока (I_0) и напряжения (U_0) даны на рис. 2, а, б.

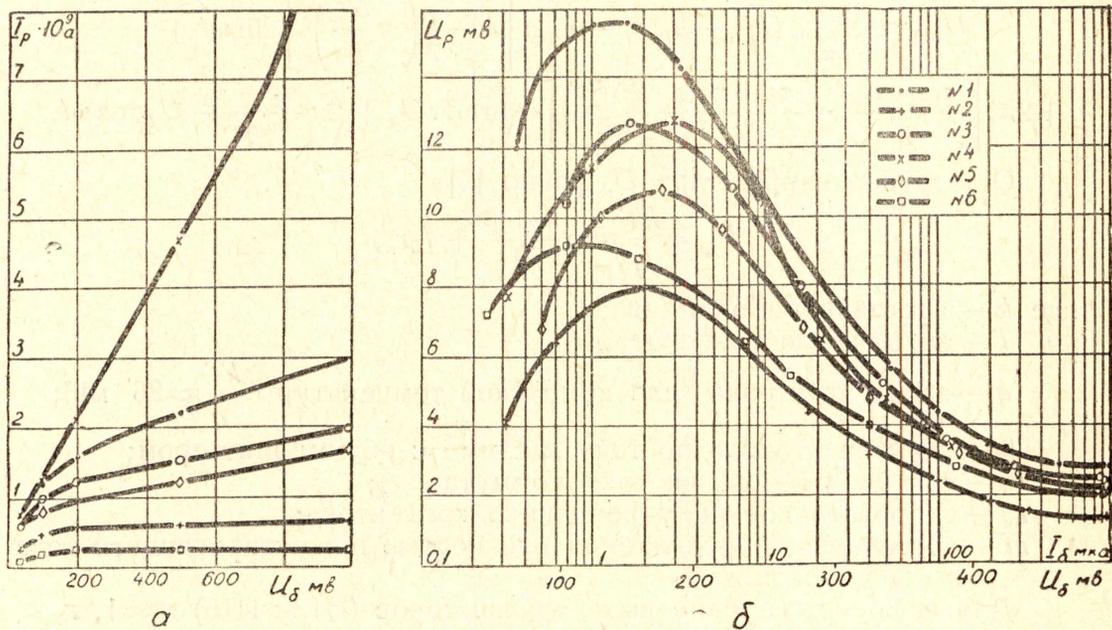


Рис. 2.

Поскольку для $t = 60^\circ\text{C}$ $I_p \leq 5 \cdot 10^{-9}$ а, то при $r_i \leq 5$ ком на низких частотах $U_{л.с.} \approx (U_{p_1} - U_{p_2}) \frac{\sqrt{2}}{\pi}$. Если последовательно с коллекторами включить сопротивления (рис. 1, б), то

$$U_{л.с.} \approx (U_{p_1} + I_k r_1 - U_{p_2} - I_k r_2).$$

Очевидно, что если $|U_{p1} - U_{p2}| < I_k(r_1 + r_2)$, то меняя соотношение между r_1 и r_2 , т. е. регулируя потенциометр R , можно свести $U_{л.с.}$ к весьма малой величине.

Однако I_k является функцией коммутирующего напряжения U_k , а $U_p = f(U_k, T)$.

Для оценки реальной величины дрейфа нуля U_d , т. е. изменения $U_{л.с.}$, необходимо определить влияние различных факторов, прежде всего, изменения температуры и коммутирующего напряжения. Зависимости $U_{л.с.} = f(t^\circ\text{C})$ для различных триодов, использованных в практической схеме модулятора (рис. 3) даны в табл. 2.

Таблица 2
 $U_d^{\text{мкВ}} = f(t^\circ\text{C})$

	22	35	40	50	60
4и1	0	—	—	—	10
4и3	0	15	15	18	18
4и5	0	0	0	2,5	7,5
4и6	0	0	0	—	6
4и2	0	—5	—7,5	—10	—11
1и2	0	—	30	—	66

Экспериментальные данные подтверждают очевидное предположение, что наибольшим дрейфом обладают пары триодов с максимальным отличием остаточных напряжений U_p (табл. 1). У триодов 1 и 2 весьма существенное различие в коэффициентах усиления по току. Отношение $\frac{\beta_2}{\beta_1} > 3,7$ намного превышает допустимое ГОСТом значение для триодов одной группы. Экспериментальная проверка показала, что, если брать триоды МП103А с $\beta_{\text{мин}} \geq 40$ и отношением $\frac{\beta_{\text{макс}}}{\beta_{\text{мин}}} \leq 2$, то при

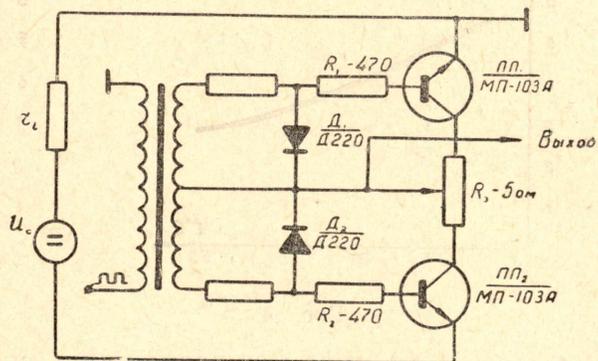


Рис. 3.

любых комбинациях триодов и условия коммутации номинальным током дрейф нуля от нагрева до 60°C меньше 30 мкВ (практически находится в пределах ± 20 мкВ).

За номинальное значение коммутирующего тока I_b нами принято 0,5 ма.

Меньшая величина I_b , как следует из зависимости $U_p = f(I_b)$ (рис. 2, а), нежелательна. Увеличение I_b не приводит к существенному уменьшению U_p , но в то же время вызывает возрастание длительности и амплитуды выбросов при выходе триодов из насыщения¹⁾.

¹ Оптимальное значение I_b определяется не только указанными факторами, но и температурными зависимостями $U_p = f(t^\circ\text{C})$ для заданного тока I_b .

При малых токах коммутации температурный коэффициент U_p отрицателен, при больших ($I_b > 2$) — положителен и, очевидно, в некотором промежутке значений I_b он минимален.

Изменения коммутирующего напряжения U_k на $\pm 5\%$ приводят к дрейфу нуля не более ± 15 мкв.

Диоды Д220 применены для уменьшения влияния изменений U_k , а также для улучшения формы кривой напряжения при наличии искажений трансформатора.

Предпочтение отдано диодам Д220, поскольку у них малое динамическое и значительное статическое сопротивления (при токе $2 \div 5$ ма $r_d \approx 10$ ом, $r_{ст} \approx 150$ ом) и прямое напряжение, близкое к оптимальной величине ($U_{гр} = 0,7 \div 0,8$ в).

Нестабильность коэффициента преобразования входного напряжения практически определяется лишь нестабильностью скважности коммутирующего напряжения.

Если к выходу модулятора подключен усилитель с малым фазовым сдвигом в полосе частот и усиленное напряжение выпрямляется синхронным детектором, коммутирующее напряжение на который подается от того же источника, что и на модулятор, то девиация скважности не меняет коэффициента преобразования входного сигнала.

Входное сопротивление модулятора $R_{вх} \geq 5$ мом и зависит как от режима работы триодов, так и от температуры окружающей среды. Усредненная зависимость $R_{вх} = f(t^\circ C)$ дана на рис. 4.

С увеличением частоты выходное сопротивление падает (рис. 5). Это обусловлено тем, что при крутых фронтах коммутирующего напряжения ($t_{ф+} < t_n$

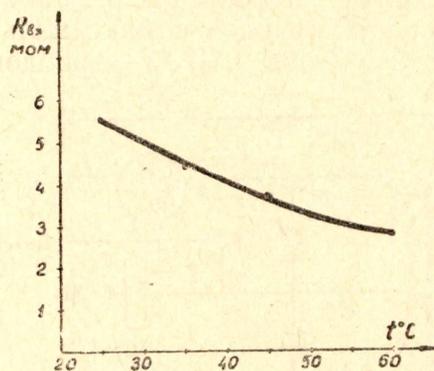


Рис. 4.

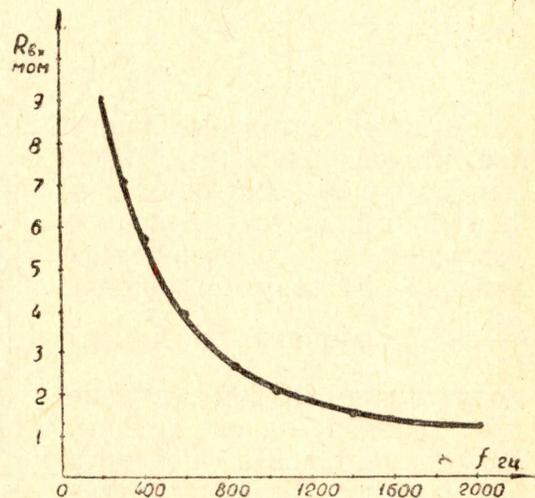


Рис. 5.

и $t_{ф-} < t_p + t_c$) имеем существенную сквозную проводимость модулятора в течение промежутка времени τ , примерно равного

$$t_p + t_c - t_n.$$

где t_n — время нарастания коллекторного тока;

t_p , t_c — соответственно время рассасывания неосновных носителей в базе и время спада.

Очевидно, что с увеличением частоты увеличивается отношение $\frac{\tau}{T}$, где T — длительность периода.

При коммутации триодов синусоидальным напряжением входное сопротивление на частотах $f \geq 400$ гц выше, однако, существенно увеличивается дрейф нуля ($\pm 50 \div 60$ мкв) и содержание гармоник на выходе модулятора вследствие возможной неидентичности триодов.

Нами не было проведено детального исследования $U_p(t^\circ C)$ в функции от I_b для триодов МП103А, хотя выполнение такой работы весьма желательно.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. C. Hutcheon, D. Hemmers. A low-drift transistor chopper-type D. C. amplifier with high gain and large dynamic range. IEE.
 2. Н. С. Николаенко, В. П. Федотов. Проектирование преобразователей малых сигналов постоянного тока на полупроводниковых триодах. Известия ВУЗов, Приборостроение. № 2. 1962.
 3. М. С. Ройтман, А. Н. Кармадонов, Ю. С. Рябинкин, С. А. Гофман. Преобразователи малых э.д.с. постоянного тока на полупроводниковых приборах. Труды II конференции по автоконтролю и электрометрии, Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1962.
 4. R. L. Bright, A. P. Kruger. Electronics, 28, № 4, p. 135—137, 1955.
 5. Дж. Каррол. Электронные схемы на полупроводниковых триодах. стр. 71—79, издательство иностранной литературы, 1959.
-