

М. М. ЛАДЫЖЕНСКИЙ

(Ленинград)

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАНЗИСТОРНЫХ КЛЮЧЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРИНЦИПАМИ УПРАВЛЕНИЯ

В статье приводятся результаты исследования транзисторных ключей, управляемых от источников напряжения $U_y = \text{const}$ и тока $I_y = \text{const}$. Даются рекомендации по выбору значения управляющего тока и типа транзистора для построения надежных в работе ключей.

В системах автоматики, телемеханики и информационно-вычислительной техники для переключения каналов передачи информации и преобразования малых постоянных напряжений в переменные стали широко применяться транзисторные ключи, обладающие рядом существенных преимуществ в сравнении с электромагнитными и электромеханическими переключателями: широким диапазоном частоты коммутации, высокой надежностью работы в условиях вибраций и тряски, простотой конструкции, большим сроком службы. Следует различать некомпенсированные и компенсированные транзисторные ключи [6]. Первые отличаются от вторых тем, что при их построении не предусматриваются какие-либо меры по нейтрализации влияния остаточных параметров транзистора. Предлагается следующая классификация некомпенсированных транзисторных ключей, описанных в [1—6]:

- 1) по способу соединения с нагрузкой: а) серийные, б) шунтовые;
- 2) по способу управления: а) с однополярным управлением, б) с двухполярным управлением;
- 3) по принципу управления: а) управляемые от источника напряжения ($U_y = \text{const}$), б) управляемые от источника тока ($I_y = \text{const}$);
- 4) по виду примененных транзисторов: а) на германиевых низкочастотных транзисторах, б) на германиевых высокочастотных транзисторах, в) на кремниевых транзисторах.

Представляется целесообразным сравнить двухполярное управление при $U_y = \text{const}$ (рис. 1, а) и $I_y = \text{const}$ (рис. 1, б) у некомпенсированных серийных ключей на транзисторах различных типов, так как этот вопрос недостаточно полно освещен в современной технической литературе.

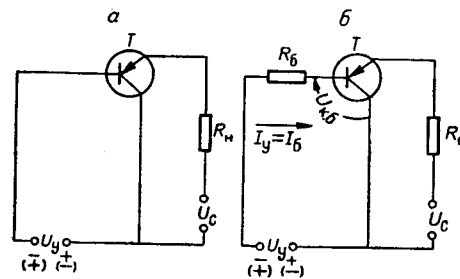


Рис. 1. Простейшие некомпенсированные ключи:

а — с управлением от источника напряжения $U_y = \text{const}$; б — с управлением от источника тока $I_y = \text{const}$.

Между тем в большинстве практических случаев именно на базе этих ключей выполняются более сложные по схемному решению компенсированные ключи [1—6], применяемые для построения модуляторов и коммутаторов малых напряжений.

На рис. 2 приведены графики типичных зависимостей остаточного напряжения U_{pi} от управляющего напряжения U_y и управляющего тока I_y для низкочастотных германиевых транзисторов типа П-15А,

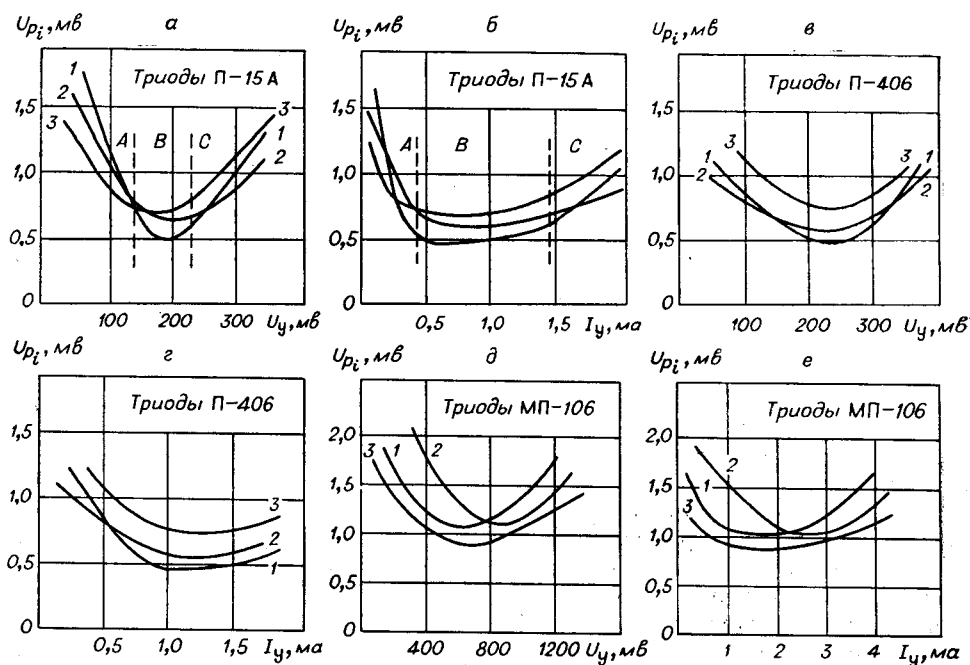


Рис. 2. Характеристики $U_{pi} = f(U_y)$ и $U_{pi} = F(I_y)$ для транзисторов различных типов.

высокочастотных германиевых транзисторов типа П-406 и кремниевых транзисторов типа МП-106 при инверсном включении. Остаточное напряжение транзистора при инверсном включении равно

$$U_{pi} = \varphi m \ln \alpha_N + I_b r_k, \quad (1)$$

где φ — постоянная, зависящая от температуры коллекторного перехода (при $+20^\circ\text{C}$ $\varphi = 26$ мВ);
 m — постоянная, определяемая плотностью инжектированного тока в области базы;
 α_N — коэффициент усиления транзистора по постоянному току в схеме с общей базой при прямом включении;
 $I_b = I_y$ — управляющий ток базы;
 r_k — омическое сопротивление полупроводникового материала коллектора.

Экспериментально установлено, что для германиевых триодов типа П-15А, П-406: $m = 1$, $r_k = 0,15 - 0,25$ ом, для кремниевых триодов типа МП-106: $m = 1,5 - 2$, $r_k = 0,20 - 0,35$ ом.

Кривые $U_{pi} = f(U_y)$ и $U_{pi} = F(I_y)$ могут быть разбиты на 3 основные области (см. рис. 2, а, б). В области А наблюдается резкий спад U_{pi}

при увеличении U_y и I_y , обусловленный преобладающим влиянием первой составляющей в (1) и монотонным возрастанием α_N при увеличении тока базы. В области C при больших значениях I_6 основное влияние на величину U_{pi} оказывает вторая составляющая (1). Так как с увеличением базового тока первая составляющая убывает, а вторая — возрастает, то существует некоторый оптимальный диапазон U_y и I_y — область B , где остаточное напряжение минимально и зависимость U_{pi} от U_y и I_y не так резко выражена, как в A и C . Поскольку при использовании транзисторного ключа в режиме коммутации малых напряжений эта область является рабочей, то зависимость U_{pi} от U_y и I_y для данной области исследована более подробно. Результаты многочисленных измерений, обработанные методами математической статистики [7], для транзисторных ключей различных типов, наиболее часто применяемых для коммутации малых напряжений, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения остаточных напряжений U_{pi} исследуемых транзисторов в области B при различных принципах управления и температуре $+20^\circ\text{C}$

Тип транзистора	Количество исследованных транзисторов, шт	Принцип управления	Диапазон изменения в области B		U_{pi}	
			U_y , мв	I_y , ма	\bar{X} , мкв	σ , мкв
П-15А	200	$U_y = \text{const}$ $I_y = \text{const}$	0,15—0,22	0,3—1,5	703,2 630	170,5 112,8
П-29А	100	$U_y = \text{const}$ $I_y = \text{const}$	0,15—0,30	0,2—2,0	627 572	163 117
П-30	180	$U_y = \text{const}$ $I_y = \text{const}$	0,20—0,30	0,3—1,8	390,8 340,5	128 70
П-406	200	$U_y = \text{const}$ $I_y = \text{const}$	0,15—0,30	0,6—1,8	902 857,8	275 228,8
МП-102	180	$U_y = \text{const}$ $I_y = \text{const}$	0,5—0,7	2,0—6,0	2860 2810	870 850
МП-106	180	$U_y = \text{const}$ $I_y = \text{const}$	0,5—0,7	1,0—3,0	1450 1390	600 560

Примечание. Здесь \bar{X} — среднее значение исследуемой случайной величины (математическое ожидание); σ — среднеквадратическое отклонение значений случайной величины от \bar{X} .

При управлении по принципу $I_y = \text{const}$ значения \bar{X} и σ меньше, чем при управлении по принципу $U_y = \text{const}$. Германиевые транзисторы имеют не только значительно меньшие средние значения U_{pi} , чем кремниевые транзисторы, но в отличие от последних характеризуются и гораздо меньшими значениями разброса этих параметров от образца к образцу. Так, например, для исследованных германиевых транзисторов в области B при управлении по принципу $I_y = \text{const}$ среднеквадратическое отклонение значений случайной величины U_{pi} от математического ожидания \bar{X} этой величины не превышает 26,6% от \bar{X} для высокочастотных транзисторов и 21% от \bar{X} для низкочастотных.

Для исследования кремниевых транзисторов в области B среднеквадратическое отклонение значений того же параметра U_{pi} от \bar{X} достигает 40%.

При выборе типа ключа для коммутации малых напряжений важными критериями являются стабильность остаточного напряжения при изменениях температуры окружающей среды и флюктуациях управляющего напряжения (тока). Из рис. 2 видно, что область B для кривых $U_{pi} = F(I_y)$ относительно больше, чем для кривых $U_{pi} = f(U_y)$, и в области C наклон первого семейства кривых к оси абсцисс значительно меньше, чем у кривых второго семейства. Отсюда следует, что одинаковые относительные изменения U_y (при $U_y = \text{const}$) и I_y (при $I_y = \text{const}$) будут приводить в первом случае к более резким изменениям остаточного напряжения U_{pi} . Это наглядно подтверждается гистограммами относительного изменения остаточного напряжения для 100 транзисторов типа П-15А, полученными при изменении U_y (рис. 3, а) и I_y (рис. 3, б) в пределах $\pm 10\%$ от оптимального значения, при котором U_{pi} достигает минимума.

На рис. 3 в приведены кривые $U_{pi} = f_1(t^0) |_{U_y = \text{const}}$ и $U_{pi} = f_2 \times \times (t^0) |_{I_y = \text{const}}$ для транзисторов типа П-15А. Если при управлении по принципу $U_y = \text{const}$ повышение температуры при любом значении U_y всегда сопровождается значительным увеличением остаточного напря-

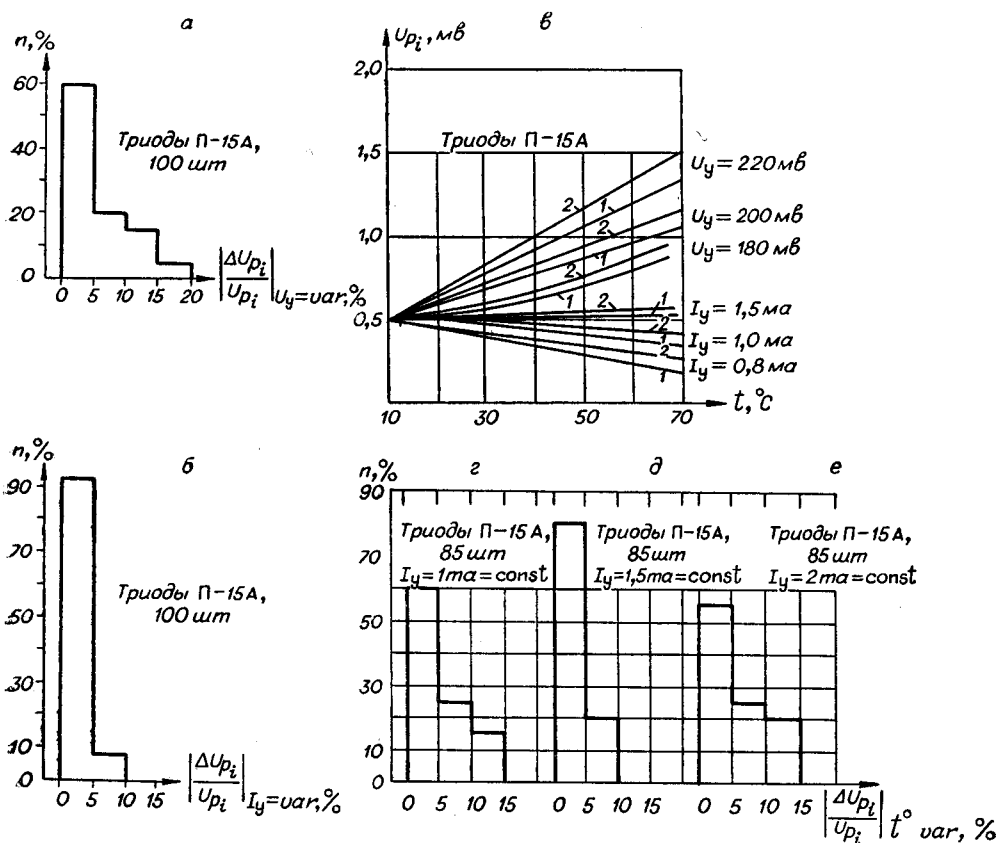


Рис. 3. Зависимость остаточного напряжения транзисторов типа П-15А от изменений U_y , I_y и температуры окружающей среды.

Результаты исследования стабильности остаточного напряжения U_{pi} при изменении величины I_y и температуры окружающей среды

Тип транзистора	Количество исследованных транзисторов, шт	Оптимальное значение I_y			Рекомендуемое значение I_y		
		$I_y, \text{ ма}$	процент транзисторов, для которых $\frac{\Delta U_{pi}}{U_{pi}} = f_1(t^\circ)$ в диапазоне $+(20 \div 70)^\circ\text{C}$ меньше 10%	процент транзисторов, для которых $\frac{\Delta U_{pi}}{U_{pi}} = F_1(I_y)$ при $t = +20^\circ\text{C}$ меньше 5% при изменении I_y на $\pm 10\%$	$I_y, \text{ ма}$	процент транзисторов, для которых $\frac{\Delta U_{pi}}{U_{pi}} = f_2(t^\circ)$ в диапазоне $+(20 \div 70)^\circ\text{C}$ меньше 10%	процент транзисторов, для которых $\frac{\Delta U_{pi}}{U_{pi}} = F_2(I_y)$ при $t = +20^\circ\text{C}$ меньше 5% при изменении I_y на $\pm 10\%$
П-15А	200	1,5	100	50	1,0	85	100
П-29А	100	2,0	95	40	1,5	82	96
П-30	180	1,7	98	45	1,2	86	96
П-406	200	1,5	90	50	1,0	80	94
МП-102	180	5,0	80	60	4,0	68	97
МП-106	180	2,5	85	55	2,0	75	95

жения, то при управлении по принципу $I_y = \text{const}$ относительные изменения U_{pi} в функции температуры значительно меньше, и можно подобрать для каждого типа транзисторов такие значения управляющего тока I_y , при которых изменения U_{pi} в широком диапазоне температур будут минимальны.

На рис. 3, г, д, е приведены гистограммы относительного изменения остаточного напряжения, снятые для 85 транзисторов типа П-15А в диапазоне температур $+(20 \div 70)^\circ\text{C}$ при различных значениях управляющих токов I_y . Для транзисторов типа П-15А управляющий ток $I_y = 1,5 \text{ ма}$ является оптимальным с точки зрения максимальной стабильности остаточного напряжения в рассматриваемом диапазоне температур.

Аналогичные качественные зависимости изменения остаточного напряжения от температуры при управлении от источников напряжения $U_y = \text{const}$ и тока $I_y = \text{const}$ наблюдаются и для других типов германиевых, а также кремниевых транзисторов, хотя для последних в диапазоне температур $+(20 \div 70)^\circ\text{C}$ разница в изменении U_{pi} при различных принципах управления проявляется не так резко.

При выборе тока управления для транзисторного ключа следует, однако, учитывать не только зависимость $U_{pi} = f_2(t^\circ) |_{I_y = \text{const}}$, но и стабильность U_{pi} при колебаниях величины управляющего тока I_y , обусловленных внешними воздействиями и изменением параметров схемы во времени. Для обеспечения минимальных изменений U_{pi} при колебаниях I_y нужно стремиться выбирать значения I_y возможно ближе к середине области В. В табл. 2 приводятся некоторые рекомендации по выбору значений I_y для транзисторных ключей в зависимости от типа транзистора.

Так как сопротивление базы r_6 у германиевых транзисторов не превышает 150 ом, а у кремниевых — 600 ом и в диапазоне температур $+(20 \div 70)^\circ\text{C}$ r_6 уменьшается при $I_y = \text{const}$ у германиевых транзисторов на 40—50%, а у кремниевых транзисторов — на 10—20%, то в

общем случае для обеспечения постоянства управляющего тока с точностью порядка 5% следует включать в цепь базы транзистора последовательно с источником модулирующего напряжения сопротивление 1,5 ком для германиевых и 2 ком для кремниевых транзисторов.

Для объяснения результатов экспериментальных исследований рассмотрим вольтамперную характеристику диода коллектор-база транзистора. Известно [6], что эта характеристика для идеализированного диода описывается уравнением

$$I_6 = I_{к.о} \left(e^{\frac{U_{к.б}}{\varphi}} - 1 \right), \quad (2)$$

где $I_{к.о}$ — обратный ток насыщения коллекторного перехода при токе эмиттера $I_3 = 0$.

Однако зависимость $I_6 = f(U_{к.б})$ для реального транзистора отличается от описываемой уравнением (2), так как при выводе данного уравнения не учитывались объемные сопротивления базы и коллектора r_b и r_k , а также модуляция проводимости базовой области подвижными носителями, которая начинает проявляться при токе I_6 порядка 1 ма.

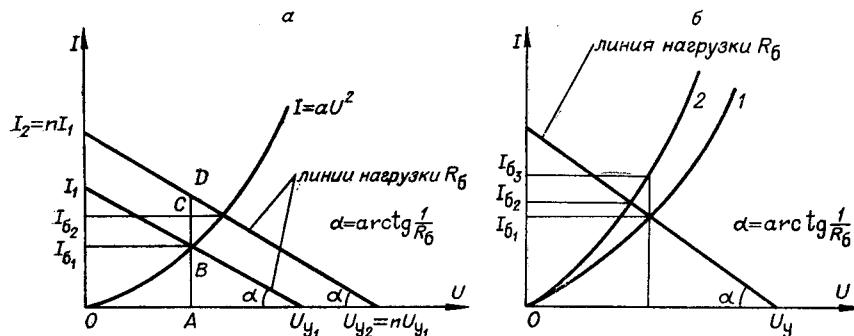


Рис. 4. Зависимость U_{p1} от изменений модулирующего напряжения и температуры окружающей среды при различных принципах управления.

Экспериментально установлено, что с учетом этих факторов зависимость $I_6 = f(U_{к.б})$ для открытого транзистора с достаточной для инженерной практики точностью может быть аппроксимирована функцией

$$I_6 = aU_{к.б}^2, \quad (3)$$

где a — коэффициент, зависящий от типа транзистора (например, для транзисторов типа П-15А $a = (1,5 \cdot 10^{-4} - 2) \cdot 10^{-5}$ 1/мв · ом).

Из совместного рассмотрения (1) и (3) очевидно, что при управлении от источника напряжения изменения U_y в n раз приводит к изменению второй составляющей остаточного напряжения в n^2 раз. При управлении от источника тока $I_y = \text{const}$, как видно из совместного рассмотрения вольтамперной характеристики диода коллектор-база и нагрузочных характеристик R_6 (рис. 4, а), увеличение модулирующего напряжения от U_{y1} до nU_{y1} приводит к увеличению тока базы от I_{61} до I_{62} . Причем $\frac{I_{62}}{I_{61}} < \frac{AD}{AB} = \frac{nI_1}{I_1} = n$, т. е. в данном случае ток базы, а

следовательно, и вторая составляющая U_{p1} увеличиваются менее чем в n раз. Для пояснения температурной зависимости остаточного напряжения транзисторного ключа при различных принципах управления

рассмотрим (см. рис. 4, б) нагрузочную характеристику R_6 и вольт-амперные характеристики диода коллектор-база при t_1° (кривая 1) и t_2° (кривая 2). При этом $t_2^\circ > t_1^\circ > 0$.

При изменении температуры окружающей среды от t_1° до t_2° ток базы транзистора в случае управления от источника напряжения $U_y = \text{const}$ возрастает от I_{6_1} до I_{6_2} , а в случае управления от источника тока $I_y = \text{const}$ — от I_{6_1} до I_{6_2} .

Из рис. 4, б видно, что $I_{6_2} - I_{6_1} \ll I_{6_3} - I_{6_1}$. Этим и объясняется более высокая температурная стабильность транзисторного ключа, управляемого от источника тока, по сравнению с ключом, управляемым от источника напряжения.

Определенный практический интерес представляют результаты исследования стабильности во времени параметра U_{pi} транзисторов различных типов при управлении по принципу $I_y = \text{const}$ (табл. 3). Ста-

Таблица 3
Результаты исследования стабильности во времени параметра U_{pi}
у транзисторов различных типов в течение 5 суток при температуре
 $+20^\circ \text{C}$

Тип транзистора	Количество исследованных транзисторов, шт	Управляющий ток I_y , ма	Время достижения установившегося значения U_{pi} , час	Процент транзисторов с различными значениями $\frac{\Delta U_{pi} \text{уст}}{U_{pi} \text{уст}}$			
				менее 0,05	от 0,05 до 0,10	от 0,10 до 0,15	свыше 0,15
П-15А	24	1,0	0,3—0,6	92	8	—	—
П-29А	24	1,5	0,3—0,7	96	4	—	—
П-30	24	1,2	0,3—0,75	100	—	—	—
П-406	24	1,0	0,5—1,0	12	12	16	60
МП-102	24	4,0	4—6	20	28	24	28
МП-106	24	2,0	1—3	44	28	16	12

бильность остаточного напряжения контролировалась 12-канальным самописцем ЭПП-09МЗ класса 0,5 в течение 5 суток. Управляющий ток I_y поддерживался постоянным с точностью порядка $\pm 1\%$. Значение I_y выбиралось для транзисторов каждого типа в соответствии с данными табл. 2. Параметр U_{pi} достигает установившегося значения не сразу после включения транзистора, а через некоторый промежуток времени, составляющий от 0,3—1 (для германиевых транзисторов) до 1—6 (для кремниевых транзисторов) часов. Это необходимо учитывать как при настройке, так и при эксплуатации ключевых транзисторных схем. В процессе дальнейших исследований у большинства германиевых высокочастотных и кремниевых транзисторов наблюдались значительные флюктуации U_{pi} по отношению к установившемуся значению этого параметра (табл. 3). С точки зрения стабильности остаточного напряжения во времени наилучшими оказались германиевые низкочастотные транзисторы.

ВЫВОДЫ

Для транзисторных ключей управление от источника тока предпочтительнее управления от источника напряжения, так как в первом случае обеспечивается более высокая стабильность остаточного напряже-

ния U_{pi} при изменениях температуры окружающей среды и модулирующего напряжения U_y , меньше среднее значение U_{pi} и среднеквадратическое отклонение.

Из числа исследованных отечественных транзисторов наиболее перспективными для переключения малых напряжений в температурном диапазоне $+(20\text{--}70)^\circ\text{C}$ являются низкочастотные германиевые транзисторы типа П-15А, П-29А, П-30, обладающие сравнительно высокой стабильностью остаточного напряжения в рабочем диапазоне температур и во времени.

Кремниевые транзисторы типа МП-106, МП-102 ввиду свойственного им большого разброса и нестабильности остаточного напряжения могут быть рекомендованы для переключения малых напряжений только в схемах с верхней границей температурного диапазона $+(75\text{--}130)^\circ\text{C}$, где германиевые транзисторы неприменимы.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев, В. И. Гольдгефтер, Л. Н. Мизюк. Преобразователи постоянного тока на полупроводниковых триодах для измерительных усилителей.— Приборы и техника эксперимента, 1959, № 2.
2. Н. С. Николаенко, В. П. Федотов. Полупроводниковый триод в режиме преобразования малого постоянного тока в переменный.— ИВУЗ, Приборостроение, 1962, т. V, № 1.
3. В. Г. Зубов. Полупроводниковый преобразователь на одном триоде с температурной стабилизацией.— Автоматический контроль и измерительная техника, 1963, № 8.
4. I. A. Ekiss, I. W. Halligan. The application, characterisation and performance of the SPAT as transistor chopper.— Instrument Practice, 1963, v. 17, № 4, p. 387—399.
5. М. С. Ройтман, А. Н. Кармадонов. Преобразователи малых напряжений на плоскостных полупроводниковых триодах.— Преобразующие устройства на транзисторах. Передовой научно-технический и производственный опыт, № 28—63—263/6. М., ГОСИНТИ, 1963.
6. В. И. Анисимов, А. П. Голубев. Транзисторные модуляторы. М., Изд-во «Энергия», 1964.
7. А. В. Шереметьев, Р. Г. Житкевич. Обработка результатов измерений методами математической статистики. М., Связьиздат, 1961.

*Поступила в редакцию
26 сентября 1964 г.,
после переработки —
3 апреля 1965 г.*