

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.82

А. П. ГОЛУБЕВ, Е. П. ДРОБЫШЕВ, А. Г. КУДРЯШОВ

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРЕРЫВАТЕЛЬ ИП-1

Описываются особенности технологии изготовления интегральных прерывателей ИП-1, предназначенных для коммутации с высокой точностью слабых сигналов постоянного и переменного тока, и рассматриваются их основные электрические характеристики и параметры.

При проектировании радиоэлектронной аппаратуры приходится сталкиваться с задачей коммутации слабых сигналов постоянного и переменного тока. Наиболее часто встречающиеся примеры подобных задач показаны на рис. 1. К ключам, используемым в схемах на рис. 1,

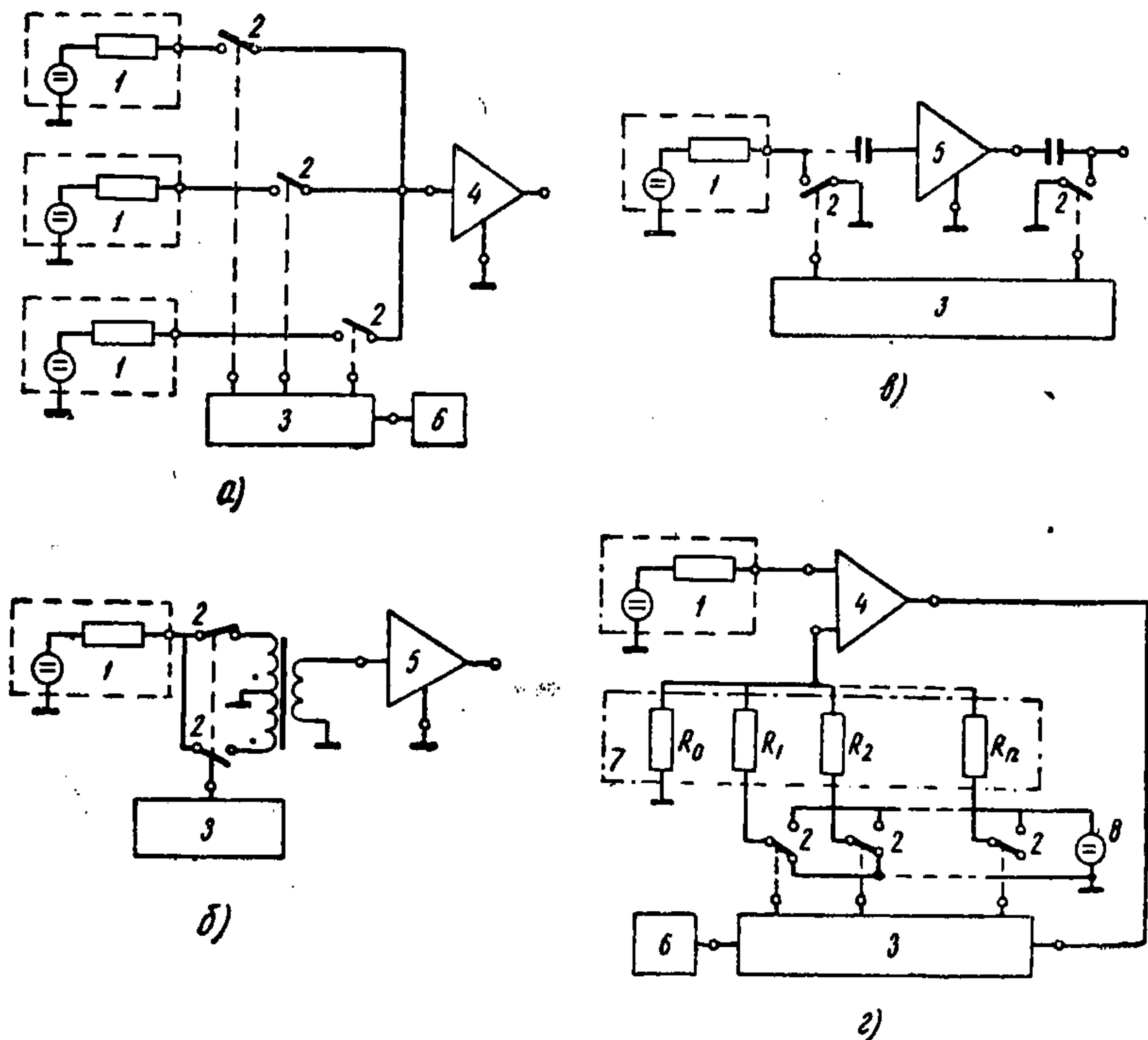


Рис. 1. Радиоэлектронные устройства с коммутацией слаботочных цепей:  
 а — многоканальный переключатель для телеметрии; б — преобразователь постоянного тока в переменный; в — усилитель постоянного тока типа М-ДМ; г — аналого-цифровой преобразователь.  
 1 — источник сигнала; 2 — ключ-прерыватель; 3 — устройство управления ключами; 4 — усилитель постоянного тока; 5 — усилитель переменного тока; 6 — генератор тактовых импульсов; 7 — матрица эталонных сопротивлений; 8 — эталонный источник.

предъявляются очень жесткие требования с точки зрения величины помехи, вносимой ими в коммутируемую цепь. Кроме того, ключи должны быть устойчивы к температурным и механическим воздействиям (ударам, вибрациям), иметь большой срок службы и работать при частотах коммутации до десятков и сотен килогерц. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет освоенный отечественной промышленностью интегральный прерыватель ИП-1, схема и расположение выводов которого показаны на рис. 2.

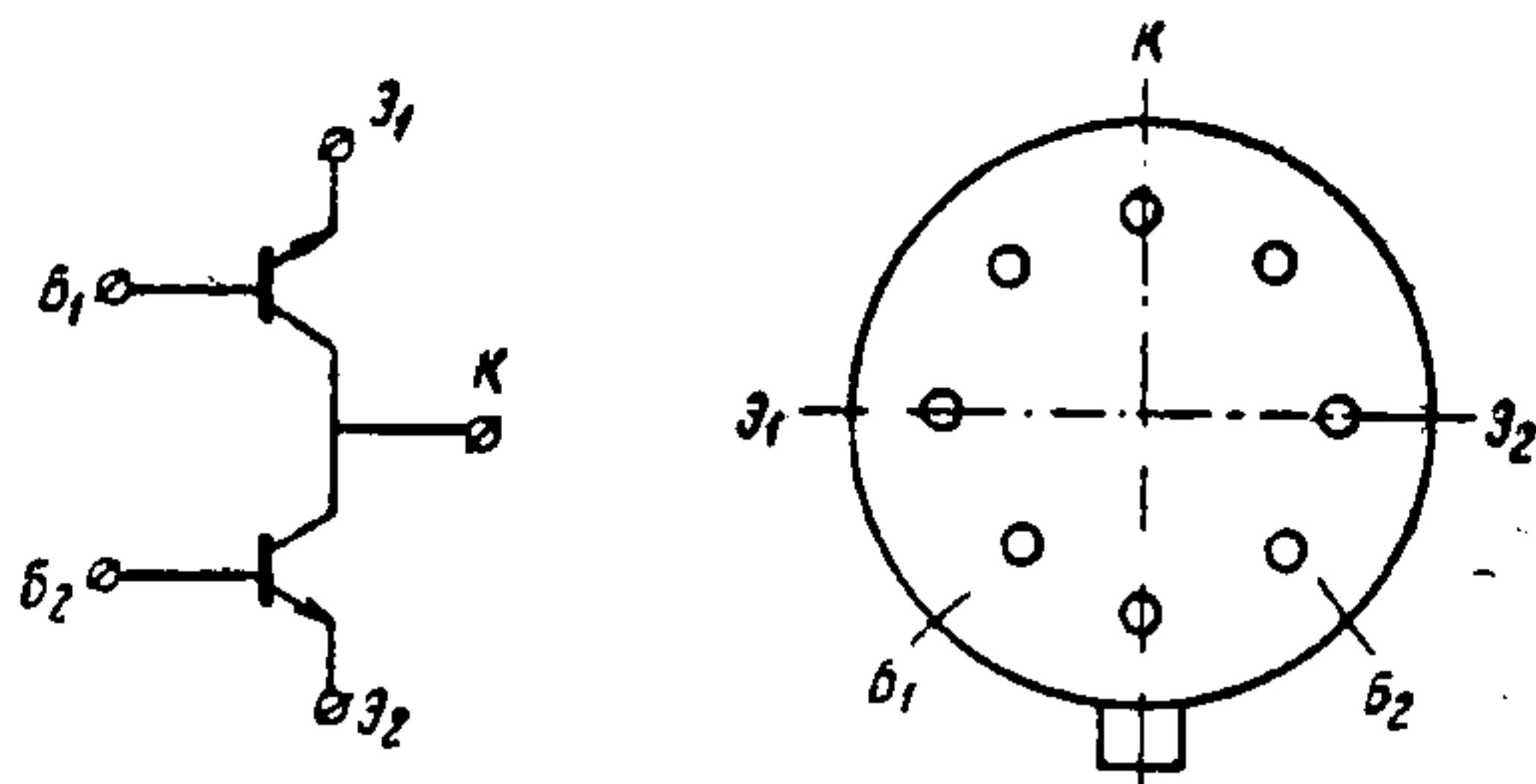


Рис. 2. Схема и расположение выводов интегрального прерывателя ИП-1.

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ

Интегральный прерыватель ИП-1, разрез которого изображен на рис. 3, изготавливается по хорошо известной эпитаксиально-планарной технологии. Специфичные для интегральных прерывателей требования низкого сопротивления тела коллектора, высоких и стабильных коэффициентов передачи тока для нормального и инверсного включений и малых токов утечки эмиттера достигаются использованием в качестве исходного материала эпитаксиальных структур 10 КЭФ 1,0/200 КЭС

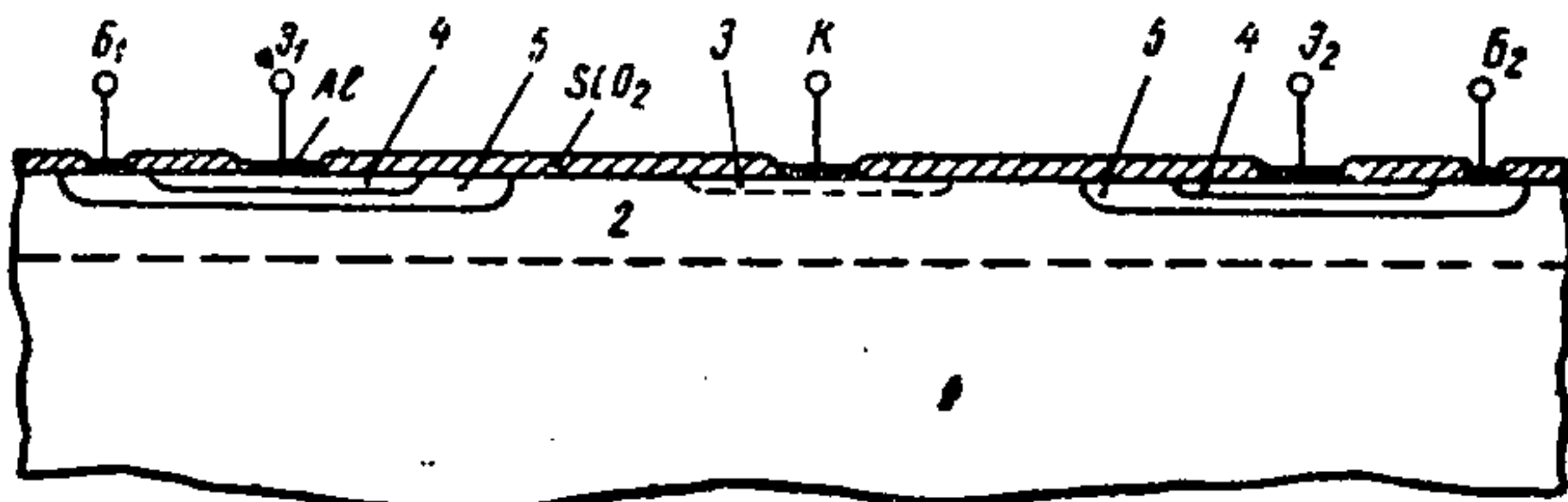


Рис. 3. Разрез интегрального прерывателя:  
1 — исходная пластина; 2 — эпитаксиальная коллекторная область; 3 — контакт к коллекторной области; 4 — эмиттер; 5 — база.

0,01, состоящих из низкоомной кремниевой подложки и эпитаксиально-го слоя кремния того же типа проводимости, но с более высоким удельным сопротивлением, а также соответствующим выбором режимов технологических операций (параметры диффузионных слоев прерывателя приведены в табл. 1).

Таблица 1

Элемент структуры прерывателя	Тип проводимости	Легирующая примесь	Толщина слоя, мкм	Максимальная концентрация примесей, см <sup>-3</sup>
Исходная пластина	n+	Сурьма	200 ± 10	5 · 10 <sup>18</sup> — 10 <sup>19</sup>
Эпитаксиальная коллекторная область	n	Фосфор	10 ± 2	4 · 10 <sup>15</sup> — 6 · 10 <sup>15</sup>
Контакт к коллекторной области	n++	То же	2,1 ± 0,2	8 · 10 <sup>20</sup> — 2 · 10 <sup>21</sup>
Эмиттер	n++	"	2,1 ± 0,2	8 · 10 <sup>20</sup> — 2 · 10 <sup>21</sup>
База	p	Бор	2,8 ± 0,2	1,5 · 10 <sup>18</sup> — 4,5 · 10 <sup>18</sup>

Выбор сурьмы в качестве легирующей примеси подложки, из-за малого значения ее коэффициента диффузии, во-первых, улучшает воспроизводимость результатов при получении диффузионного профиля прибора и, во-вторых, позволяет уменьшить толщину наращиваемой высокоомной пленки  $n$ -типа и тем самым снизить величину сопротивления тела коллектора. Идентичность значений коэффициентов усиления транзисторных структур обеспечивается тем, что обе транзисторные структуры изготовлены на кристалле в непосредственной близости друг от друга, где однородность материала приближается к идеальной. Воспроизводимость параметров достигается жестким контролем диффузионных процессов и процессов, связанных с очисткой и стабилизацией поверхности.

Вакуумный метод диффузии базовой примеси и двухстадийная эмиттерная диффузия из жидкого источника  $\text{PCl}_3$ , а также низкотемпературное термическое окисление дают возможность получать требуемый диффузионный профиль с высокой точностью воспроизведения и стабильное состояние поверхности.

Для снижения токов утечки в технологический процесс вводится дополнительная стабилизация поверхности путем нанесения на поверхность окисленной пластины с готовыми структурами монослоя титана с последующим низкотемпературным вжиганием, а также длительная низкотемпературная стабилизация поверхности в среде сухого кислорода. Высокая надежность металлизированных токоведущих дорожек достигается за счет нанесения перед напылением алюминия подслоя ванадия. Этим обеспечивается высокая адгезия металлов к кремнию и окислу.

Крепление кристалла к корпусу в интегральном прерывателе ИП-1 производится путем пайки эвтектикой золото—кремний, при этом получают идеальные условия теплоотвода и механической прочности. Слой эвтектики создается заранее гальваническим нанесением золота на обратную сторону пластины и вжиганием его в кремний, так что после скрайбирования каждый кристалл имеет на обратной стороне слой эвтектического припоя. Скрайбирование ведется непосредственно по кремнию, для чего на фотошаблонах предусмотрено вскрытие полосок на поверхности пластины в местах перемещения резца. Это исключает образование перенапряжений в маскирующем слое  $\text{SiO}_2$  и возникновение нежелательных поверхностных эффектов.

### Основные характеристики интегральных прерывателей

Работая в режиме ключа в схемах, приведенных на рис. 1, интегральный прерыватель может находиться в двух состояниях: открытом (рис. 4, а), когда протекает ток  $I_{62} = I_{61} + I_{62}$ , и в закрытом (рис. 4, б), когда к переходам коллектор—база транзисторных структур приложено запирающее напряжение  $E_3$ . Полная эквивалентная схема ИП-1 для его работы в режиме ключа показана на рис. 4, в.

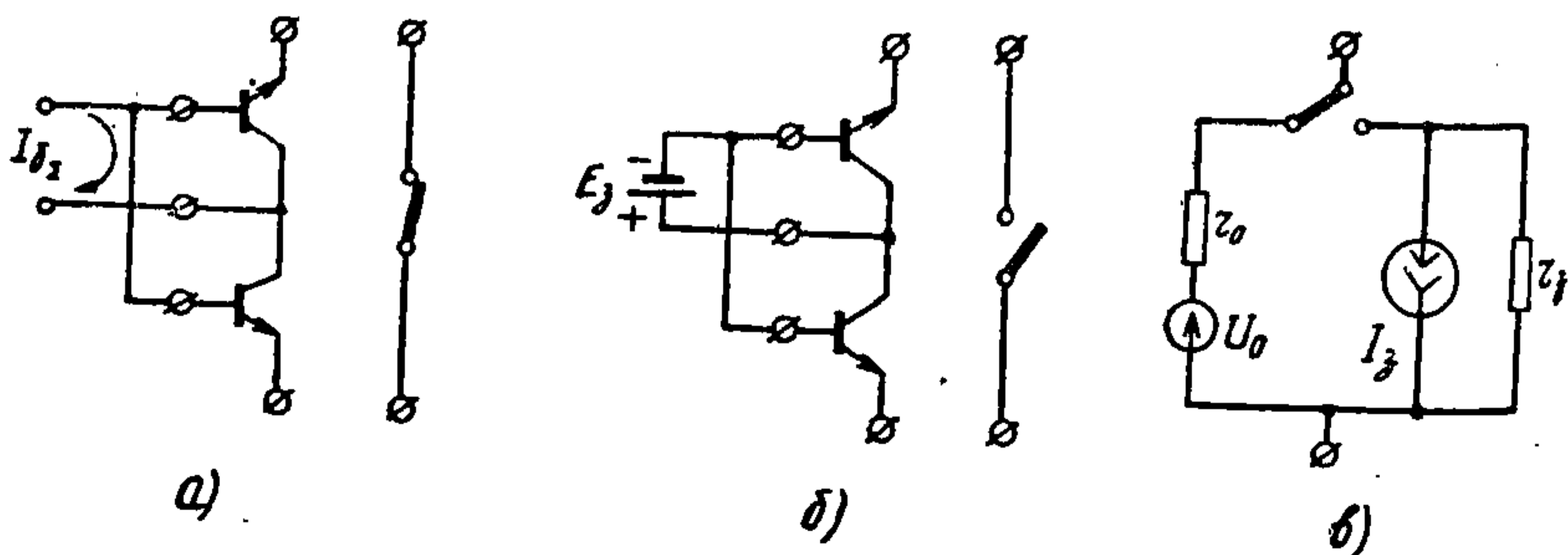


Рис. 4. Режимы работы ИП-1.

Параметры этой схемы для открытого состояния транзисторов  $U_0$  и  $I_0$  можно найти из эквивалентной схемы одной из планарных транзисторных структур прерывателя, изображенной на рис. 5. Диоды  $D'_k$  и  $D''_k$  на схеме рис. 5 отражают инжекцию соответственно активной (под эмиттером) и пассивной частей  $p-n$  перехода коллектор—база. Сопротивление  $r'_k$  учитывает сопротивление эпитаксиальной пленки между высоколегированной подложкой и активной частью коллекторного  $p-n$  перехода, а сопротивление  $r_{kk}$  — между подложкой и коллекторным контактом.

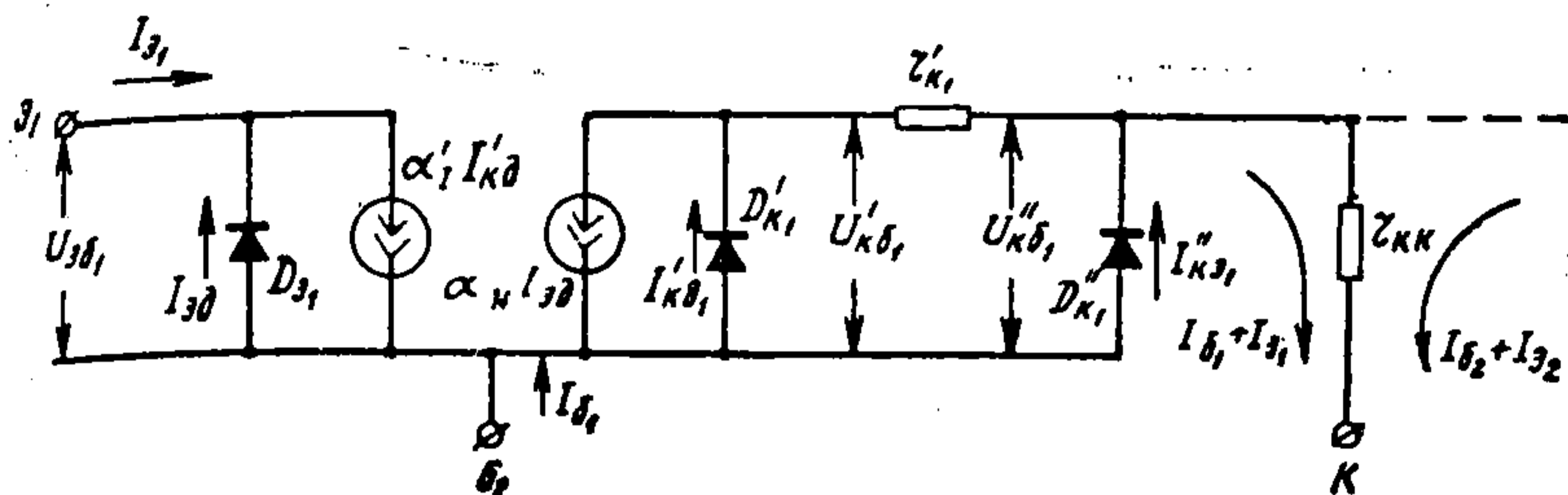


Рис. 5. Эквивалентная схема транзисторной структуры для открытого состояния.

Схема на рис. 5 описывается следующими уравнениями:

$$I'_{кд} = I'_{кдн} e^{\frac{U'_{кб}}{\varphi_T}}; \quad I'_{эд} = I'_{эдн} e^{\frac{U'_{эб}}{\varphi_T}};$$

$$I'_{эд} = \alpha'_I I'_{кд} - I'_{э}; \quad I'_{эд} (1 - \alpha_N) + I'_{кд} (1 - \alpha'_I) + I''_{кд} = I_б;$$

$$U''_{кб} = U'_{кб} + (I'_{кд} - \alpha_N I'_{эд}) r'_k.$$

Кроме этого, токи в схеме рис. 5 связаны соотношениями:

$$\frac{I'_{кд}}{I'_{кд} + I''_{кд}} = \gamma \approx \text{const}; \quad \alpha'_I I'_{кдн} = \alpha_N I'_{эдн}.$$

Решая совместно приведенные выше уравнения и вводя обозначения

$$I'_{кд} + I''_{кд} = I_{кд}; \quad \alpha_I = \frac{\alpha'_I I'_{кд}}{I_{кд}} = \gamma \alpha'_I,$$

получаем

$$U_{э1к} = \varphi_T \ln \left[ \frac{\alpha_{I1}}{\alpha_{N1}} \frac{I_{б1} + (1 - \alpha_{N1}) I_{э1}}{\alpha_{I1} I_{б1} - (1 - \alpha_{I1}) I_{э1}} \right] + \left( r_{кк} + r'_{к1} \frac{\gamma_1 - \alpha_{N1} \alpha_{I1}}{1 - \alpha_{N1} \alpha_{I1}} \right) I_{б1} + \left( r_{кк} + r'_{к1} \frac{\alpha_{N1} (1 - \alpha_{I1}) + \gamma_1 (1 - \alpha_{N1})}{1 - \alpha_{N1} \alpha_{I1}} \right) I_{э1} + r_{кк} (I_{э2} + I_{б2}). \quad (1)$$

Для работы ИП-1 в режиме ключа должно выполняться соотношение

$$I_б > \frac{1 - \alpha_I}{\alpha_I} I_э.$$

Учитывая, что реально  $1 - \alpha_N \ll 1$ ;  $1 - \alpha_N \ll 1 - \alpha_I$ ;  $\gamma \approx \alpha_I$ , выражение для  $U_{э1к}$  можно записать следующим образом:

$$U_{э1к} \approx \varphi_T (1 - \alpha_{N1}) + \varphi_T \ln \frac{1}{1 - \frac{1 - \alpha_{I1}}{\alpha_{I1}} \frac{I_{э1}}{I_{б1}}} + (r_{кк} + r^*_{к1}) I_{б1} + (r_{кк} + r'_{к1}) I_{э1} + r_{кк} (I_{э2} + I_{б2}), \quad (2)$$

где

$$r^*_{к1} \approx r'_{к1} \frac{\gamma_1 - \alpha_{I1}}{1 - \alpha_{I1}} \ll r'_{к1}.$$

При  $I_{э1} = I_{э2} = 0$  для  $U_{э1к}$  имеем

$$U_{э1к}^0 = \varphi_T (1 - \alpha_{N1}) + (r_{кк} + r_{к1}^*) I_{б1} + r_{кк} I_{б2} \quad (3)$$

Типовые зависимости  $U_{э1к}^0 = f(I_{б1})$  для  $I_{б2} = 0$  и  $I_{б2} = I_{б1}$  показаны на рис. 6, а. Из этих зависимостей следует, что для ИП-1  $r_{кк} \approx 0,54$  ом,  $r_{к1}^* \approx 0,38$  ом и  $\alpha_N \approx 0,99$ .

Выражение для  $U_{э1э2} = f(I_{э}, I_{б})$  легко находится из соотношения (2), причем при  $I_{э1} = -I_{э2} = I_{э1э2}$ ;  $I_{б1} = I_{б2} = \frac{I_{б\Sigma}}{2}$  и идентичных параметрах транзисторных структур ( $\alpha_{N1} = \alpha_{N2} = \alpha_N$  и т. д.) оно записывается следующим образом:

$$U_{э1э2} = U_{э1к} - U_{э2к} \approx \varphi_T \ln \frac{1 + 2 \frac{1 - \alpha_I}{\alpha_I} \frac{I_{э1э2}}{I_{б\Sigma}}}{1 - 2 \frac{1 - \alpha_I}{\alpha_I} \frac{I_{э1э2}}{I_{б\Sigma}}} + 2r'_к I_{э1э2} \quad (4)$$

Типовая зависимость  $U_{э1э2} = f(I_{э1э2})$  показана на рис. 6, б ( $I_{б\Sigma} = 2$  ма;  $T = 25^\circ\text{C}$ ).

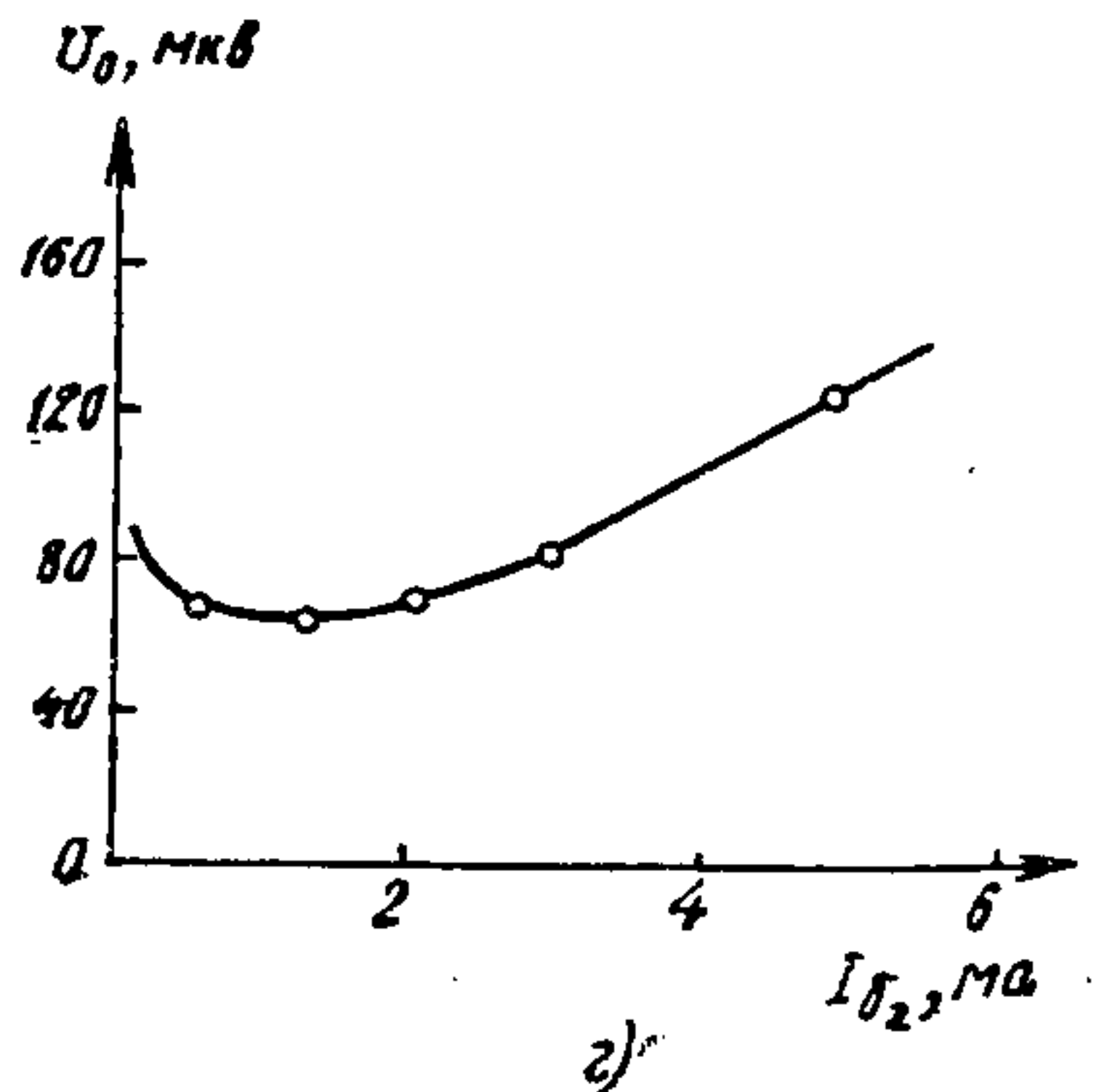
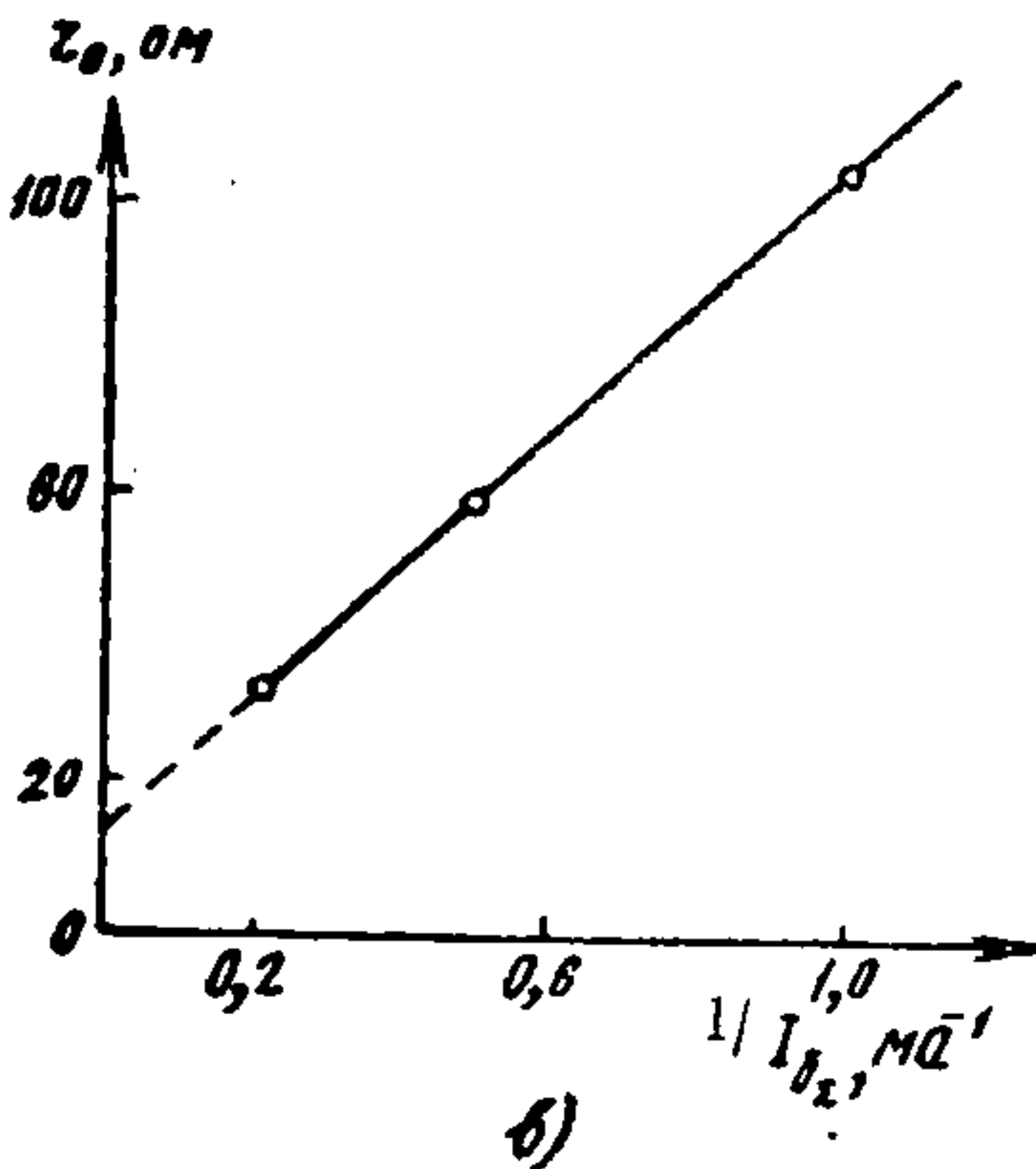
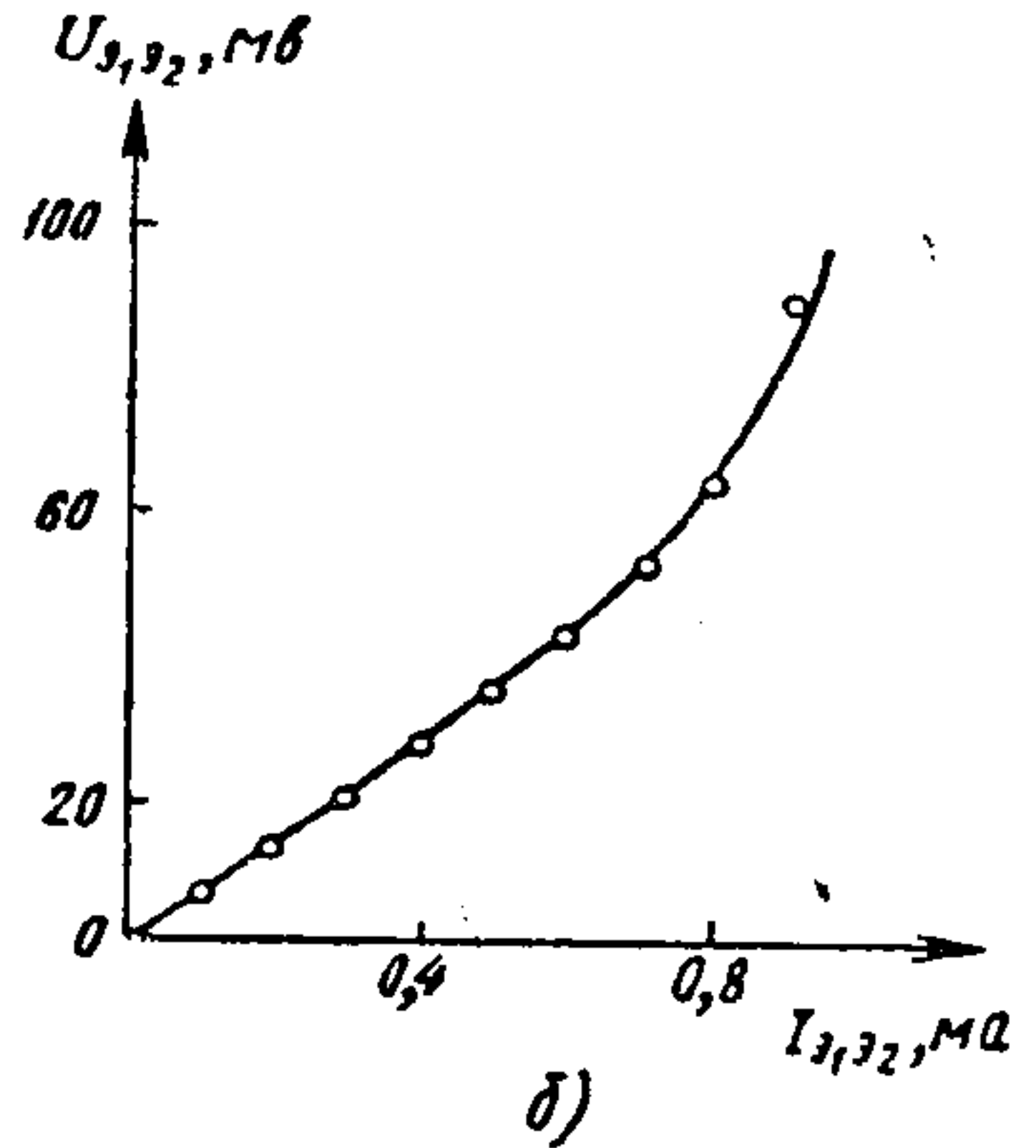
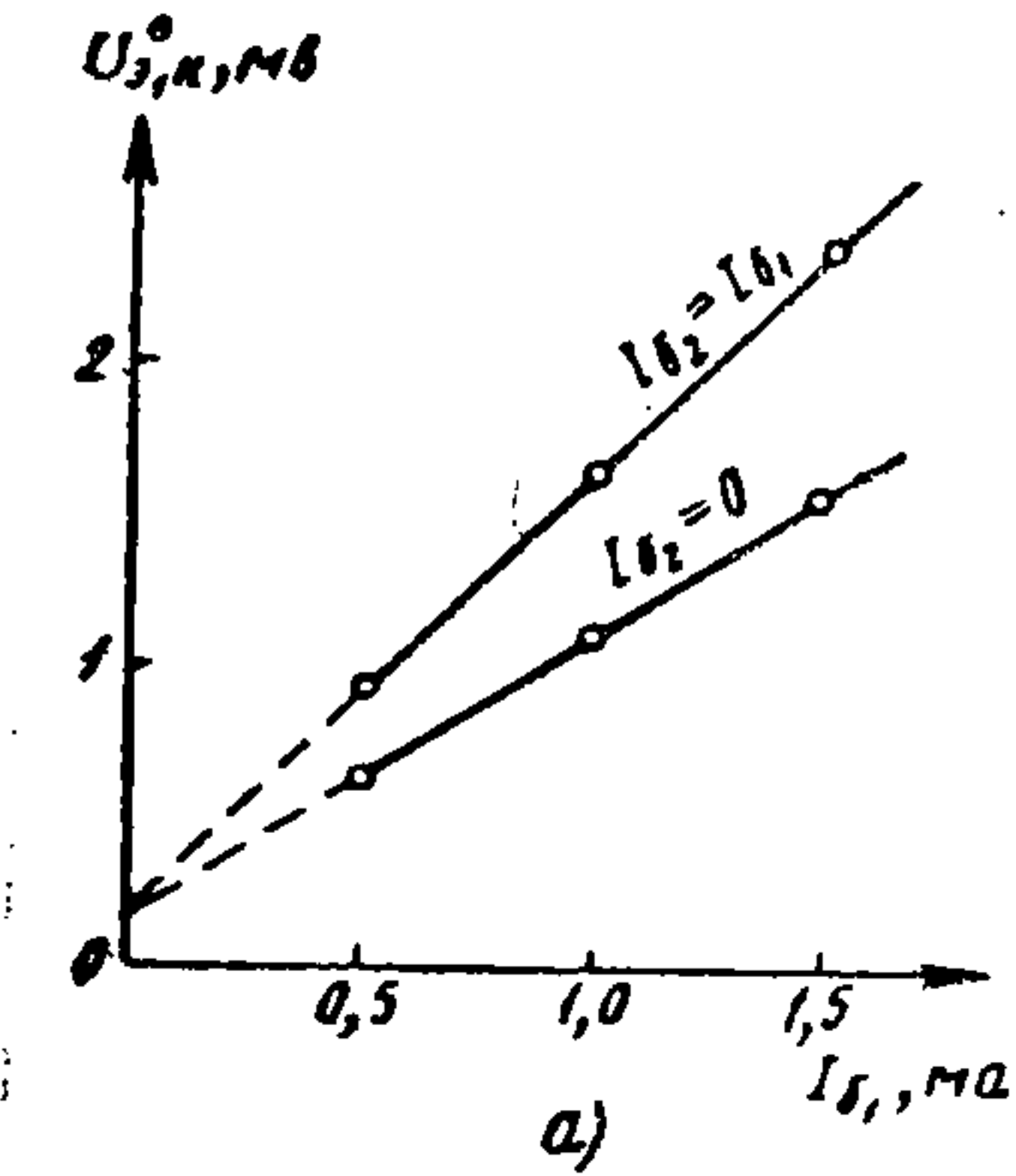


Рис. 6. Типовые зависимости параметров интегрального прерывателя.

Из выражения (4) легко определяется динамическое сопротивление  $r_0$  на схеме (рис. 4, в):

$$r_0 = \left. \frac{dU_{\text{э1 э2}}}{dI_{\text{э1 э2}}} \right|_{\substack{I_{\text{бэ}} = \text{const} \\ I_{\text{э1 э2}} = 0}} = 4 \frac{\varphi_T}{I_{\text{бэ}}} \frac{1 - \alpha_I}{\alpha_I} + 2r'_k. \quad (5)$$

Типовая зависимость  $r_0 = f\left(\frac{1}{I_{\text{бэ}}}\right)$ , из которой следует, что для ИП-1  $r'_k \approx 7$  ом и  $\alpha_I \approx 0,5$  показана на рис. 6, в ( $T = 25^\circ\text{C}$ ).

Выражение для остаточного напряжения  $U_0$  при  $I_{\text{б1}} = I_{\text{б2}} = \frac{I_{\text{бэ}}}{2}$  записывается следующим образом:

$$U_0 = U_{\text{э1к}}^0 - U_{\text{э2к}}^0 = \varphi_T (\alpha_{N2} - \alpha_{N1}) + \frac{I_{\text{бэ}}}{2} (r_{k1}^* - r_{k2}^*). \quad (6)$$

Это соотношение хорошо объясняет типовую зависимость  $U_0 = f(I_{\text{бэ}})$ , показанную на рис. 6, г (для  $T = 25^\circ\text{C}$ ). При малых  $I_{\text{бэ}}$ , когда резко падает  $B_N = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N}$ , возрастает разброс  $\alpha_N$  транзисторных структур. При больших  $I_{\text{бэ}}$  начинает преобладать разброс  $r_k^*$ .

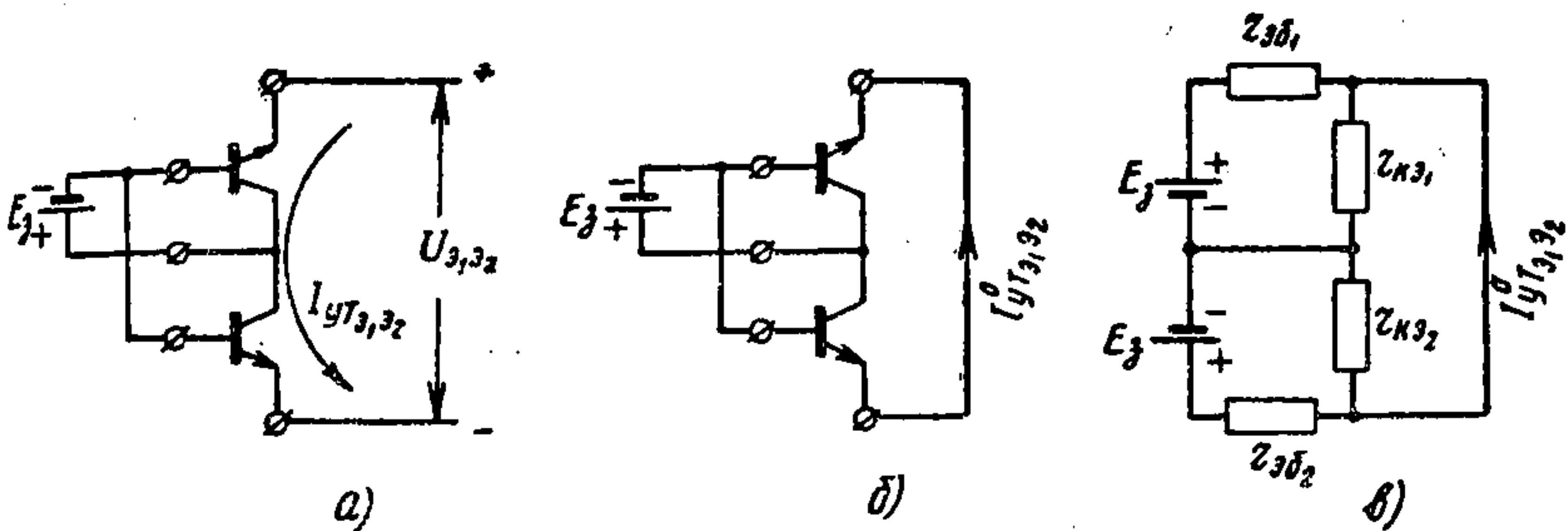


Рис. 7. Работа прерывателя ИП-1 в закрытом состоянии.

Параметры эквивалентной схемы прерывателя (см. рис. 4, в) для закрытого состояния транзисторов  $r_э$  и  $I_э$  находятся из анализа схемы на рис. 7, а. Сопротивление  $r_э$  можно характеризовать зависимостью  $I_{\text{ут э1 э2}} = f(U_{\text{э1 э2}})$  в схеме рис. 7, а, а ток  $I_э$  равен току, протекающему между эмиттерами при  $U_{\text{э1 э2}} = 0$  (см. рис. 7, б).

При показанной на рис. 7, а полярности напряжения  $U_{\text{э1 э2}}$  переход эмиттер—база транзистора  $T_2$  работает при прямом смещении, и поэтому ток утечки  $I_{\text{ут э1 э2}}$  будет определяться утечками перехода эмиттер—база и промежутка коллектор—эмиттер транзистора  $T_1$ . Эти утечки обусловлены, главным образом, пробоем микроплазм в слое объемного заряда, причем

$$\frac{dI_{\text{ут}}}{I_{\text{ут}}} \approx k \frac{dU}{\varphi_{\text{пор}}},$$

$$I_{\text{ут}} \approx I_0 \left( e^{k \frac{U}{\varphi_{\text{пор}}}} - 1 \right).$$

На рис. 8 приведены типовые зависимости  $I_{ут\ э1\ э2} = f(U_{э1\ э2})$  при  $E_3 = 0$ .

Как следует из рис. 7, а к промежутку коллектор—эмиттер наибольшее напряжение будет приложено в режиме, когда  $E_3 = 0$ , и поэтому ток утечки при  $E_3 \neq 0$  будет всегда меньше тока утечки  $I_{ут\ э1\ э2}$  при  $E_3 = 0$ .

Эквивалентная схема, из которой можно определить  $I_3 = I_{ут\ э1\ э2}^0$ , приведена на рис. 7, в. Очевидно,  $I_{ут\ э1\ э2}^0$  будет наибольшим при условии  $r_{эб1} \ll r_{кэ1}$  и  $r_{эб2} \gg r_{кэ2}$ . Нетрудно показать, что и в этом случае он всегда будет меньше  $I_{ут\ э1\ э2}$  при  $U_{э1\ э2} = \frac{E_3}{2}$ , и, учитывая экспоненциальную зависимость  $I_{ут\ э1\ э2}$  от  $U_{э1\ э2}$ , для приборов ИП-1 будет практически отсутствовать.

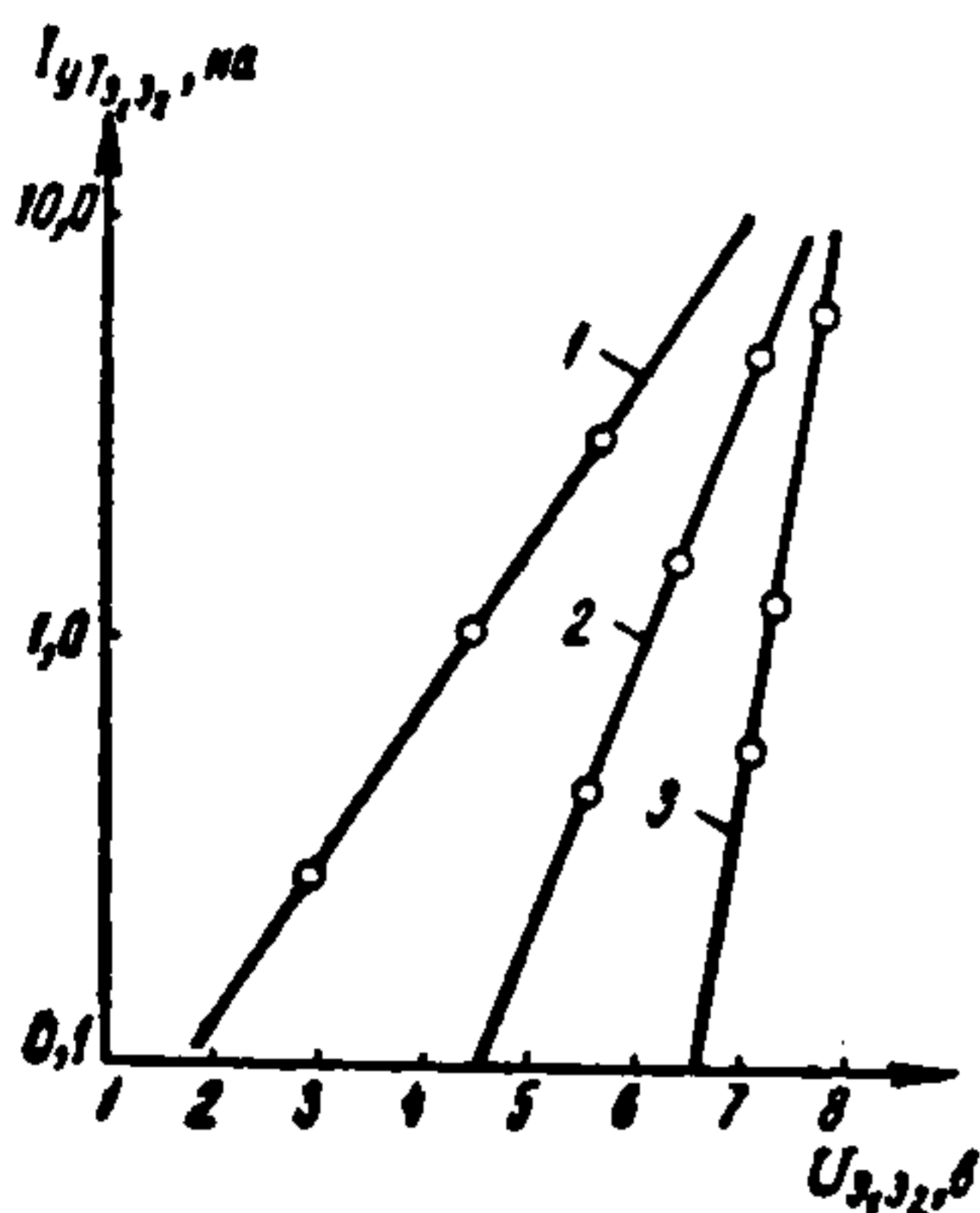


Рис. 8. Токи утечки интегрального прерывателя при различных температурах: 1) 85; 2) 25; 3)  $-60^\circ\text{C}$ .

### Основные эксплуатационные параметры прерывателей ИП-1

В соответствии с ТУ приборы ИП-1 по электрическим параметрам разделяются на следующие группы (см. табл. 2).

Таблица 2

Группа ИП-1	$I_{ут\ э1\ э2\ макс. ма}$		$r_{0\ макс. ом}$	$U_0\ макс. мкв$
	$U_{э1\ э2} = \pm 6,3 в$	$U_{э1\ э2} = \pm 3,0 в$	$I_{б\sum} = 2 ма$	
А	10	—	100	50
Б	10	—	100	150
В	—	10	100	50
Г	—	10	100	150

На рис. 9, а представлено типовое интегральное распределение всех групп по параметру  $I_{ут\ э1\ э2}$  при нормальной температуре. Как видно из распределения, более 50% всех приборов имеют токи утечки при  $U_{э1\ э2} = 3,5 в$  менее 1 ма. Согласно ТУ, при  $+85^\circ\text{C}$  допускается увеличение тока  $I_{ут\ э1\ э2}$  до значения не более 100 ма.

Распределение всех групп по остаточному напряжению  $U_0$  приведено на рис. 9, б, а по динамическому сопротивлению  $r_0$  — на рис. 9, в. Типовое значение  $r_0$  при  $+25^\circ\text{C}$  для отдельных партий составляет около 20 ом. Это говорит о том, что улучшение технологии и качества применяемых материалов может существенно увеличить величину инвер-

сного коэффициента передачи тока через базу (до величины порядка 0,8—0,9).

При положительной температуре наблюдается преимущественно рост значения  $r_0$  с температурным коэффициентом 0,05—0,1 ом/град, что связано с увеличением объемного сопротивления тела коллектора. При отрицательных температурах может наблюдаться как увеличение, так и уменьшение значений  $r_0$  в зависимости от вклада, вносимого изменением объемного сопротивления  $r'_k$  и инверсного коэффициента переноса тока через базу  $\alpha_1$ . Распределение интегральных прерывателей по параметру  $\frac{dU_0}{dI_{\delta z}}$  показано на рис. 9, г. Типовые значения емкостей переходов эмиттер—база и коллектор—база составляют 5—7 пф при отсутствии смещения.

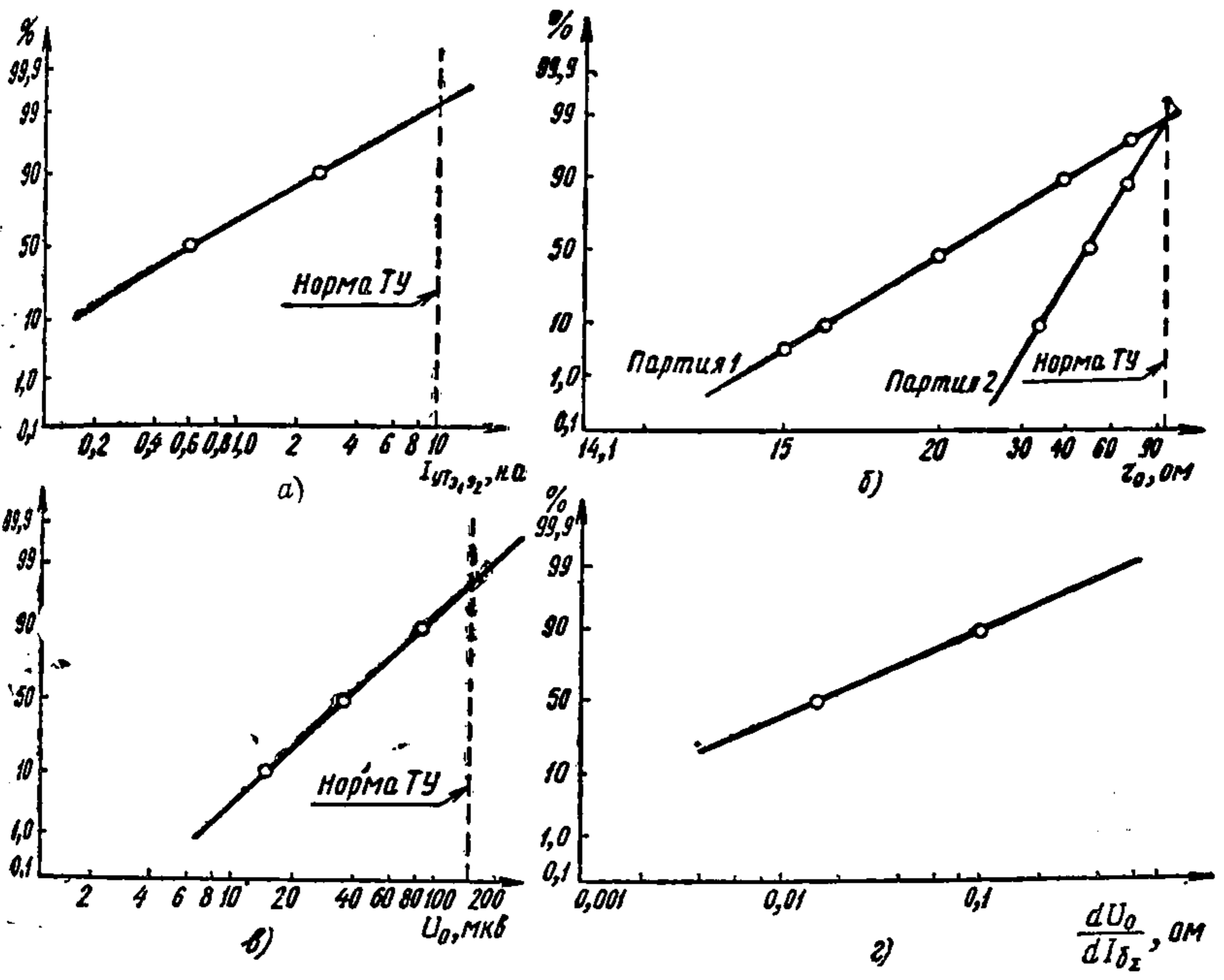


Рис. 9. Типовые интегральные распределения параметров прерывателей ИП-1.

Конструкция интегральных прерывателей ИП-1 позволяет применять их в условиях жестких механических воздействий. Прерыватели выдерживают вибрацию в диапазоне частот 5—5000 гц с ускорением до 40 g, линейные ускорения до 150 g, многократные удары с ускорением до 150 g и одиночные удары с ускорением до 1000 g. Герметичность конструкции позволяет использовать приборы в условиях повышенного и пониженного атмосферного давления. Применение же их в условиях повышенной влажности допускается лишь при наличии дополнительной защиты монтажа от влаги или в герметизированных блоках, так как в противном случае поверхностные токи утечки между электродами могут значительно превышать токи утечки прибора.

Интегральные прерыватели могут выполняться и в бескорпусном варианте. Транзисторные структуры прерывателя обладают хорошими частотными свойствами ( $f_T \approx 200—300$  Мгц), имеют высокие значения



$h_{21э}$  на малых токах ( $h_{21э} > 10$  при  $I_э = 10$  мкА), низкие значения  $U_{кэ}$  в режиме насыщения, благодаря чему они могут найти широкое применение в цифровых и усилительных микросхемах.

*Статья поступила 11 марта 1969 г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов В. И., Голубев А. П. Транзисторные модуляторы. Изд-во «Энергия», 1964.
2. Aronson M. W. Integrated Circuit Device and Fabrication Technology, SCP and Solid State Technology, 1966, v. 8, № 3.
3. Гаврилов Р. А., Скворцов А. М. Технология производства полупроводниковых приборов. Изд-во «Энергия», 1968.