

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

В.Ф. Агафонников

**Изучение статических характеристик
биполярного транзистора**

Руководство к лабораторной работе
по курсу "Физика полупроводниковых структур"
для студентов радиоконструкторского факультета

Томск 2012

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Принцип действия биполярного транзистора в качестве усилителя	3
3. Статические характеристики и коэффициент передачи тока в различных схемах включения	5
3.1. Схема с общей базой	5
3.2. Схема с общим эмиттером	8
4. Порядок выполнения работы	-
5. Задание	14
6. Вопросы для самопроверки	14
7. Рекомендуемая литература	15

I. ВВЕДЕНИЕ

Транзистор является основным компонентом практически всех радиотехнических, а также интегральных схем. Он представляет собой полупроводниковый прибор, пригодный для усиления мощности и имеющий три вывода или больше.

Изучению статических характеристик биполярного транзистора посвящена эта работа.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В КАЧЕСТВЕ УСИЛИТЕЛЯ

Транзистор — это полупроводниковый прибор, имеющий два p-n перехода, расположенных в одном полупроводниковом монокристалле на расстоянии, значительно меньшем диффузионной длины неосновных носителей заряда. На рис. 2.1 показано включение транзистора типа p-n-p по схеме с общей базой.

При работе транзистора p-n-p типа в режиме усиления эмиттерный переход включен в пропускном режиме и инжектирует дырки в базу, откуда они попадают в цепь обратносмещенного коллекторного перехода. Поскольку толщина базы транзистора W значительно меньше диффузионной длины дырок L_p , то концентрация инжектированных эмиттером дырок при пролете через базу почти не изменяется. Таким образом, сила дырочного тока в коллекторной цепи I_{pk} приблизительно равна силе тока дырок в эмиттерной цепи I_{pe} . Ток насыщения коллекторного перехода мал и им можно в первом приближении пренебречь по сравнению с I_{pk} . Поскольку коллекторный переход смещен в обратном направлении, то его сопротивление велико, что позволяет включать в коллекторную цепь большое сопротивление нагрузки R_n без заметного изменения коллекторного тока. При этом, конечно, R_n должно быть значительно меньше сопротивления коллектора. В связи с отмеченными выше обстоятельствами относительно малое изменение падения напряжения на эмиттерном переходе, сопротивление которого мало, вызовет большое изменение падения напряжения на

сопротивлении нагрузки ($\Delta V = \Delta I_{pk} R_n$) при почти одинаковом изменении силы тока в эмиттерной и коллекторной цепях. В результате разного различия входного и выходного сопротивлений транзистор осуществляет усиление по мощности.

Биполярный транзистор, включенный по схеме с ОБ

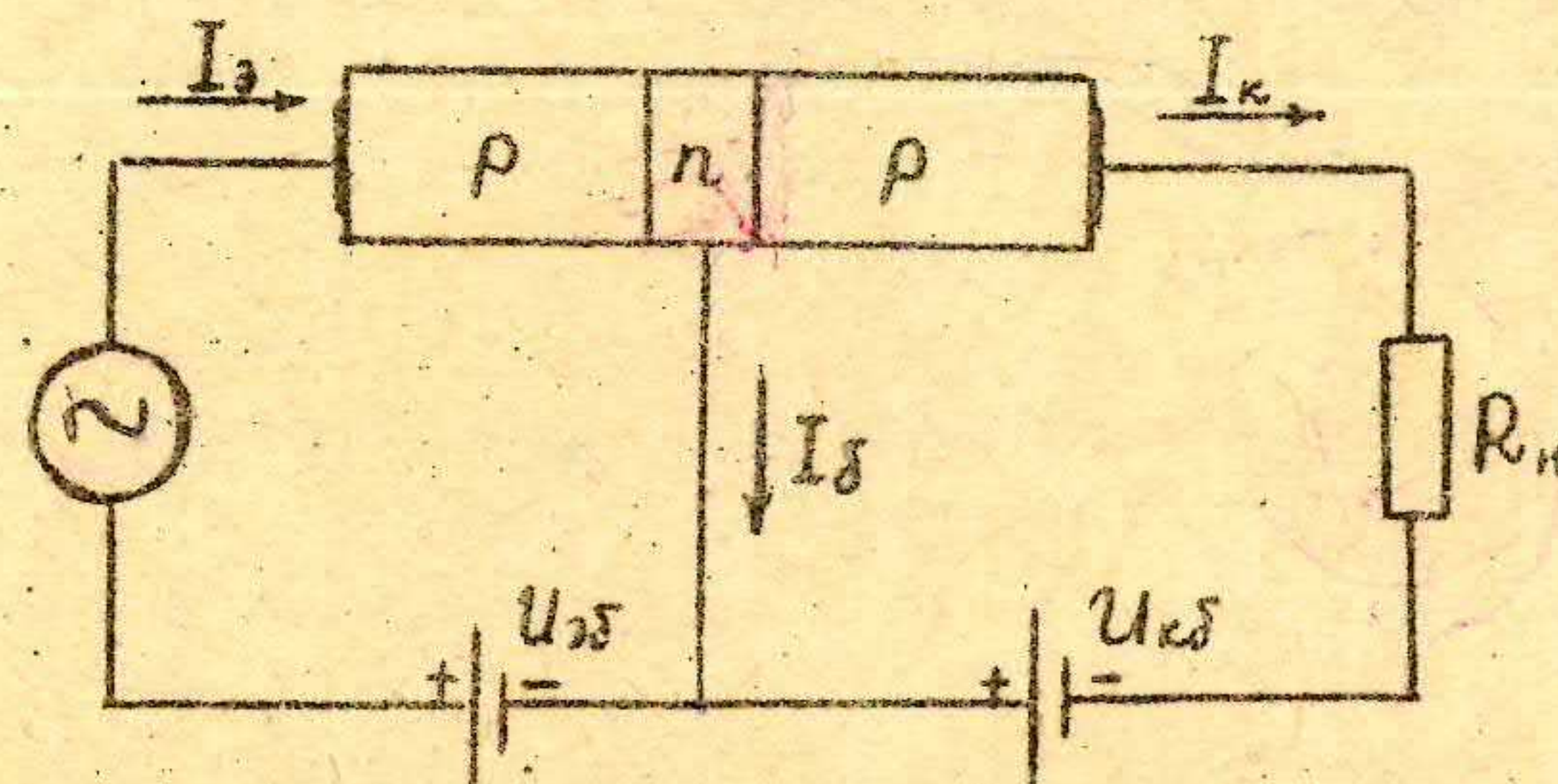


Рис. 2.1

При работе транзистора в описанном выше режиме через эмиттерный переход будет течь и электронный ток, вызванный инжекцией электронов из базы в эмиттер, но эта составляющая тока в коллекторный переход не попадает и не влияет на силу тока в его цепи, т.е. она оказывается бесполезной для управления коллекторным переходом. Отсюда следует, что наилучшее управление коллекторного тока эмиттерным может быть достигнуто в транзисторе, в котором эмиттерный ток, в основном, обусловлен инжекцией дырок в базу. Это условие выполняется за счет того, что обычно удельная проводимость эмиттера σ_{p_2} значительно больше удельной проводимости базы σ_{n_2} . Технология изготовления транзисторов предусматривает выполнение этого условия и для коллекторного перехода, т.е. $\sigma_{p_1} \gg \sigma_{n_1}$.

Ток через базовый контакт $I_б$ является чисто электронным. В стационарном случае он определяется потоком электронов, которые втягиваются в базу через базовый контакт для компенсации электронов, уходящих в эмиттер и создающих электронную составляющую тока эмиттера I_{n_2} , электронов, погибших за счет рекомбинации с дырками, инжектируемыми из эмиттера, за вычетом электронов, поставляемых в базу обратным током коллектора.

Усилительные свойства транзистора обычно характеризуются коэффициентом передачи тока или коэффициентом усиления, который равен отношению изменения выходного тока к изменению вход-

ного при неизменном напряжении на выходе и в схеме с общей базой обозначается через $h_{21\delta}$ или \mathcal{L}_0 . В соответствии с определением

$$h_{21\delta} = \left. \frac{dI_k}{dI_э} \right|_{U_{кб} = const} = \frac{d(I_{pk} + I_{nk})}{d(I_{p_2} + I_{n_2})} \Big|_{U_{кб} = const} = \delta \beta M_k \quad (2.1)$$

Параметр $\delta = dI_{p_2} / d(I_{p_2} + I_{n_2})$ называется эффективностью эмиттера, т.к. он показывает, какая часть приращения тока эмиттера управляет током коллектора; $\beta = dI_{pk} / dI_{p_2}$ — коэффициент переноса, он показывает, во сколько раз уменьшается приращение дырочного тока в процессе переноса дырок от эмиттера до коллектора за счет их рекомбинации в базе. И, наконец, $M_k = d(I_{pk} + I_{nk}) / dI_{pk}$ называется коэффициентом умножения коллектора (при $U_{кб} = const$).

3. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ТОКА В РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ

3.1. Схема с общей базой

При включении транзистора по схеме с общей базой (рис.3.1) входным является ток эмиттера, а выходным — коллектора. Коэффициент передачи тока в этом случае определяется формулой (2.1). Выражения для полного тока эмиттера и коллектора можно записать в виде

$$I_э = \frac{I_{ps}}{sh(W/L_p)} \left\{ \left[\exp\left(\frac{eU_{эб}}{kT}\right) - 1 \right] ch \frac{W}{L_p} - \left[\exp\left(\frac{eU_{кб}}{kT}\right) - 1 \right] \right\} + I_{ns} \left[\exp\left(\frac{eU_{эб}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

$$I_k = \frac{I_{ps}}{sh(W/L_p)} \left\{ \left[\exp\left(\frac{eU_{эб}}{kT}\right) - 1 \right] - \left[\exp\left(\frac{eU_{кб}}{kT}\right) - 1 \right] ch \frac{W}{L_p} \right\} - I_{ns} \left[\exp\left(\frac{eU_{кб}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Семейство входных статических характеристик, т.е. зависимость $I_э$ от $U_{эб}$ при фиксированных значениях $U_{кб}$ описывается выражением (см.3.1). Если $U_{кб} = 0$, то $I_э \sim \left[\exp(eU_{эб}/kT) - 1 \right]$ (рис. 3.2, кривая I). При $U_{кб} < 0$ и $U_{эб} = 0$ эмиттерный ток, как следует из (3.1) отличается от нуля.

Обычно при работе транзистора в режиме усиления $|U_{кб}| > 2,3 \frac{kT}{e}$, но тогда $\Delta p(w) = -p_n$, а $p(w) = 0$. У эмиттерного перехода

при $U_{зб} = 0$ $\Delta p(0) = 0$, а $p = p_n$. Таким образом, в рассматриваемом случае в базе транзистора существует градиент

Схема с общей базой

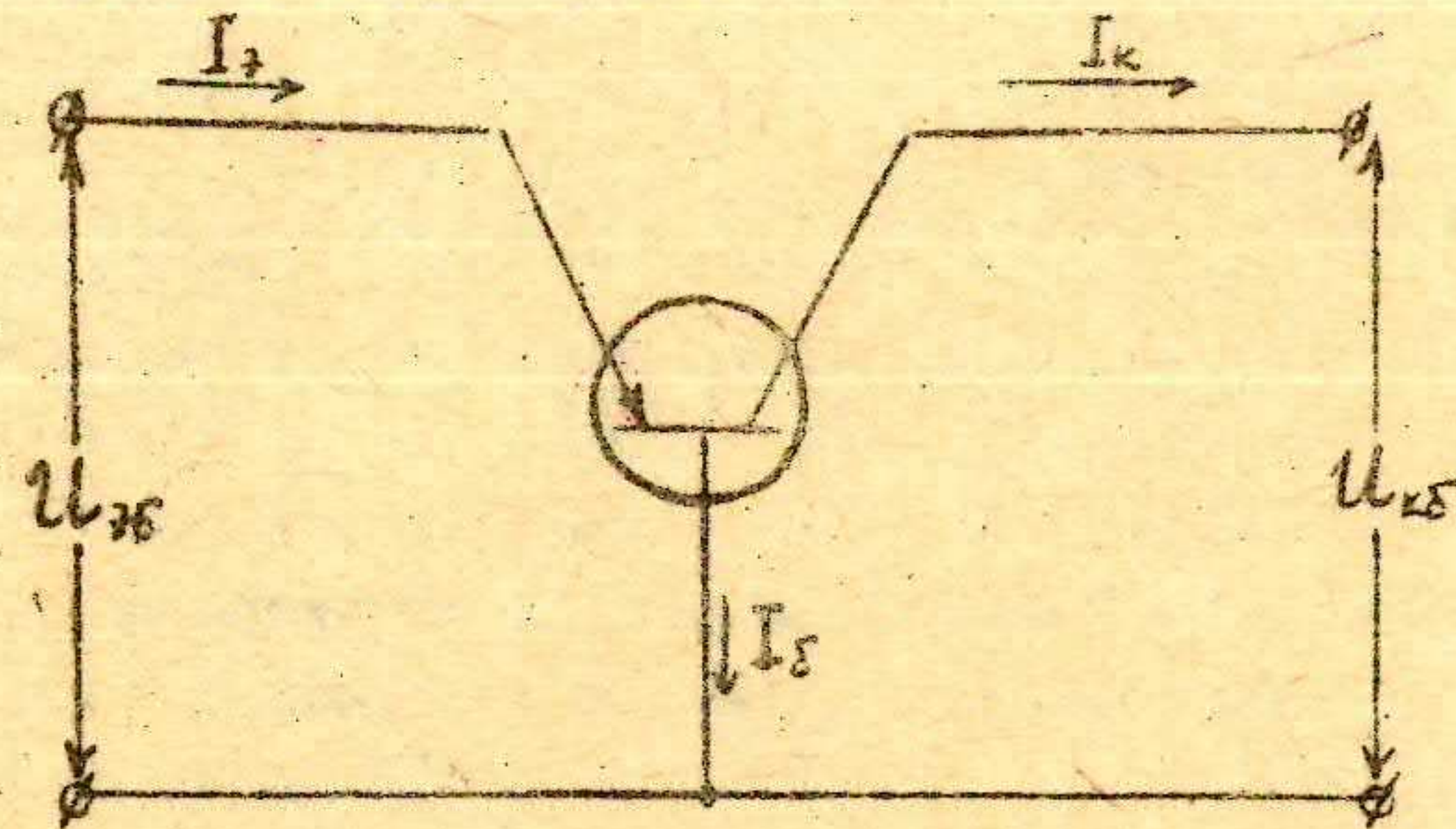


Рис. 3.1

концентрации дырок и $I_з \neq 0$. Для компенсации этого тока на эмиттерный переход необходимо подать смещение в запиорном направлении (рис. 3.2, кривая 2).

Семейство выходных характеристик (зависимость $I_к$ от $U_кб$ при фиксированных значениях $I_з$) можно построить исходя из формулы (3.2) для $I_к$. При этом кривая 1 будет исходить из начала координат и соответствовать обратному току коллекторного перехода (рис. 3.3).

$$I_{кб0} = -S_k [j_{рз} \operatorname{cth} \left(\frac{W}{L_p} \right) + j_{нк}] \left[\exp \left(-\frac{eU_{кб}}{kT} \right) - 1 \right],$$

где S_k - площадь коллекторного перехода. Поскольку $\sigma_{рз} \gg \sigma_{кб}$, то $j_{рз} \gg j_{нк}$ и последним членом в формуле (3.2) можно пренебречь. Кроме того, обычно

$$\left[\exp \left(\frac{eU_{зб}}{kT} \right) - 1 \right] \gg \left[\exp \left(-\frac{eU_{кб}}{kT} \right) - 1 \right]$$

С учетом этих обстоятельств из (3.1) следует, что

$$I_з = I_{рз} \operatorname{cth} \left(\frac{W}{L_p} \right) \left[\exp \left(\frac{eU_{зб}}{kT} \right) - 1 \right],$$

где $I_{рз} = j_{рз} \cdot S_з$,
 $S_з$ - площадь эмиттерного перехода.

Тогда полагая, что $S_k = S_з$, можно записать при $U_{кб} < 0$ выражение (3.2) в следующем виде

$$I_к \approx L_0 I_з + I_{кб0} \quad (3.3)$$

Здесь предполагается, что $\delta_0 = 1$ и $L_0 = 1 / \operatorname{ch} \frac{W}{L_p}$.

Входные характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ

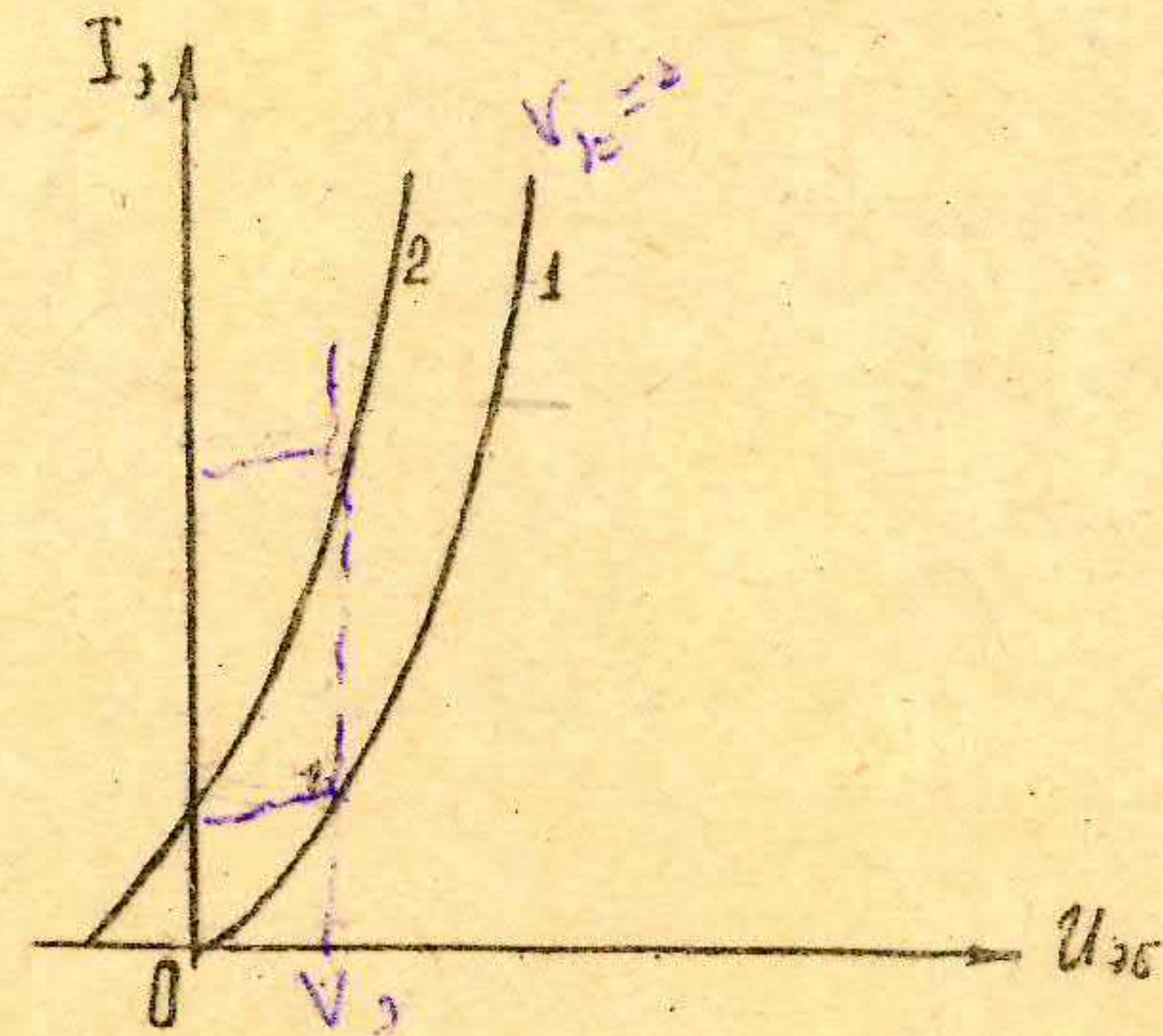


Рис. 3.2

Полученное соотношение устанавливает связь выходного тока с током эмиттера, который выступает здесь в качестве параметра. Из (3.3) и (3.2) следует, что при $U_{кб} = 0$ $I_{кб0} = 0$, а $I_к \approx L_0 I_з$. Для компенсации потока дырок из эмиттерного в коллекторный переход на последний необходимо подать напряжение смещения в пропускном направлении. В связи с этим все выходные характеристики при $I_з \neq 0$ начинаются в области положительных значений $U_{кб}$ (рис. 3.3, кривая 2 и 3). Поскольку $L_0 \approx 1$, $I_{кб0} \ll I_з$, то из (3.3) видно, что $I_к \approx I_з$ и фактически не зависит от $U_{кб}$ в области его отрицательных значений. При достаточно больших обратных смещениях на коллекторном переходе в нем развивается обычно лавинный пробой и на выходной характеристике появляется участок резкой зависимости

Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ

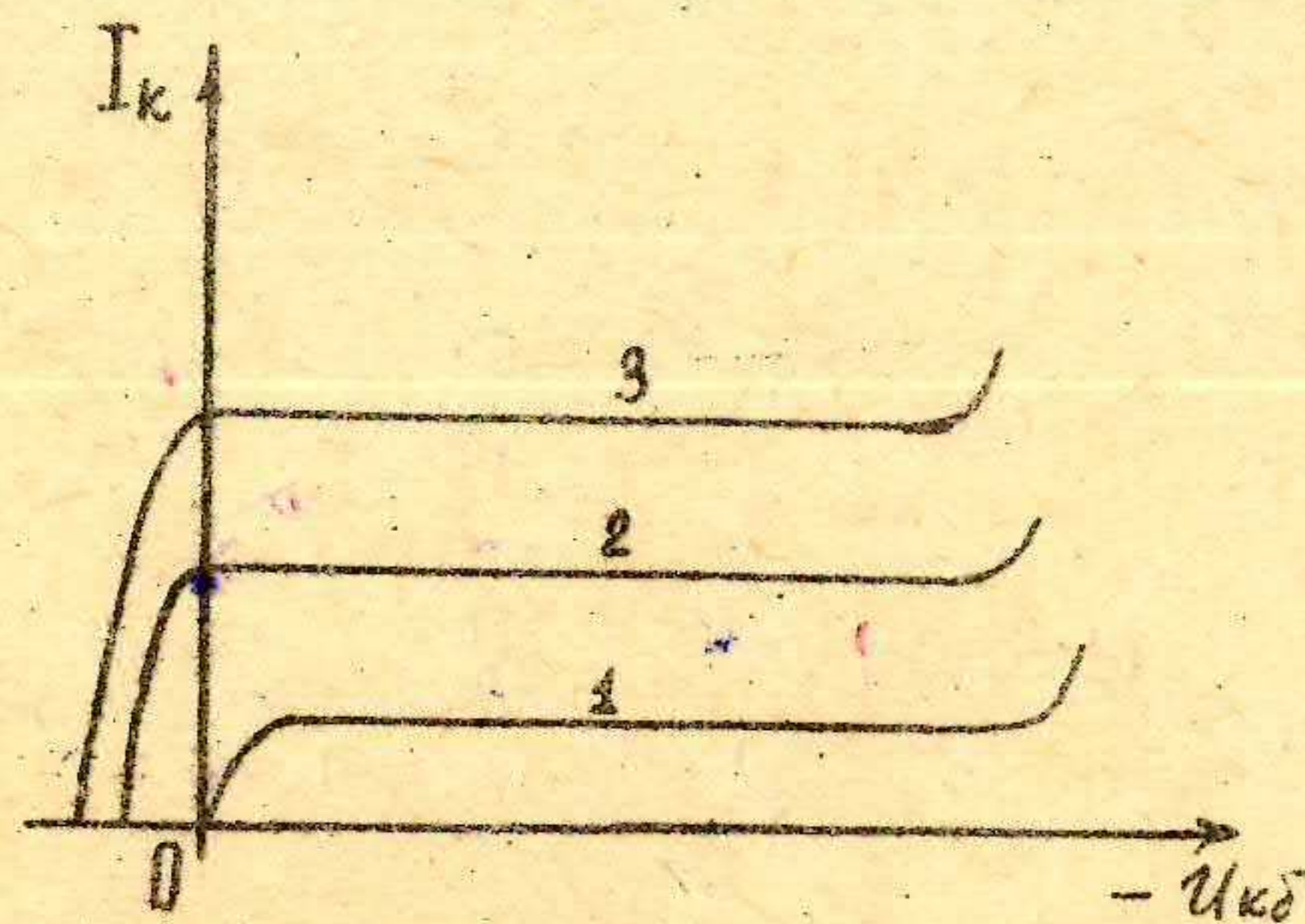


Рис. 3.3

I_k от $U_{кб}$ (см. рис. 3.3). Большой ток может протекать через транзистор и в случае прокола базы, когда эмиттерный и коллекторный переход сомкнутся за счет расширения ООЗ последнего при увеличении $U_{кб}$ (отрицательного объемного заряда).

3.2. Схема с общим эмиттером

На практике довольно часто используются транзисторы, включенные по схеме с общим эмиттером (рис. 3.4.). В этой схеме входным является ток базы, а выходным, как и в предыдущем случае, ток коллектора. В соответствии с определением коэффициента передачи тока для схемы с общим эмиттером будем иметь h_{21} или $B_0 = dI_k / dI_B$, но $I_B = I_3 - I_k$, и, следовательно,

$$B_0 = dI_k / (dI_3 - dI_k) = L_0 / (1 - L_0) \quad (3.4)$$

Схема с общим эмиттером

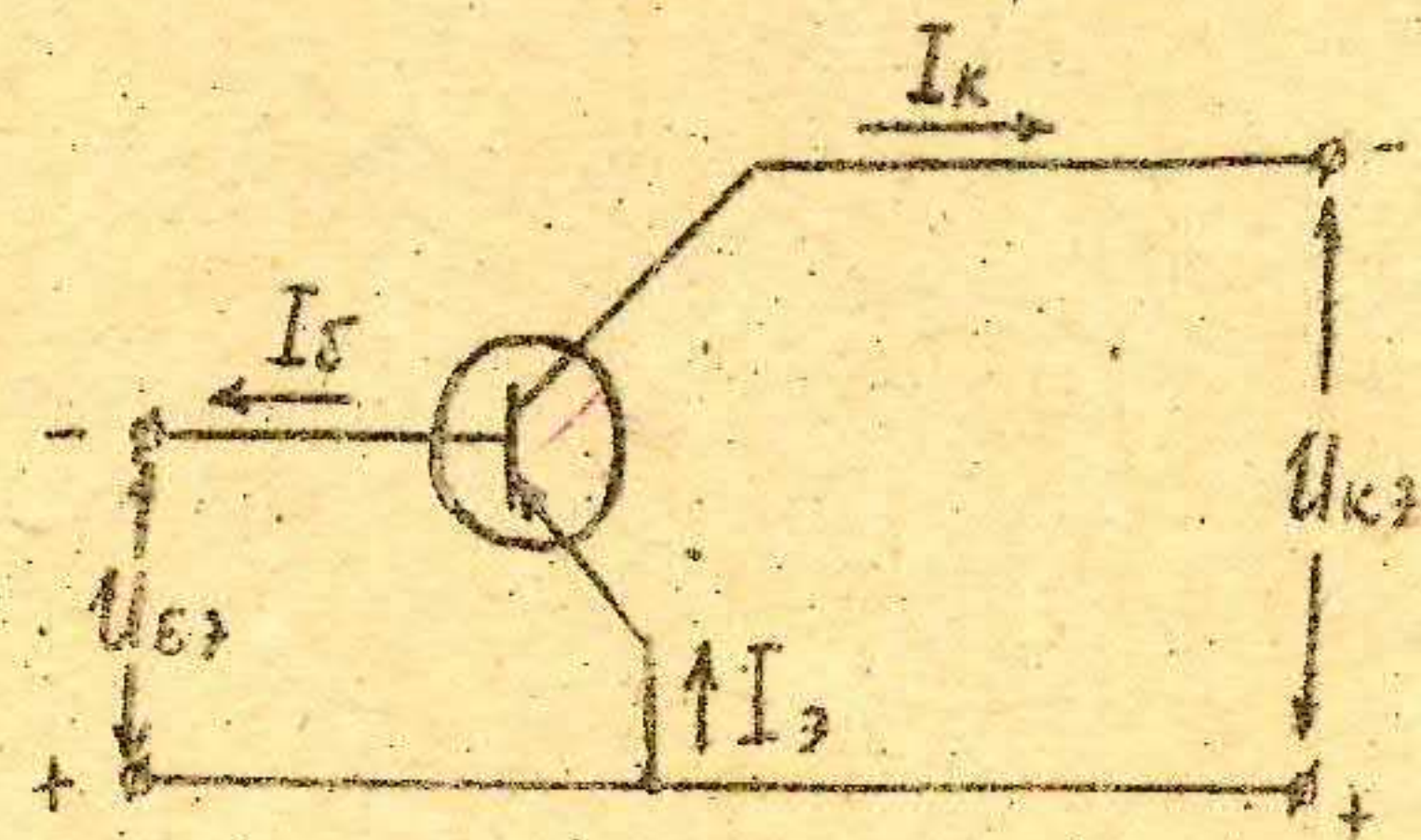


Рис. 3.4

Отсюда видно, что B_0 должен быть значительно больше L_0 . Действительно, при $L_0 = 0.95$ $B_0 = 19$.

Поскольку рассматриваемая схема включения транзистора отличается от схемы с общей базой только тем, что вместо базы заземляется эмиттер, то для описания входных и выходных характеристик можно воспользоваться соотношениями, полученными в предыдущем разделе. Исходя из этого для тока базы с учетом (3.2) можно записать

$$I_B = I_3 - I_k = (1 - L_0) I_3 - I_{кбс} \quad (3.5)$$

Поскольку при выводе (3.3) мы полагали, что $L_0 = \beta_0 = dI_{рк} / dI_{р+с}$, то первая составляющая тока в (3.5) обусловлена электронами, входящими в базу транзистора для компенсации их потерь на рекомбинацию с инжектированными из эмиттера дырками. Вторая составляющая тока связана с электронами, которые выбрасываются в базу обратнорасположенным коллектором, частично компенсируя потери на рекомбинацию. Электронный ток через эмиттер при записи выражений (3.3) и (3.5) не учитывался.

Анализ общего вида входных характеристик, представляющих собой зависимость I_B от $U_{кэ} = U_{кб}$ при фиксированных значениях $U_{кэ}$, проведем на основе выражения (3.5), учитывая, что $U_{кэ} = U_{кб} - U_{кэ}$. Если $U_{кэ} = 0$, то входная характеристика должна изображаться кривой, выходящей из начала координат (рис. 3.5, кривая 1, т.к. при $U_{кэ} = 0$ $U_{кб}$ и $I_{кбс}$ также равны нулю. При $U_{кэ} < 0$ и $U_{кэ} = 0$ коллектор должен быть смещен в запиорном направлении. Тогда при $U_{кэ} = 0$ $I_B = -I_{кбс}$, то есть начало входной характеристики располагается в области отрицательных значений тока (см. рис. 3.5, кривая 2). В целом ход зависимости I_B от $U_{кэ}$ определяется эмиттерным током ($I_3 \sim \exp(eU_{кэ}/kT) - 1$) и по своей форме входные характеристики подобны вольт-амперной характеристике р-п перехода, смещенного в пропускном направлении. Подставляя в (3.3) вместо I_3 сумму $I_k + I_B$, после несложных преобразований получим

$$I_k = B_0 I_B + I_{кэ0}, \quad (3.6)$$

где $I_{кэ0} = I_{кбс} / (1 - L_0)$

Входные характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ

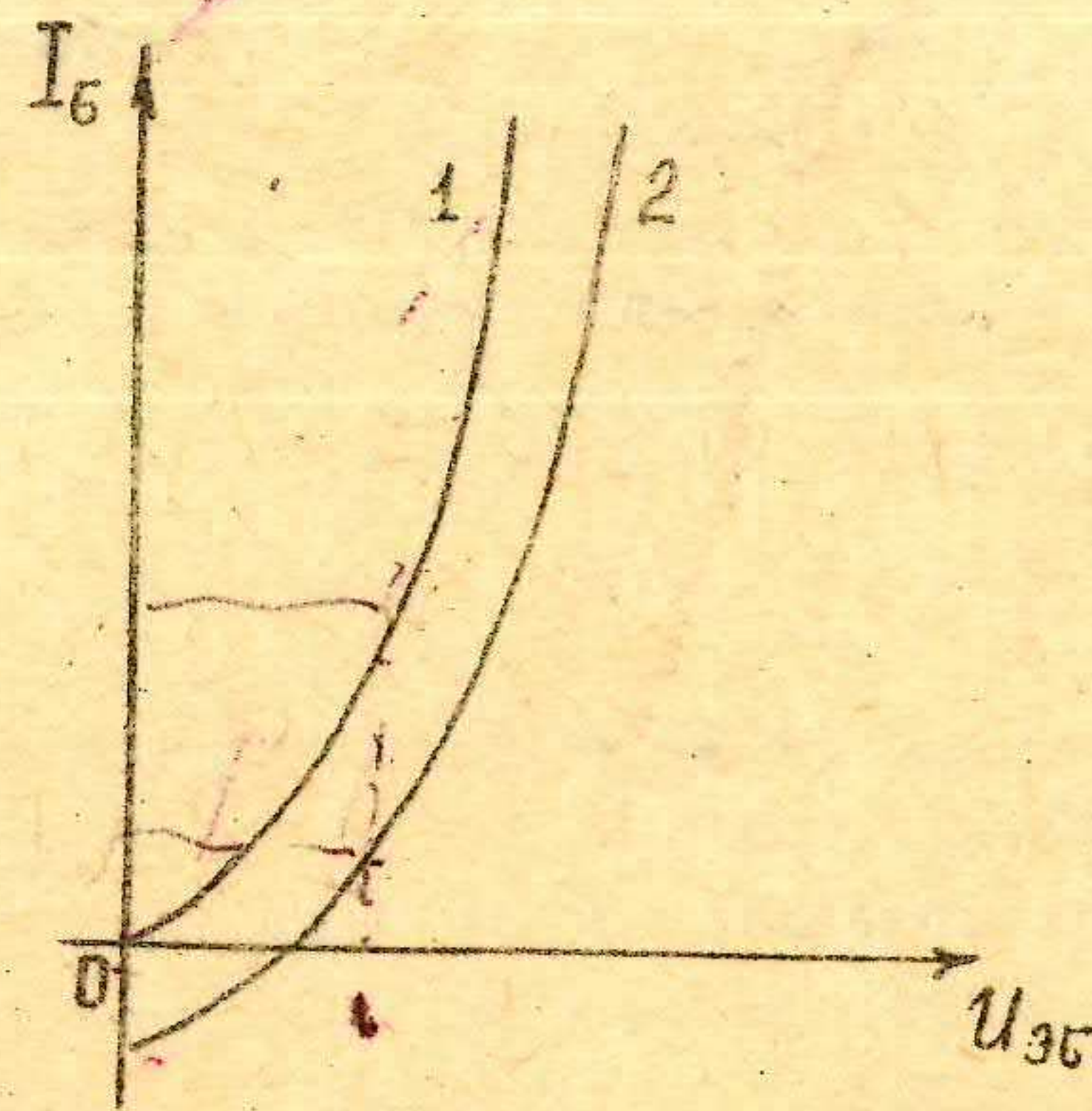


Рис. 3.5

На основе этого выражения можно провести качественный анализ выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 3.6). Прежде всего из (3.6) следует, что при разомкнутом входе ($I_E = 0$) ток через коллекторный переход значительно больше, чем в схеме с общей базой, т.е. $I_{кЭ0} \gg I_{кБ0}$.

Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ

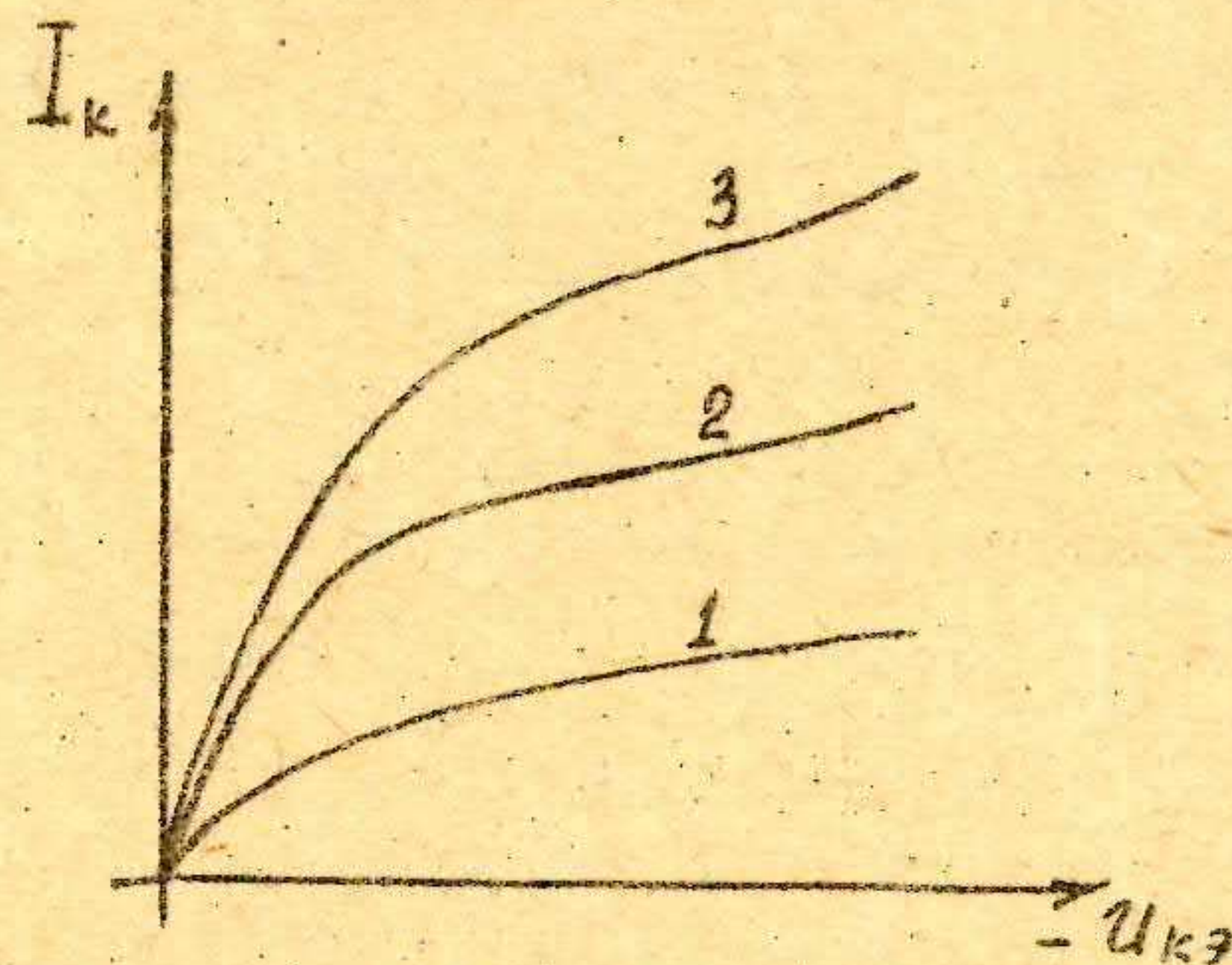


Рис. 3.6

Для поддержания базового тока постоянным при любом $U_{кЭ}$ необходимо зафиксировать значение $U_{ЭБ}$. Но тогда $U_{кЭ} = U_{кБ} - U_{ЭБ}$ может обратиться в нуль только в том случае, если коллекторный переход сместится в пропускном направлении. В этой ситуации и эмиттерный, и коллекторный переходы инжектируют дырки в базу транзистора навстречу друг другу и при $U_{кЭ} = 0$ ток коллектора при любом фиксированном значении I_E принимает нулевое значение (см. рис. 3.6).

При перемещении вдоль выходной характеристики в сторону увеличения тока падение напряжения на коллекторном переходе $U_{кБ}$ в области малых значений $U_{кЭ}$ положительно, затем переходит через нуль, меняет знак на противоположный и непрерывно увеличивается. По мере увеличения $U_{кБ}$ за счет расширения ООЗ коллекторного перехода уменьшается ширина базы транзистора и, следовательно, увеличивается L_0 . Это приводит к существенному росту V_0 (3.4) и $I_{кЭ0}$ (см. 3.6) при увеличении $U_{кЭ}$ (см. рис. 3.6).

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Для наблюдения выходных характеристик транзистора в схеме с общей базой необходимо выполнить следующие операции:

- 1) ручку РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ повернуть в крайнее левое положение;
- 2) переключатель ДИАПАЗОН в положение "0-20 В";
- 3) переключатель ТИП ТРАНЗИСТОРА в положение "р-п-р";
- 4) переключатель ОГРАНИЧИТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ в положение "100 Ом";
- 5) переключатель ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ в положение "22 кОм";
- 6) переключатель СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ - ОТКЛ. РАЗОВЫЙ в положение "Откл.";
- 7) переключатель КОЛИЧЕСТВО СТУПЕНЕК в крайнее левое положение;
- 8) переключатель ПОЛЯРНОСТЬ в положение "+";

- 9) переключатель Ступ. I СЕК. в верхнее положение "100";
 - 10) переключатель МАСШТАБ СТУПЕНЕК в положение "0,5";
 - 11) переключатель ТОК ИЛИ НАПРЯЖЕНИЕ НА ДЕЛЕНИЕ в положение "0,2" в секторе КОЛЛЕКТОР/МА;
 - 12) переключатель НАПРЯЖЕНИЕ НА ДЕЛЕНИЕ в положение "0,5" в секторе КОЛЛЕКТОР I В;
 - 13) переключатель ЭМИТТЕР ЗАЗЕМЛЕН-БАЗА ЗАЗЕМЛЕНА в положение БАЗА ЗАЗЕМЛЕНА ;
 - 14) установить в одну из панелек испытуемый транзистор и переключатель ТРАНЗИСТОР А-ТРАНЗИСТОР В поставить в положение, соответствующее этой панели ;
 - 15) включить тумблер СЕТЬ и прогреть прибор в течение 15 минут ;
 - 16) ручками СМЩЕНИЕ X и Y установить пятно в правом верхнем углу шкалы экрана осциллографической трубки ;
 - 17) переключатель СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ -ОТКЛ. -РАЗОВЫЙ перевести в положение СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ ;
 - 18) плавно вращая ручку РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ подать на коллектор транзистора такое напряжение, чтобы появившаяся на экране характеристика по горизонтали была развернута на всю ширину экрана ;
 - 19) срисовать систему выходных характеристик транзистора вместе с осями координаты ;
 - 20) оценить величину коэффициента передачи тока, если ток эмиттера меняется на 0,5 мА на ступеньку.
- 4.2. Для наблюдения выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером необходимо :
- 1) ручку РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ перевести в положение "0";
 - 2) переключатель СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ -ОТКЛ.- РАЗОВЫЙ поставить в положение ОТКЛ. ;
 - 3) переключатель ЭМИТТЕР ЗАЗЕМЛЕН - БАЗА ЗАЗЕМЛЕНА перевести в положение ЭМИТТЕР ЗАЗЕМЛЕН ;
 - 4) переключатель ПОЛЯРНОСТЬ в положение "-" ;
 - 5) переключатель МАСШТАБ СТУПЕНЕК перевести в положение "0,02" ;
 - 6) переключатель НАПРЯЖЕНИЕ НА ДЕЛЕНИЕ в положение "0,5";

- 7) переключатель СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ-ОТКЛ.-РАЗОВЫЙ поставить в положение СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ ;
 - 8) плавно вращая ручку РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ получить на экране трубки семейство выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером ;
 - 9) срисовать семейство выходных характеристик и рассчитать коэффициент передачи тока для трех значений коллекторного напряжения.
- 4.3. Для наблюдения входных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером необходимо :
- 1) убрать напряжение с коллектора и переключатель СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ поставить в положение ОТКЛ. ;
 - 2) переключатель ТОК ИЛИ НАПРЯЖЕНИЕ НА ДЕЛЕНИЕ поставить в положение ТОК БАЗЫ ИЛИ НАПРЯЖЕНИЕ БАЗОВОГО ИСТОЧНИКА, а переключатель НАПРЯЖЕНИЕ НА ДЕЛЕНИЕ В ПОЛОЖЕНИЕ "0,05" в секторе БАЗА I В ;
 - 3) ручку КОЛИЧЕСТВО СТУПЕНЕК перевести в положение "12" ;
 - 4) переключатель СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ-ОТКЛ.-РАЗОВЫЙ вернуть в положение СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ ;
 - 5) стабилизировать изображения входной характеристики на экране трубки переключателем СТУП/СЕК. ;
 - 6) скопировать входную характеристику вместе с осями координат ;
 - 7) пронаблюдать смещение входной характеристики при подаче небольшого коллекторного напряжения.
- 4.4. Для наблюдения входных характеристик транзистора в схеме с общей базой необходимо:
- 1) снять напряжение с коллектора ;
 - 2) переключатель СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ поставить в положение ОТКЛ. ;
 - 3) переключатель ПОЛЯРНОСТЬ в положение "+" ;
 - 4) переключатель ЭМИТТЕР ЗАЗЕМЛЕН - БАЗА ЗАЗЕМЛЕНА поставить в положение БАЗА ЗАЗЕМЛЕНА ;
 - 5) ручками СМЩЕНИЕ X и Y установить пятно осциллографической трубки в точку пересечений центральной вертикальной линии и второй снизу горизонтальной ;

- 6) переключатель СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ - ОТКЛ. - РАЗОБЫИ вернуть в положение СИГНАЛ НЕПРЕРЫВНЫЙ ;
 7) скопировать входную характеристику.
 После окончания работы выключить ПНХТ (прибор для наблюдения характеристик, транзисторов ПНХТ).

5. ЗАДАНИЕ

- 5.1. Ознакомиться с порядком выполнения работы.
 5.2. Снять семейство выходных характеристик кремниевого транзистора (КТ 361), включенного по схеме с общей базой.
 5.3. Оценить низкочастотное значение коэффициента передачи тока.
 5.4. Снять семейство выходных характеристик того же транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Оценить величину коэффициента передачи тока β (h_{21}) для трех значений коллекторного напряжения и объяснить полученную зависимость.
 5.5. Снять семейство входных характеристик транзистора, включенного по схеме с общей базой.
 5.6. Снять семейство входных характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
 5.7. Снять семейство выходных характеристик транзистора при трех различных температурах. Рассчитать L_0 , V_0 при одном $U_{кб}$ и различной температуре.

6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 6.1. Что такое транзистор ?
 6.2. За счет чего происходит усиление по мощности в схеме с общей базой ?
 6.3. Почему в схеме с общим эмиттером входная ВАХ зависит от коллекторного напряжения ?
 6.4. Что такое режим "оборванной базы" ?

- 6.5. Объясните зависимость V_0 от $U_{кб}$.
 6.6. Объясните изменения выходных ВАХ транзистора с ростом температуры.

7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 7.1. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов. - Томск: Изд-во ТГУ, 1989.
 7.2. Прибор для наблюдения характеристик транзисторов ПНХТ-1 (техническое описание и инструкция по эксплуатации). - М.: Машприборинторг, 1971. - 70 с.
 7.3. Гаман В.И. Изучение статических характеристик биполярного транзистора: Методические указания. - Томск: Изд-во ТГУ, 1989.