

Министерство путей сообщения Российской Федерации



САМАРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Кафедра теоретических основ электротехники,  
автоматики и электроники

**ЗАДАНИЕ  
И  
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению контрольной работы № 1  
по дисциплине**

**"ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ"**

**для студентов заочной формы обучения  
специальности  
210700 "Автоматика, телемеханика и связь  
на железнодорожном транспорте"**

**Составитель: В. И. Прокопьев**

**САМАРА 2001**

УДК 621.38

Задание и методические указания к выполнению контрольной работы № 1 по дисциплине "Физические основы полупроводниковых приборов" для студентов заочной формы обучения спец. 210700 "АТС на ж. д. транспорте". - Самара: СамИИТ. 2001. - 36 с.

Утверждено на заседании кафедры ТОЭАиЭ 3 сентября 2001 г. протокол № 1.

Печатается по решению редакционно-издательского совета института.

В методических указаниях изложены задания к контрольной работе и подробные указания по их выполнению. Основное внимание уделено получению эквивалентных схем ряда электронных приборов на основе кусочно-линейной аппроксимации реальных статических характеристик.

Методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения спец. 210700 "АТС на ж. д. транспорте" и могут быть полезны студентам других электротехнических специальностей.

Составитель: Владимир Ильич Прокопьев

Рецензенты: Яков Никанорович Пугачев.

к. т. н., доцент, СамИИТ

Павел Юрьевич Грачев.

к. т. н., доцент, СамГТУ

Редактор Шимкина И. А.

Подписано в печать 23.10.2001. Формат 60x84 1/16

Бумага писчая. Усл. п.л. 2,25. Тираж 200 экз. Заказ № 108.

© Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Прежде чем приступить к выполнению контрольной работы, студент должен внимательно изучить соответствующие разделы курса, руководствуясь рекомендуемой литературой.

Контрольная работа состоит из двух задач и контрольного вопроса.

Исходные данные заданий на контрольную работу следует выбрать из табл. 1-3 в соответствии с последней и предпоследней цифрами шифра студента. Оформленная контрольная работа должна содержать расчетно-пояснительную записку и необходимые рисунки и схемы. В записке нужно представить исходные данные задания, расчетную часть с соответствующими обоснованиями и список использованной литературы. В процессе расчета каждого параметра приводится формула, затем подставляются числовые значения каждой из величин, полученный результат в принятых единицах измерения округляют до 3-х значащих цифр. Графики статических характеристик должны иметь оси с условными обозначениями откладываемых величин, единицами измерения и масштабами и выполняться на листах координатной бумаги.

Контрольная работа, выполненная не по варианту, не проверяется. Образец оформления титульного листа приведен в приложении 2.

### ЗАДАЧА № 1

1. Определить основные параметры полупроводникового диода и стабилитрона по их статическим характеристикам и электрическим параметрам, приведенным в справочной литературе. Рассчитать диффузионную емкость диода.
2. Выполнить кусочно-линейную аппроксимацию вольт-амперной характеристики диода для нормальной температуры.
3. Привести линейные эквивалентные схемы стабилитрона и диода и рассчитать их параметры.
4. Определить параметры математической модели варикапа, используя справочные сведения и вольт-фарадные характеристики.

Приборы и их рабочие точки выбираются согласно табл. 1 и 2.

Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики некоторых приборов приведены в приложении 1.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧИ № 1

Основные параметры полупроводникового диода: дифференциальное сопротивление -  $r_d$  температурный коэффициент напряжения - ТКН и емкость диода -  $C_d$  имеемая две составляющие: барьерную -  $C_b$  и диффузионную -  $C_{df}$ .

Дифференциальное сопротивление  $r_d$  - это сопротивление диода переменному току низкой частоты при малых изменениях электрического сигнала:

Таблица 1

|                       |       |       |        |        |         |        |       |        |       |       |
|-----------------------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Последняя цифра шифра | 0     | 1     | 2      | 3      | 4       | 5      | 6     | 7      | 8     | 9     |
| Тип прибора           | КД102 | КД103 | КД105Б | КД106А | КД116Б1 | 2Д217А | КД221 | КД104А | МД217 | Д223  |
| $I_0$                 | 50    | 50    | 200    | 1000   | 60      | 1500   | 100   | 10     | 40    | 30    |
| Тип прибора           | Д808  | Д810  | Д811   | Д813   | Д814А   | Д814Б  | Д814Б | Д814Г  | Д814Г | Д814Б |
| $I_{ст}$              | 10    | 5     | 7,5    | 12,5   | 15      | 5      | 7,5   | 10     | 12,5  | 15    |

$I_0$  - прямой ток диода;

$I_{ст}$  - ток, протекающий через стабилизатор в рабочей точке.

Таблица 2

|                           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Предпоследняя цифра шифра | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9       |
| Тип прибора               | КВ102А | КВ104А | КВ102Б | КВ104Б | КВ102В | КВ104В | КВ102Г | КВ104Г | КВ104Д | КВ104Д1 |

$$r_c = \frac{dU_\partial}{dI_\partial} \approx \frac{\Delta U_\partial}{\Delta I_\partial}$$

Оно находится в некоторой рабочей точке, заданной либо током ( $I_\partial$ ), либо напряжением ( $U_\partial$ ).

Определяется дифференциальное сопротивление  $r_\partial$  обычно с помощью графиков вольт-амперных характеристик (ВАХ). Для этого на графике ВАХ диода находится рабочая точка, к кривой в этой точке проводится касательная и затем вычисляется тангенс угла, образованного этой касательной и осью токов.

Пример: определить дифференциальное сопротивление диода  $r_\partial$  в рабочей точке, заданной  $I_\partial = 17,5$  мА (рис. 1).

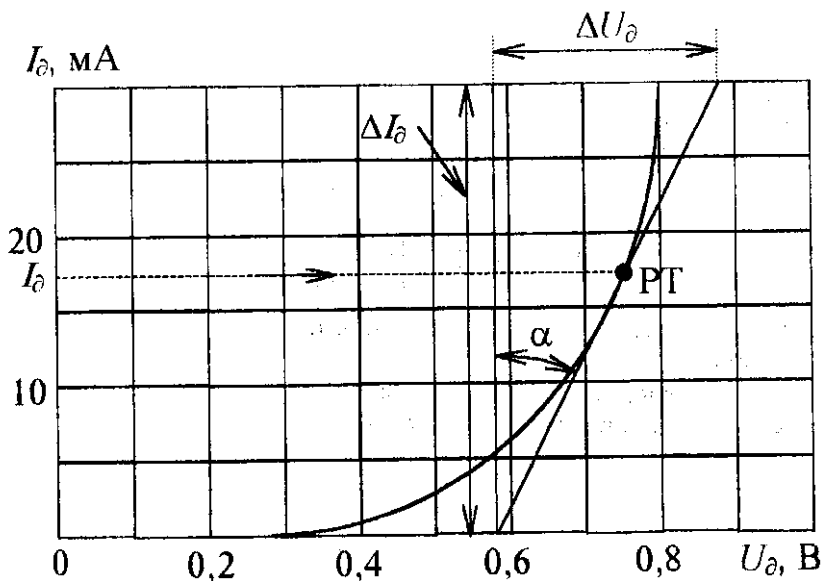


Рис. 1

$$r_\partial \approx \frac{\Delta U_\partial}{\Delta I_\partial} = \frac{0,88 - 0,59}{30 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,29}{30} \cdot 10^3 \approx 10 \text{ Ом.}$$

Приближенное значение величины  $r_\partial$  также можно найти, воспользовавшись аналитическим выражением ВАХ идеального  $p-n$  перехода:

$$I_\partial = I_0 \left[ \exp\left(\frac{U_\partial}{\varphi_T}\right) - 1 \right],$$

где  $I_0$  - ток насыщения диода;

$U_0$  - напряжение, приложенное к диоду;

$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q}$  - температурный потенциал,

где  $k$  - постоянная Больцмана,

$T$  - абсолютная температура,

$q$  - заряд электрона.

Для этого необходимо продифференцировать уравнение ВАХ, определив дифференциальную проводимость  $\sigma_d$ :

$$\sigma_d = \frac{1}{r_d} = \frac{dI_d}{dU_d}.$$

После преобразований получаем:  $r_d = \frac{\varphi_T}{I_d}$ .

Пример: оценить значение дифференциального сопротивления для нормальной температуры  $T = 293$  К.

$$\varphi_T = 25 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 25 \text{ мВ},$$

следовательно, если  $I_d = 17,5$  мА, то  $r_d = \frac{\varphi_T}{I_d} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{17,5 \cdot 10^{-3}} \approx 1,5 \text{ Ом}$ .

Сравните полученное значение  $r_d$  со значением, полученным графическим способом.

Барьерной емкостью диода  $C_B$  называют отношение приращенных заряда на переходе к вызвавшему его приращению напряжения:

$$C_B = \frac{dQ}{dU_d}.$$

Наиболее существенно барьерная емкость проявляется при обратных напряжениях. Числовое значение барьерной емкости с учетом конструктивной емкости диода приводится в справочниках.

Диффузионная емкость  $C_{дф}$  моделирует накопление неравновесного заряда в структуре диода (базе) при протекании прямого тока через диод. Она пропорциональна величине тока и определяется с помощью соотношения:

$$C_{дф} = \frac{dQ_{дф}}{dU_d} = \frac{I_d \cdot \tau}{\varphi_T} = \frac{Q_{дф}}{\varphi_T},$$

где  $Q_{дф}$  - диффузионный заряд;

$\tau$  - время жизни носителей.

Пример: определить диффузионную емкость диода  $C_{дф}$  при

$$I_d = 100 \text{ мА} = 0,1 \text{ А}, \quad \tau = 10^{-5} \text{ с} \quad \text{и} \quad \varphi_T = 25 \cdot 10^{-3} \text{ В}.$$

$$C_{j(\Phi)} = \frac{I_{\delta} \cdot \tau}{\varphi_1} = \frac{0,1 \cdot 10^{-5}}{25 \cdot 10^{-3}} = 4 \cdot 10^{-5} \Phi = 40 \text{ мкФ.}$$

В расчетах при выполнении контрольной работы принять, что среднее эффективное время жизни носителей -  $\tau_{\text{эфф}} \approx 10 \text{ нс} = 10^{-8} \text{ с}$ .

Температурный коэффициент напряжения - ТКН показывает, как изменится прямое падение напряжения на диоде при неизменном протекающем через него токе, если температура окружающей среды изменится на  $1^{\circ}\text{C}$ :

$$\text{ТКН} = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} \text{ в заданной рабочей точке } I_{\delta} = \text{const.}$$

Определяется этот параметр по ВАХ диода.

Пример: определить ТКН диода в рабочей точке, заданной  $I_{\delta} = 42 \text{ мА}$  (рис. 2).

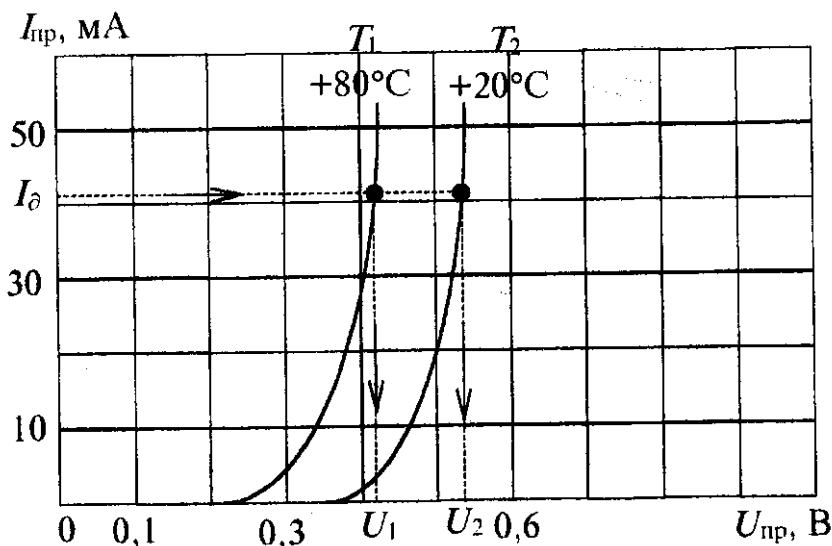


Рис. 2

$$\text{ТКН} \Big|_{I_{\delta} = 42 \text{ мА}} = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} = \frac{0,54 - 0,42}{20 - 80} = \frac{0,12}{-60} = -2 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C.}$$

При наличии ВАХ, приведенных для трех температур  $T_1, T_2, T_3$ , получают три значения ТКН.

Кусочно-линейная аппроксимация - замена реальной ВАХ диода отрезками прямых линий таким образом, чтобы они имели наименьшее отклонение от аппроксимируемых участков реальных ВАХ (рис. 3).

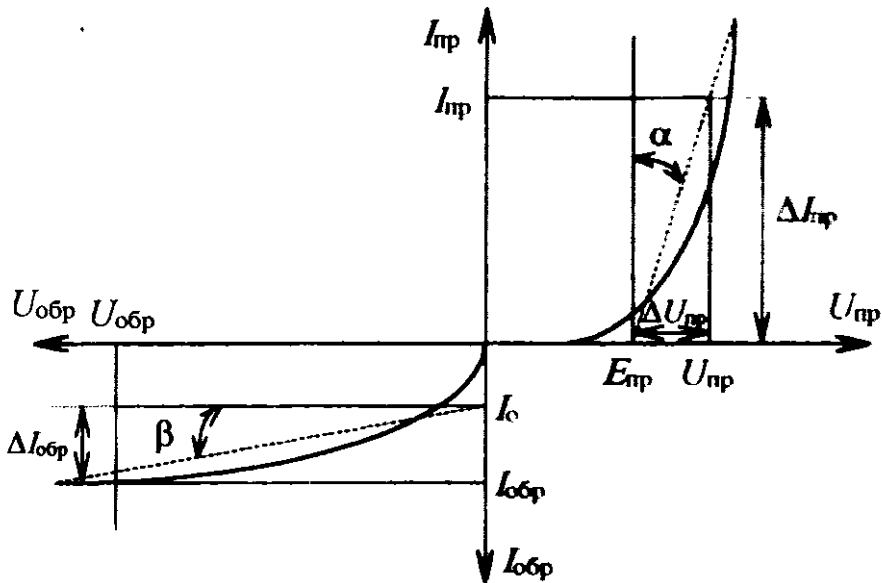


Рис. 3

Полученные графики используются для составления ~~дифференциальных~~ уравнений, связывающих ток и напряжение -

$$\text{для прямой ветви ВАХ: } U_{пр} = E_{пр} + \Delta U_{пр},$$

$$\text{где } \Delta U_{пр} = \Delta I_{пр} \cdot \operatorname{tg} \alpha = I_{пр} \cdot r_d, \text{ или } U_{пр} = E_{пр} + I_{пр} \cdot r_d$$

$$\text{для обратной ветви ВАХ: } I_{обр} = I_0 + \Delta I_{обр},$$

$$\text{где } \Delta I_{обр} = \Delta U_{обр} \cdot \operatorname{tg} \beta = U_{обр} \cdot \operatorname{tg} \beta = \frac{U_{обр}}{r_{добр}},$$

где  $r_{добр}$  - дифференциальное сопротивление обратносмещенного диода.

**Пример:** выполнить линеаризацию ВАХ диода и определить параметры линейной модели диода. ВАХ приведена на рис. 4.

Прямая ветвь ВАХ: из геометрических построений получают:

$$E_{пр} = 0,75 \text{ В,}$$



$$r_{\partial} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} = \frac{0,95 - 0,75}{20 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,2}{20} \cdot 10^3 = 10 \text{ Ом.}$$

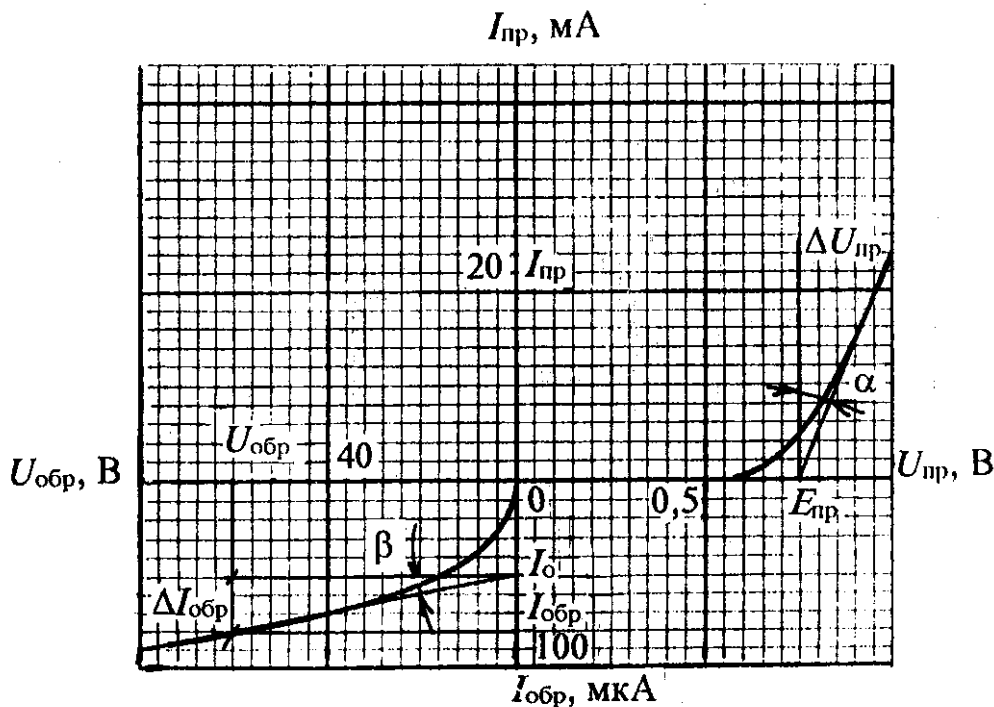


Рис. 4

Выражение, описывающее прямую ветвь ВАХ:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} + r_{\partial} \cdot I_{\text{пр}} = 0,75 + 10 \cdot I_{\text{пр}}.$$

Обратная ветвь ВАХ:  $I_0 = 50 \text{ мкА} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ ,

$$r_{\partial \text{обр}} = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{U_{\text{обр}}}{\Delta I_{\text{обр}}} = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}} - I_0};$$

$$r_{\partial \text{обр}} = \frac{60}{(80 - 50) \cdot 10^{-6}} = 2 \cdot 10^6 = 2 \text{ МОм.}$$

Соответственно выражение обратной ВАХ имеет вид:

$$I_{\text{обр}} = I_0 + \frac{U_{\text{обр}}}{r_{\partial \text{обр}}} = 50 \cdot 10^6 + \frac{U_{\text{обр}}}{2 \cdot 10^6}.$$

Эквивалентная схема, полученная на основе кусочно-линейной аппроксимации, для прямого смещения диода представлена на рис. 5.

На рис. 5 приведено также условное графическое обозначение диода, и показаны положительные направления токов и напряжений соответственно для диода и его модели. С учетом накопления носителей заряда в структуре диода при протекании прямого тока эквивалентная схема диода приобретает вид, представленный на рис. 6.

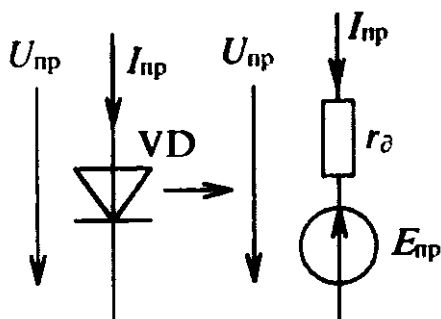


Рис. 5

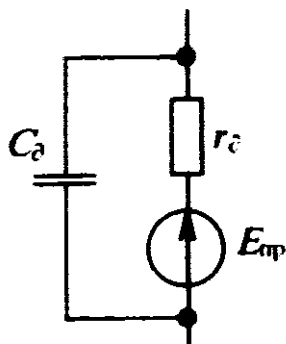


Рис. 6

Эквивалентная схема обратного смещенного диода представлена на рис. 7.

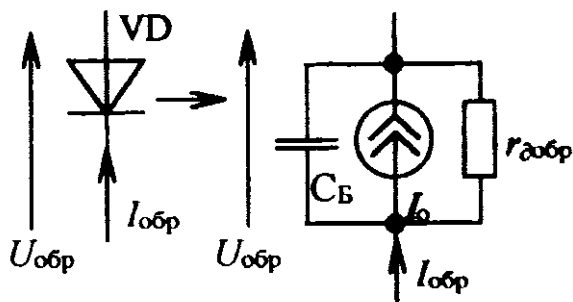


Рис. 7

Аналогично осуществляется линеаризация рабочей ветви ВАХ стабилитрона (рис. 8).

Из геометрических построений получают для рабочего участка ВАХ линейное соотношение:

$$U_{ст.р\text{аб}} = U_{ст.ном} + \Delta U_{ст};$$

$$\Delta U_{ст} = r_{ст} \Delta I_{ст} = r_{ст} I_{ст}.$$

где  $U_{ст.раб.}$  - рабочее напряжение на стабилитроне;

$r_c$  - дифференциальное сопротивление стабилитрона;

$I_{ст.}$  - ток, протекающий через стабилитрон в рабочей точке.

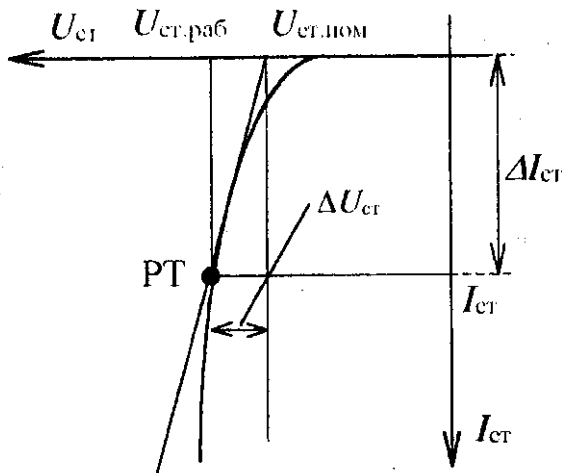


Рис. 8

Эквивалентная схема стабилитрона представлена на рис. 9.

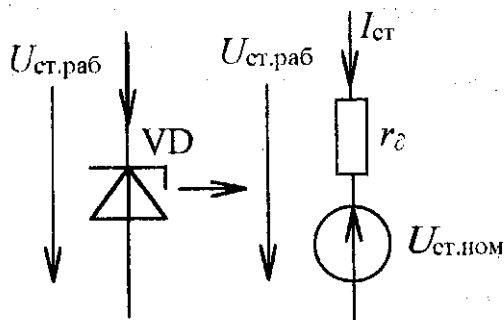


Рис. 9

В случае отсутствия ВАХ стабилитрона нахождение числовых значений параметров линейной модели осуществляется из справочных данных.

Пример: для стабилитрона КС147  $U_{ст.ном} = 4,7 \text{ В} \pm 10\%$  при токе стабилитрона 10 мА и дифференциальном сопротивлении при этом же значении тока не более 56 Ом (реальная величина  $r_d$ , как правило, в несколько раз меньше).

Отсюда числовые значения параметров линейной модели стабилитрона:

$$U_{ст.ном} = 4,7 \text{ В}; \quad r_d = 56 \text{ Ом}.$$

Вольт-фарадная характеристика (ВФХ) варикапов и варакторов (зависимость емкости варикапа  $C_v$  от обратного напряжения  $U_{обр}$ ) в общем виде описывается выражением вида:

$$C_v = C_0 \left( 1 + \frac{U_{обр}}{U_k} \right)^{-\gamma}.$$

где  $C_0$  - емкость варикапа при нулевом обратном напряжении;

$U_k$  - контактная разность потенциалов р-п перехода.

Для кремниевых варикапов значение  $U_k$  составляет порядка 0,7 В и мало зависит от типа перехода. Значение  $\gamma$  лежит в пределах от 1/3 до 1/2 и определяется распределением концентрации примесей в области р-п перехода.

Для многих видов варикапов и варакторов экспериментальные ВФХ, построенные в логарифмических координатах, представляют собой отрезок прямой в достаточно большом диапазоне изменений обратных напряжений. По этим графикам можно легко найти числовые значения параметра математической модели варикапа  $\gamma$ , так как в этом случае приведенное выше выражение может быть упрощено и представлено в виде:

$$C_v = C_0 \left( \frac{U_{обр}}{U_k} \right)^{-\gamma}.$$

В этом случае значение  $\gamma$  определяется как тангенс угла наклона отрезка прямой к оси напряжений.

Величина  $C_0$  определяется подстановкой значения емкости варикапа при некотором заданном обратном напряжении (как правило  $U_{обр} = 4 \text{ В}$ ) в соотношение

$$C_v = C_0 \left( \frac{U_{обр}}{U_k} \right)^{-\gamma}.$$

которое решается относительно  $C_0$ .

Так как в электрических параметрах приводятся минимальное и максимальное значения емкости варикапа при заданном  $U_{обр} = 4 \text{ В}$ , то в расчетах полагают, что  $C_0$  определяется как среднее:

$$C_B = \frac{C_{\text{вmin}} + C_{\text{вmax}}}{2}$$

Пример: найти числовые значения  $C_0$  и  $\gamma$  варикапа КВ110А, ВФХ которого приведена на рис. 10. Емкость варикапа  $C_B$  при  $U_{\text{обр}} = 4$  В лежит в пределах от 12 до 18 пФ.

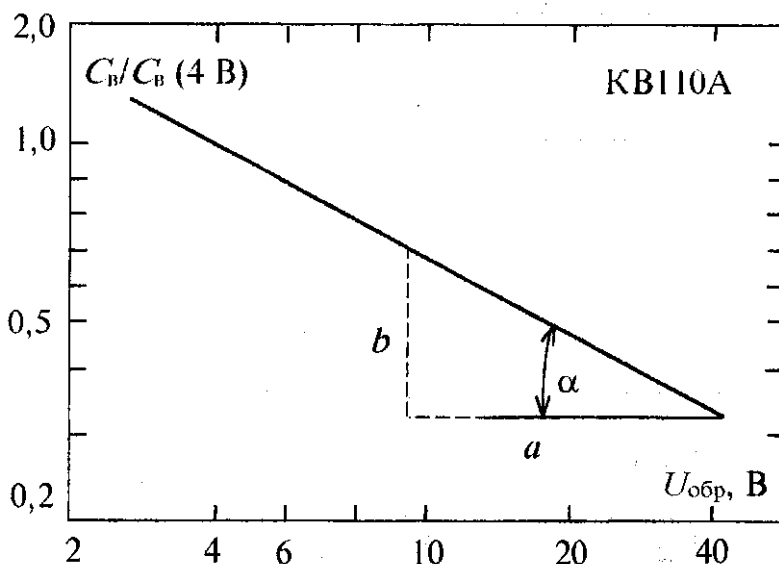


Рис. 10

1. Определяют  $\gamma$ . Для этого на ВФХ строят прямоугольный треугольник со сторонами  $a$  и  $b$ , параллельными осям координат. Измеряют линейкой катеты  $a$  и  $b$  и находят соотношение  $b/a$ .  $b/a = \text{tg } \alpha = \gamma = 1/2$ .

2. Вычисляют усредненное значение емкости варикапа при  $U_{\text{обр}} = 4$  В:

$$C_B = \frac{C_{\text{вmin}} + C_{\text{вmax}}}{2} = \frac{12 + 18}{2} = 15 \text{ пФ.}$$

3. Находят величину  $C_0$ . В расчетах принимают  $U_K = 0,7$  В:

$$C_0 = C_B \left( \frac{U_{\text{обр}}}{U_K} \right)^\gamma = 15 \left( \frac{4}{0,7} \right)^{1/2} = 36 \text{ пФ.}$$

Выражение ВФХ варикапа КВ110А соответственно имеет вид:

$$C_B = C_0 \left( \frac{U_{\text{обр}}}{U_K} \right)^{-\gamma} = 36 \left( \frac{U_{\text{обр}}}{0,7} \right)^{-1/2}$$

Таблица 3

|                           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Предпоследняя цифра шифра | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| Тип прибора               | КТ355  | КТ355  | КТ315Б | КТ349  | КТ349  | КТ349  | КТ342  | КТ342А | КТ342А | КТ349  |
| $I_K^0$ , мА              | 10     | 8      | 20     | 15     | 5      | 10     | 10     | 20     | 40     | 15     |
| $U_{кз}^0$ , В            | 5      | 8      | 10     | 11     | 10     | 5      | 5      | 3      | 4      | 8      |
| Тип прибора               | КТ302А | КТ302А | КТ302А | КТ302Б | КТ302Б | КТ302Б | КТ302Б | КТ302В | КТ302В | КТ302В |
| $I_C^0$ , мА              | 4      | 5      | 8      | 6      | 5      | 15     | 22     | 15     | 22     | 5      |
| $U_{сн}^0$ , В            | 5      | 8      | 10     | 10     | 15     | 8      | 10     | 10     | 12     | 15     |

$I_K^0$  - ток покоя коллектора;

$U_{кз}^0$  - напряжение покоя между коллектором и эмиттером;

$I_C^0$  - ток стока покоя;

$U_{сн}^0$  - напряжение покоя между стоком и истоком.

## ЗАДАЧА № 2

1. Определить  $h$ -параметры биполярных транзисторов, используя их статические характеристики и электрические параметры.
2. Рассчитать физические параметры транзисторов и привести Т-образные эквивалентные схемы транзисторов в физических параметрах.
3. Определить дифференциальные параметры полевых транзисторов и показать их эквивалентные схемы.

Приборы и рабочие точки заданы в табл. 3.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАЧЕ № 2

Одной из формальных линейных систем параметров, описывающих биполярный транзистор как четырехполюсник, являются  $h$ -параметры. Эти параметры характеризуют поведение прибора на внешних зажимах, но не раскрывают его внутреннего содержания, они являются дифференциальными параметрами и определяются в некоторой заданной рабочей точке. В качестве независимых сигналов в этой системе используют входной ток  $\Delta I_1$  и выходное напряжение  $\Delta U_2$ , а зависимые сигналы - входное напряжение  $\Delta U_1$  и выходной ток  $\Delta I_2$  - находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$

Физический смысл  $h$ -параметров:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad \text{- входное сопротивление транзистора;}$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad \text{- коэффициент прямой передачи тока;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const}} \quad \text{- коэффициент обратной связи (передачи с выхода на вход) по напряжению;}$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const}} \quad \text{- выходная проводимость транзистора.}$$

Параметры  $h_{11}$ ,  $h_{21}$  определяются в режиме короткого замыкания по переменному напряжению на выходных зажимах, т. е. при  $\Delta U_2 = 0$ .

Параметры  $h_{12}$ ,  $h_{22}$  определяются в режиме холостого хода на входе, т. е.  $\Delta I_1 = 0$ .

Для описания свойств полевых (униполярных) транзисторов и вакуумных электронных приборов используется следующая система дифференциальных параметров.

$$S = g_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad - \text{крутизна проходной характеристики.}$$

Этот параметр определяется в режиме короткого замыкания на выходе, т. е.  $\Delta U_2 = 0$ .

$$r_i = \frac{1}{g_{22}} = \left. \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} \right|_{U_1 = \text{const}} \quad - \text{внутреннее (выходное) сопротивление.}$$

Данный параметр определяется в режиме короткого замыкания на входе, т. е.  $\Delta U_1 = 0$ .

$$\mu = \left. \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} \right|_{I_2 = \text{const}} \quad - \text{статический коэффициент усиления.}$$

Данный параметр определяется в режиме холостого хода на выходе, т. е.  $\Delta I_2 = 0$ .

Все приведенные параметры связаны соотношением:  $\mu = S \cdot r_i$ .

Усредненные значения дифференциальных параметров электронных приборов приводятся в справочниках, либо определяются экспериментально или графически. Причем для нахождения параметров биполярных транзисторов необходимо иметь семейства входных и выходных характеристик, а для полевых транзисторов - семейства проходных и выходных характеристик.

#### Алгоритм графического нахождения параметров приборов:

1. На семействах характеристик выбранного типа прибора находят положение рабочей точки, которое задается соответствующими значениями постоянных токов и напряжений.
2. Выполняют необходимые геометрические построения и находят приращения двух величин при постоянной третьей (постоянном параметре). Для этого через рабочую точку проводят линию, соответствующую заданному значению той величины (параметра), которую необходимо поддерживать постоянной. Такой линией может быть линия, проходящая через рабочую точку параллельно оси токов, напряжений, либо одна из характеристик. Перемещаясь вдоль линии постоянной величины в окрестности рабочей точки находят приращения двух других величин. При этом участки нужно выбирать такой длины, чтобы в первом приближении можно было заменить реальные вольт-амперные характеристики отрезками прямых линий, т. е. должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &\ll U_1, & \Delta h &\ll h; \\ \Delta U_2 &\ll U_2, & \Delta h &\ll h. \end{aligned}$$



3. Подставив полученные числовые значения приращений токов и напряжений в соответствующие выражения, определяют значения дифференциальных параметров приборов в заданной рабочей точке.

**Пример.** Определить  $h$ -параметры транзистора КТ315А в схеме с общим эмиттером в рабочей точке, заданной:

$$U_{кэ}^0 = 10 \text{ В. } I_{к}^0 = 20 \text{ мА.}$$

На семействе выходных ВАХ (рис. 11) находят положение рабочей точки и определяют ток базы покоя -  $I_{б}^0 = 0,2 \text{ мА}$ .

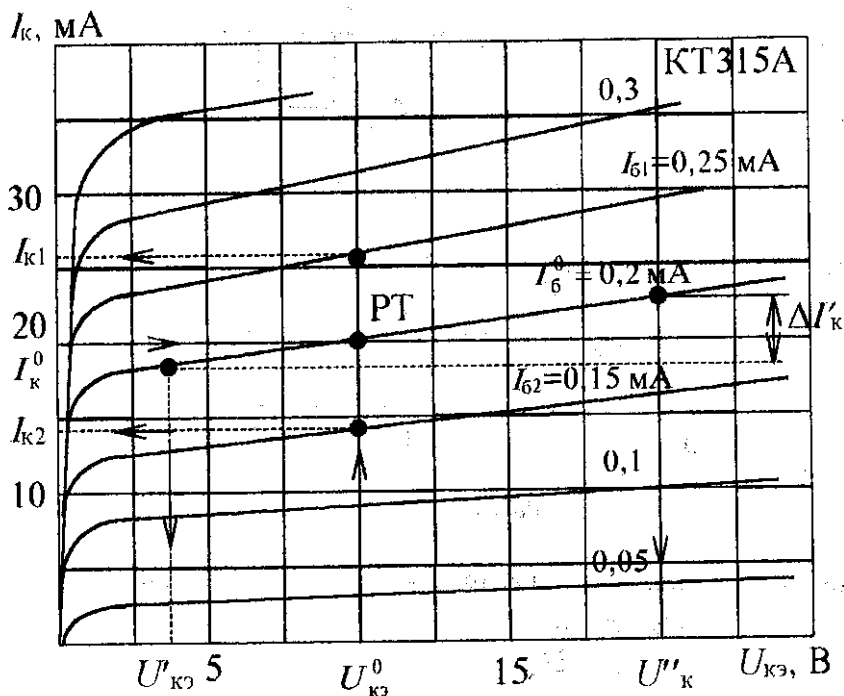


Рис. 11

Переносят рабочую точку на семейство входных ВАХ (рис. 12).

**Примечание:** так как семейство входных ВАХ имеет всего две характеристики, то полагают, что в активном режиме работы транзистора семейство сливается в одну характеристику, полученную при выходном напряжении  $U_{кэ}^0 = 5 \text{ В}$ .

На выходных характеристиках выполняют построения в соответствии с приведенным алгоритмом и находят приращения токов базы и коллектора при неизменном выходном напряжении:

$$\Delta I_{б} = I_{б1} - I_{б2} = 0,25 - 0,15 = 0,1 \text{ мА;}$$

$$\Delta I_{к} = I_{к1} - I_{к2} = 26 - 14,0 = 12,0 \text{ мА,}$$

отсюда: 
$$h_{21s} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} \right|_{U_{кз}=10 \text{ В}} = \frac{12,0}{0,1} = 120.$$

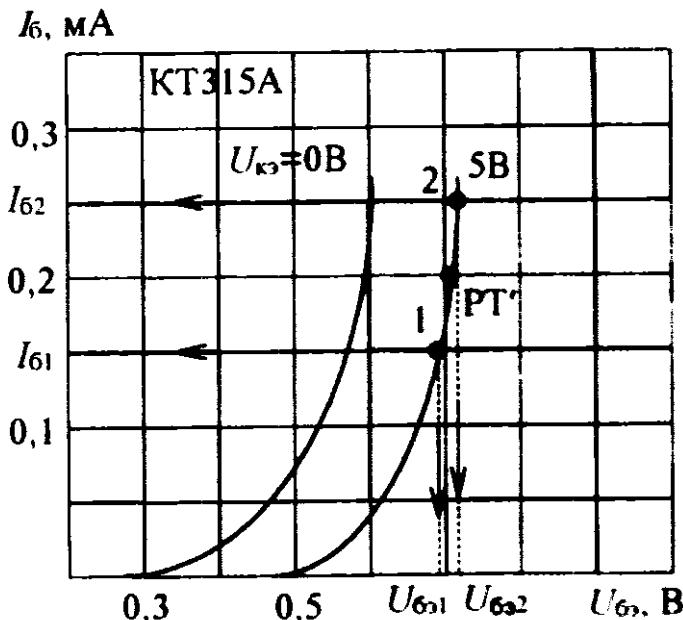


Рис. 12

Оставляя неизменным входной ток  $I_6 = I_6^0 = 0,2 \text{ мА}$ , задают приращение выходного напряжения:

$$\Delta U_{кз} = U_{кз}'' - U_{кз}' = 20 - 3,75 = 16,25 \text{ В}$$

и находят приращение тока коллектора, проследив концы выбранного участка выходной характеристики на ось токов:

$$\Delta I_k' = 23 - 17,0 = 6,0 \text{ мА},$$

отсюда: 
$$h_{22s} = \left. \frac{\Delta I_k'}{\Delta U_{кз}} \right|_{I_6=0,2 \text{ мА}} = \frac{6,0 \cdot 10^{-3}}{16,25} = 36,9 \cdot 10^{-5} \text{ 1/Ом}.$$

На семействе входных ВАХ, перемещаясь по характеристике, заданной  $U_{кз} = 5 \text{ В}$ , в окрестности рабочей точки определяют приращение входного напряжения:  $\Delta U_{6s} = U_{6s2} - U_{6s1} = 0,72 - 0,69 = 0,03 \text{ В}$

и входного тока:  $\Delta I_6 = I_{62} - I_{61} = 0,25 - 0,15 = 0,1 \text{ мА}.$

соответственно: 
$$h_{113} = \frac{\Delta U_{63}}{\Delta I_6} \Big|_{U_{н}^0 = 10 \text{ В}} = \frac{0,03}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 300 \text{ Ом}.$$

Параметр  $h_{123}$  на данном семействе входных характеристик определить нельзя, так как не приведены характеристики при разных выходных напряжениях. В этом случае для определения значения параметра  $h_{123}$  можно поступить следующим образом: выписывают из справочника значение постоянной времени обратной связи  $\tau_{oc}$  и рассчитывают статическое сопротивление базы барьерной емкости коллекторного перехода с помощью соотношения:  $r_6 = \frac{2\tau_{oc}}{C_k}$ , где  $C_k$  - максимальное значение барьерной емкости коллекторного перехода.

Для транзистора КТ315А  $\tau_{oc} \leq 300 \cdot 10^{-12} \text{ с}; \quad C_k \leq 7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$

отсюда: 
$$r_6 \approx \frac{2\tau_{oc}}{C_k} = \frac{2 \cdot 300 \cdot 10^{-12}}{7 \cdot 10^{-12}} = 86 \text{ Ом}.$$

Затем, используя найденные значения  $h$ -параметров ( $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ ), вычисляют величину  $h_{123}$  и остальные физические параметры с помощью соотношений:

$$r_3 = \frac{h_{113} - r_6}{h_{213} + 1}; \quad r_k = \frac{h_{213} + 1}{h_{223}};$$

$$\alpha = \frac{h_{213}}{h_{213} + 1}; \quad h_{123} = \frac{r_3}{r_k(1 - \alpha)}.$$

Расчет параметров полевых транзисторов осуществляется аналогично.

**Пример:** найти дифференциальные параметры полевого транзистора КП302А в рабочей точке, заданной:

$$I_c^0 = 11,1 \text{ мА} \text{ и } U_{си}^0 = 11,25 \text{ В}.$$

На выходных характеристиках (рис. 13) определяют положение рабочей точки и в соответствии с алгоритмом выполняют геометрические построения: для нахождения параметра  $S$  через рабочую точку проводят линию, параллельную оси токов (линия постоянного выходного напряжения -  $U_{си}^0 = 11,25 \text{ В}$ ), пересекающую две соседние выходные характеристики. Проецируют точки пересечения на ось токов и находят приращение тока стока:

$$\Delta I_c = I_{c1} - I_{c2} = 15,2 - 5,2 = 10,0 \text{ мА}$$

и соответствующее данному изменению тока приращение напряжения затвор-исток:

$$\Delta U_{зи} = U_{зи1} - U_{зи2} = -1 - (-2) = 1 \text{ В}.$$

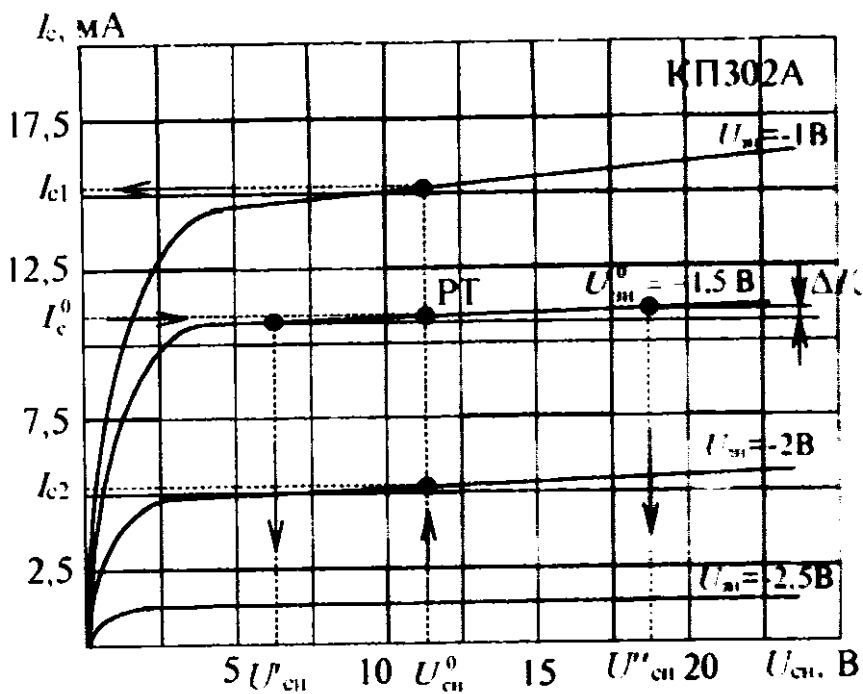


Рис. 13

$$\text{Отсюда: } S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{\text{ш}}} \right|_{U_{\text{в}} = \text{const}} = \frac{10.0}{1} \Big|_{U_{\text{в}} = 1.25 \text{ В}} = 10.0 \text{ мА/В.}$$

Внутреннее сопротивление находят, проектируя концы участка выходной характеристики в окрестности рабочей точки на ось, получают:

$$\Delta I_c' = 0,37 \text{ мА};$$

$$\Delta U_{\text{сш}} = U_{\text{сш}}' - U_{\text{сш}} = 18,7 - 6,2 = 12,5 \text{ В.}$$

Величина выходного сопротивления:

$$r_i = \left. \frac{\Delta U_{\text{сш}}}{\Delta I_c'} \right|_{U_{\text{в}} = \text{const}} = \frac{12,5}{0,37 \cdot 10^{-3}} \Big|_{U_{\text{в}} = 1,5 \text{ В}} = 33,8 \text{ кОм.}$$

Коэффициент усиления обычно определяется расчетным путем:

$$\mu = S \cdot r_i = 10,0 \cdot 10^{-3} \cdot 33,8 \cdot 10^3 = 338.$$

Полученные числовые значения всех параметров нужно сравнить с усредненными числовыми значениями параметров, приводимых в справочных данных и сделать выводы.

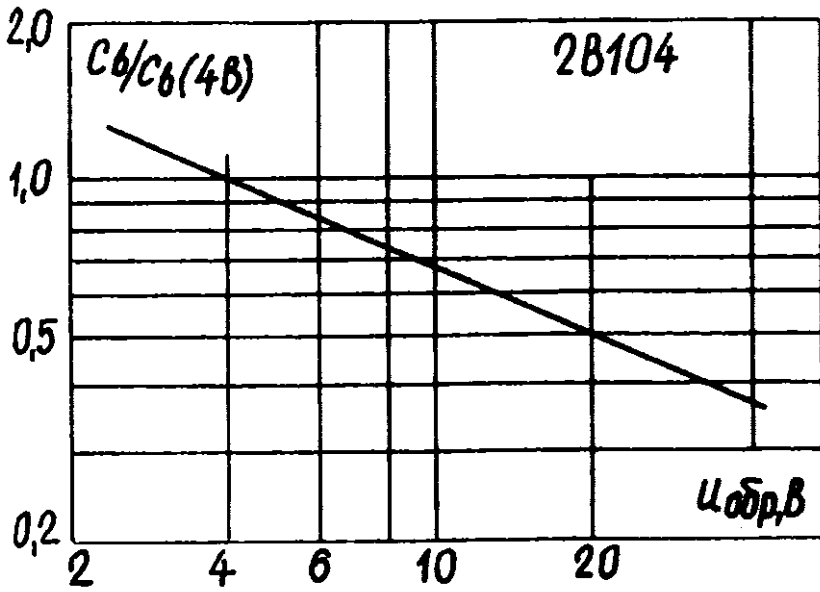
## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Вопрос, на который нужно ответить письменно, определяется по последней цифре шифра студента.

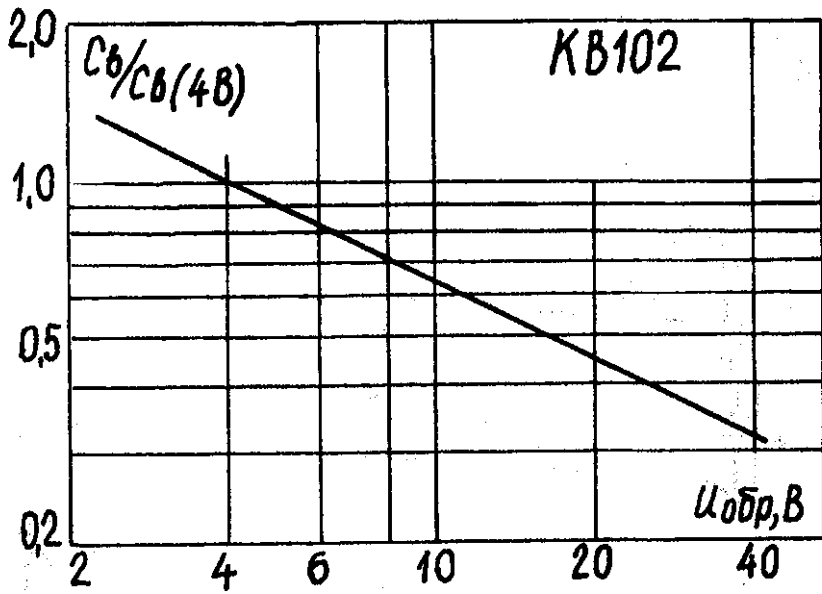
1. Особенности фотодиодов, светодиодов и полупроводниковых лазеров, применяемых в волоконнооптических линиях связи.
2. Кратко опишите методы получения монокристаллов полупроводников, укажите преимущества и недостатки этих методов.
3. Опишите основные этапы планарной технологии изготовления полупроводниковых приборов.
4. Технология изготовления и устройство гибридных интегральных схем (ИС).
5. Основные характеристики и параметры цифровых ИС.
6. Особенности схемотехники базового элемента ТТЛШ.
7. Особенности цифровых ИС на КМОП структурах.
8. Дайте классификацию аналоговых ИС по функциональному признаку. Область применения аналоговых интегральных схем.
9. Тиристоры. Назначение, принцип работы тринистора.
10. Кратко опишите принцип работы фотодиодов и светоизлучающих диодов.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

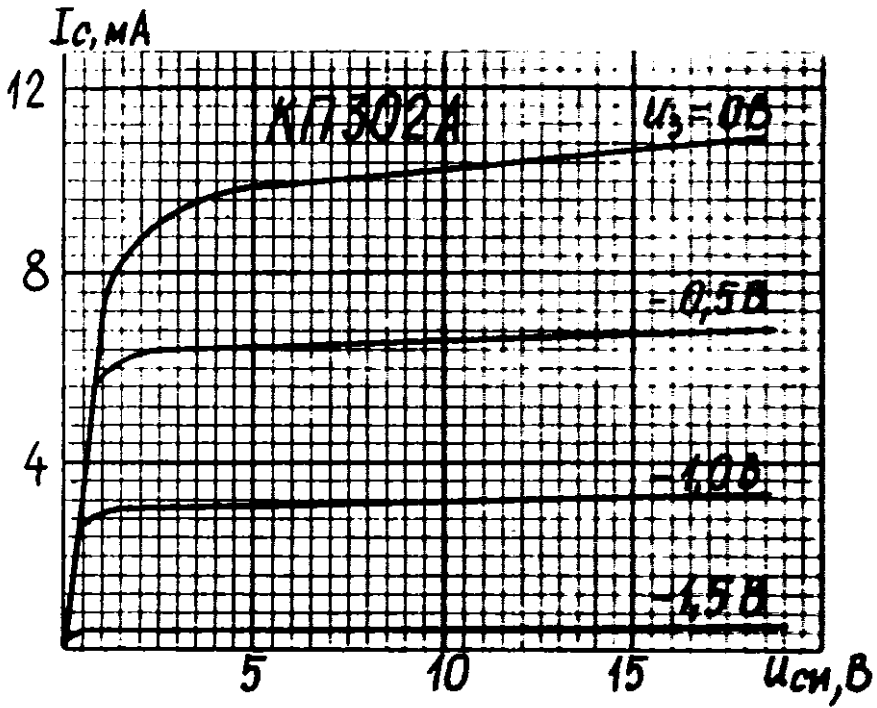
1. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. - СПб.: Изд-во "Лань", 2001. - 480 с.
2. Батушев В. А. Электронные приборы. - М.: ВШ, 1980. - 383 с.
3. Либерман Ф. Я. Электроника на железнодорожном транспорте. - М.: Транспорт, 1987. - 287 с.
4. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. - М.: Сов. Радио, 1980. - 424 с.
5. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. - М.: Мир, 1989. - 630 с.
6. Полупроводниковые приборы. Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник/Под ред. Н. Н. Горюнова. - М.: Энергоиздат, 1982. - 744 с.
7. Хрулев А. К., Черепанов В. П., Савельев Ю. Н. Диоды и их зарубежные аналоги: Справочник. В 3-х т. - М.: ИП РадиоСофт, 2001. - Т. 1. - 640 с. - Т. 2. - 640 с. - Т. 3. - 704 с.
8. Петухов В. М. Маломощные транзисторы и их зарубежные аналоги: Справочник. Т. 1. - М.: КУБК-а, 1997. - 688 с.
9. Петухов В. М. Полевые и высокочастотные биполярные транзисторы средней и большой мощности и их зарубежные аналоги: Справочник. Т. 3. - М.: КУБК-а, 1997. - 672 с.



Вольт-фарадная характеристика конденсатора 2B104

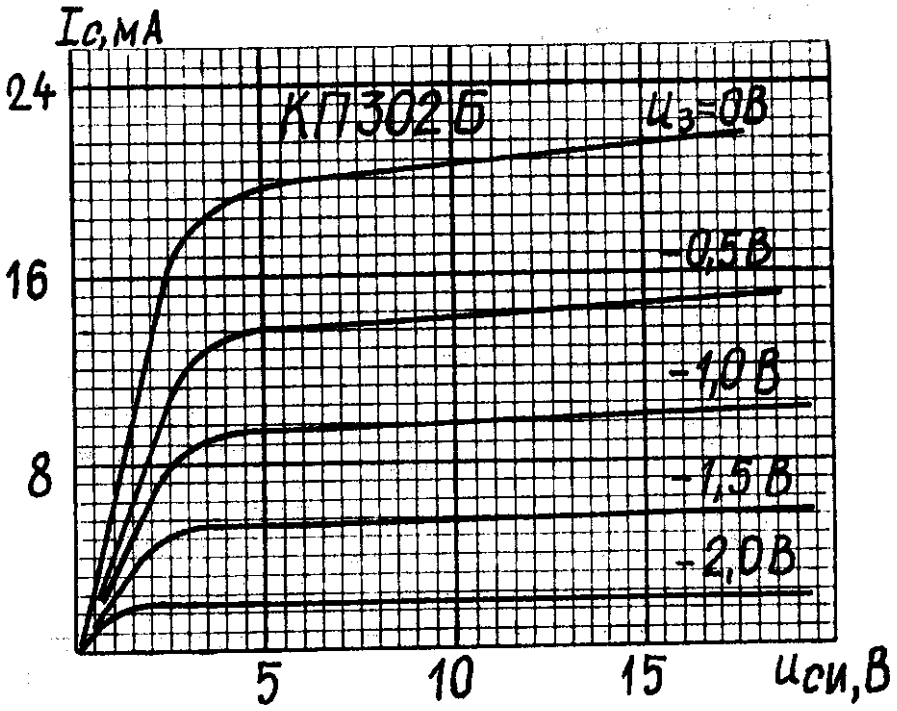


Вольт-фардная характеристика варикапа KV102

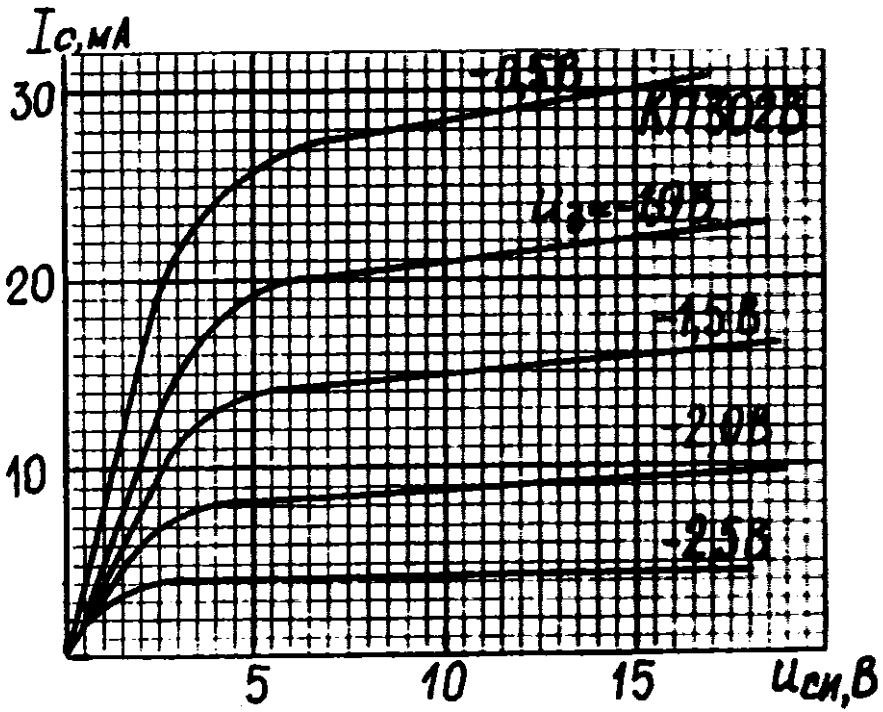


Выходные характеристики транзистора КП7302А

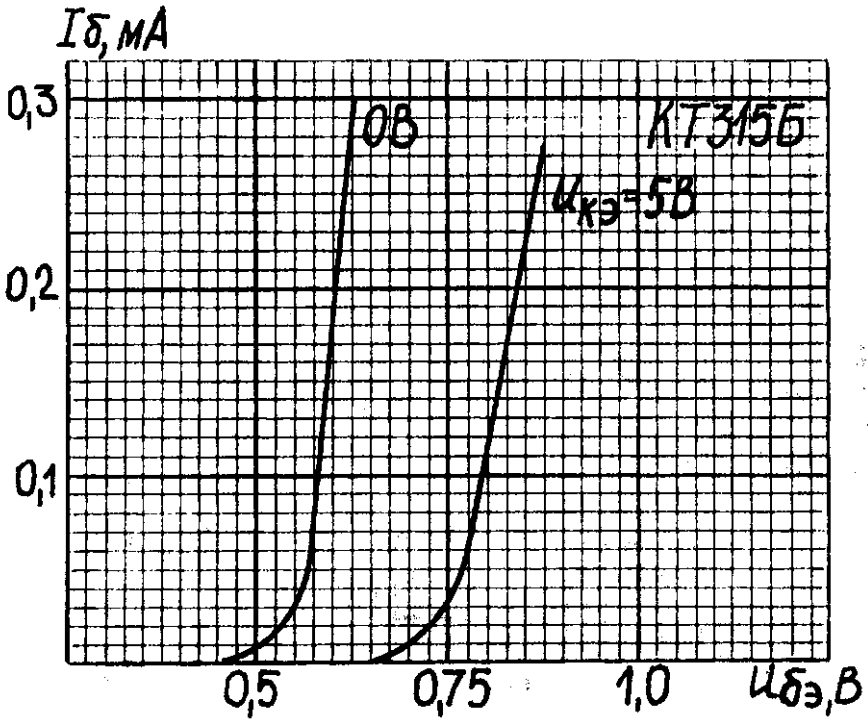




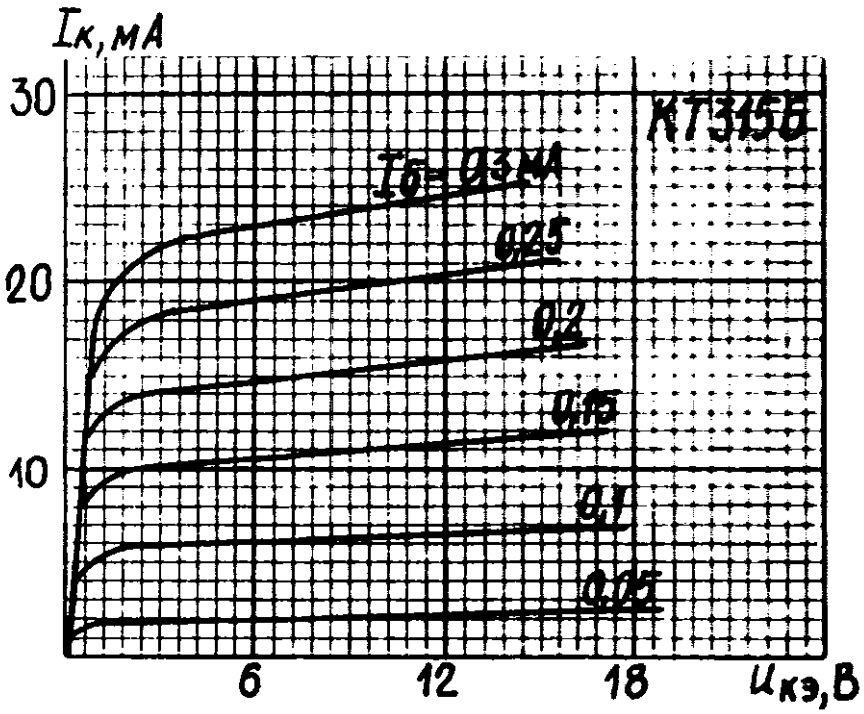
Выходные характеристики транзистора КП302Б



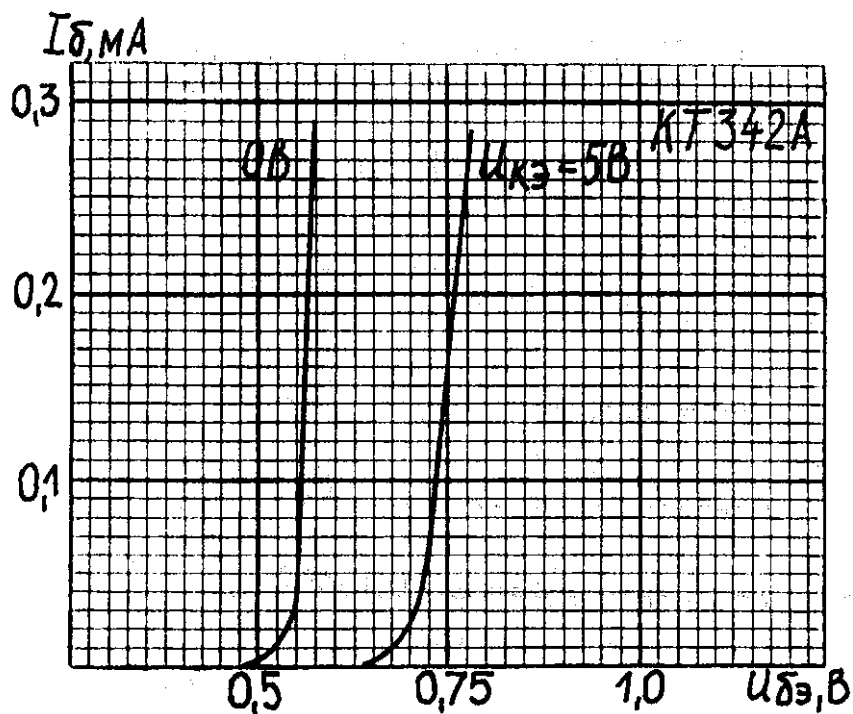
Выходные характеристики транзистора КП302В



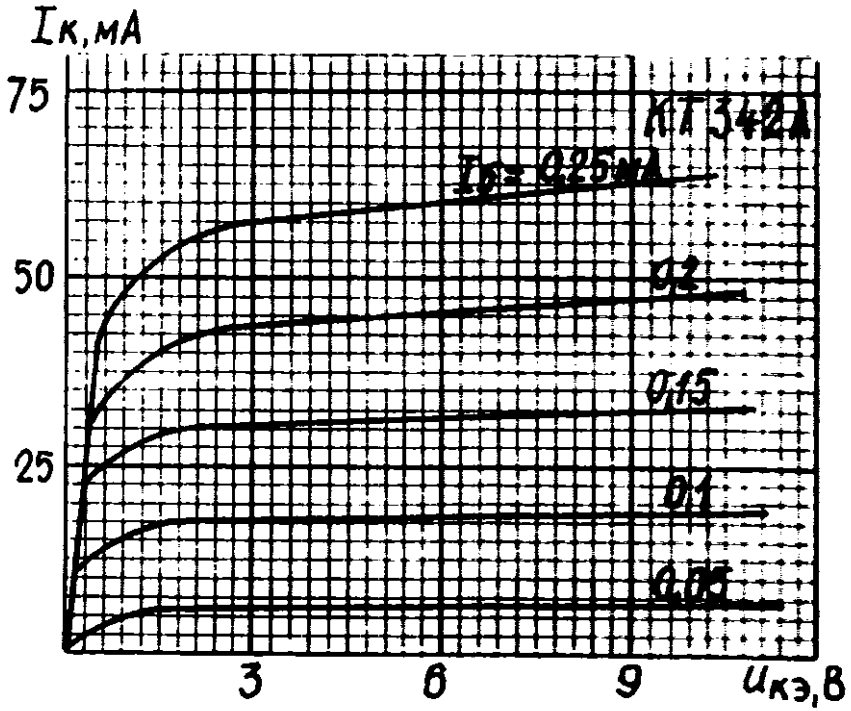
Входные характеристики транзистора КТ315Б



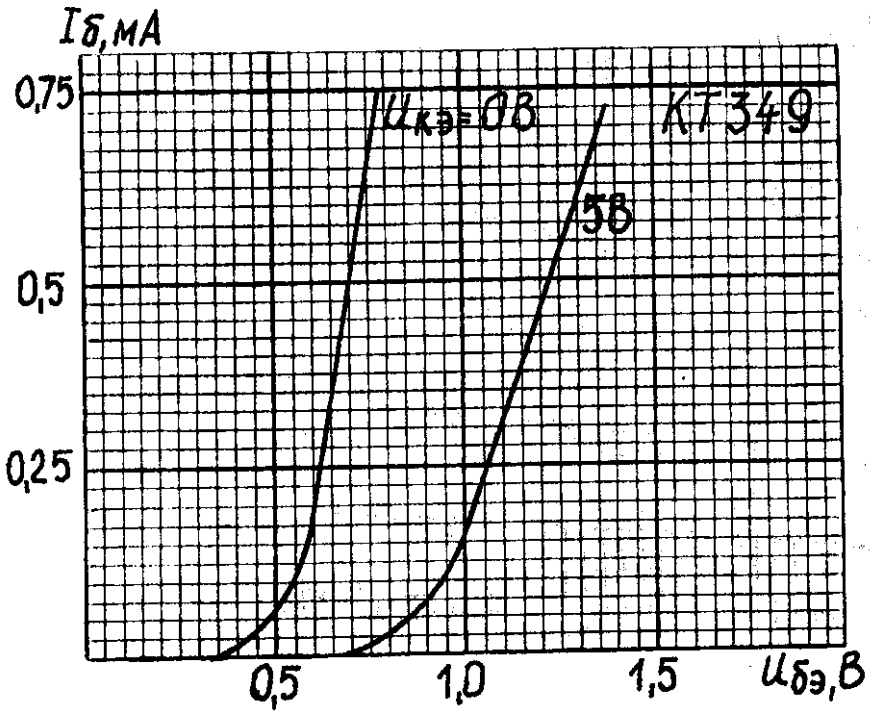
Выходные характеристики транзистора КТ315Б



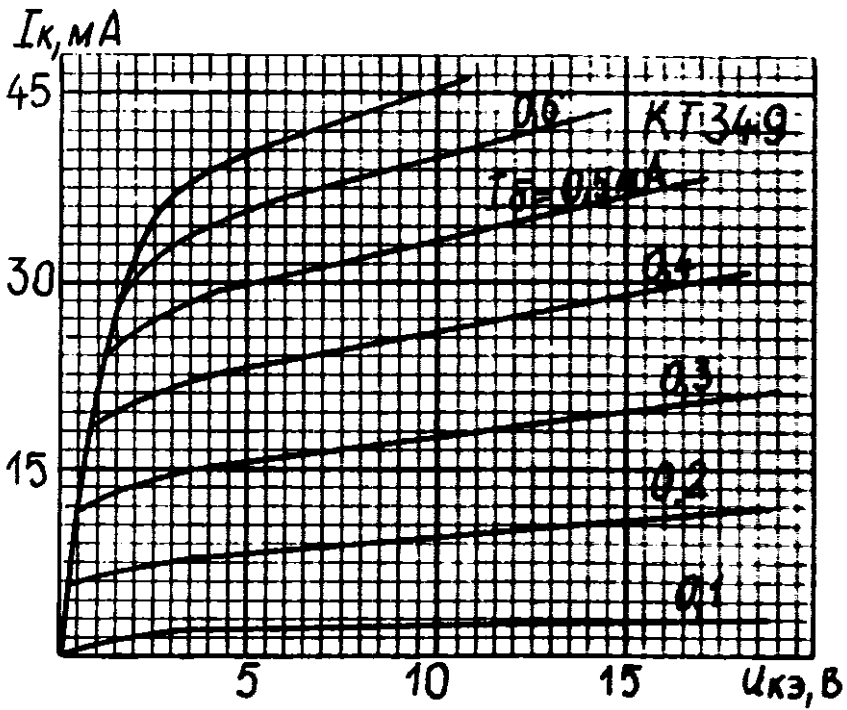
Входные характеристики транзистора КТ342А



Выходные характеристики транзистора КТ342А

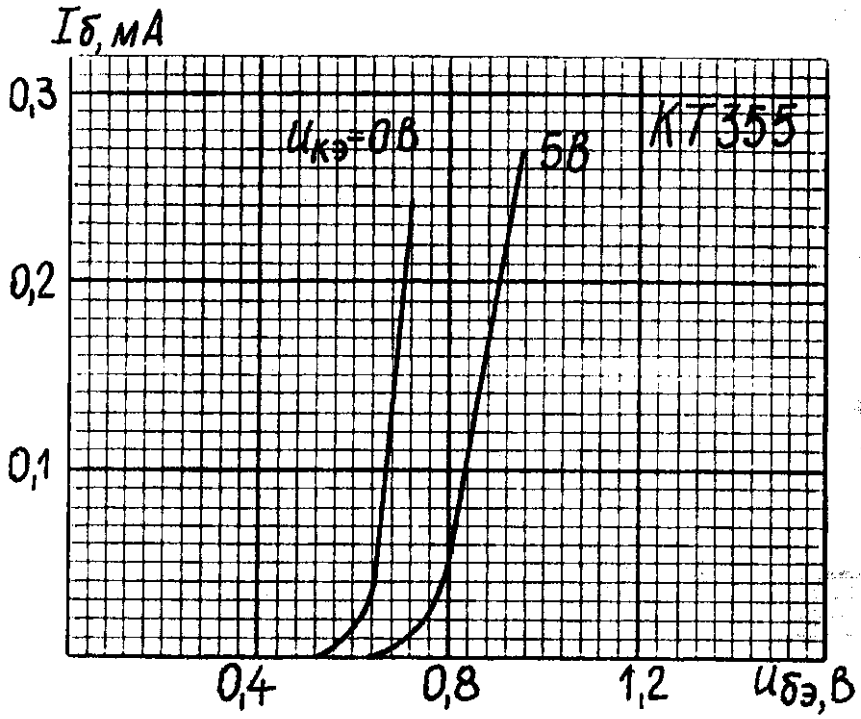


Входные характеристики транзистора КТ349

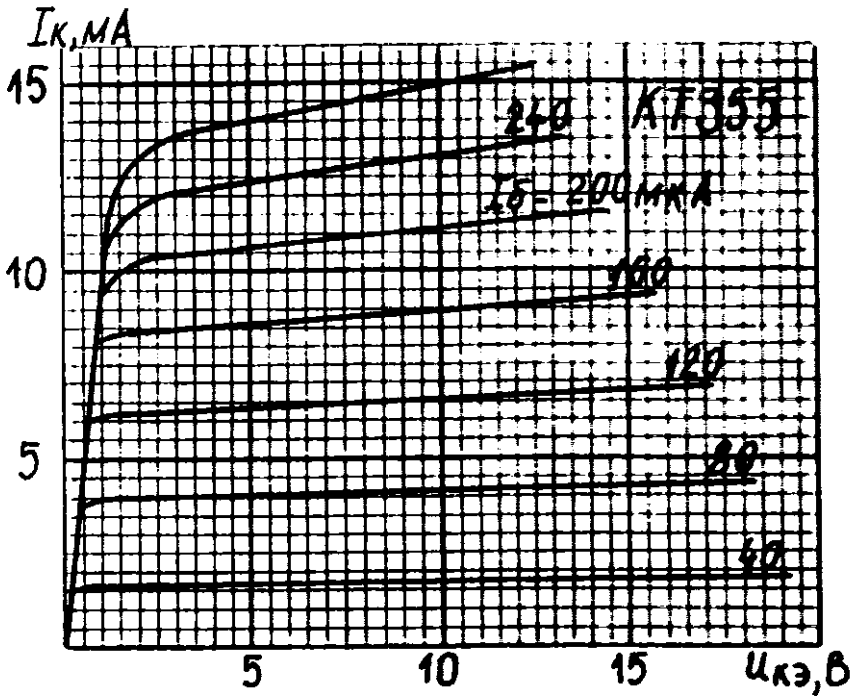


Выходные характеристики транзистора КТ349





Входные характеристики транзистора КТ355



Выходные характеристики транзистора КТ355

*Образец оформления титульного листа*

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА

Кафедра теоретических основ электротехники,  
автоматики и электроники

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1**

по дисциплине

**“ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ”**

ВАРИАНТ № \_\_\_\_\_

Выполнил: студент 3 курса з/ф

\_\_\_\_\_  
(Ф. И. О.)

Шифр: \_\_\_\_\_  
Проверил: Прокопьев В. И.

САМАРА 2001

