

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

В.А. Шалимов, А.М. Заболоцкий

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

Руководство к лабораторной работе

Томск 2023

Шалимов В.А., Заболоцкий А.М. Исследование вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов: руководство к лабораторной работе. Учебно-методическое пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2023. – 11 с.

Одобрено на заседании каф. ТУ протокол 3 от 15.02.2023

© Шалимов В.А., Заболоцкий А.М., 2023

© Кафедра Телевидения и управления, ТУСУР, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Общее положение.....	4
2. Описание лабораторного макета.....	7
3. Порядок выполнения работы.....	9
Список литературы.....	11

Введение

Цель работы – исследование статических вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов в схеме с общим эмиттером, оценка статических параметров транзисторов.

1. Общие положения

1.1 Разновидности транзисторов

В настоящее время транзисторы и созданные на их основе линейные и цифровые интегральные схемы получили самое широкое распространение и стали основой современной радиоэлектроники. Отечественная промышленность выпускает биполярные транзисторы $n-p-n$ и $p-n-p$ типов, представляющие собой трехэлектродные двухпереходные полупроводниковые приборы, которые могут работать в трех схемах включения: общая база (ОБ), общий эмиттер (ОЭ), общий коллектор (ОК), причем в каждой из схем включения в трех режимах работы.

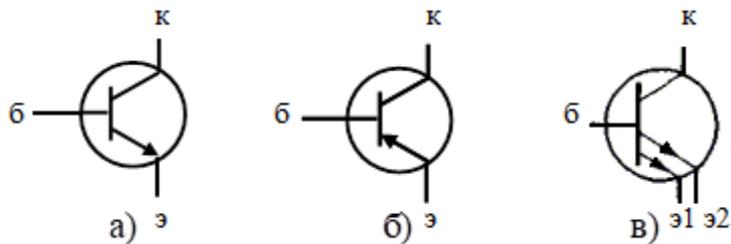


Рис. 1.1 Обозначения биполярных транзисторов: $n-p-n$ (а) и $p-n-p$ (б) типов, многоэмиттерный (в)

1.2 Статические вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов в схеме с ОБ

Статические вольтамперные характеристики идеализированных биполярных транзисторов в схеме с общей базой описываются формулами Эберса – Молла

$$I_{\text{Э}} = I'_{\text{Э0}} \left(e^{U_{\text{ЭБ}}/\varphi_T} - 1 \right) - \alpha_1 I'_{\text{К0}} \left(e^{U_{\text{КБ}}/\varphi_T} - 1 \right), \quad (1.1)$$

$$I_{\text{К}} = \alpha_N I'_{\text{Э0}} \left(e^{U_{\text{ЭБ}}/\varphi_T} - 1 \right) - I'_{\text{К0}} \left(e^{U_{\text{КБ}}/\varphi_T} - 1 \right), \quad (1.2)$$

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}$$

где $I_{\text{К}}$, $I_{\text{Э}}$ – токи коллектора и эмиттера; $I'_{\text{Э0}}$, $I'_{\text{К0}}$ – тепловые токи коллекторного и эмиттерного переходов, измеренные при $U_{\text{ЭБ}} = 0$ и $U_{\text{КБ}} = 0$ соответственно; α_1 и α_N – коэффициенты передачи коллекторного и эмиттерного токов.

Так как задать прямое напряжение на эмиттерном $p-n$ переходе трудно, целесообразно считать заданной величиной эмиттерный ток, а не эмиттерное напряжение.

Решив уравнение (2.2) относительно $I_{\text{К}}$, получим для схемы ОБ:

$$I_K = \alpha_N I_{\mathcal{E}} - I_{K0} (e^{U_{KB}/\varphi_T} - 1), \quad (1.3)$$

полагая, что $\alpha_N I_{\mathcal{E}0} = \alpha_I I_{K0}$ и $\alpha_N \approx \alpha_I$

Это уравнение описывает выходные характеристики транзистора $I_K = f(U_{KB})$ с параметром $I_{\mathcal{E}}$ (рис. 1.2, а).

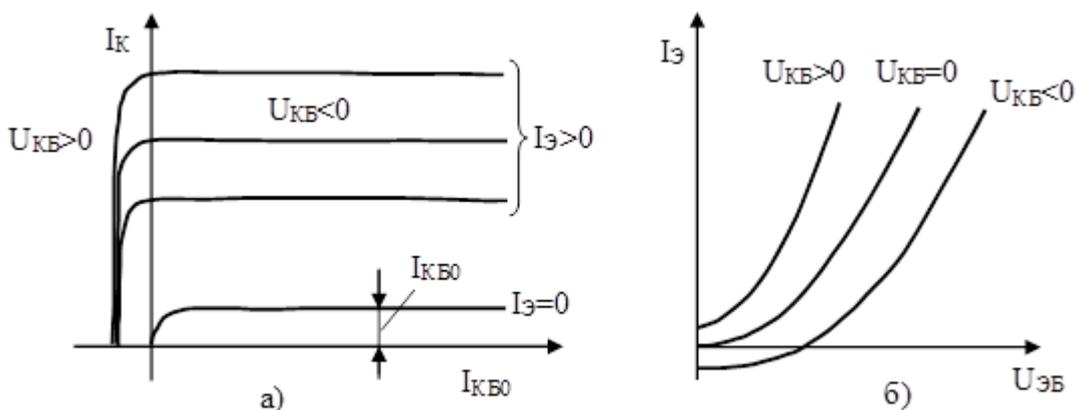


Рис. 1.2 – Статические характеристики идеализированного транзистора, включенного по схеме с ОБ: а – выходные; б – входные

Уравнение (1.4), решенное относительно $U_{\mathcal{E}B}$, дает выражение, характеризующее идеализированные входные характеристики транзистора $U_{\mathcal{E}B} = f(I_{\mathcal{E}})$:

$$U_{\mathcal{E}B} = \varphi_T \ln \left[I_{\mathcal{E}} / I'_{\mathcal{E}0} + 1 + \alpha_N (e^{U_{KB}/\varphi_T} - 1) \right], \quad (1.5)$$

Входные характеристики транзистора показаны на рис. 1.2б.

На (рис. 1.2, а) ясно видны две области: активного режима ($U_{KB} > 0$) и режима насыщения ($U_{KB} < 0$).

Для активного режима, когда $(1 - \alpha_N) \approx 0$, $U_{KB} \gg \varphi_T$ и ($U_{KB} < 0$), выражения (1.3) и (1.5) можно упростить и записать в виде:

$$I_K = \alpha I_{\mathcal{E}} + I_{K0}, \quad (1.6)$$

$$U_{\mathcal{E}B} \approx \varphi_T \ln(I_{\mathcal{E}} / I'_{\mathcal{E}0}), \quad (1.7)$$

1.3 Реальные статические вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов в схеме с ОБ

В формулах Молла – Эберса не учитывается целый ряд факторов, таких, как эффект Эрли (модуляция толщины базы при изменении коллекторного напряжения), пробой перехода, зависимость α от тока и др. Реальные коллекторные характеристики показаны на рис. 1.3. Кривые коллекторного семейства имеют конечный, хотя и очень небольшой, наклон, который в области, близкой к пробую, резко увеличивается. Расстояние между кривыми немного уменьшается при больших токах из-за уменьшения α .

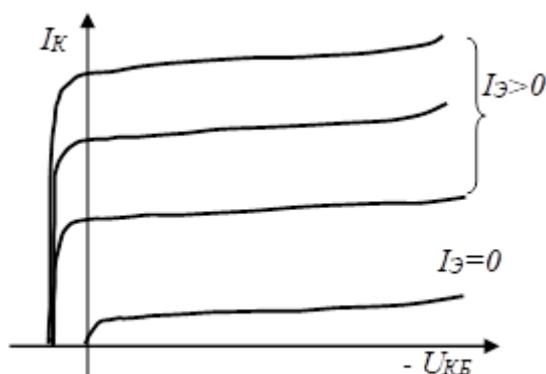


Рис. 1.3 – Реальные вольтамперные характеристики биполярного транзистора в схеме с ОБ

В активном режиме (1-й квадрант), усредняя нелинейное сопротивление $r_{к}$, можно характеризовать коллекторное семейство в схеме с ОБ достаточно строгим соотношением:

$$I_K = \alpha I_{Э} + I_{КБ0} + (U_{КБ} / r_{кдиф}), \quad (1.8)$$

где $r_{кдиф} = \frac{\partial U_{КБ}}{\partial I_K} |_{I_{Э}=const}$ - дифференциальное сопротивление коллекторного $p-n$ -перехода.

1.4 Статические вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов при включении с общим эмиттером

При включении транзисторов с общим эмиттером входным током является ток базы, который и принят за параметр семейства выходных характеристик рис. 1.4.

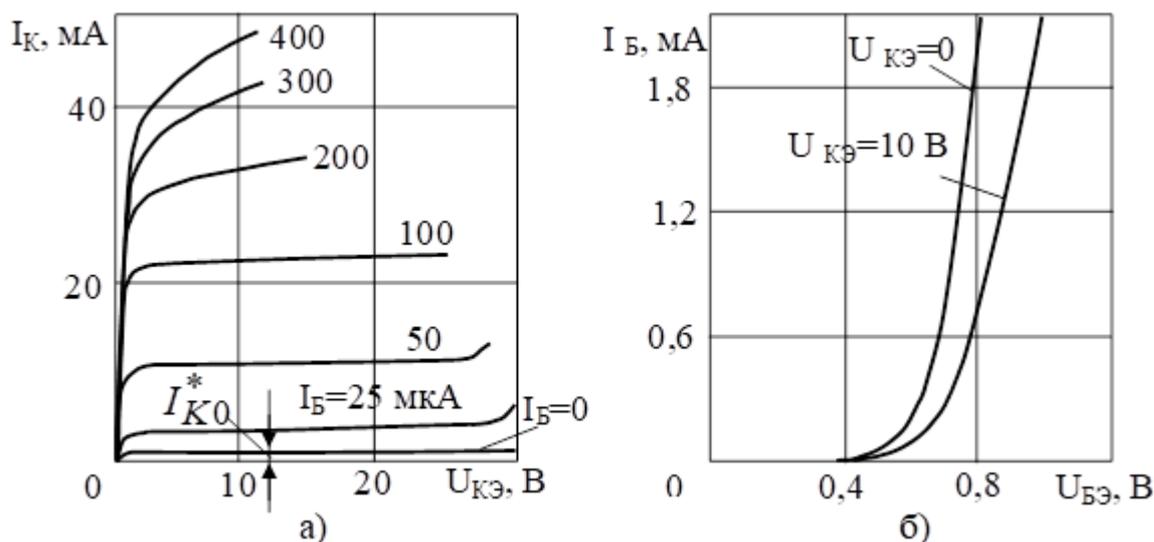


Рис. 1.4 – Выходные (а) и входные (б) характеристики транзистора для схемы с ОЭ

$$I_K = \beta I_B + I_{К0}^* + U_{КЭ} / r_{кдиф}^*, \quad (1.9)$$

где $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$; $I_{К0}^* = I_{КБ0} (1 + \beta)$; $r_{кдиф}^* = r_{кдиф} / (1 + \beta)$; $I_{К0}^*$ - обратный ток коллекторного перехода при $I_B = 0$.

Семейства входных и выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ, приведены на рис. 1.4.

Следует обратить внимание на то, что в схеме с ОЭ влияние тока $I_{КБ0}$ и сопротивления $r_{к\text{ диф}}$ на коллекторный ток увеличивается в $1+\beta$ раз по сравнению со схемой с ОБ.

Коллекторный ток $I_K = I_{КБ0}$ получается, если $I_B = -I_{КБ0}$. Следовательно, в диапазоне от $I_B = 0$ до $I_B = -I_{КБ0}$ транзистор управляется «отрицательным» входным током.

2. Описание лабораторного макета

Для исследования статических вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов в схеме с общим эмиттером используется схема, изображенная в правой части лабораторного макета рис. 2.1. С помощью переключателя П5б выбирается исследуемый транзистор. С помощью переключателя П3, меняя сопротивление резистора R_B (грубо), и переменного резистора $R_{Б\text{ под}}$ (плавно) можно установить ток базы I_B при работе с биполярными транзисторами. Измерение тока базы производится стрелочным миллиамперметром, включаемым в базовую цепь переключателем П7. Чувствительность прибора устанавливается переключателем Пб.

При работе с полевым транзистором с помощью переключателей П3 и П8 (грубо) и переменного резистора $R_{Б\text{ под}}$ (плавно) можно установить управляющее напряжение на затворе транзистора.

Изменять величину коллекторного напряжения можно переключателем П4, меняя величину резистора ($R_{К1} \div R_{К10}$) в цепи коллектора. Напряжение на коллекторе транзистора измеряется осциллографом, а ток, протекающий через транзистор, измеряется стрелочным миллиамперметром, включаемым в коллекторную цепь переключателем П7.

Перечень биполярных транзисторов, исследуемых при проведении лабораторной работы, приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Наименование	T1	T2
Тип	МП16	МП104

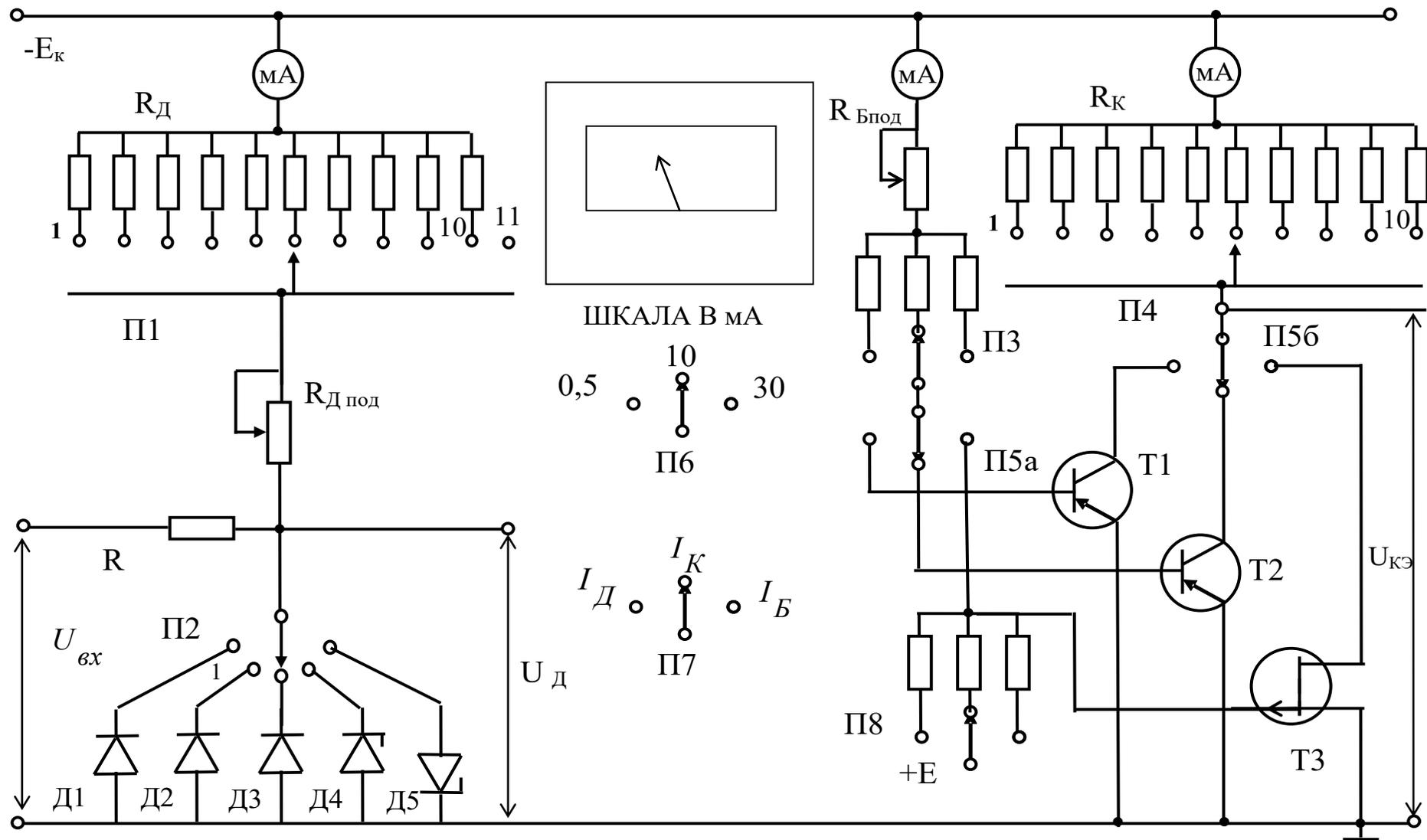


Рис. 2.1 – Лицевая панель макета для исследования диодов и транзисторов

3. Порядок выполнения работы

Для исследования выходных вольтамперных характеристик транзисторов в схеме с общим эмиттером необходимо:

- 1) Включить источник питания макета;
- 2) Переключатель П5б установить в положение 1, подключив транзистор Т1;
- 3) Переключатель П7 установить в положение ток базы I_b ;
- 4) Переключатель П6 установить в положение 0,5 мА;
- 5) С помощью переключателя П3 (грубо) и переменного резистора $R_{b\text{ под}}$ (плавно) установить ток базы I_B равным 50 мкА;
- 6) Переключатель П6 установить в положение 10 мА, переключатель П7 в положение ток коллектора I_K ;
- 7) Вход осциллографа присоединить к коллектору исследуемого транзистора для измерения постоянного напряжения на коллекторе $U_{KЭ}$;
- 8) Изменяя переключателем П4 резисторы $R_{K1} \div R_{K10}$ и тем самым величину коллекторного напряжения, снять зависимость $I_K = f(U_{KЭ})$ при токе базы I_b равном 50 мкА. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Положение переключателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Примечание
I_K , мА											$I_b=50$ мкА
$U_{KЭ}$, В											
I_K , мА											$I_b=100$ мкА
$U_{KЭ}$, В											
I_K , мА											$I_b=150$ мкА
$U_{KЭ}$, В											

9) Снять зависимости $I_K = f(U_{KЭ})$ при токе базы I_B равном 100 и 150 мкА. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

10) Переключатель П5б установить в положение 2, подключив транзистор Т2 и повторить пункты 3 – 9 для транзистора Т2. Результаты измерений занесите в таблицу 2, аналогичную таблице 1.

11) Выключить источник питания макета.

12) Построить выходные вольт-амперные характеристики транзисторов Т1 и Т2. $I_K = f(U_{KЭ})$, при $I_B = const$.

13) По построенным графикам для одного из транзисторов определить дифференциальную и интегральную величины коэффициента усиления тока базы β при напряжении $U_{КЭ} = 5$ В.

14) Построить зависимость дифференциального сопротивления коллекторного p - n -перехода $r_{\kappa}^* = f(U_{КЭ})$ при токе базы транзистора Т1 $I_B = 100$ мкА, где дифференциальное сопротивление $r_{\kappa}^* = \frac{\partial U_{КЭ}}{\partial I_{\kappa}}$ при $I_B = const$.

15) Оформить отчет и сделать выводы по работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
2. Электроника. Часть 1: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 209 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7278> (дата доступа:08.05.2023)
3. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
4. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
5. Электроника. Часть 2: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 120 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7279> (дата доступа:08.05.2023)
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.- 488 с.
7. Учебное пособие «Микроэлектроника» : Для направления подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника». Профиль: «Промышленная электроника» / Легостаев Н.С. - 2013. 172 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4280> (дата доступа:08.05.2023)
8. Гусев В.Г. Электроника: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с. (73): Библиотека ТУСУР.