

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять з дисципліни
«ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМАТЕХНІКА»
Частина 1
«Аналогова електроніка»
для студентів усіх форм навчання

Харків 2015

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем 26 лютого 2015 р., протокол № 9.

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Електроніка та мікросхемотехніка» та «Комп'ютерна електроніка» призначені для студентів усіх форм навчання напрямів 050102 „Комп'ютерна інженерія”, 050202 „Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”, 070107 „Системи забезпечення руху поїздів”.

Укладач
доц. Л.А. Клименко

Рецензент
проф. М.А. Мірошник

ЗМІСТ

Вступ	3
1 Напівпровідникові діоди	4
2 Транзистори в режимі постійних напруг і струмів	15
3 Транзисторні ключові каскади	22
4 Оптоелектронні прилади.....	30
Список літератури	34

ВСТУП

Дисципліни «Електроніка та мікросхемотехніка» та «Комп'ютерна електроніка» є базовими в галузі апаратної підготовки студентів, що навчаються за напрямками «Комп'ютерна інженерія», «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Системи забезпечення руху поїздів».

Метою практичних занять є закріплення теоретичного матеріалу, вивченого на лекціях, і розвиток навичок:

- аналізу розподілу струмів і напруг у діодних і транзисторних схемах;
- проектування схем перетворювачів рівнів цифрових сигналів;
- застосування оптоелектронних приладів.

Матеріали для кожного заняття містять основні запитання теорії з теми заняття і варіанти завдань для розв'язання в аудиторній і позааудиторній час. Ступінь підготовленості до заняття оцінюється за допомогою контрольних запитань і завдань з теми заняття.

У задачах використовуються реальні діоди, транзистори й інтегральні мікросхеми, на які є велика кількість довідкових матеріалів як у бібліотеці УкрДУЗТу, так і в ресурсах Internet.

Отримані знання будуть необхідні під час вивчення дисциплін, пов'язаних з апаратними засобами комп'ютерних технологій.

1 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

Мета заняття

Освоїти методику розрахунку схем з напівпровідниковими діодами, визначення параметрів діодів за вольт-амперною характеристикою (ВАХ).

1.1 Методичні вказівки для самостійної підготовки до заняття

Вивчити розділи дисципліни, пов'язані з принципом роботи напівпровідникових діодів [3,4,8].

Напівпровідниковий діод – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, як правило, з одним електричним переходом і двома виводами. Розглянемо діод з електронно-дірковим (р-п) переходом, що розділяє р– і п–області кристала напівпровідника.

Вольт-амперна характеристика діода описується виразом

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_D}{\phi_T}} - 1 \right), \quad (1.1)$$

де U_D – напруга на р-п переході;

$\phi_T = kT/q$ – тепловий потенціал, що дорівнює контактній різниці потенціалів ϕ_K на межі р-п переходу за відсутності зовнішньої напруги (при $T=300$ К, $\phi_T = 0,025$ В);

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура;

q – заряд електрона;

I_0 – зворотний струм р-п переходу, утворений за рахунок неосновних носіїв. Температурна зміна I_0 визначається відомою залежністю

$$I_0(T) = I_0 \cdot 2^{\frac{T-T_0}{\delta T}}, \quad (1.2)$$

де I_0 – значення теплового струму при кімнатній температурі $T_0 = 300$ К;

δT – значення збільшення температури, що відповідає подвоєнню значення теплового струму. Значення δT залежить від матеріалу напівпровідника і складає приблизно 10 К для германію і 7 К для кремнію.

При негативних напругах близько 0,1 ... 0,2 В у формулі (1.2) експонентною складовою можна знехтувати ($e^{-4} \approx 0,02$), при позитивних напругах, що перевищують 0,1 В, можна знехтувати одиницею ($e^4 \approx 54,6$), тому ВАХ, яка описується цими співвідношеннями, матиме вигляд, наведений на рисунку 1.1, а.

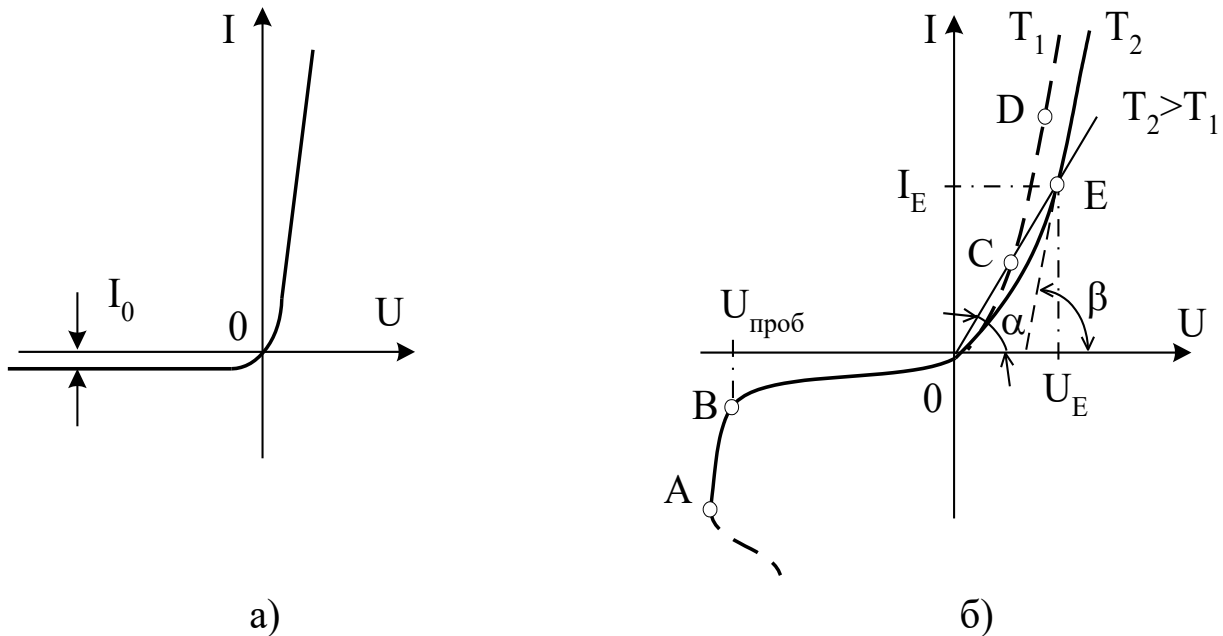


Рисунок 1.1 – Вольт-амперна характеристика діода

Вольт-амперна характеристика реального діода має вигляд, наведений на рисунку 1.1, б (суцільна лінія). З неї випливає, що при визначеному значенні зворотної напруги $U_{\text{звор}} = U_{\text{проб}}$ починається лавиноподібний процес зростання струму $I_{\text{звор}}$, що відповідає електричному пробію р- n переходу (відрізок АВ на рисунку 1.1, б). Якщо в цей момент струм не обмежити, то електричний пробій переходить у тепловий (ділянка ВАХ після точки А). Такий процес наростання струму $I_{\text{звор}}$ характерний для кремнієвих діодів. У діодах з германію під час збільшення зворотної напруги тепловий пробій р-п переходу настає практично одночасно з початком лавиноподібного процесу наростання струму $I_{\text{звор}}$. Електричний пробій оборотний, тобто після зменшення напруги $U_{\text{звор}}$ робота діода відповідає положистій ділянці зворотної області ВАХ. Тепловий пробій необоротний, тому що руйнує р-п перехід.

Напівпровідниковий діод характеризується *статичним* і *диференціальним* (динамічним) опорами, що легко визначаються за ВАХ. Диференціальний опір r_d чисельно дорівнює відношенню нескінченно малого збільшення напруги до відповідного збільшення струму в заданому режимі роботи діода і може бути визначений графічно як котангенс кута між дотичною в розглянутій робочій точці ВАХ діода і віссю абсцис (пунктирна лінія на рисунку 1.1,б з кутом нахилу β):

$$r_d = dU/dI \approx \delta U/\delta I = (m_U/m_I) \operatorname{ctg} \beta, \quad (1.3)$$

де δU і δI – кінцеві прирости напруги і струму поблизу робочої точки Е;

m_U і m_I – масштаби осей напруги і струму.

Статичний опір $R_{ст}$ чисельно дорівнює відношенню напруги на елементі U_E до струму, що протікає через нього, I_E (рисунок 1.1, б). Цей опір дорівнює котангенсові кута нахилу прямої, проведеної з початку координат через задану робочу точку ВАХ до осі абсцис:

$$R_{ст} = U_E/I_E = (m_U/m_I) \operatorname{ctg} \alpha. \quad (1.4)$$

У залежності від того, на якій ділянці ВАХ розташована задана робоча точка, значення $R_{ст}$ може бути меншим або більшим значення r_d .

Деякі типи напівпровідникових діодів.

Випрямляючі діоди. Застосовуються в пристроях перетворення змінного струму в постійний. Випрямляючі діоди розділяють за матеріалом, який використовується для р-п переходу (германій, кремній та ін.), а також за припустимим значенням прямого струму (діоди малої, середньої і великої потужності).

Імпульсні діоди. Призначені для роботи в імпульсному режимі, тобто в пристроях формування імпульсних сигналів, а також у ключових і логічних схемах. Імпульсні діоди, як правило, мають малу площу електричного переходу. Це дає змогу істотно знизити ємність переходу (не вище одиниць пікофарад), що особливо важливо для зменшення часу перехідних процесів у

діоді. Однак внаслідок малої площі переходу імпульсні діоди характеризуються низькою припустимою потужністю (20-30 мВт).

Напівпровідниковий стабілітрон. Це діод, напруга на якому в області електричного пробою слабо залежить від струму. Робочою ділянкою ВАХ стабілітрона є область пробою р-п переходу при його зворотному вмиканні. Стабілітрони використовуються для стабілізації, фіксації рівнів напруг.

1.2 Контрольні запитання і завдання

- 1 Чим відрізняються ВАХ р-п переходу і реального діода?
- 2 Які види пробою р-п переходу існують і в чому їх відмінність?
- 3 Визначити величину струму через р-п перехід при 20 °С, якщо напруга на переході 0,6 В, а зворотний струм 1 мкА.
- 4 Описати особливості діодів Шотткі.
- 5 Назвати основні параметри напівпровідникових діодів.
- 6 Яка відмінна риса імпульсних діодів?
- 7 Завдяки чому у випрямних діодах великі значення максимально припустимого прямого струму ?
- 8 Описати принцип дії стабілітрона.
- 9 Назвіть основні параметри стабілітронів.

1.3 Варіанти аудиторних задач

Задача 1. Користуючись ВАХ напівпровідникового діода (рисунок 1.2), визначити статичний опір $R_{ст}$ при вмиканні в прямому і зворотному напрямках, якщо до діода прикладені такі напруги: $U_{пр} = 0,6$ В, $U_{звор} = 40$ В при температурі навколишнього середовища $t = 25$ °С.

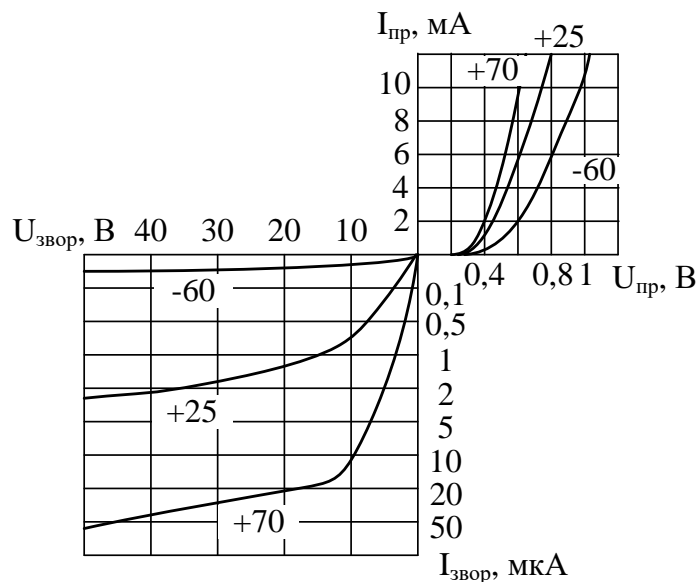


Рисунок 1.2 – ВАХ напівпровідникового діода

Задача 2. Визначити диференціальний опір діода, ВАХ якого наведена на рисунку 1.2 для $U_{пр} = 0,5 \text{ В}$, $U_{пр} = 0,7 \text{ В}$ при $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 3. Визначити вихідну напругу в схемі рисунка 1.3, якщо діод ідеальний, а $U_{вх} = 20 \text{ В}$.

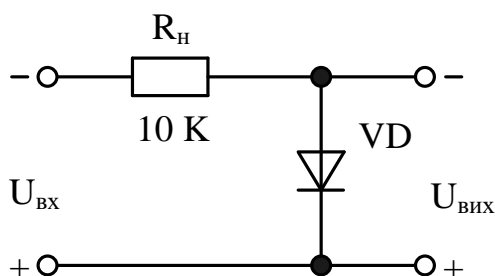


Рисунок 1.3 – Схема до задачі 3

Задача 4. Визначити вихідну напругу в схемі рисунка 1.4, якщо при температурі $T=300 \text{ К}$ у схемі використовується кремнієвий діод, що має зворотний струм $I_0 = 20 \text{ мкА}$, а $U_{вх} = 30 \text{ В}$.

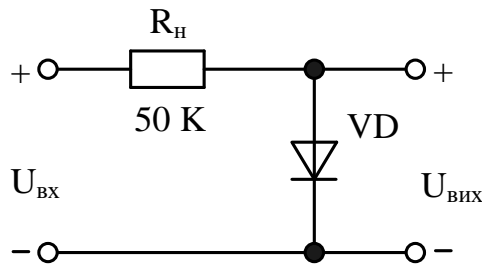


Рисунок 1.4 – Схема до задачі 4

Задача 5. Визначити, на якій частоті ємнісний опір діода дорівнює $R_{звор}$, внаслідок чого відбудеться помітне збільшення зворотного струму. Параметри діода: $R_{пр} = 5 \text{ Ом}$, $R_{звор} = 2 \text{ МОм}$, $C = 10 \text{ пФ}$.

Задача 6. У схемі на рисунку 1.5 застосований стабілітрон з такими параметрами: $U_{ст} = 10 \text{ В}$, $I_{ст \max} = 13 \text{ мА}$, $I_{ст \min} = 3 \text{ мА}$, опір навантаження $R_H = 2 \text{ кОм}$, опір обмежувального резистора $R = 1 \text{ кОм}$. Необхідно визначити припустимий діапазон зміни вхідної напруги ($U_{вх \min} < U_{вх} < U_{вх \max}$).

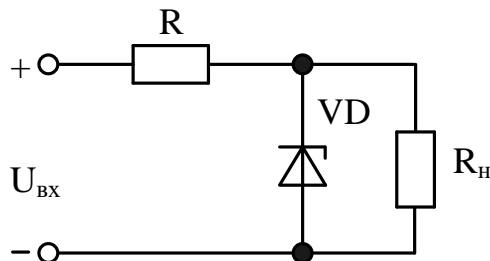


Рисунок 1.5 – Схема до задачі 6

Задача 7. На вхід схеми (рисунок 1.6) подається синусоїдальна напруга амплітудою $U_{вх} = 10 \text{ В}$. Опір відкритого діода $R_{пр} = 100 \text{ Ом}$, закритого $R_{звор} = 400 \text{ кОм}$, $R_H = 1 \text{ кОм}$. Визначити амплітуду напруги на виході під час дії додатної і від'ємної напівхвиль вхідної напруги.

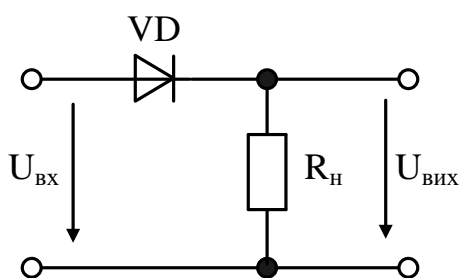


Рисунок 1.6 – Схема до задачі 7

Задача 8. На вхід схеми (рисунок 1.6) подається напруга, форма якої показана на рисунку 1.7. Побудувати діаграму вихідної напруги. Діод вважати ідеальним.

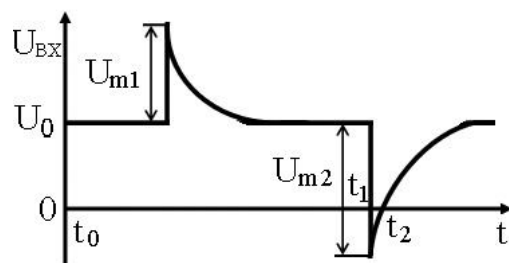


Рисунок 1.7 – Діаграми вхідної і вихідної напруг

1.4 Задачі для самостійної роботи

Задача 9. Використовуючи ВАХ діода [1,2], визначити статичний опір напівпровідникового діода при вмиканні в прямому і зворотному напрямках, постійному струмі і температурі навколишнього середовища +25 °С. Варіанти завдань наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань до задачі 9

Варіант	Тип діода	$U_{пр}, В$	$U_{звор}, В$
1	2	3	4
1	МДЗ	0,8	10
2	2Д104А	0,9	100
3	Д211	0,4	300
4	Д223	0,8	30
5	2Д102А	1,2	200

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
6	Д237А	0,6	150
7	Д226	0,6	250
8	ДММ3	0,8	10
9	2Д101А	0,8	25
10	2Д231А	1	0,8
11	2Д251В	0,8	0,6
12	КД105Б	0,6	300
13	Д104	0,8	30
14	ГД107Б	0,6	10
15	МД217	0,9	400
16	2Д115А-1	0,8	40
17	2Д106А	0,85	60
18	Д237Б	0,5	300
19	КД212А	0,8	150
20	КД103А	0,8	40
21	КДС111А	0,8	150
22	Д226А	0,5	150
23	Д9Ж	0,8	60
24	КД213Б	1	200
25	Д223А	0,8	80
26	ГД107Б	0,6	20
27	Д229А	0,6	100
28	КД209А	0,7	100
29	КД102Б	1,2	150
30	КД106А	0,9	75

Примітка – Якщо тип діода в таблиці 1.1 зазначений без букви, дозволяється застосувати діод з будь-якою буквою. У розв'язанні задачі обов'язково мають бути включені вольт-амперні характеристики обраного діода з позначенням точок, що відповідають заданим значенням напруг і відповідних їм значенням струмів.

Задача 10. У схемі на рисунку 1.5 вхідна напруга змінюється в межах від $U_{вх\ min}$ до $U_{вх\ max}$. Визначити опір і мінімально припустиму потужність розсіювання обмежувального резистора R для забезпечення стабільності вихідної напруги у

всьому діапазоні зміни вхідної напруги. Варіанти завдань наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Варіанти завдань до задачі 10

Варіант	Тип стабілітрона	$U_{\text{вх min}}, \text{В}$	$U_{\text{вх max}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$
1	Д809	10	20	1000
2	Д814А	9	15	1800
3	КС133А	7	10	680
4	КС162А	10	12	1200
5	Д816Б	35	50	1500
6	КС447А	10	15	910
7	Д811	15	20	2700
8	КС213Б	20	30	3300
9	КС168А	12	18	4300
10	Д814Д	18	22	3600
11	Д814Б	12	20	5600
12	КС175Ж	15	18	3900
13	КС680А	200	220	10000
14	КС156А	10	15	11000
15	Д814Г	15	18	18000
16	КС147А	9	12	12000
17	КС210Б	15	20	15000
18	КС139А	8	14	1200
19	КС191Ж	12	25	3300
20	КС170А	10	12	1200
21	КС168В	15	20	2200
22	Д815А	10	15	10000
23	КС215Ж	20	30	2000
24	КС222Ж	30	35	9100
25	КС630А	150	200	100000
26	КС218Ж	25	30	6800
27	КС224Ж	30	35	1800
28	КС182Ж	12	16	3000
29	Д817Б	80	100	20000
30	КС439А	8	15	1000
31	КС531В	40	60	20000

Примітка – У розрахунковому завданні необхідно навести параметри обраного стабілітрона [1,2].

Задача 11. На вхід схеми (дивись рисунок 1.8) подається синусоїдальна напруга. Визначити амплітуду напруги на виході під час дії додатної і від'ємної напівхвиль вхідної напруги. Значення опорів відкритого діода $R_{\text{пр}}$, закритого діода $R_{\text{звор}}$, $R_{\text{н}}$, $R_{\text{бал}}$, амплітуда вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ наведені в таблиці 1.3.

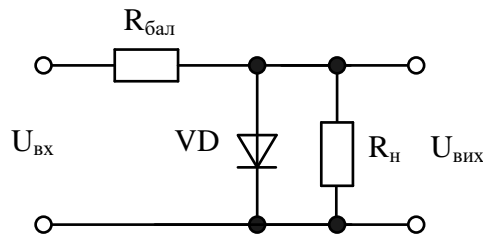


Рисунок 1.8 – Схема до задачі 11

Таблиця 1.3 – Варіанти завдань для задачі 11

Варіант	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$	$R_{\text{звор}}, \text{кОм}$	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$	$R_{\text{бал}}, \text{Ом}$
1	15	50	100	330	500
2	13	100	300	100	720
3	12	120	200	270	400
4	45	150	500	820	500
5	55	200	250	1000	150
6	5	100	600	200	300
7	18	300	100	850	600
8	20	210	300	500	510
9	100	400	200	1200	1000
10	19	80	400	300	220
11	42	110	345	450	480
12	36	90	400	130	330
13	58	150	810	2000	800
14	68	100	600	1000	1000
15	30	300	750	600	510
16	9	200	410	50	150
17	10	300	370	200	270
18	47	100	280	400	500
19	75	400	715	200	700
20	24	500	440	300	200
21	10	120	390	100	400
22	120	40	220	1500	2000
23	21	90	100	800	330
24	4	110	350	75	400
25	87	50	120	200	500

2 ТРАНЗИСТОРИ В РЕЖИМІ ПОСТІЙНИХ НАПРУГ І СТРУМІВ

Мета заняття

Освоїти методику розрахунку параметрів і режимів роботи транзисторів.

2.1 Методичні вказівки для самостійної підготовки до заняття

Вивчити розділи дисципліни, зв'язані з принципом роботи транзисторів, їх основними параметрами і характеристиками, схемами вмикання [3,4,5,9].

Біполярні транзистори. Переходи біполярного транзистора можуть бути зміщені або в прямому або в зворотному напрямках. У залежності від цього розрізняють чотири режими роботи біполярних транзисторів:

- 1) активний режим (на емітерний перехід подана пряма напруга, на колекторний – зворотна), загальний режим роботи;
- 2) інверсний режим (на емітерний перехід подана зворотна напруга, на колекторний – пряма), цей режим роботи практично не використовується;
- 3) режим насичення (на емітерний і колекторний переходи подана пряма напруга), транзистор повністю відкрито;
- 4) режим відсічення (до обох переходів подані зворотні напруги), транзистор закрито.

Розрізняють три схеми вмикання транзисторів: із загальною базою (ЗБ), із загальним емітером (ЗЕ) та із загальним колектором (ЗК). Така термінологія вказує, який з електродів транзистора є загальним для його вхідного та вихідного ланцюгів.

Для схеми із ЗБ: $I_{вх} = I_E$, $I_{вих} = I_K$, а коефіцієнт прямої передачі струму розраховується за формулою

$$\alpha = \frac{\Delta I_{ВИХ}}{\Delta I_{ВХ}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \cdot \quad (2.1)$$

Для схеми із ЗЕ: $I_{ex} = I_B$, $I_{vix} = I_K$, а коефіцієнт прямої передачі струму розраховується за формулою

$$\beta = \frac{\Delta I_{VIX}}{\Delta I_{BX}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}. \quad (2.2)$$

Для схеми із ЗК: $I_{ex} = I_B$, $I_{vix} = I_E$, а коефіцієнт прямої передачі струму розраховується за формулою

$$\gamma = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_E - \Delta I_K} = \beta + 1. \quad (2.3)$$

Під час роботи в активному режимі вхідні і вихідні струми пов'язані співвідношеннями:

для схеми із загальною базою (ЗБ)

$$I_K = \alpha \cdot I_E + I_{K0}, \quad (2.4)$$

для схеми із загальним емітером (ЗЕ)

$$I_K = \beta \cdot I_B + I_{K0} \cdot (1 + \beta), \quad (2.5)$$

де α , β – коефіцієнти передачі струмів емітера і бази відповідно;

I_{K0} – зворотний струм через колекторний перехід при розімкненому виводі емітера.

Для розрахунку ланцюгів з біполярними транзисторами в теперішній час використовуються h -параметри, тобто транзистор подають як чотириполіусник і записують рівняння чотириполіусника в h -параметрах. Коефіцієнти чотириполіусника (h -параметри) розраховуються за формулами:

$$h_{11} = \Delta U_{6e} / \Delta I_6 \text{ при } U_{ке} = \text{const} \quad (2.6)$$

$$h_{12} = \Delta U_{6e} / \Delta U_{ке} \text{ при } I_6 = \text{const} \quad (2.7)$$

$$h_{21} = \Delta I_K / \Delta I_6 \text{ при } U_{ке} = \text{const} \quad (2.8)$$

$$h_{22} = \Delta I_K / \Delta U_{ке} \text{ при } I_6 = \text{const} \quad (2.9)$$

Фізичний зміст h – параметрів:

h_{11} – вхідний опір $R_{вх}$, Ом;

h_{12} – безрозмірний коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі;

h_{21} – безрозмірний коефіцієнт передачі струму β ;

h_{22} – вихідна провідність $1/R_{вих}$, См.

h -параметри наводяться у довіднику, а також можуть бути визначені за сімейством вхідних і вихідних характеристик транзистора.

Польові транзистори. Польовий транзистор характеризується нижченаведеними параметрами.

Основний параметр – *крутість* S визначається за нижченаведеною формулою і може бути до декількох міліамперів на вольт

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{з-в} \text{ при } U_{с-в} = \text{const}. \quad (2.10)$$

Крутість характеризує керуючу дію затвора. Наприклад, $S = 3 \text{ мА/В}$ означає, що зміна напруги затвора на 1 В створює зміну струму стоку на 3 мА.

Керуючу дію затвора наочно ілюструють характеристики, що виражають залежність $I_C = f(U_{зв})$ при $U_{св} = \text{const}$ (рисунок 2.1).

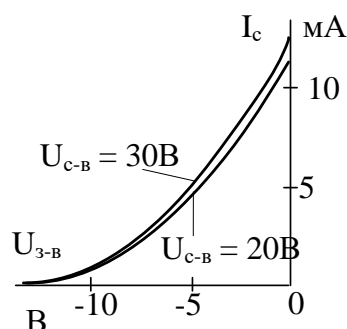


Рисунок 2.1 – Керуючі характеристики польового транзистора

Внутрішній (вихідний) опір R_i аналогічний величині $1/Y_{22}$ для біполярного транзистора. Цей параметр являє собою опір транзистора між стоком і витокком (опір каналу) для змінного струму і виражається формулою

$$R_i = 1/Y_{22} = \Delta U_{c-b} / \Delta I_c \text{ при } U_{з-в} = \text{const.} \quad (2.11)$$

Значення R_i досягає сотень кілоом і виявляється в багато разів більше опору транзистора постійному струмові R_o на положистих ділянках вихідних (стокових) характеристик $I_c = f(U_{c-b})$ при $U_{з-в} = \text{const}$ (рисунок 2.2).

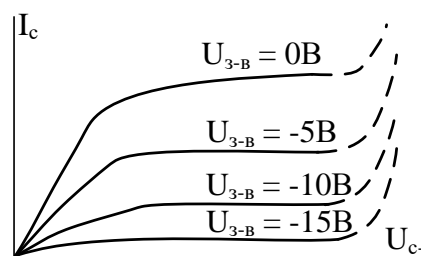


Рисунок 2.2 – Вихідні (стокові) характеристики польового транзистора

Вхідний опір польового транзистора визначається формулою

$$R_{вх} = \Delta U_{з-в} / \Delta I_з \text{ при } U_{c-b} = \text{const.} \quad (2.12)$$

Оскільки струм $I_з$ – зворотний струм n-p переходу, а тому дуже малий, то $R_{вх}$ досягає одиниць і десятків мегаОм.

Початковий струм стоку $I_{c\text{поч}}$ – струм стоку при нульовій напрузі $U_{з-в}$.

Постійний струм стоку $I_{c\text{мах}}$.

2.2 Контрольні запитання і завдання

1 Наведіть статичні вхідні і вихідні ВАХ біполярного транзистора.

2 Які струми і напруги є вхідними (вихідними) під час вмикання транзистора за схемою із загальною базою, загальним емітером, загальним колектором?

- 3 Наведіть основні параметри біполярних транзисторів.
- 4 Чому h-параметри транзистора називаються гібридними ?
- 5 Чим визначаються частотні властивості біполярних транзисторів ?
- 6 Дайте порівняльну характеристику коефіцієнтів підсилення для схем зі ЗБ, ЗК, ЗЕ.
- 7 Дайте порівняльну характеристику вхідного і вихідного опорів для схем із ЗБ, ЗК, ЗЕ.
- 8 Назвіть основні види польових транзисторів і опишіть особливості їхньої структури, наведіть їхні основні параметри й умовні графічні позначення.
- 9 Наведіть вихідні характеристики основних видів польових транзисторів і порівняйте їх.

2.3 Варіанти аудиторних задач

Задача 1. Визначити статичні коефіцієнти підсилення по струму біполярного транзистора, увімкненого в схемі зі ЗБ, ЗК, ЗЕ, якщо під час зміни струму емітера на 1,6 мА струм колектора збільшився на 1,57 мА.

Задача 2. Визначити h-параметри для схеми вмикання зі ЗЕ, коефіцієнти передачі по струму α і β , внутрішні фізичні параметри r_b , r_e , r_k , якщо $h_{116} = 40 \text{ Ом}$, $h_{126} = 6 \cdot 10^{-4}$, $h_{216} = 0,97$, $h_{226} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

Задача 3. У схемі на рисунку 2.3 використовується транзистор з параметрами $\beta = 50$, $I_{k0} = 10^{-6} \text{ А}$. Розрахувати опір резистора R_1 і напругу U_{KE} , якщо $E_K = 10 \text{ В}$, $R_2 = 2 \text{ кОм}$, $R_K = 3,3 \text{ кОм}$, $U_{BE} = 0,62 \text{ В}$; $I_B = 0,1 \cdot I_2$.

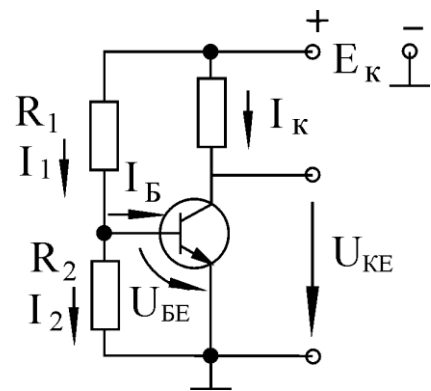


Рисунок 2.3 – Схема до задачі 3

Задача 4. Транзистор типу р-п-р увімкнений за схемою зі ЗЕ (рисунок 2.4). Визначити, у якому режимі він працює, якщо:

- а) $U_{BE} = -0,3 \text{ В}$; $U_{KE} = -0,2 \text{ В}$;
- б) $U_{BE} = -0,5 \text{ В}$; $U_{KE} = -10 \text{ В}$;
- в) $U_{BE} = 0,4 \text{ В}$; $U_{KE} = -10 \text{ В}$.

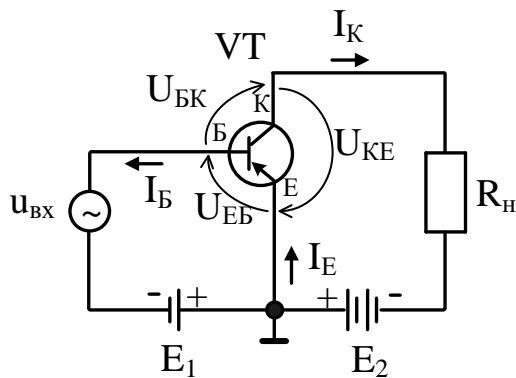


Рисунок 2.4 – Схема до задачі 4

Задача 5. Розрахунок h -параметрів для схеми з рисунка 2.5 із ЗЕ за вхідними і вихідними характеристиками транзистора.

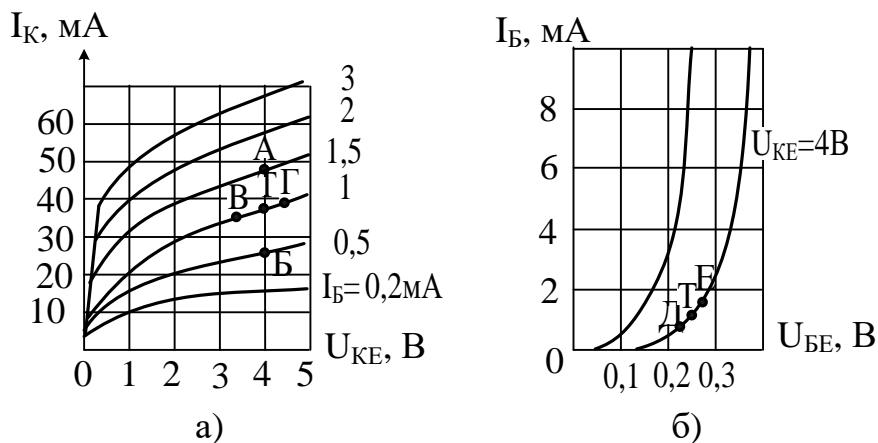


Рисунок 2.5 – Приклади характеристик транзистора

Задача 6. Для польового транзистора з керуючим р-п переходом і каналом п-типу, передатна характеристика якого наведена на рисунку 2.6, визначити крутість S передатної характеристики у точці О.

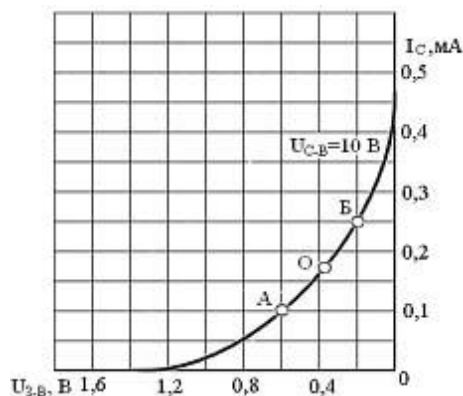


Рисунок 2.6 – Передатна характеристика польового транзистора

2.4 Задачі для самостійної роботи

Задача 7. Застосовуючи вхідні і вихідні характеристики біполярного транзистора [1,14], визначити його параметри h_{21e} , h_{22e} , h_{11e} . Типи транзисторів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань до задачі 7

Варіант	Тип транзистора	Варіант	Тип транзистора	Варіант	Тип транзистора
1	КТ207В	2	КТ392А	23	МП39Б
3	КТ312В	4	КТ313Б	24	КТ351А
5	КТ208Б	6	МП39А	25	КТ814Б
7	МП40А	8	КТ503А	26	КТ301В
9	ГТ402Б	10	КТ345А	27	КТ392А
11	КТ349А	12	КТ350А	28	КТ361А
13	КТ814А	14	МП42А	29	КТ370Б
15	КТ502Б	16	КТ343Б	30	КТ503Б
17	КТ380В	18	КТ209Б	31	КТ603Б
19	КТ315Б	20	КТ608А		
21	КТ3102Б	22	КТ3107А		

Задача 8. За отриманими у задачі 7 даними для обраного транзистора визначити його опори r_b , r_e , r_k .

Задача 9. Визначити крутість характеристики і внутрішній опір польового транзистора (на крутій ділянці вихідних характеристик) [1,14]. Варіанти завдань наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Варіанти завдань до задачі 9

Варіант	Тип транзистора	Варіант	Тип транзистора	Варіант	Тип транзистора
1	2	3	4	5	6
1	КП101Е	2	КП903А	23	КП103М
3	КП312А	4	КП312Б	24	КП201И
5	КП305Д	6	КПС104Г	25	КП201К
7	КП901А	8	КП902Б	26	КП103К
9	КПС202А	10	КП101Г	27	КП306А
11	КП313А	12	КП103Л	28	КП201Ж

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6
13	КП903Б	14	КП304	29	КП201Л
15	КП301Б	16	КП103Ж	30	КП103И
17	КП904А	18	КПС104В	31	КП350А
19	КП103Е	20	КП101Д		
21	КПС104А	22	КП201Е		

Примітка – У розв'язанні задач 7 і 9 мають знаходитися вольт-амперні характеристики транзисторів.

3 РОЗРАХУНОК ТРАНЗИСТОРНИХ КЛЮЧОВИХ КАСКАДІВ

Мета заняття

Вивчити методи розрахунку ключових каскадів на транзисторах.

3.1 Методичні вказівки для самостійної підготовки до заняття

Транзисторні ключі – елементи схемотехніки, що здійснюють під впливом керуючих сигналів різні комутації: вмикання/вимикання пасивних і підсилювальних елементів, джерел живлення і т.д. [3,5,9,11]. У статичному режимі ключ перебуває в одному з двох станів: замкнутому (увімкненому) або розімкненому (вимкненому).

Ключі на біполярних транзисторах. Типова схема ключа на біполярному транзисторі в схемі із ЗЕ наведена на рисунку 3.1.

Біполярний транзистор може знаходитися в трьох режимах.

Режим відсічення. Емітерний і колекторний переходи транзистора зміщені у зворотному напрямку.

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{КЕ}} = U_{\text{жив}} - I_{\text{К0}} \cdot R_{\text{К}}. \quad (3.1)$$

Струм бази транзистора дорівнює струму зворотно-зміщеного колекторного переходу $I_{\text{Б}} = -I_{\text{К0}}$. Умова режиму

відсічення для n-p-n транзистора: $U_B < 0$, для p-n-p транзистора: $U_B > 0$.

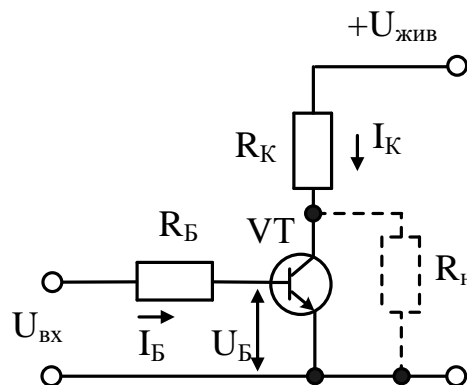


Рисунок 3.1 – Типова схема ключа на біполярному транзисторі

Режим насичення. Емітерний і колекторний переходи транзистора зміщені в прямому напрямку. Умова переходу транзистора в режим насичення:

$$I_B \geq I_{B \text{ нас}} = U_{\text{жив}} / \beta R_K. \quad (3.2)$$

Активний режим. Емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, колекторний перехід зміщений у зворотному напрямку

$$I_K = \beta \cdot I_B + I_{K0} \cdot (1 + \beta). \quad (3.3)$$

Ключі на польових транзисторах. Сьогодні відбувається активне витиснення біполярних транзисторів з області ключових пристроїв. Значною мірою альтернативою служать польові транзистори. Польові транзистори не споживають статичної потужності в колі керування, у них відсутні неосновні носії, а отже, не потрібний час на їх розсмоктування.

З усього різноманіття польових транзисторів для побудови електронних ключів найбільше поширення одержали МДН-транзистори з індукованим каналом (в іноземній літературі – збагаченого типу). Транзистори цього типу характеризуються граничною напругою $U_{\text{пор}}$, під час дії якої виникає провідність каналу. Іншими параметрами МДН-транзистора, використовуваними у розрахунках, є I_{C0} – залишковий струм стоку, крутість характеристики S . МДН-транзистор в області

малих напруг між стоком і витком (відкритий транзистор) можна подати еквівалентним опором (на відміну від насиченого біполярного транзистора – джерела напруги). У ключах на МДН-транзисторах з індукованим каналом, полярності вхідної $U_{зв}$ і вихідної $U_{св}$ напруг збігаються.

На рисунку 3.2, а наведена типова схема ключа на МДН-транзисторі з індукованим каналом і резистивним навантаженням. Резистор R_c у колі стоку виконує роль баластного опору, що обмежує струм стоку транзистора. За допомогою наведеної на рисунку 3.2, б вихідної характеристики транзистора розглянемо режими роботи транзистора.

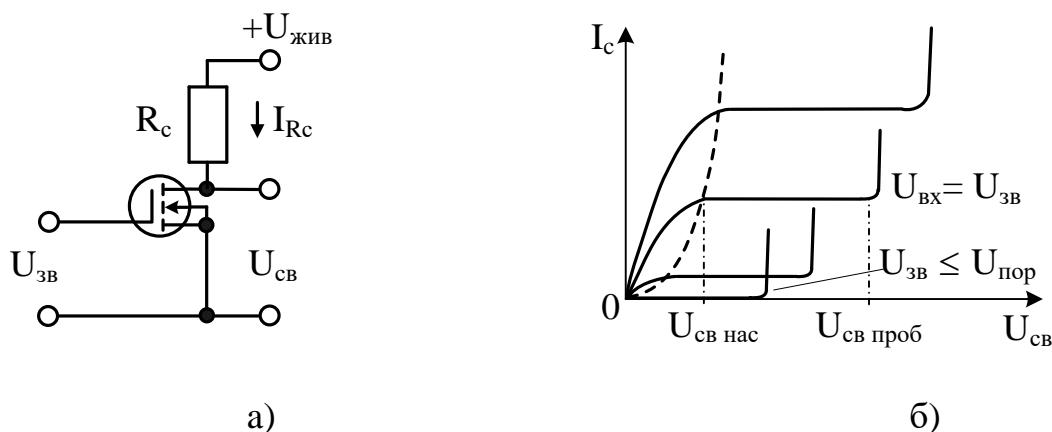


Рисунок 3.2 – Схема ключа на МДН - транзисторі і вихідна характеристика ключа

При $U_{вх} < U_{пор}$ канал транзистора відсутній, струми витоку в транзисторі нехтовно малі, тому $U_{вих} \approx U_{жив}$ (для більш точних розрахунків можна скористатися формулою $U_{вих} = U_{жив} - I_{c0} \cdot R_c$).

При $U_{вх} > U_{пор}$ і $U_{св} > U_{св \text{ нас гр}}$ ($U_{св \text{ нас гр}} = U_{вх} - U_{пор}$ – напруга, що розмежовує круту і положисту області характеристики) робоча точка транзистора перебуває в положистій області характеристики і розраховується за формулами

$$U_{вих} = U_{жив} - I_c R_c. \quad (3.4)$$

З урахуванням того, що

$$I_c = 0,5 \cdot S_0 (U_{вх} - U_{пор})^2, \quad (3.5)$$

де S_0 (A/B^2) – питома крутість транзистора, що зв'язана з крутістю керування по затвору $S=S_0U_{зв}$, одержуємо:

$$U_{вих} = U_{жив} - 0,5 \cdot S_0 R_C (U_{вх} - U_{пор})^2. \quad (3.6)$$

При $U_{вх} > U_{пор}$ і $0 \leq U_{св} \leq U_{св \text{ нас гр}}$ робоча точка транзистора міститься в крутій області характеристики, а вихідна напруга $U_{вих}$ знаходиться із спільного розв'язання рівнянь за виразами

$$U_{вих} = U_{жив} - I_C R_C, \quad (3.7)$$

$$I_C = S_0 \left[(U_{вх} - U_{пор}) U_{вих} - \frac{U_{вих}^2}{2} \right]. \quad (3.8)$$

3.2 Контрольні запитання та завдання

1 Які режими роботи біполярних транзисторів є домінуючими для ключових каскадів?

2 Назвіть стадії процесів вмикання і вимикання ключа на біполярному транзисторі.

3 Як у ключових каскадах можна забезпечити роботу біполярного транзистора до входу в режим насичення?

4 Зазначте принципову різницю керуючих сигналів для ключів на польових транзисторах з керуючим р-п переходом і на МДН - транзисторах з індукованим каналом.

5 Чим визначається швидкодія ключа на МДН - транзисторі з індукованим каналом?

3.3 Варіанти аудиторних задач

Задача 1. Вибрати транзистор, розрахувати значення опорів резисторів R_K , R для схеми на рисунку 3.3. Визначити час перемикання. Розрахувати потужність, споживану ключем від джерела живлення в стані «увімкнено» і «вимкнено» (стосовно навантаження).

Вихідні дані: $U_{жив} = +5$ В, вхідна напруга увімкнення (стосовно ключа) $U_{вх.вкл} = +2.5$ В, вхідна напруга вимкнення $U_{вх.викл} = -1$ В, вихідна напруга низького рівня $U_{вих}^0 \leq 0,8$ В,

вихідна напруга високого рівня $U_{\text{вих}}^1 = 3\text{В}$, опір навантаження $R_{\text{н}} = 100\text{кОм}$.

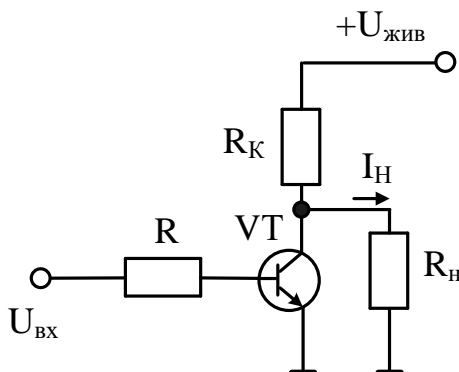


Рисунок 3.3 – Схема до задачі 1

Задача 2. Виконати розрахунок елементів схеми ключа на рисунку 3.4. Вихідні дані (допоміжну схему дивись на рисунку 3.5):

- струм навантаження в режимі «увімкнене» (стосовно навантаження) 2 мА;
- напруга на навантаженні $U_{\text{н}} = U_{\text{вих}}^1 = 4,5\text{В}$;
- ключ закритий (транзистор у режимі насичення) при $U_{\text{вх.викл}} \geq 20\text{В}$;
- ключ відкритий (транзистор у режимі відсікання) при $0 \leq U_{\text{вх.викл}} \leq 15\text{В}$.

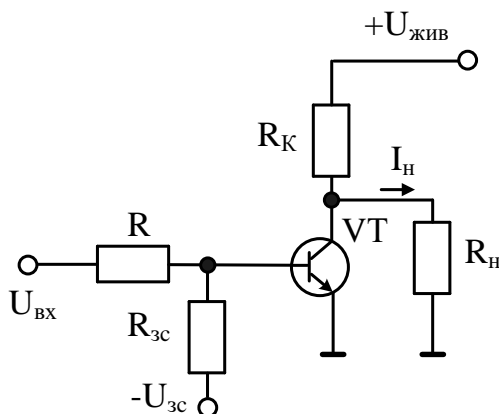


Рисунок 3.4 – Схема до задачі 2

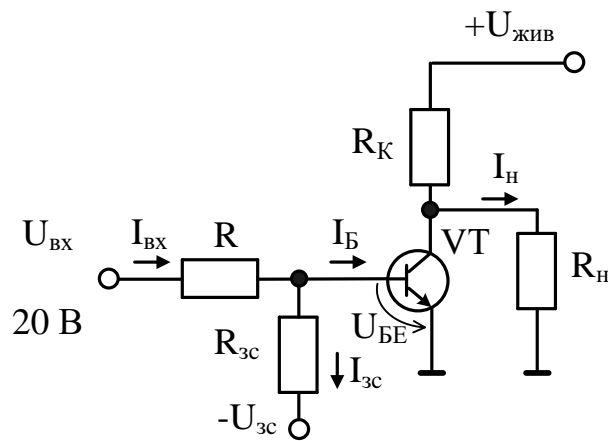


Рисунок 3.5 – Розподіл струмів і напруг при $U_{ВХ.ВИКЛ} = 20 \text{ В}$

Розподіл струмів і напруг при $U_{ВХ.ВИКЛ} = 0 \text{ В}$ $U_{ВХ.ВИКЛ} = 15 \text{ В}$ аналогічно $U_{ВХ.ВИКЛ} = 20 \text{ В}$, (дивись рисунок 3.5).

Задача 3. Ключ на МДН - транзисторі виконаний за схемою рисунка 3.2, а. Порогова напруга транзистора $U_{пор} = 3 \text{ В}$, $U_{жив} = 18 \text{ В}$, $R_C = 1 \text{ кОм}$, $I_{C0} = 1 \text{ мкА}$. Визначити напругу на виході ключа, опір каналу і режим роботи транзистора, якщо вхідна напруга дорівнює: а) $U_{ВХ} = 2 \text{ В}$; б) $U_{ВХ} = 4 \text{ В}$; в) $U_{ВХ} = 10 \text{ В}$. Вихідні характеристики транзистора наведені на рисунку 3.6.

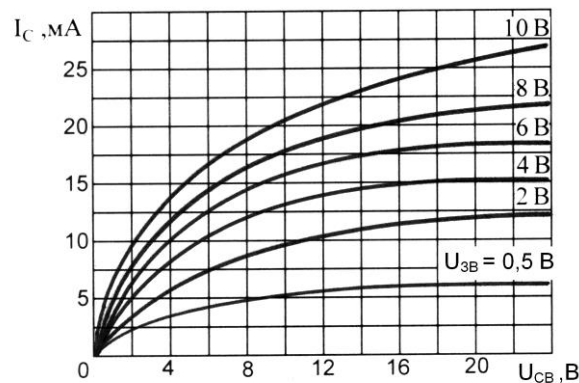


Рисунок 3.6 – Вихідні характеристики транзистора

3.4 Задачі для самостійної роботи

Задача 4. Виконати розрахунок ключа за схемою на рисунку 3.4. Варіанти завдань наведені в таблиці 3.1.

Вихідна напруга низького рівня $U_{ВІХ}^0 \leq 0.8 \text{ В}$. Розрахунок

полягає у виборі транзистора, визначенні значень опорів, аналізі часу перемикавання, розрахунку споживаної потужності.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань до задачі 4

Варіант	Напруга живлення $U_{\text{пит}}$, В	Вхідна напруга вмикання $U_{\text{вх}}^{\text{вickl}}$, В	Вхідна напруга вимкнення $U_{\text{вх}}^{\text{вickl}}$, В	Струм навантаження $I_{\text{н}}$, мА	Вихідна напруга високого рівня $U_{\text{вих}}^1$, В
1	5	3	1	1	4
2	5	2,5	1	0,3	3
3	10	6	6	5	5
4	15	8	5	2	9
5	5	2,5	1	0,5	2,5
6	10	5	2	0,03	8
7	12	7	3	1	10
8	9	6	1	0,05	4
9	5	3	1	10	3
10	12	6	4	0,5	10
11	15	12	5	20	10
12	20	15	8	25	15
13	10	7	3	0,01	6
14	3	2,5	1	0,005	2
15	5	2,5	1	0,15	3
16	5	3	1	3	3
17	10	6	2	1	6
18	12	7	3	2	10
19	5	3	1	0,5	4
20	10	8	3	2	9
21	5	3	1	0,5	2,5
22	12	8	4	0,1	10
23	5	2,5	1	10	4
24	30	20	12	15	20
25	9	4	3	0,5	5
26	10	4	4	0,3	5
27	5	3	1	1	3
28	12	5	2	2	10
29	16	4	1,5	3	14
30	10	6	1	1,5	9

Задача 5. Для схеми ключа на рисунку 3.2,а визначити значення вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ і розрахувати значення опору $R_{\text{с}}$, що

забезпечують формування заданої вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ відповідно до умов з таблиці 3.2. Параметри транзистора: $U_{\text{пор}}=3,5 \text{ В}$, $I_{\text{CO}}=1 \text{ мкА}$. Вихідні характеристики наведені на рисунку 3.6.

Таблиця 3.2 – Варіанти завдань до задачі 5

Варіант	Напруга живлення $U_{\text{жив}}$, В	Вихідна напруга $U_{\text{вих}}$, В
1	5	4
2	20	3
3	10	5
4	15	9
5	8	2,5
6	22	8
7	12	10
8	9	4
9	14	3
10	12	10
11	15	10
12	20	15
13	10	6
14	8	2
15	5	3
16	5	3
17	10	6
18	12	10
19	5	4
20	10	9
21	5	2,5
22	12	10
23	5	4
24	30	20
25	9	5
26	10	5
27	24	3
28	8	4
29	12	6
30	15	10

4 ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

Мета заняття

Набути навички розрахунку схем з напівпровідниковими оптоелектронними приладами.

4.1 Методичні вказівки для самостійної підготовки до заняття

Оптоелектронними приладами називають пристрої, дія яких основана на використанні зовнішнього або внутрішнього фотоефекту або фотогоальванічного ефекту [3, 4, 9, 10, 13]. Одним з різновидів таких пристроїв є напівпровідникові оптоелектронні прилади нижченаведених видів.

Фоторезистори – фотоелектричні напівпровідникові приймачі випромінювання, принцип дії яких оснований на ефекті фотопровідності.

Основні параметри фоторезисторів:

- темновий опір R_T , МОм;
- темновий струм I_T , мА;
- відношення темного опору до світлового $R_T/R_{св}$, відн. од.;
- робоча напруга, U_p , В;
- гранична частота $f_{ГР}$, кГц.

Основні характеристики фоторезисторів:

- вольт-амперна характеристика;
- енергетична характеристика;
- спектральні характеристики.

Фотодіоди – фоточутливі напівпровідникові діоди з відкритим р-п переходом. Під час освітлення р-п переходу з обох його сторін збільшується концентрація носіїв заряду, провідність діода зростає і зворотний струм збільшується. Якщо світлового потоку немає, то через діод протікає звичайний початковий струм I_0 , що називають темновим.

Основні характеристики фотодіодів:

- енергетичні;
- вольт-амперна;
- спектральні;
- частотна.

Основні параметри фотодіодів:

- робоча напруга, $U_p, В$;
- темновий струм $I_T, мкА$;
- інтегральна струмова чутливість $S_{INT}, мкА/лк$.

Світлодіоди – напівпровідникові діоди, у яких під час прямого зсуву р-п переходу відбувається інжекція носіїв заряду з емітерної області в область бази і виникаючої внаслідок цього рекомбінації основних носіїв заряду з неосновними. Це викликає виділення квантів світла – фотонів, що утворюють випромінювання у визначеному діапазоні частот.

Основні характеристики світлодіодів:

- яскравісна характеристика;
- спектральна характеристика;
- вольт-амперна характеристика;
- діаграма спрямованості випромінювання.

Основні параметри світлодіодів:

- сила світла;
- довжина хвилі випромінювання;
- постійна пряма напруга;
- максимальний припустимий постійний струм;
- максимально припустима зворотна напруга.

Оптоелектронні пари (оптрони) – це напівпровідникові прилади, у яких конструктивно об'єднане джерело і приймач випромінювання, що мають між собою оптичний зв'язок.

Основні параметри оптронів:

- напруга ізоляції U_{iz} ;
- вхідний струм $I_{вх}$;
- вихідний струм $I_{вих}$;
- напруга, що комутується, $U_{ком}$;
- зворотна вхідна напруга $U_{вх звор}$;
- зворотна вихідна напруга $U_{вих звор}$;
- час вмикання $t_{вкл}$;
- час вимикання $t_{вим}$.

Оптоелектронні мікросхеми, крім випромінювачів і фотоприймачів, містять пристрої формування, посилення й обробки електричних сигналів.

Основні параметри оптоелектронних мікросхем:

- струм, що комутується $I_{ком}$;
- напруга живлення оптоелектронного перемикача $U_{жив}$;

- вихідний струм високого рівня оптоелектронного перемикача $I_{\text{вих}}^1$;
- вихідний струм низького рівня оптоелектронного перемикача $I_{\text{вих}}^0$;
- час затримки розповсюдження сигналу $t_{\text{зд р}}$;
- опір гальванічної розв'язки R_C ;
- споживаний струм (для різних рівнів вихідної напруги) $I_{\text{жив}}$.

4.2 Контрольні запитання та завдання

- 1 Назвіть основні параметри, характеристики фоторезисторів.
- 2 Перелічіть основні параметри і характеристики світлодіодів.
- 3 Поясніть принцип роботи фотодіода.
- 4 Зобразіть і поясніть ВАХ фотодіода.
- 5 Назвіть основні види оптоелектронних пар.
- 6 Дайте пояснення параметрам оптоелектронних пар.
- 7 Для чого застосовуються оптоелектронні мікросхеми? Дайте пояснення їхнім основним параметрам.

4.3 Варіанти аудиторних задач

Задача 1. Застосувати світлодіод для індикації наявності напруги $U_{\text{жив}} = +15\text{В}$.

4.4 Задачі для самостійної роботи

Задача 2. Для схеми на рисунку 4.1 вибрати світлодіод, розрахувати параметри резистора R . Величина напруги живлення (у вольтах) визначається останніми двома цифрами залікової книжки.

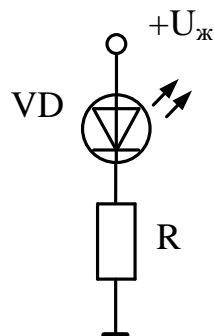


Рисунок 4.1 – Застосування світлодіода для індикації напруги постійного струму

Задача 3. Розрахувати величину напруги в т. А (рисунок 4.2) при освітленому і при затемненому фоторезисторах.

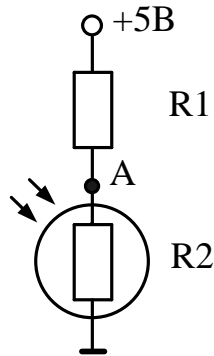


Рисунок 4.2 – Схема вмикання фоторезистора

Параметри фоторезистора взяти з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань до задачі 2

Варіант	$U_{жив}, В$	$R, кОм$	Параметри фоторезистора	
			$R_T, МОм$	$R_T/R_{СВ}$
1	2	3	4	5
1	5	10	2	125
2	12	15	1.3	200
3	10	25	20	500
4	6	13	0.5	25
5	9	13	100	2000
6	25	68	3	600
7	30	100	3.3	250
8	15	15	0.15	300
9	8	27	2	400
10	10	30	40	600
11	14	31	1	60
12	7	18	20	120
13	4	22	10	1000
14	9	20	0.01	14
15	16	7.5	1	10
16	22	51	1	80
17	30	75	30	40
18	25	47	15	100
19	16	33	0.5	80
20	10	10	0.3	30
21	5	9.1	10	100
22	4	10	1	150

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
23	9	6.8	5	40
24	15	47	10	100
25	18	15	2	500
26	24	82	100	200
27	30	91	15	20
28	20	39	1	300
29	12	15	0.3	400
30	9	20	1	40
31	6	24	10	15

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Галкин В.И. Полупроводниковые приборы: Справочник. – Минск: Беларусь, 1987. – 285 с.

2 Галкин В.И. Полупроводниковые приборы: Справочник. – Минск: Беларусь, 1994. – 345 с.

3 Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроительных специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 1991. — 622 с.

4 Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

5 Завадский В.А. Компьютерная электроника. – К.: Век, 1996. – 368 с.

6 Чурілов О.І., Бармін В.І. Методичні вказівки до практичних занять з курсу «Аналогова та цифрова електроніка». – Харків: ХТУРЕ, 2001. – 56 с.

7 Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника: Учеб. для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 768 с.

8 Пароль Н.В., Кайдалов С.А. Фоточувствительные приборы и их применение: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 112 с.

9 Преснухин Л.Н. Расчет элементов цифровых устройств: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1991. – 526 с

10 Терещук Р.М. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: Справочник Радиолобителя. – 4-е изд., стер. – К.: Наук. думка, 1989. – 800 с.

11 Брежнева К.М. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник. – М.: Радио и связь, 1981. – 656 с.