

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять із дисципліни

«ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА»

Частина 1

Аналогова електроніка

Харків 2024

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем 12 лютого 2024 р., протокол № 8.

Методичні вказівки призначені для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня всіх форм навчання спеціальностей 123 «Комп'ютерна інженерія» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», які вивчають дисципліну «Електроніка та мікросхемотехніка».

Укладач

доц. Л. А. Клименко

Рецензент

доц. І. В. Ковтун

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Напівпровідникові діоди	5
2 Транзистори в режимі постійних напруг і струмів	18
3 Транзисторні ключові каскади	29
4 Оптоелектронні прилади.....	39
Список літератури.....	45

ВСТУП

Дисципліна «Електроніка та мікросхемотехніка» є однією з основних дисциплін у галузі апаратної підготовки здобувачів, які навчаються за напрямками «Комп'ютерна інженерія», «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

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

- з 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 теоретичні запитання з теми заняття;
- приклади розв'язання аудиторних задач;
- варіанти завдань для розв'язання в позааудиторний час.

Ступінь підготовленості до заняття оцінюють за допомогою контрольних запитань і завдань із теми заняття.

У задачах використано реальні діоди, транзистори та інтегральні мікросхеми, на які є багато довідкового матеріалу як у бібліотеці УкрДУЗТ, так і в ресурсах Internet.

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

1 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

Мета заняття

Засвоїти методику розрахунку схем із напівпровідниковими діодами, визначення параметрів діодів за ВАХ.

Методичні вказівки для самостійної підготовки до заняття

Вивчити розділи дисципліни, пов'язані з принципом роботи напівпровідникових діодів [2-4, 8, 13].

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

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) діода

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

де U_D – напруга на p-n-переході;

$\varphi_T = kT/q$ – тепловий потенціал, що дорівнює контактній різниці потенціалів φ_k на межі p-n-переходу за відсутності зовнішньої напруги (за $T=300$ К, $\varphi_T = 0.025$ В),

де k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура;

q – заряд електрона;

I_0 – зворотний струм p-n-переходу, утворений за рахунок неосновних носіїв.

Температурна зміна I_0

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

де I_0 – значення теплового струму за кімнатної температури $T_0 = 300$ 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.

За негативних напруг близько 0.1...0.2 В у формулі (1.2) експонентною складовою можна знехтувати ($e^{-4} \approx 0.02$), за позитивних напруг, що перевищують 0.1 В, можна знехтувати одиницею ($e^4 \approx 54.6$). ВАХ, описана цими співвідношеннями, матиме вигляд, наведений на рисунку 1.1, а.

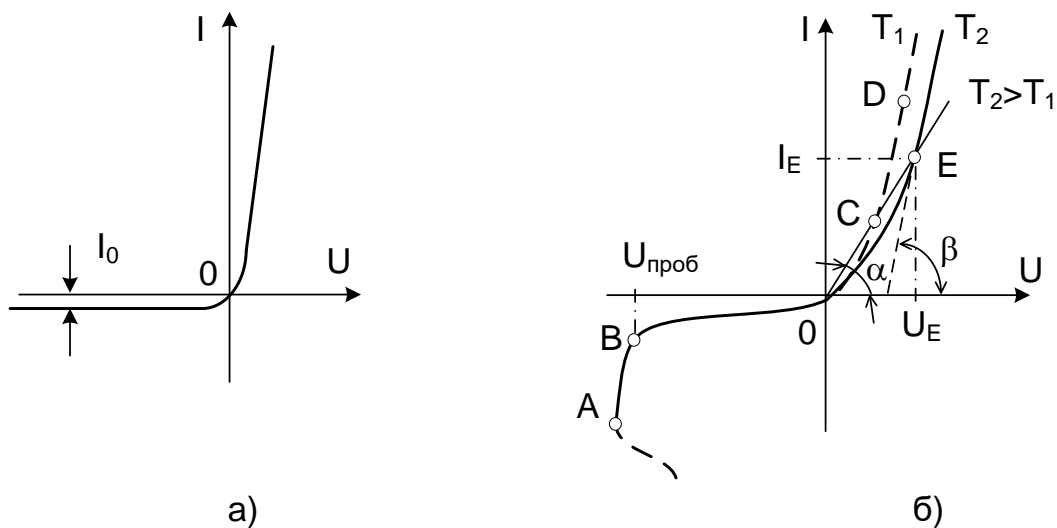


Рисунок 1.1 – Вольт-амперна характеристика діода

Вольт-амперна характеристика реального діода має вигляд, наведений на рисунку 1.1, б (суцільна лінія). З цього випливає, що за визначеного значення зворотної напруги $U_{\text{звор}} = U_{\text{проб}}$ починається

лавиноподібний процес зростання струму $I_{звор}$, що відповідає електричному пробію р-п-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 $I_{звор}$ характерний для кремнієвих діодів. У діодах із германію під час збільшення зворотної напруги тепловий пробій р-п-переходу настає практично одночасно з початком лавиноподібного процесу наростання струму $I_{звор}$. Електричний пробій оборотний, тобто після зменшення напруги $U_{звор}$ робота діода відповідає положистій ділянці зворотної галузі ВАХ. Тепловий пробій необоротний, тому що руйнує р-п-перехід.

Напівпровідниковий діод характеризується *статичними* і *диференціальним* (динамічним) опором, що легко визначають 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 котангенсу кута нахилу прямої, проведеної з початку координат через задану робочу точку ВАХ, до осі абсцис:

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

Залежно 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

Випрямні діоди. Застосовують у пристроях перетворення змінного струму в постійний. Випрямні діоди поділяють за матеріалом, використовуваним для р-п-переходу (германій, кремній та ін.), а також 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 допустимою 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 за його зворотного ввімкнення. Стабілітрони використовують для стабілізації, фіксації рівнів напруг.

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 їхня відмінність?
- 3 Визначіть величину струму через р-п-перехід за 20 °С, якщо напруга на переході 0.6 В, а зворотний струм 1 мкА.

- 4 Опишіть випрямний діод, його основні параметри. Чим характеризуються і що погіршують випрямні властивості діода?
- 5 Опишіть особливості діодів Шотткі.
- 6 Назвіть основні параметри напівпровідникових діодів.
- 7 Яка відмінна риса імпульсних діодів?
- 8 Завдяки чому у випрямних діодах великі значення максимально допустимого прямого струму?
- 9 Опишіть особливості тунельних діодів.
- 10 Опишіть принцип дії стабілітрона.
- 11 Перелічіть основні параметри стабілітронів.
- 12 Опишіть варикап, його переваги, особливості. Поясніть принцип дії варикапа.
- 13 Опишіть фотодіод, його переваги, параметри, застосування. Поясніть режими роботи фотодіода.
- 14 Опишіть світлодіод, його переваги, параметри, застосування. Поясніть принцип дії (режими роботи) світлодіода.

Приклади аудиторних задач

Задача 1. Визначити вихідну напругу на схемі рисунка 1.2, якщо діод ідеальний, а $U_{вх} = 20 \text{ В}$.

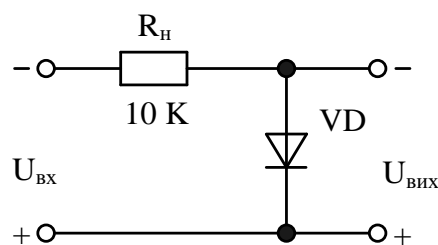


Рисунок 1.2 – Схема до задачі 1

Задача 2. Користуючись ВАХ напівпровідникового діода (рисунок 1.3), визначити статичний опір $R_{СТ}$ за ввімкнення в прямому і зворотному напрямках, якщо до діода прикладені такі напруги: $U_{пр} = 0.6$ В, $U_{звор} = 40$ В за температури навколишнього середовища $t = 25$ °С.

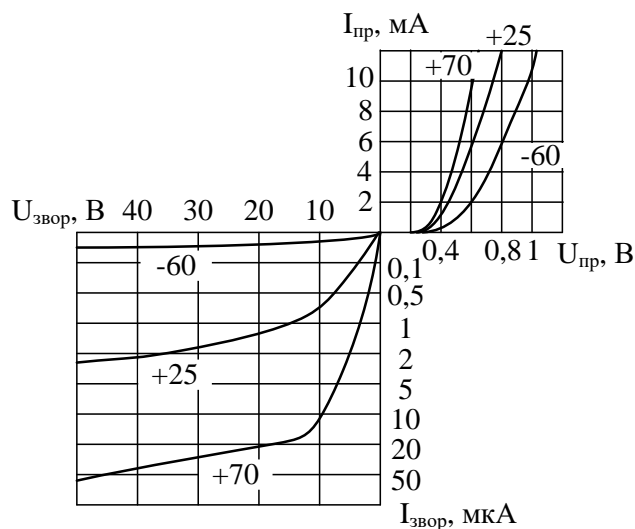


Рисунок 1.3 – ВАХ напівпровідникового діода

Задача 3. Визначити диференціальний опір діода, ВАХ якого наведена на рисунку 1.3, для $U_{пр} = 0,5$ В, $U_{пр} = 0,7$ В за $t = 25$ °С.

Задача 4. Визначити, на якій частоті ємнісний опір діода дорівнює $R_{звор}$, внаслідок чого відбудеться помітне збільшення зворотного струму. Параметри діода: $R_{пр} = 5$ Ом, $R_{звор} = 2$ МОм, $C = 10$ пФ.

Задача 5. Визначити вихідну напругу на схемі рисунка 1.4, якщо за температури $T=300$ К у схемі використано кремнієвий діод, що має зворотний струм $I_0 = 20$ мкА, а $U_{вх} = 30$ В.

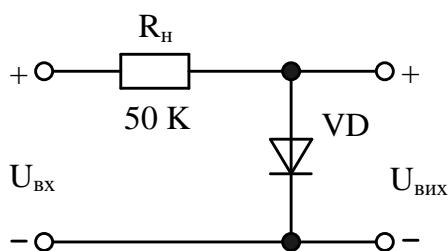


Рисунок 1.4 – Схема до задачі 5

Задача 6. На вхід схеми (рисунок 1.5) подано синусоїдальну напругу амплітудою $U_{\text{вх}} = 10$ В. Опір відкритого діода $R_{\text{пр}} = 100$ Ом, закритого $R_{\text{звор}} = 400$ кОм, $R_{\text{н}} = 1$ кОм. Визначити амплітуду напруги на виході під час дії додатної і від'ємної напівхвиль вхідної напруги.

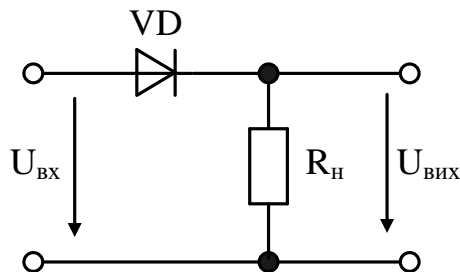


Рисунок 1.5 – Схема до задачі 6

Задача 7. У схемі на рисунку 1.6 застосовано стабілітрон із такими параметрами: $U_{\text{ст}} = 10$ В, $I_{\text{ст max}} = 13$ мА, $I_{\text{ст min}} = 3$ мА, опір навантаження $R_{\text{н}} = 2$ кОм, опір обмежувального резистора $R = 1$ кОм. Визначити припустимий діапазон зміни вхідної напруги ($U_{\text{вх min}} < U_{\text{вх}} < U_{\text{вх max}}$).

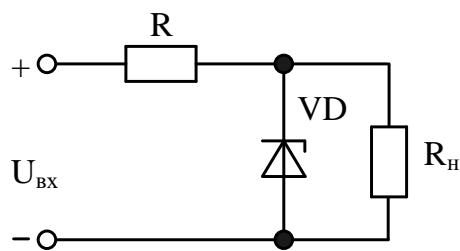


Рисунок 1.6 – Схема до задачі 7

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

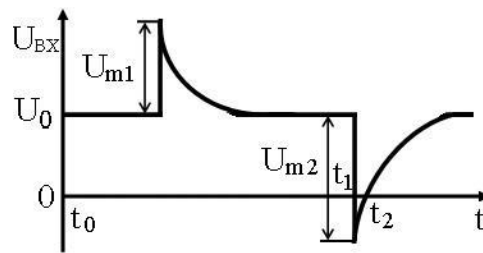


Рисунок 1.7 – Діаграми вхідної і вихідної напруг

Задача 9. Для стабілізації напруги на навантаженні використовують напівпровідниковий стабілітрон, напруга стабілізації якого $U_{ст} = 10$ В. Визначити допустимі межі зміни напруги живлення (E_{min} і E_{max}), якщо максимальний струм стабілітрона $I_{стmax} = 30$ мА, $I_{стmin} = 1$ мА, опір навантаження $R_H = 1$ кОм, опір обмежувального резистора $R_{орг} = 0,5$ кОм.

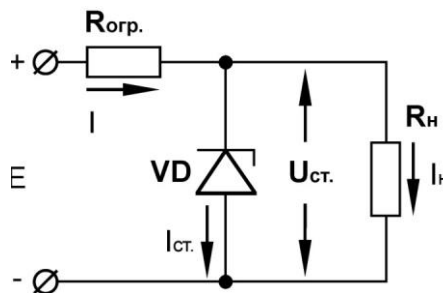


Рисунок 1.8 – Схема до задачі 9

Задача 10. В ідеальному діоді за $T = 300$ К пряма напруга $0,1$ В викликає певний струм носіїв заряду. За якої прямої напруги цей струм збільшиться у два рази?

Задача 11. Напівпровідниковий діод має прямий струм $0,8$ А за прямої напруги $0,3$ В і температури навколишнього середовища 35 °С. Визначити зворотний струм, диференціальний опір за прямої напруги $0,2$ В. Диференціальна напруга діода за зворотної напруги 1 В. Як зміниться зворотний струм і диференціальний опір діода зі збільшенням температури на 40 К?

Задача 12. Діод має зворотний струм насичення $I_0 = 10$ мкА, напруга, прикладена до діода, дорівнює 0,5. Знайти відношення прямого струму до зворотного за $T = 300$ К.

Задачі для самостійної роботи

Задача 13. Використовуючи ВАХ діода [7, 14], визначити статичний опір напівпровідникового діода за ввімкнення в прямому і зворотному напрямках, постійного струму і температури навколишнього середовища $+25$ °С. Варіанти завдань наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань для задачі 13

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
6	Д237А	0,6	150
7	Д226	0,6	250
8	ДММЗ	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

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
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	КД106А	0,9	75
22	Д226А	0,5	150
23	Д106	0,7	40
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	КДС111А	0,8	150

Примітка – якщо тип діода в таблиці 1.1 зазначений без літери, дозволено застосувати діод із будь-якою літерою. У розв'язанні задачі обов'язково мають бути включені вольт-амперні характеристики вибраного діода з позначенням точок, що відповідають заданим значенням напруг і відповідним їм значенням струмів.

Задача 14. 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 наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Варіанти завдань для задачі 14

Варіант	Тип стабілітрона	$U_{вх\ min}$, В	$U_{вх\ max}$, В	R_H , Ом
1	2	3	4	5
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

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5
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 вибраного стабілітрона [7, 14].

Задача 15. На вхід схеми (рисунок 1.9) подають синусоїдальну напругу. Визначити амплітуду напруги на виході під час дії додатної і від’ємної напівхвиль вхідної напруги. Значення опорів відкритого діода $R_{пр}$, закритого діода $R_{звор}$, R_H , $R_{бал}$, амплітуда вхідної напруги $U_{вх}$ наведені в таблиці 1.3.

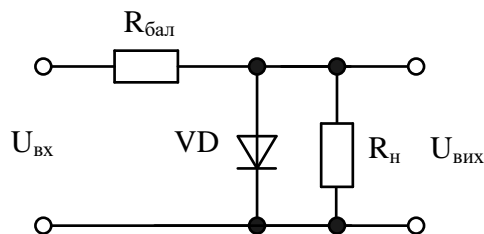


Рисунок 1.9 – Схема до задачі 15

Таблиця 1.3 – Варіанти завдань для задачі 15

Варіант	$U_{вх}$, В	$R_{пр}$, Ом	$R_{звор}$, кОм	R_H , Ом	$R_{бал}$, Ом
1	2	3	4	5	6
1	15	50	100	330	500
2	13	100	300	100	720
3	12	120	200	270	400

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6
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

Засвоїти методику розрахунку параметрів і режимів роботи транзисторів.

Методичні вказівки для самостійної підготовки до заняття

Вивчити розділи дисципліни, пов'язані з принципом роботи транзисторів, їхніми основними параметрами і характеристиками, схемами ввімкнення [5, 6, 10, 12].

Біполярні транзистори. Переходи біполярного транзистора можуть бути зміщені в прямому або зворотному напрямках. Залежно 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 використовують;
- 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 ввімкнення транзисторів: із загальною базою (ЗБ), загальним емітером (ЗЕ) і загальним колектором (ЗК). Така термінологія вказує, який з електродів транзистора є загальним для його вхідного та вихідного кіл.

Для схеми з ЗБ $I_{вх} = I_E$, $I_{вих}=I_K$, а коефіцієнт прямого передавання струму

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

Для схеми з ЗЕ $I_{вх} = I_B$, $I_{вих}=I_K$, а коефіцієнт прямого передавання струму

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

Для схеми з ЗК $I_{вх} = I_B$, $I_{вих}=I_E$, а коефіцієнт прямого передавання струму

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

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

- для схеми з загальною базою (ЗБ)

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

- для схеми з загальним емітером (ЗЕ)

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

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

I_{K0} – зворотний струм через колекторний перехід за розімкненого виводу емітера.

Для розрахунку кіл із біполярними транзисторами в наш час використовують h-параметри, тобто транзистор подають як чотириполіусник і записують рівняння чотириполіусника в h-параметрах. Коефіцієнти чотириполіусника (h-параметри)

$$h_{11} = \Delta U_{\text{бe}} / \Delta I_{\text{б}} \text{ за } U_{\text{ке}} = \text{const}, \quad (2.6)$$

$$h_{12} = \Delta U_{\text{бe}} / \Delta U_{\text{ке}} \text{ за } I_{\text{б}} = \text{const}, \quad (2.7)$$

$$h_{21} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}} \text{ за } U_{\text{ке}} = \text{const}, \quad (2.8)$$

$$h_{22} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta U_{\text{ке}} \text{ за } I_{\text{б}} = \text{const}. \quad (2.9)$$

Фізичний сенс h-параметрів:

h_{11} – вхідний опір $R_{\text{вх}}$, Ом;

h_{12} – безрозмірний коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою;

h_{21} – безрозмірний коефіцієнт передавання струму β ;

h_{22} – вихідна провідність ($1/R_{\text{вих}}$), См.

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

Польові транзистори. Польовий транзистор характеризується такими параметрами.

Основний параметр – *крутизна* S може бути до декількох міліамперів на вольт.

$$S = \Delta I_{\text{C}} / \Delta U_{\text{з-в}} \text{ за } U_{\text{C-в}} = \text{const}. \quad (2.10)$$

Крутизна характеризує керуючу дію затвора. Наприклад, $S = 3$ 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 $I_C = f(U_{3B})$ за $U_{CB} = \text{const}$ (рисунок 2.1).

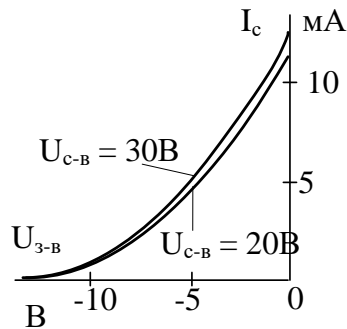


Рисунок 2.1 – Керуючі характеристики польового транзистора

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

$$R_i = 1/Y_{22} = \Delta U_{C-B} / \Delta I_C \text{ за } U_{3-B} = \text{const}. \quad (2.11)$$

Значення R_i досягає сотень кілоомів і виявляється в багато разів більше за опір транзистора постійного струму R_o на положистих ділянках вихідних (стокових) характеристик $I_C = f(U_{CB})$ за $U_{3B} = \text{const}$ (рисунок 2.2).

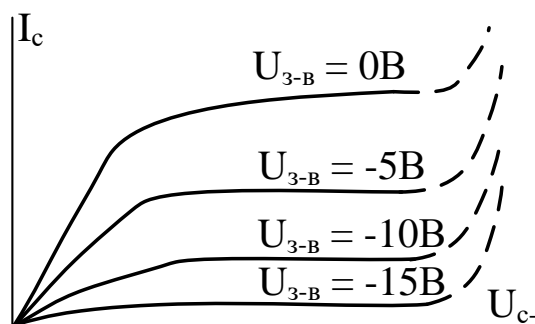


Рисунок 2.2 – Вихідні (стокові) характеристики польового транзистора

Вхідний опір польового транзистора

$$R_{ВХ} = \Delta U_{З-В} / \Delta I_3 \text{ за } U_{С-В} = \text{const.} \quad (2.12)$$

Оскільки струм I_3 – зворотний струм n-p-переходу, а тому дуже малий, то $R_{ВХ}$ досягає одиниць і десятків мегаомів.

Початковий струм стоку $I_{Споч}$ – струм стоку за нульової напруги $U_{ЗВ}$.

Постійний струм стоку $I_{Смах}$.

Контрольні запитання і завдання

- 1 Наведіть статичні вхідні і вихідні ВАХ біполярного транзистора.
- 2 Які струми і напруги є вхідними (вихідними) під час ввімкнення транзистора за схемою зі спільною базою, спільним емітером, спільним колектором?
- 3 Наведіть основні параметри біполярних транзисторів.
- 4 Чому h-параметри транзистора називають гібридними?
- 5 Як визначають 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 Що таке статичні та динамічні характеристики? Накресліть і охарактеризуйте еквівалентні схеми заміщення?
- 9 Опишіть схему ввімкнення транзистора з загальним емітером, його параметри, переваги та недоліки.
- 10 Назвіть принцип дії польових транзисторів, класифікацію та переваги польових транзисторів порівняно з біполярними.

11 Назвіть основні види польових транзисторів і опишіть особливості їхньої структури, наведіть їхні основні параметри й умовні графічні позначення.

12 Наведіть вихідні характеристики основних видів польових транзисторів і порівняйте їх.

Приклади аудиторних задач

Задача 1. Визначити статичні коефіцієнти підсилення за струмом біполярного транзистора, включеного у схеми 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 ввімкнення з ЗЕ, коефіцієнти передавання за струмом α і β , внутрішні фізичні параметри r_b , r_k , якщо $h_{11\epsilon} = 40 \text{ Ом}$, $h_{12\epsilon} = 6 \cdot 10^{-4}$, $h_{21\epsilon} = 0,97$, $h_{22\epsilon} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

Задача 3. Транзистор типу р-п-р ввімкнений за схемою з ЗЕ (рисунок 2.3). 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) $U_{BE} = 0.4 \text{ В}$; $U_{KE} = -10 \text{ В}$.

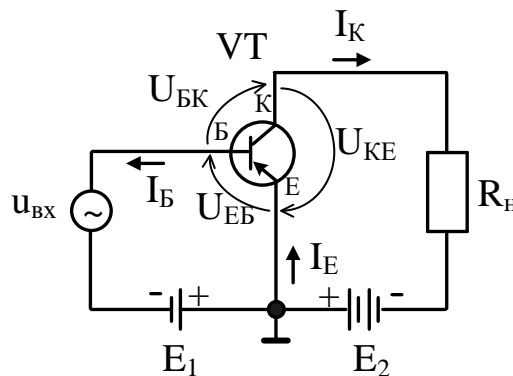


Рисунок 2.3 – Схема до задачі 3

Задача 4. У схемі на рисунку 2.4 використано транзистор із параметрами $\beta = 48$, $I_{k0} = 5$ мкА. Розрахувати опір резистора R_1 і напругу U_{KE} , якщо $E_K = 15$ В, $R_2 = 10$ кОм, $R_K = 5$ кОм, $U_{BE} = 0,85$ В; $I_B = 0,1 \cdot I_2$.

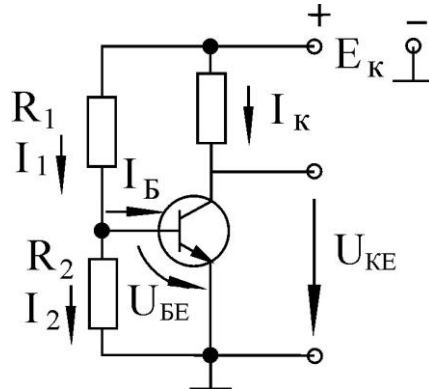


Рисунок 2.4 – Схема до задачі 4

Задача 5. Визначити вхідний і вихідний опори та коефіцієнти підсилення за струмом і напругою ($R_{вх}$, K_i , $R_{ввых}$, K_u) біполярного транзистора для схеми з ЗБ з параметрами $r_b = 500$ Ом; $r_c = 45$ Ом; $r_k = 1$ МОм; $R_K = 2$ к; $R_2 = 500$ Ом (рисунок 2.5).

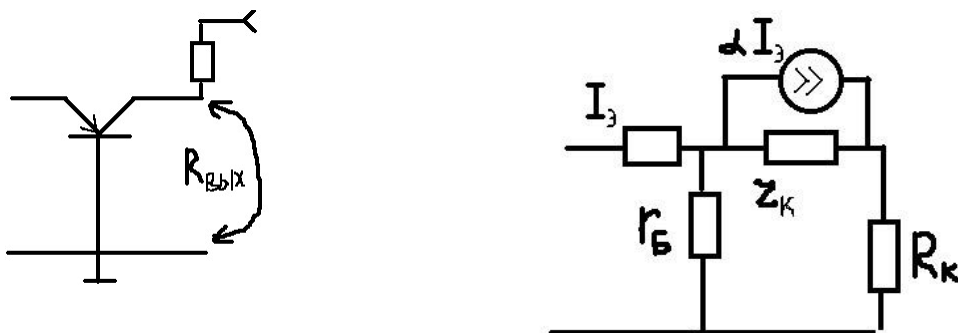


Рисунок 2.5 – Схема до задачі 5

Задача 6. Визначити вихідну напругу $U_{кб}$ біполярного транзистора для схеми з ЗБ з параметрами $R_c = 5 \cdot 10^3$ Ом; $R_K = 10 \cdot 10^3$ Ом; $E_c = 10$ В; $E_K = 30$ В; $\alpha = 1$; $I_{кб0} = 0$ (рисунок 2.6).

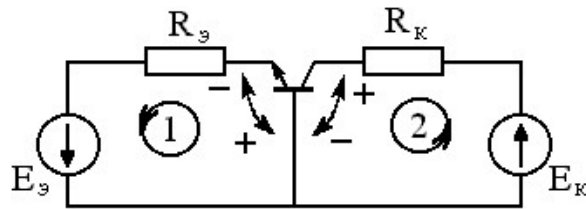


Рисунок 2.6 – Схема до задачі 6

Задача 7. Визначити вхідний опір і коефіцієнти підсилення за напругою ($R_{вх}$, K_u) біполярного транзистора для схеми з ЗЕ з параметрами $\alpha = 0.99$; $r_{б} = 100 \text{ Ом}$; $r_{з} = 40 \text{ Ом}$; $r_{к} = 2 \text{ Ом}$; $R_{к} = 5 \text{ кОм}$ (рисунок 2.7).

Задача 8. Визначити вихідну напругу $U_{кв}$ біполярного транзистора для схеми з ЗЕ з параметрами $\beta = 50$; $I_{кб0} = 10 \text{ мкА}$; $R_{б} = 10 \text{ кОм}$; $E_{б} = 1 \text{ В}$; $R_{к} = 5 \text{ кОм}$; $E_{к} = 20 \text{ В}$ (рисунок 2.7).

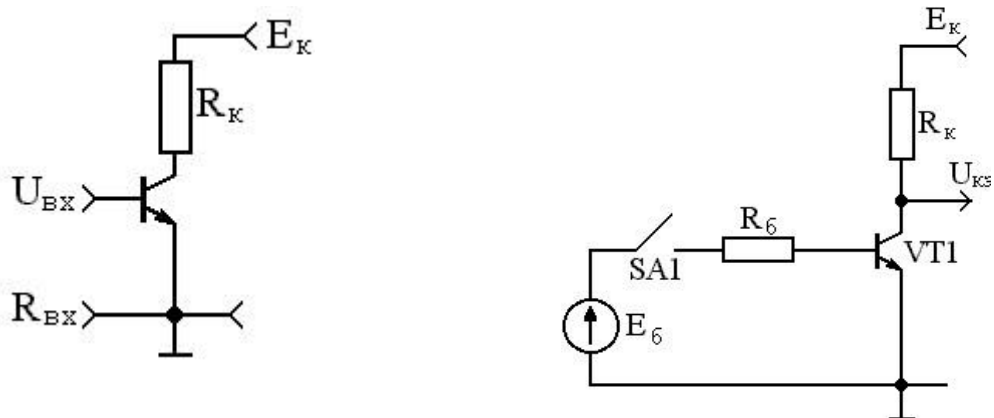


Рисунок 2.7 – Схеми до задач 7, 8

Задача 9. Розрахунок h -параметрів для схеми з рисунка 2.8 із ЗЕ за вхідними і вихідними характеристиками транзистора.

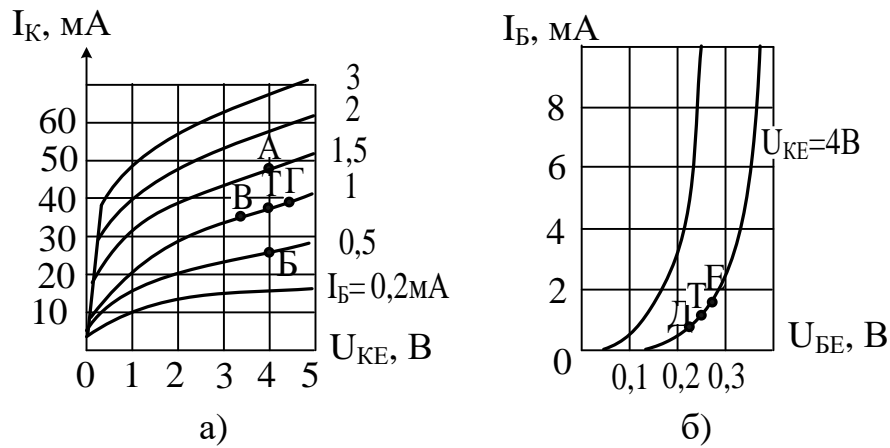


Рисунок 2.8 – Вихідна (а) і вхідна (б) вольт-амперні характеристики транзистора з ЗЕ

Задача 10. Для польового транзистора з керуючим р-п-переходом і каналом п-типу, передатна характеристика якого наведена на рисунку 2.9, визначити крутизну S передатної характеристики в точці O .

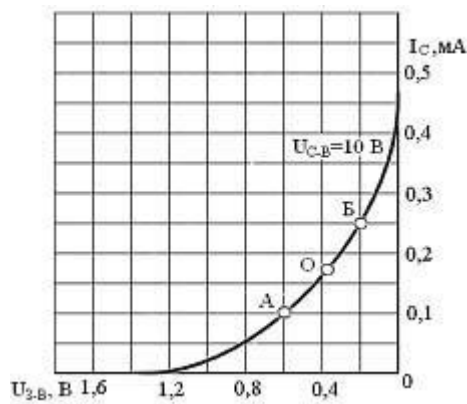


Рисунок 2.9 – Передатна характеристика польового транзистора

Задачі для самостійної роботи

Задача 11. Застосовуючи вхідні і вихідні характеристики біполярного транзистора з таблиці 2.1 [1, 9], визначити його параметри h_{11e} , h_{12e} , h_{21e} , h_{22e} .

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань для задачі 11

Варіант	Тип транзистора	Варіант	Тип транзистора	Варіант	Тип транзистора
1	КТ207А	2	КТ392А	23	МП39Б
3	КТ312В	4	ГТ313Б	24	КТ351А
5	КТ208Б	6	МП38А	25	КТ808А
7	МП40А	8	ГТ405А	26	КТ301В
9	ГТ402Д	10	КТ345А	27	ПЧ16
11	КТ349А	12	КТ350А	28	КТ361А
13	КТ809А	14	МП42А	29	КТ370Б
15	КТ501Б	16	КТ343Б	30	КТ369А
17	КТ380В	18	КТ3107А	31	КТ603Б
19	КТ317Б	20	КТ608А		
21	КТ3102Б	22	КТ214А-1		

Задача 12. За отриманими в задачі 11 даними для обраного транзистора визначити його опори r_b , r_e , r_k (використати одногенераторну схему) (рисунок 2.10).

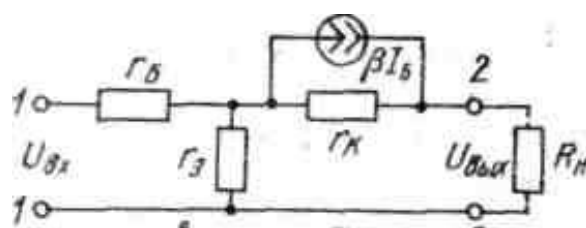


Рисунок 2.10 – Еквівалентна Т-подібна схема транзистора з загальним емітером

Задача 13. Визначити крутизну характеристики, вхідний і внутрішній опори польового транзистора (на крутій ділянці вихідних характеристик) [1, 9]. Варіанти завдань наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Варіанти завдань для задачі 13

Варіант	Тип транзистора	Варіант	Тип транзистора	Варіант	Тип транзистора
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
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 11 і 13 мають знаходитися вольт-амперні характеристики транзисторів із позначенням точок (ділянки) для розрахунку параметрів.

3 ТРАНЗИСТОРНІ КЛЮЧОВІ КАСКАДИ

Мета заняття

Вивчити методи розрахунку ключових каскадів на транзисторах.

Методичні вказівки для самостійної підготовки до заняття

Транзисторні ключі – елементи схемотехніки, що здійснюють під впливом керуючих сигналів різні комутації: ввімкнення/вимикання пасивних

і підсилювальних елементів, джерел живлення і т. д. [3, 5, 6, 11, 15]. У статичному режимі ключ знаходиться в одному з двох станів: замкненому (ввімкненому) або розімкненому (вимкненому).

Ключі на біполярних транзисторах. Типова схема ключа на біполярному транзисторі у схемі з СЕ наведена на рисунку 3.1.

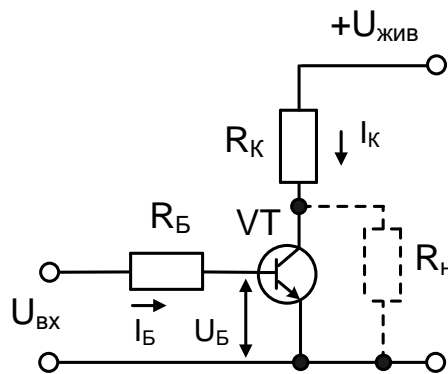


Рисунок 3.1 – Типова схема ключа на біполярному транзисторі

Біполярний транзистор може знаходитися в трьох режимах.

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

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

Струм бази транзистора дорівнює струму зворотно-зміщеного колекторного переходу: $I_{\text{Б}} = -I_{\text{К0}}$. Умова режиму відсічення для п-р-п-транзистора - $U_{\text{Б}} < 0$, для р-п-р-транзистора - $U_{\text{Б}} > 0$.

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

$$I_{\text{Б}} \geq I_{\text{Б нас}} = U_{\text{ПИТ}} / \beta R_{\text{К}}. \quad (3.2)$$

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

$$I_{\text{К}} = \beta \cdot I_{\text{Б}} + I_{\text{К0}} \cdot (1 + \beta). \quad (3.3)$$

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

З усього різноманіття польових транзисторів для побудови електронних ключів найбільшого 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, використовуваних у розрахунках є I_{C0} – залишковий струм стоку, крутизна характеристики S . МДН-транзистор в області малих напруг між стоком і витокм (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.

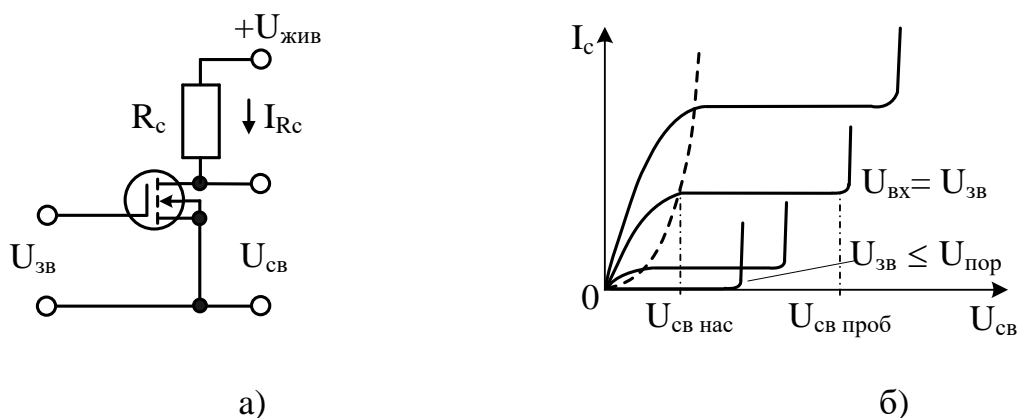


Рисунок 3.2 – Схема ключа на МДН-транзисторі і вихідна характеристика ключа

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

За $U_{вх} > U_{пор}$ і $U_{св} > U_{св\ нас\ гр}$ ($U_{св\ нас\ гр} = U_{вх} - U_{пор}$ – напруга, що розмежовує круту і положисту області характеристики) робоча точка транзистора знаходиться в положистій області характеристики, розраховують її за такими формулами:

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

З урахуванням того, що

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

де S_0 (A/B^2) – питома крутизна транзистора, пов'язана з крутизною керування за затвором $S = S_0 U_{\text{зв}}$,

одержуємо

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

За $U_{\text{вх}} > U_{\text{пор}}$ і $0 \leq U_{\text{св}} \leq U_{\text{св нас гр}}$ робоча точка транзистора знаходиться в крутій області характеристики, а вихідну напругу $U_{\text{вих}}$ розраховують із спільного розв'язку рівнянь

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

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

Контрольні запитання та завдання

- 1 Які режими роботи біполярних транзисторів є домінуючими для ключових каскадів?
- 2 Назвіть стадії процесів ввімкнення і вимикання ключа на біполярному транзисторі.
- 3 Як у ключових каскадах можна забезпечити роботу біполярного транзистора до входження в режим насичення?
- 4 Зазначте принципову різницю керуючих сигналів для ключів на польових транзисторах із керуючим р-п-переходом і на МДН-транзисторах з індукованим каналом.
- 5 Чим визначена швидкодія ключа на МДН-транзисторі з індукованим каналом?

Приклади 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 «ввімкнено» і «вимкнено» (відносно навантаження).

Вихідні дані: $U_{\text{жив}} = +5$ В, вхідна напруга ввімкнення (відносно ключа) $U_{\text{вх.вкл}} = +2.5$ В, вхідна напруга вимкнення $U_{\text{вх.викл}} = -1$ В, вихідна напруга низького рівня $U_{\text{вих}}^0 \leq 0,8$ В, вихідна напруга високого рівня $U_{\text{вих}}^1 = 3$ В, опір навантаження $R_H = 100$ кОм.

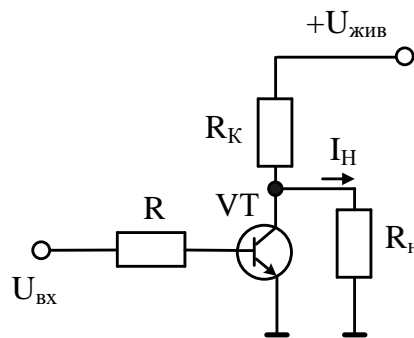


Рисунок 3.3 – Схема до задачі 1

Задача 2. Виконати розрахунок елементів схеми ключа на рисунку 3.4. Вихідні дані, допоміжну схему подано на рисунку 3.5:

– струм навантаження в режимі «ввімкнено» (відносно навантаження) 2 мА;

– напруга на навантаженні $U_H = U_{\text{вих}}^1 = 4,5$ В;

– ключ закритий (транзистор у режимі насичення) за $U_{\text{вх.викл}} \geq 20$ В;

– ключ відкритий (транзистор у режимі відсічення) за $0 \leq U_{\text{вх.вкл}} \leq 15$ В.

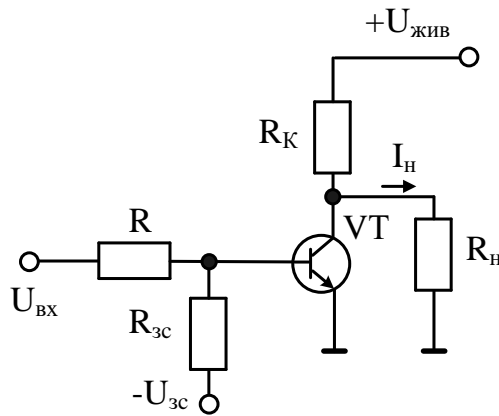


Рисунок 3.4 – Схема до задачі 2

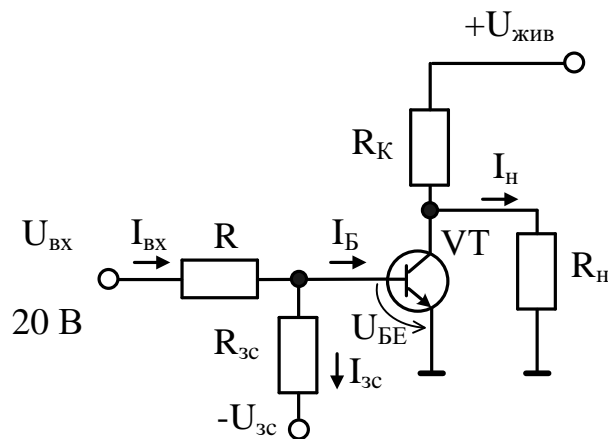


Рисунок 3.5 – Розподіл струмів і напруг за $U_{\text{вх.викл}} = 20 \text{ В}$

Розподіл струмів і напруг за $U_{\text{вх.викл}} = 0 \text{ В}$ $U_{\text{вх.викл}} = 15 \text{ В}$ аналогічно $U_{\text{вх.викл}} = 20 \text{ В}$ (рисунок 3.5).

Задача 3. Ключ на МДН-транзисторі виконаний за схемою рисунка 3.2, а. Порогова напруга транзистора $U_{\text{пор}} = 3 \text{ В}$, $U_{\text{жив}} = 18 \text{ В}$, $R_{\text{с}} = 1 \text{ кОм}$, $I_{\text{с0}} = 1 \text{ мкА}$. Визначити напругу на виході ключа, опір каналу і режим роботи транзистора, якщо вхідна напруга дорівнює: а) $U_{\text{вх}} = 2 \text{ В}$; б) $U_{\text{вх}} = 4 \text{ В}$; в) $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$. Вихідні характеристики транзистора наведені на рисунку 3.6.

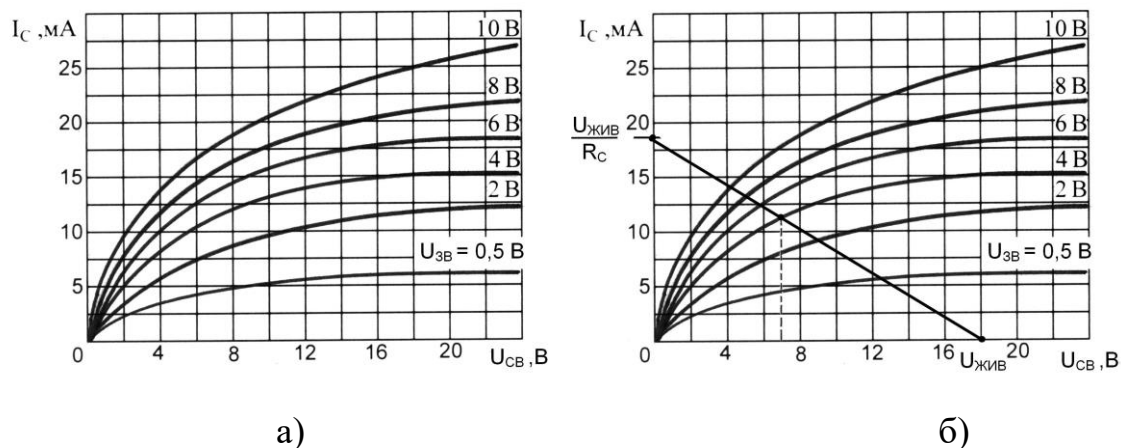


Рисунок 3.6 – Вихідні характеристики транзистора

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 $U_{\text{вих}}^0 \leq 0.8\text{В}$. Розрахунок полягає у виборі транзистора, визначенні значень опорів, аналізі часу переключення, розрахунку споживаної потужності.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань для задачі 4

Номер з/п	Напруга живлення $U_{\text{пит}}, \text{В}$	Вхідна напруга ввімкнення $U_{\text{вх}}^{\text{вickl}}, \text{В}$	Вхідна напруга вимкнення $U_{\text{вх}}^{\text{вickl}}, \text{В}$	Струм навантаження $I_{\text{н}}, \text{мА}$	Вихідна напруга високого рівня $U_{\text{вих}}^1, \text{В}$
1	2	3	4	5	6
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

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
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 $U_{вх}$ і розрахувати значення опору R_C , що забезпечують формування заданої вихідної напруги $U_{вих}$ відповідно до умов із таблиці 3.2. Параметри транзистора: $U_{пор} = 3,5$ В, $I_{C0} = 1$ мкА. Вихідні характеристики наведені на рисунку 3.6, а.

Таблиця 3.2 – Варіанти завдань для задачі 5

Номер з/П	Напруга живлення $U_{жив}, В$	Вихідна напруга $U_{вих}, В$
1	2	3
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

Продовження таблиці 3.2

1	2	3
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 з розрахунку схем із напівпровідниковими оптоелектронними приладами.

Методичні вказівки для самостійної підготовки до заняття

Оптоелектронними приладами називають пристрої, дія яких заснована на використанні зовнішнього або внутрішнього фотоефекту чи фотогальванічного ефекту [2-4, 10-13, 15]. Одним із різновидів цих приладів є напівпровідникові оптоелектронні прилади таких видів.

Фоторезистори – фотоелектричні напівпровідникові приймачі випромінювання, принцип дії яких заснований 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;
- енергетична;
- спектральні.

Фотодіоди – фоточутливі напівпровідникові діоди з відкритим р-п-переходом. Під час освітлення р-п-переходу з обох його боків збільшується концентрація носіїв заряду, провідність діода зростає, і зворотний струм збільшується. Якщо світлового потоку нема, 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-n-переходу відбувається інжекція носіїв заряду з емітерної області в область бази, і виникає внаслідок цього рекомбінація основних носіїв заряду з неосновними. Це викликає виділення квантів світла – фотонів, що утворюють випромінювання у визначеному діапазоні частот.

Основні характеристики світлодіодів:

- яскравості;
- спектральна;
- вольт-амперна;
- діаграма спрямованості випромінювання.

Основні параметри світлодіодів:

- сила світла;
- довжина хвилі випромінювання;
- постійна пряма напруга;
- максимальний допустимий постійний струм;
- максимально допустима 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 $U_{із}$;
- 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 ввімкнення $t_{вкл}$;
- 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 $I_{вих}^1$;
- вихідний струм низького рівня оптоелектронного перемикача $I_{вих}^0$;
- час затримки розповсюдження сигналу $t_{зд р}$;
- опір гальванічної розв'язки R_C ;
- споживаний струм (для різних рівнів вихідної напруги) $I_{жив}$.

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 застосовують оптоелектронні мікросхеми? Дайте пояснення їхнім основним параметрам.

Приклади аудиторних задач

Задача 1. Застосувати світлодіод (рисунок 4.1) для індикації наявності напруги $U_{\text{жив}} = +15 \text{ В}$.

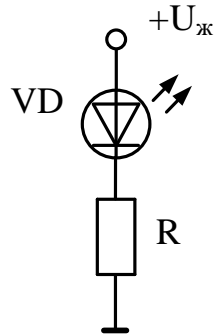


Рисунок 4.1 – Застосування світлодіода для індикації напруги постійного струму

Задачі для самостійної роботи

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

Задача 3. Розрахувати величину напруги в точці **A** (рисунок 4.2) за використання освітленого і затемненого фоторезисторів.

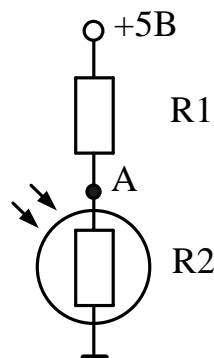


Рисунок 4.2 – Схема ввімкнення фоторезистора

Параметри фоторезистора взяти з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань для задачі 3

Варіант	$U_{\text{жив}}, \text{В}$	$R, \text{кОм}$	Параметри фоторезистора	
			$R_T, \text{МОм}$	$R_T/R_{\text{СВ}}$
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
23	9	6.8	5	40

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
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 Напівпровідникові приймально-підсилювальні пристрої: довідник / Терещук Р. М. та ін. Вид. 4-те, стер. Київ: Наукова думка, 1989. 800 с.
- 2 Петренко І. А. Основи електротехніки та електроніки: навч. посіб. для дистанц. навч. Ч. 2. Основи електроніки. Київ: Університет «Україна», 2006. 511 с.
- 3 Мілих В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник. Київ: Каравела, 2018. 688 с.
- 4 Полупроводниковые приборы: справочник / В. И. Галкин и др. Минск: Беларусь, 1994. 345 с.
- 5 Транзисторы для аппаратуры широкого применения: справочник/ К. М. Брежнева и др. Москва: Радио и связь, 1981. 656 с.
- 6 Курило І. В., Губа С. К. Основи технології напівпровідникових матеріалів: навч. посіб. / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. 240 с.
- 7 Кособуцький П. С., Лобур М. В., Лопатинський І. Є. Фізичні основи напівпровідників та електронних структур: навч. посіб. для студ. вищ. навч. техн. закл. / за ред. П. С. Кособуцького; Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів, 2001. 347 с.
- 8 Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: підручник. Київ: Кондор, 2008. 556 с.
- 9 Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямляющие, стабилитроны, тиристоры: справочник / под ред. А. В. Голомедова. Москва: Радио и связь, 1988. 528 с.
- 10 Сосков А. Г., Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка: Теорія і практикум: підручник / за ред. А. Г. Соскова. Київ: Каравела, 2013. 496 с.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять із дисципліни
«ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА»

Частина 1
Аналогова електроніка

Відповідальний за випуск Клименко Л. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 03.05.2024 р.

Умовн. друк. арк. 3,0. Тираж . Замовлення № .

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.