

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

І. В. Трубаров

ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ

ЧАСТИНА 2. НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

**Рекомендації до виконання домашньої контрольної
роботи**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами «Інженерія та програмування інфокомунікацій», «Інформаційно-
комунікаційні технології», «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»
спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та
радіотехніка»

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2026

УДК 621.391
Т77

Автор: *Трубаров Ігор Володимирович*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент: *Трубін О.О.*, д.т.н., старший науковий співробітник, професор кафедри електронних комунікацій та Інтернету речей НН ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор: *Явісія В.С.*, к.т.н, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 1 від 11.09.2026 р.)
за поданням вченої ради НН ІТС
(протокол № 7 від 30.06.2026 р.)*

Трубаров І.В.
Т77 Основи теорії кіл. Частина 2. Нелінійні електричні кола [Електронний ресурс] : рек. до виконання домашньої контрольної роботи : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмами «Інженерія та програмування інфокомунікацій», «Інформаційно-комунікаційні технології», «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей» спец. G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» / І. В. Трубаров ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 35 с.

Навчальний посібник до домашньої контрольної роботи призначений для здобувачів, які вивчають освітній компонент “Основи теорії кіл. Частина 2. Нелінійні електричні кола”. Він складений відповідно до силабусу освітнього компонента і призначений для використання в рамках виконання домашньої контрольної роботи. Матеріал посібника містить теоретичні відомості, завдання, а також детальний аналіз та виконання завдання за допомогою засобів автоматизації обчислень. Матеріали посібника також будуть корисними у навчальній діяльності аспірантів і викладачів.

УДК 621.391

Реєстр. № НП 26/27-014. Обсяг 1,24 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© І. В. Трубаров, 2026
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

Зміст

Вступ. Загальні положення щодо домашньої контрольної роботи	4
1. Завдання на домашню контрольну роботу	5
1.1. Опис завдання	5
1.2. Варіанти завдань	6
1.3. Вимоги до змісту основної частини роботи	7
2. Теоретичні відомості	8
2.1. Розрахунок параметрів еквівалентної схеми заміщення транзистора для випадку лінійного режиму роботи	8
2.2. Розрахунок параметрів схеми підсилювального каскаду	10
3. Приклад виконання розрахунків	12
3.1. Отримання сімейства вихідних характеристик транзистора	12
3.2. Отримання вхідних характеристик транзистора	14
3.3. Побудова вхідних, вихідних та передатної характеристик транзистора	16
3.4. Побудова робочої точки та визначення її параметрів	19
3.5. Обчислення h -параметрів еквівалентної схеми заміщення	21
3.6. Розрахунок значень елементів схеми	24
3.7. Моделювання розрахованого каскаду	25
4. Вимоги до оформлення домашньої контрольної роботи	28
Література для підготовки	31
Додаток А Приклад оформлення титульного аркуша домашньої контрольної роботи	32
Додаток Б Приклад оформлення аркуша «ЗАВДАННЯ НА ДКР»	33
Додаток В Приклад оформлення розділу «ЗМІСТ»	34
Додаток Г Приклад оформлення розділу «ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ»	35

Вступ. Загальні положення щодо домашньої контрольної роботи

Дисципліна «Основи теорії кіл. Частина 2. Нелінійні електричні кола», яка викладається студентам, що навчаються за освітніми програмами «Телекомунікації», «Телекомунікаційні системи та мережі», «Інформаційно-комунікаційні технології», присвячена питанням аналізу та побудови нелінійних електричних кіл.

Для студентів, що отримують спеціальність у галузі телекомунікацій, необхідним є розуміння основ побудови електронних схем як основи фізичних компонентів телекомунікаційних систем. В даному посібнику викладено вказівки до виконання домашньої контрольної роботи в межах зазначеного кредитного модуля. Основною метою роботи є отримання студентами навичок з основ проєктування та аналізу елементарних підсилювальних каскадів на напівпровідникових приладах.

Домашня контрольна робота (ДКР) – це індивідуальне завдання, що передбачає самостійне виконання студентом певної практичної роботи на основі засвоєного теоретичного матеріалу.

Мета ДКР – узагальнити і закріпити отримані знання, навчити студентів самостійно застосовувати їх для комплексного вирішення конкретних практичних задач, прищепити навички проєктування, виконання розрахунків, самостійного проведення досліджень і обґрунтування прийнятих рішень.

Для виконання роботи студентам надається код варіанту завдання, що визначає параметри розрахунку.

Виконана робота повинна демонструвати уміння автора стисло, логічно, аргументовано і грамотно викладати матеріал, правильно виконувати розрахунки і робити з них висновки. У пояснювальній записці варто уникати загальних слів, бездоказових тверджень, повторів.

1. Завдання на домашню контрольну роботу

1.1. Опис завдання

Метою роботи є розрахунок параметрів схеми підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, включеному за схемою зі спільним емітером, та моделювання його роботи в режимі малого сигналу. Схему підсилювального каскаду, що підлягає розрахунку, представлено на рис. 1.1.

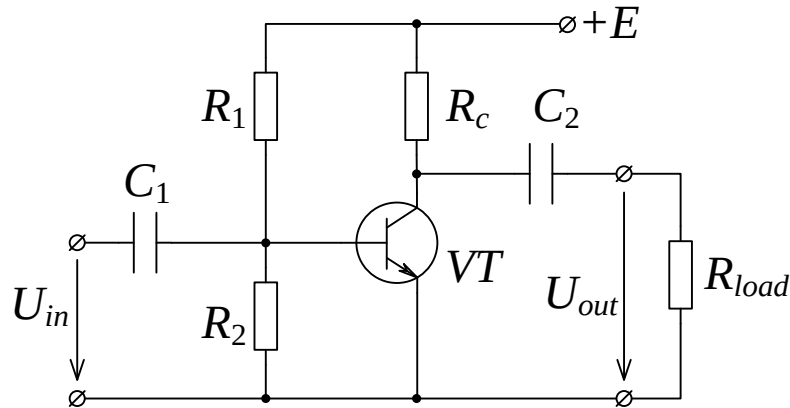


Рис. 1.1. Схема підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, включеному за схемою зі спільним емітером

На схемі, представлений на рис. 1.1, U_{in} – амплітуда вхідного гармонічного сигналу; U_{out} – амплітуда гармонічного сигналу на виході схеми; VT – біполярний транзистор типу прп; R_{load} – опір, на який навантажено підсилювальний каскад, тобто опір навантаження; E – ЕРС живлення, за рахунок енергії джерела якого здійснюється підсилення потужності сигналу; R_c – опір колектора, що визначає робочу точку на вихідних характеристиках транзистора; R_1, R_2 – опори, що складають подільник напруги, який забезпечує потрібне значення постійної напруги зміщення у вхідному колі «база-емітер», визначаючи робочу точку на вхідній характеристиці транзистора; C_1, C_2 – розділювальні ємності для виключення постійної складової напруги.

Також будемо використовувати такі позначення:

- U_{be} – напруга між базою та емітером транзистора;
- U_{ce} – напруга між колектором та емітером транзистора;
- I_b – струм, що втікає в базу транзистора;
- I_c – струм, що втікає в колектор транзистора.

Каскад працює в режимі «А», тобто в лінійному режимі. У якості вихідних даних визначаються:

- 1) модель транзистора VT ;
- 2) ЕРС живлення E ;
- 3) частота гармонічного сигналу f .

Виходячи з вихідних даних, в рамках виконання роботи необхідно виконати такі завдання:

- 1) Використовуючи програмне забезпечення Мікро-Сар 9.0, отримати дві вхідні характеристики $I_b(U_{be})$ для заданого транзистора VT для двох значень напруги на виході: $U_{ce} = 0$ В та $U_{ce} = 5$ В.

- 2) Використовуючи програмне забезпечення Мікро-Сар 9.0, отримати сімейство (8 – 12) вихідних характеристик $I_c(U_{ce})$ для заданого транзистора VT для декількох значень вхідного струму I_b (I_b – струм, що втікає в базу транзистора).
- 3) Нанести на сімейство вихідних характеристик лінії, що відповідають максимальним допустимим значенням вихідної напруги $U_{ce\ max}$, вихідного струму $I_{c\ max}$, вихідної потужності $P_{ce\ max}$.
- 4) Використовуючи задане у вихідних умовах значення ЕРС живлення E , обрати значення опору колектора R_c , за якого струм колектора не перевищує 80% максимального ($I_c \leq 0.8I_{c\ max}$) та побудувати лінію навантаження на сімействі вихідних характеристик.
- 5) Побудувати передатну характеристику транзистора за струмом $I_c(I_b)$.
- 6) Визначити робочу точку та нанести її на вхідну, вихідну та передатну характеристики транзистора. Розрахувати параметри робочої точки $U_{be0}, U_{ce0}, I_{b0}, I_{c0}$.
- 7) Задаючись значенням амплітуди вхідного гармонічного сигналу $U_{in} = 0.1\ В$, розрахувати та нанести на вхідну, вихідну та передатну характеристики граничні точки для максимального та мінімального значень вхідного гармонічного сигналу. Обчислити коефіцієнт підсилення схеми за напругою K_U .
- 8) Замінити транзистор еквівалентною схемою заміщення для лінійного режиму роботи. Модель являє собою лінійний чотириполіусник. Розрахувати h -параметри даного чотириполіусника: $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$.
- 9) Розрахувати значення опорів подільника напруги R_1, R_2 та розділювальних ємностей C_1, C_2 . Розрахувати вихідний опір каскаду за змінним струмом R_{out} . Використовуючи значення U_{out} , обрати значення опору навантаження R_{load} .
- 10) Використовуючи програмне забезпечення Мікро-Сар 9.0, скласти модель схеми розрахованого каскаду та здійснити моделювання його роботи, представивши епюри напруги на вході та виході схеми. За необхідності скоректувати параметри схеми.
- 11) Використовуючи побудовані епюри напруг $u_{in}(t), u_{out}(t)$, обчислити значення коефіцієнта підсилення K_{Uexp} та порівняти дане значення з раніше розрахованим теоретичним значенням K_U .

1.2. Варіанти завдань

Варіант завдання на домашню контрольну роботу складається з трьох цифр. Перша цифра визначає рядок у табл. 1.1, друга цифра – рядок у табл. 1.2, третя цифра – рядок у табл. 1.3.

Таблиця 1.1

№	Модель транзистора	Максимальний струм колектора $I_{c\ max}$, мА	Максимальна напруга колектор-емітер $V_{ce\ max}$, В	Максимальна напруга база-емітер $V_{be\ max}$, В	Максимальна потужність у колі колектор-емітер P_{max} , Вт
0	2N2102	1000	65	7	5
1	2N2218	800	30	5	3
2	2N2221	800	30	5	1.2
3	2N2270	1000	45	7	5

№	Модель транзистора	Максимальний струм колектора $I_{c\ max}$, мА	Максимальна напруга колектор-емітер $V_{ce\ max}$, В	Максимальна напруга база-емітер $V_{be\ max}$, В	Максимальна потужність у колі колектор-емітер P_{max} , Вт
4	2N3019	1000	80	7	5
5	2N3053	700	40	5	5
6	2N3114	200	150	5	5
7	2N3300	500	30	5	3
8	2N3498	500	100	6	5
9	2N3500	300	150	6	5

Таблиця 1.2

№	E , В
0	6
1	7
2	8
3	9
4	10
5	11
6	12
7	13
8	14
9	15

Таблиця 1.3

№	f , кГц
0	1,0
1	1,5
2	2,0
3	2,5
4	3,0
5	3,5
6	4,0
7	4,5
8	5,0
9	5,5

Наприклад, для варіанту №074 маємо: модель транзистора 2N2102, ЕРС живлення $E = 13$ В, частота $f = 3$ кГц.

1.3. Вимоги до змісту основної частини роботи

Основна частина роботи має містити:

- 1) Опис процесу отримання вхідних та вихідних характеристик транзистора із наведенням схем та характеристик, побудованих у програмному забезпеченні Micro-Cap.
- 2) Розрахунок та побудову лінії навантаження та передатної характеристики транзистора за струмом $I_c(I_b)$. Має бути наведено параметри робочої точки. На графіках вхідної, вихідної та передатної характеристик має бути зображено граничні точки, в межах яких змінюється сигнал.
- 3) Розрахунок h-параметрів схеми заміщення транзистора для лінійного режиму роботи. Необхідно навести графіки вхідної та вихідної характеристик та зобразити графічно процес обчислення h-параметрів на них.
- 4) Розрахунок параметрів $R_1, R_2, C_1, C_2, R_{out}, R_{load}$.
- 5) Результати моделювання схеми в програмному забезпеченні Micro-Cap. Має бути наведено схему каскаду із вказаними значеннями її параметрів та епюри напруги на вході та виході схеми.
- 6) Розрахунок коефіцієнта підсилення за напругою та порівняння його з теоретичним значенням.

2. Теоретичні відомості

2.1. Розрахунок параметрів еквівалентної схеми заміщення транзистора для випадку лінійного режиму роботи

Розглянемо біполярний транзистор у разі включення його за схемою зі спільним емітером (рис. 2.1, а). У цьому випадку транзистор можна розглядати як чотириполіусник. У випадку роботи біполярного транзистора в лінійному режимі даний чотириполіусник можна замінити еквівалентною схемою заміщення, що також являтиме собою лінійний чотириполіусник (рис. 2.1, б).

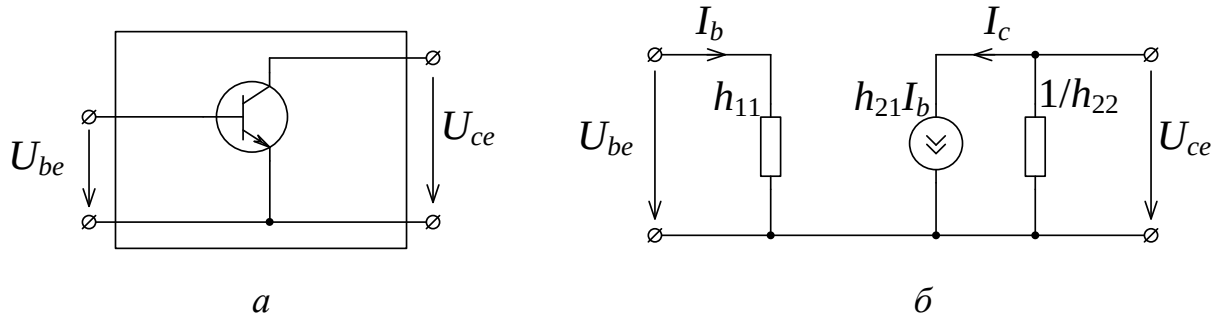


Рис. 2.1. Схема заміщення біполярного транзистора в лінійному режимі роботи: а – транзистор у схемі зі спільним емітером як чотириполіусник; б – його еквівалентна схема заміщення

Даний чотириполіусник може бути описаний матрицею h -параметрів:

$$\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix}.$$

При цьому струми та напруги на вході та виході чотириполіусника будуть пов'язані співвідношеннями:

$$\begin{cases} U_{be} = h_{11}I_b + h_{12}U_{ce}; \\ I_c = h_{21}I_b + h_{22}U_{ce}. \end{cases}$$

h -параметри для схеми заміщення транзистора мають такий фізичний зміст:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{be}}{\Delta I_b} \right|_{U_{ce}=\text{const}} = R_{in \text{ VT}} - \text{вхідний опір транзистора};$$

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{be}}{\Delta U_{ce}} \right|_{I_b=\text{const}} - \text{коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою};$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \right|_{U_{ce}=\text{const}} = \beta - \text{коефіцієнт передачі транзистора за струмом};$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{ce}} \right|_{I_b=\text{const}} - \text{вихідна провідність транзистора; вихідний опір транзистора}$$

можна обчислити як $R_{out \text{ VT}} = 1/h_{22}$.

Для обчислення параметра h_{11} будують вхідну характеристику транзистора $I_b(U_{be})$ для одного значення напруги U_{ce} на виході, наприклад $U_{ce} = 5$ В (рис. 2.2, а). Після цього на даній кривій обирають лінійну ділянку, на якій обирають дві довільні точки (рис. 2.2, а). Після цього h_{11} обчислюють як відповідне відношення різниць за осями абсцис та ординат:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{be}}{\Delta I_b} = \frac{U_{be2} - U_{be1}}{I_{b2} - I_{b1}}.$$

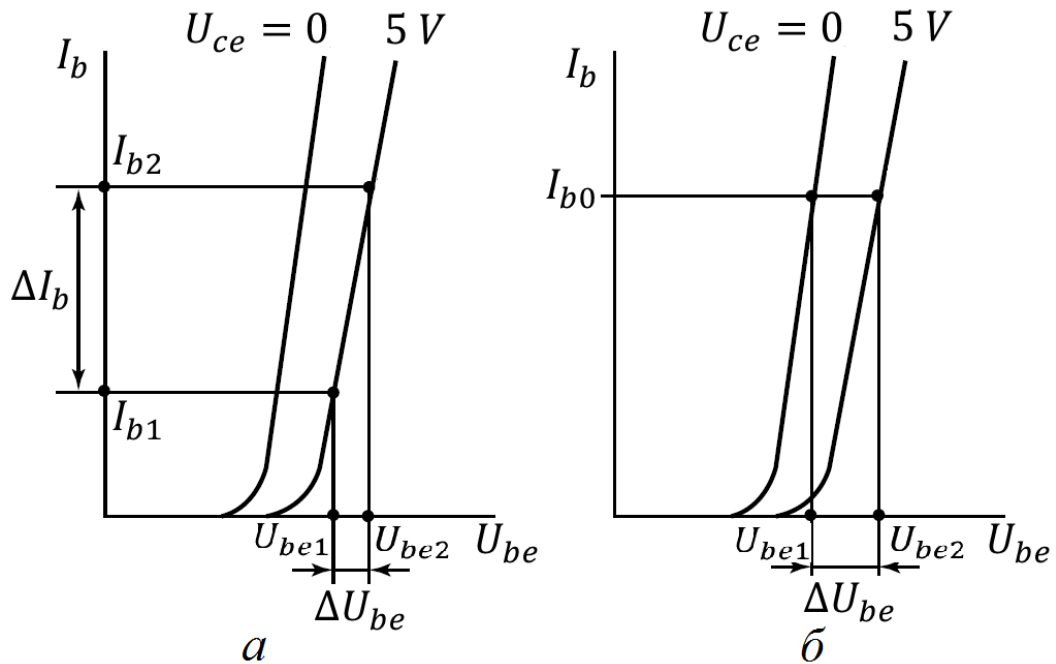


Рис. 2.2. Обчислення h -параметрів на вхідних характеристиках транзистора: а – обчислення h_{11} ; б – обчислення h_{12}

Для обчислення параметра h_{12} будують дві вхідні характеристики транзистора $I_b(U_{be})$ для двох значень напруги U_{ce} на виході, наприклад $U_{ce} = 0$ В та $U_{ce} = 5$ В (рис. 2.2, б). Після цього на даних кривих обирають лінійні ділянки, на яких фіксують точки для одного значення $I_b = I_{b0}$ (рис. 2.2, б). Після цього h_{12} обчислюють як відповідне відношення різниці напруги U_{be} між цими точками до різниці між напругами U_{ce} , для яких побудовано дві зазначені криві (у наведеному прикладі $\Delta U_{ce} = 5 - 0 = 5$ В):

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{be}}{\Delta U_{ce}} = \frac{U_{be2} - U_{be1}}{5 - 0} = \frac{U_{be2} - U_{be1}}{5}.$$

Для обчислення значення параметра h_{21} будують дві вихідні характеристики транзистора $I_c(U_{ce})$ для двох значень струму бази $I_b = I_{b2}$ та $I_b = I_{b3}$ (рис. 2.3, а). Після цього для одного значення $U_{ce} = U_{ce0}$ фіксують на кривих дві точки. Тоді параметр h_{21} може бути обчислений як відношення різниці значень струмів колектора для даних точок до різниці струмів бази для кривих, на яких обрано дані дві точки:

$$h_{21} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{I_{c2} - I_{c1}}{I_{b3} - I_{b2}}.$$

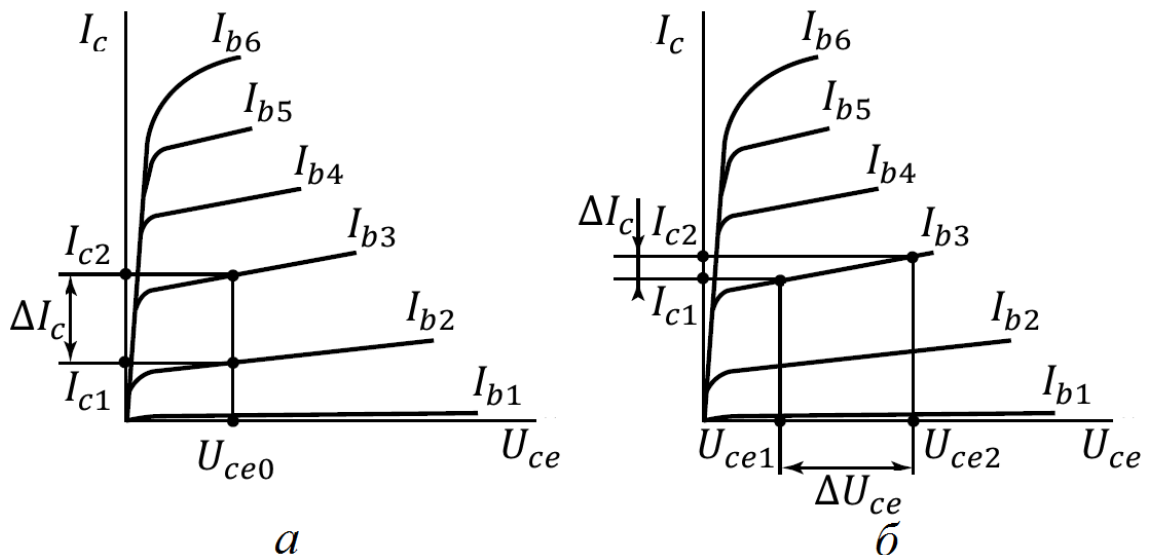


Рис. 2.3. Обчислення h -параметрів на вихідних характеристиках транзистора: а – обчислення h_{21} ; б – обчислення h_{22}

Для обчислення значення параметра h_{22} будують одну вихідну характеристику транзистора $I_c(U_{ce})$ для одного значення струму бази $I_b = I_{b3}$ (рис. 2.3, б). На даній кривій обирають дві точки та обчислюють параметр h_{22} як відношення різниці струмів колектора до різниці напруг «колектор-емітер» даних двох точок::

$$h_{22} = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{ce}} = \frac{I_{c2} - I_{c1}}{U_{ce2} - U_{ce1}}.$$

2.2. Розрахунок параметрів схеми підсилювального каскаду

У схемі підсилювального каскаду, зображений на рис. 1.1, опори R_1 та R_2 формують резистивний подільник напруги, призначення якого полягає в забезпеченні потрібного значення напруги зміщення у вхідному колі транзистора «база-емітер».

Для визначення значень даних опорів спочатку задаються струмом, що протікає через подільник (тобто через опори R_1, R_2). Зазвичай, для забезпечення стабільності роботи каскаду, його приймають рівним

$$I_d = (2 \dots 5)I_c.$$

Якщо для конкретної моделі транзистора його вхідний опір $R_{inVT} = h_{11}$ виявляється малим порівняно з типовими значеннями, що складають $10^3 - 10^4$ Ом, то вхідний опір транзистора може шунтувати опір R_2 . У цьому випадку струм подільника I_d можна прийняти більшим для зменшення впливу R_{inVT} на розподіл напруги в подільнику. Слід зауважити, що збільшення I_d призводить до збільшення потужності, що споживається від джерела.

Вхідний опір R_{in} каскаду, зображеного на рис. 1.1, може бути обчислений як паралельне з'єднання опорів R_1, R_2, R_{inVT} , оскільки для змінного струму джерело живлення E формує коротке замикання, а, отже, на змінному струмі дані три опори виявляються з'єднаними паралельно.

Введемо параметр опору бази R_b , який дорівнює еквівалентному опору паралельного з'єднання опорів подільника R_1, R_2 :

$$R_b = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Тоді вхідний опір каскаду обчислюється як паралельне з'єднання R_b та $R_{in VT}$:

$$R_{in} = \frac{R_b R_{in VT}}{R_b + R_{in VT}}.$$

Виходячи з таких самих міркувань, вихідний опір каскаду, зображеного на рис. 1.1, обчислимо як паралельне з'єднання вихідного опору транзистора $R_{out VT} = 1/h_{22}$ та опору колектора R_c :

$$R_{out} = \frac{R_c R_{out VT}}{R_c + R_{out VT}}.$$

Величина розділювальної ємності C_1 розраховується з умови того, що її реактивний опір має бути значно менше вхідного опору каскаду:

$$\frac{1}{2\pi f C_1} \ll R_{in}.$$

де f – частота сигналу.

З даного співвідношення маємо:

$$C_1 \gg \frac{1}{2\pi f R_{in}}.$$

На практиці достатньо, щоб реактивний опір, створюваний ємністю C_1 , був принаймні в 10 разів менше вхідного опору каскаду:

$$C_1 > \frac{10}{2\pi f R_{in}}.$$

Величину розділювальної ємності C_2 обирають з тих самих міркувань, але в даному випадку реактивний опір, створюваний ємністю C_2 має бути значно менше опору навантаження R_{load} (див. рис. 1.1):

$$C_2 > \frac{10}{2\pi f R_{load}}.$$

Опір навантаження зазвичай фіксований, але якщо його можна обирати, то у випадку каскаду попереднього підсилення, в якому ключовою функцією є підсилення напруги, варто взяти опір навантаження, що принаймні в 10 разів перевищує вихідний опір каскаду R_{out} :

$$R_{load} \approx 10 R_{out}.$$

3. Приклад виконання розрахунків

Нехай необхідно виконати розрахунок підсилювального каскаду, зображеного на рис. 1.1, з такими параметрами:

- Модель транзистора: 2N2219;
- $E = 15 \text{ В}$;
- $f = 1 \text{ кГц}$.

Для заданого типу транзистора маємо такі параметри:

- максимальне допустиме значення вихідної напруги $U_{ce \max} = 30 \text{ В}$;
- максимальне допустиме значення струму колектора $I_{c \max} = 0.8 \text{ мА}$;
- максимальне допустиме значення вихідної потужності $P_{ce \max} = 3 \text{ Вт}$.

3.1. Отримання сімейства вихідних характеристик транзистора

У програмному забезпеченні Мікро-Сар складемо схему для вимірювання вихідних характеристик транзистора (рис. 3.1).

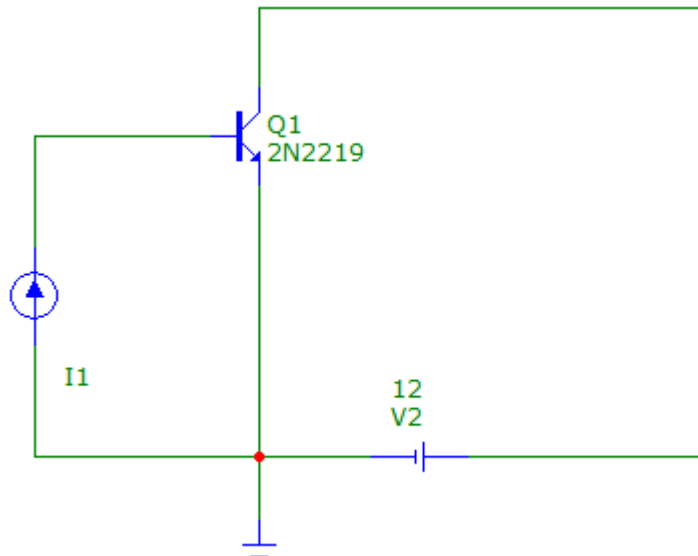


Рис. 3.1. Схема для отримання сімейства вихідних характеристик транзистора

Побудуємо 10 характеристик $I_c(U_{ce})$ для 10-ти значень струму бази I_b . При цьому діапазон значень I_b підбирається ітераційно таким чином, щоб вихідні характеристики знаходились переважно в області $I_c < I_{c \max}$. На рис. 3.2 наведено діалогове вікно **DC Analysis Limits** з параметрами побудови характеристик. Максимальне значення напруги на виході має дещо перевищувати $U_{ce \max}$. У нашому випадку діапазон напруг U_{ce} , для яких здійснюється побудова характеристик, складає $0 \dots 35 \text{ В}$ при $U_{ce \max} = 30 \text{ В}$.

В результаті моделювання отримаємо сімейство вихідних характеристик (рис. 3.3). Здійснимо експорт чисельних значень точок, за якими побудовано характеристики, у текстові файли. При цьому необхідно вказати формат виведення даних **3 Digit Scientific**. Після завершення побудови характеристик виведемо текстовий файл з даними кривих (F5). З даного файлу послідовно копіюємо дані кожної з 10-ти кривих (для кожного з 10-ти значень I1) в окремий текстовий файл (рис. 3.4). В результаті маємо 10 текстових файлів.

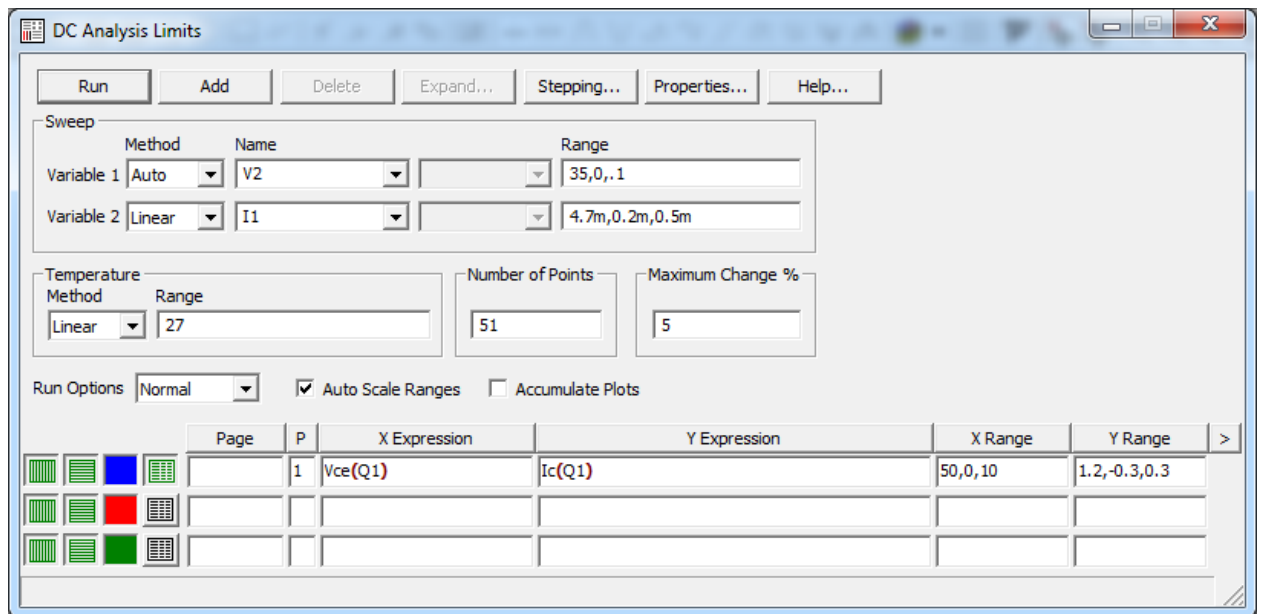


Рис. 3.2

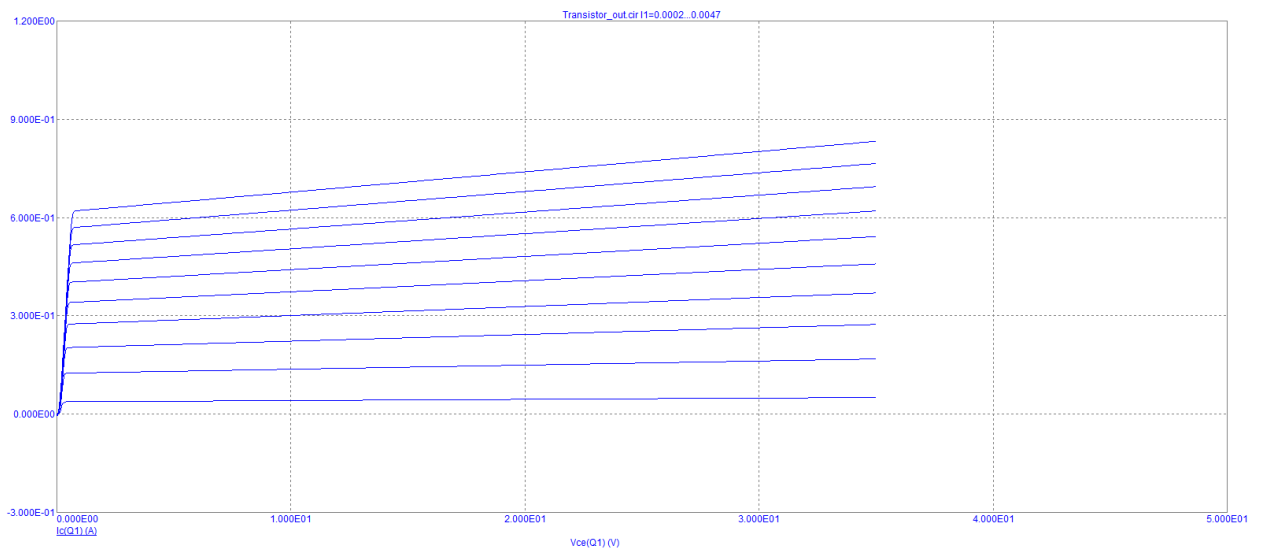


Рис. 3.3

NUMBER OF POINTS 51
Maximum Change % 5
Run Options Normal

*** Temperature=27 ***
*** I1=0.0002 ***

Temperature=27 I1=0.0002

Model parameters for devices of type Bipolar Junction Transistors NPN

Instance: Q1
Using model: 2N2219
LEVEL 1 (*)
AF 1.000 (*)
BF 200.641
BR 155.279m
CJ 30.44p

Waveform Values

Vce (Q1) (V)	Ic (Q1) (A)
0.000E00	-1.823E-04
7.000E-01	3.788E-02
1.400E00	3.814E-02
2.100E00	3.841E-02
2.800E00	3.867E-02
3.500E00	3.894E-02
4.200E00	3.920E-02
4.900E00	3.947E-02
5.600E00	3.973E-02
6.300E00	4.000E-02

Рис. 3.4

Послідовно відкриваємо створені 10 текстових файлів у програмному забезпеченні Microsoft Excel та копіюємо дані кривих в один файл **Output_characteristics.xlsx**. При цьому врахуємо, що усі 10 кривих побудовано для одних і тих самих значень U_{ce} : достатньо лише одного стовпця зі значеннями даної величини та 10 стовпців зі значеннями I_c для значень $I_b = 0.2, 0.7, \dots, 4.7$ mA. Зведені дані файлу **Output_characteristics.xlsx** наведено на рис. 3.5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	N	Ib =, mA	0.2	0.7	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2	3.7	4.2	4.7
2		Uce, V	Ic, A	Ic, A	Ic, A	Ic, A	Ic, A	Ic, A	Ic, A	Ic, A	Ic, A	Ic, A
3	1	0.00E+00	-1.82E-04	-6.34E-04	-1.08E-03	-1.53E-03	-1.98E-03	-2.43E-03	-2.88E-03	-3.33E-03	-3.78E-03	-4.23E-03
4	2	7.00E-01	3.79E-02	1.25E-01	2.04E-01	2.75E-01	3.42E-01	4.03E-01	4.62E-01	5.16E-01	5.68E-01	6.15E-01
5	3	1.40E+00	3.81E-02	1.26E-01	2.05E-01	2.77E-01	3.44E-01	4.06E-01	4.65E-01	5.21E-01	5.74E-01	6.24E-01
6	4	2.10E+00	3.84E-02	1.27E-01	2.07E-01	2.79E-01	3.46E-01	4.09E-01	4.68E-01	5.24E-01	5.78E-01	6.29E-01
7	5	2.80E+00	3.87E-02	1.28E-01	2.08E-01	2.81E-01	3.49E-01	4.12E-01	4.71E-01	5.28E-01	5.82E-01	6.33E-01
8	6	3.50E+00	3.89E-02	1.29E-01	2.10E-01	2.83E-01	3.51E-01	4.15E-01	4.75E-01	5.31E-01	5.86E-01	6.37E-01
9	7	4.20E+00	3.92E-02	1.30E-01	2.11E-01	2.85E-01	3.54E-01	4.18E-01	4.78E-01	5.35E-01	5.90E-01	6.42E-01
10	8	4.90E+00	3.95E-02	1.31E-01	2.12E-01	2.87E-01	3.56E-01	4.20E-01	4.81E-01	5.39E-01	5.93E-01	6.46E-01
11	9	5.60E+00	3.97E-02	1.32E-01	2.14E-01	2.89E-01	3.58E-01	4.23E-01	4.84E-01	5.42E-01	5.97E-01	6.50E-01
12	10	6.30E+00	4.00E-02	1.32E-01	2.15E-01	2.91E-01	3.61E-01	4.26E-01	4.88E-01	5.46E-01	6.01E-01	6.55E-01
13	11	7.00E+00	4.03E-02	1.33E-01	2.17E-01	2.93E-01	3.63E-01	4.29E-01	4.91E-01	5.50E-01	6.05E-01	6.59E-01
14	12	7.70E+00	4.05E-02	1.34E-01	2.18E-01	2.95E-01	3.65E-01	4.32E-01	4.94E-01	5.53E-01	6.09E-01	6.63E-01
15	13	8.40E+00	4.08E-02	1.35E-01	2.20E-01	2.97E-01	3.68E-01	4.34E-01	4.97E-01	5.57E-01	6.13E-01	6.68E-01
16	14	9.10E+00	4.11E-02	1.36E-01	2.21E-01	2.99E-01	3.70E-01	4.37E-01	5.00E-01	5.60E-01	6.17E-01	6.72E-01
17	15	9.80E+00	4.13E-02	1.37E-01	2.22E-01	3.00E-01	3.73E-01	4.40E-01	5.04E-01	5.64E-01	6.21E-01	6.76E-01

Рис. 3.5

3.2. Отримання вхідних характеристик транзистора

У програмному забезпеченні Micro-Cap складемо схему для вимірювання вхідних характеристик транзистора (рис. 3.6).

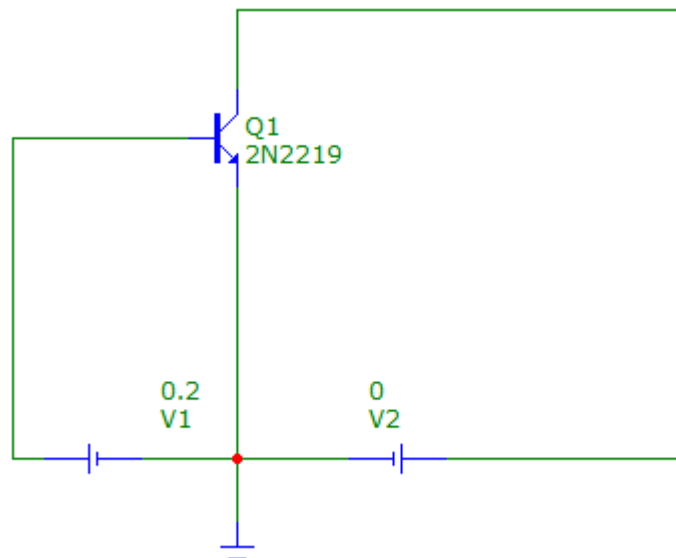


Рис. 3.6. Схема для отримання вхідних характеристик транзистора

Побудуємо дві вхідні характеристики транзистора $I_b(U_{be})$ для двох значень U_{ce} : $U_{ce} = 0$ та $U_{ce} = 5$ В. Спочатку встановимо значення $U_{ce} = 5$ В (на рис. 3.6 джерело V2=5 V). Параметри аналізу наведено на рис. 3.7. В результаті отримаємо графік вхідної характеристики (рис. 3.8). Експортуємо дані цієї кривої до окремого текстового файлу.

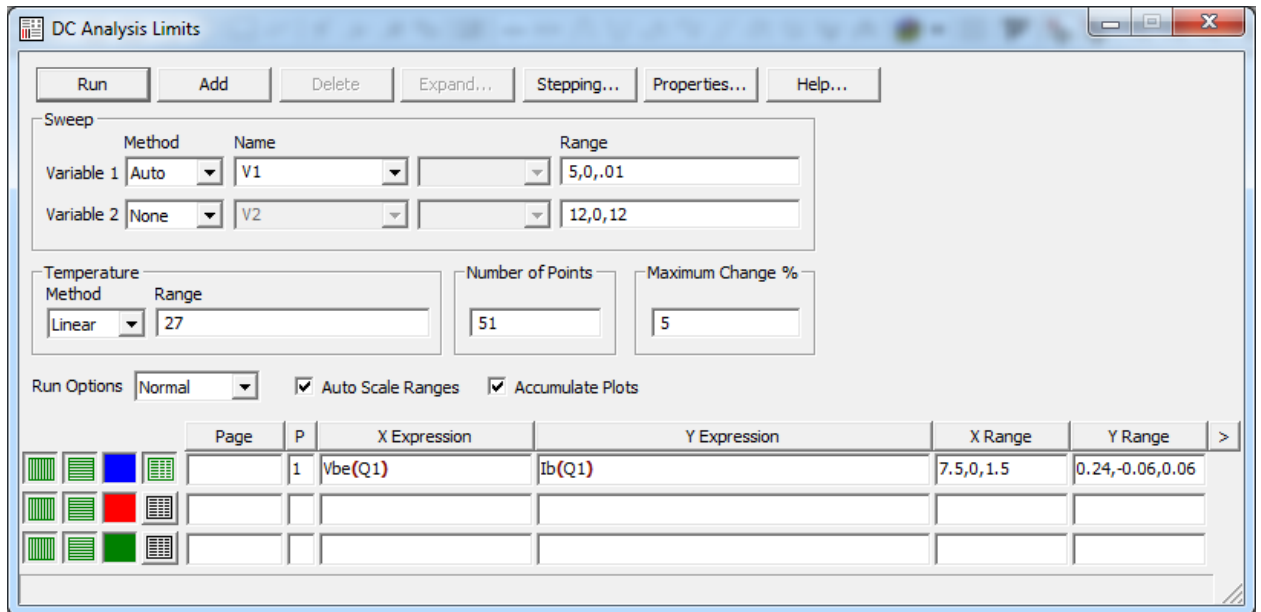


Рис. 3.7

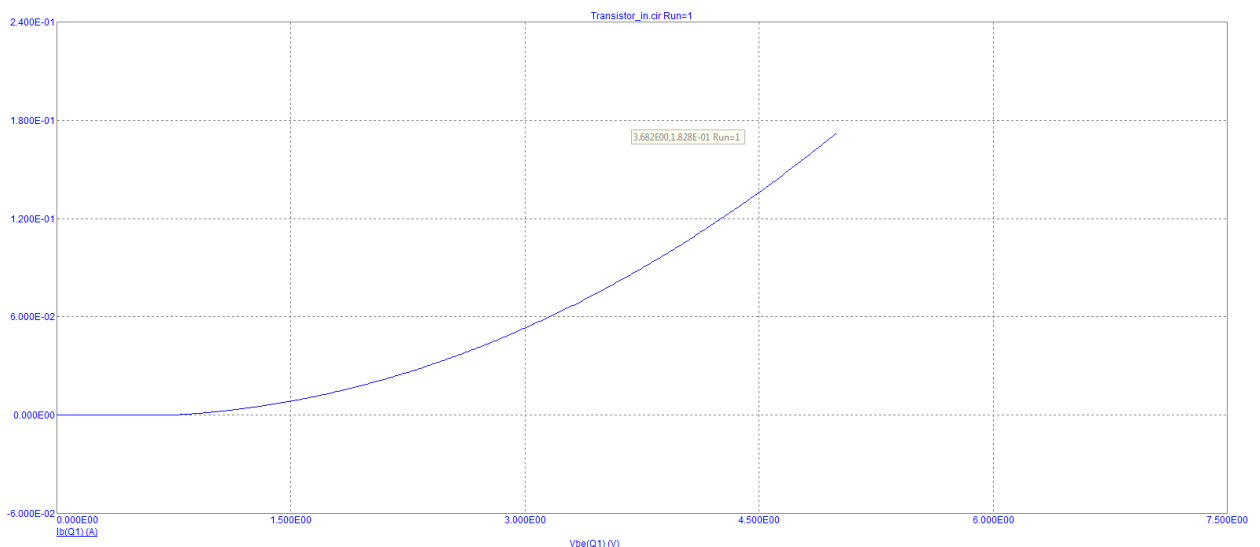


Рис. 3.8

Побудуємо другу вхідну характеристику для $U_{ce} = 0$. Для цього встановимо на схемі $V2=0$. У вікні **DC Analysis Limits** підберемо верхню межу діапазону U_{be} (V1 на рис. 3.7) так, щоб максимальне значення I_b характеристики приблизно дорівнювало аналогічному значенню попередньо отриманої кривої для $U_{ce} = 5$ В. Побудуємо характеристику та скопіюємо чисельні дані цієї кривої до другого текстового файлу.

Послідовно відкрисмо отримані два текстових файли в програмному забезпеченні Microsoft Excel та зведемо ці дані в один файл **Input_characteristics.xlsx** (рис. 3.9).

	A	B	C	D	E
1		Uce = 0 V		Uce = 5 V	
2	N	Ube, V	Ib, A	Ube, V	Ib, A
3	1	0.00E+00	8.02E-55	0.00E+00	-4.14E-11
4	2	1.50E-02	3.65E-12	1.00E-01	-3.17E-11
5	3	3.00E-02	8.49E-12	2.00E-01	5.21E-11
6	4	4.50E-02	1.50E-11	3.00E-01	7.40E-10
7	5	6.00E-02	2.37E-11	4.00E-01	7.06E-09
8	6	7.50E-02	3.55E-11	5.00E-01	9.31E-08
9	7	9.00E-02	5.16E-11	6.00E-01	2.53E-06
10	8	1.05E-01	7.34E-11	7.00E-01	6.96E-05
11	9	1.20E-01	1.04E-10	8.00E-01	4.10E-04
12	10	1.35E-01	1.35E-10	9.00E-01	1.04E-03

Рис. 3.9

3.3. Побудова вхідних, вихідних та передатної характеристик транзистора

Для подальших розрахунків скористаємось програмним забезпеченням Matlab. Для цього скопіюємо створені раніше файли **Input_characteristics.xlsx**, **Output_characteristics.xlsx** в окрему папку. У тій самій папці створимо новий файл **Amplifier_BJT.m** в якому створимо код для автоматизації обчислень.

Додамо до пустого файлу **Amplifier_BJT.m** початковий рядок

```
clc; clear all; close all;
```

Завантажимо до масиву data2 дані вихідних характеристик:

```
data2 = xlsread('Output_characteristics.xlsx', 'Characteristics', 'B3:L53');
```

Примітка. Вкладка файлу *Output_characteristics.xlsx*, що містить дані характеристик, має назву 'Characteristics', що відображено в команді вище. Третім параметром у функції *xlsread* – діапазон комірок Excel, що містять дані кривих. Для конкретного розрахунку цей діапазон може відрізнятися.

Завантажимо до масиву *Ib_arr* значення струму бази I_b , для яких побудовано вихідні характеристики (у нашому випадку файл містить дані 10-ти кривих, а, отже, і масив міститиме 10 елементів):

```
Ib_arr = xlsread('Output_characteristics.xlsx', 'Characteristics', 'C1:L1');
```

Примітка. Якщо було знято не 10, а інша кількість вихідних характеристик, діапазон комірок, що містить відповідні значення струму бази, буде відрізнятися (див. рис. 3.5).

Визначимо розмірність масиву з даними характеристик:

```
[N_Uce, N_Ic] = size(data2);
```

За необхідності можна зменшити діапазон U_{ce} , для якого будуються характеристики. У нашому випадку криві побудовано у діапазоні 0...35 В. Оскільки максимально допустиме значення напруги становить $U_{ce\ max} = 30$ В, то зменшимо

діапазон побудови характеристик до 30,1 В шляхом зменшення розмірності відповідного масиву. Для цього відкинемо зайві 7 значень U_{ce} :

```
N_Uce = N_Uce-7;
```

Зчитасмо значення напруги U_{be} , для яких будуються характеристики, в масив Uce, а значення для струму I_c – в масив Ic:

```
N_Ic = N_Ic-1;
Uce = data2(1:N_Uce,1);
Ic = data2(1:N_Uce,2:N_Ic+1);
```

Амплітуда вхідного гармонічного сигналу, що подається на вхід («база-емітер») транзистора відповідно до вихідних даних складає 0.1 В:

```
Um = 0.1;
```

Введемо значення максимально допустимих значень, згідно вихідних умов $I_{c\ max} = 0.8\text{ A}$, $U_{ce\ max} = 30\text{ В}$, $P_{ce\ max} = 3\text{ Вт}$:

```
P_max = 3;
Ic_max = 0.8;
Uce_max = 30;
```

Встановимо границі відображення графіків вихідних характеристик:

```
Uce_lim = 1.2*Uce_max;
Ic_lim = 1.1*Ic_max;
```

Визначимо координати точок для побудови маски, що окреслює область в межах гранично допустимих значень:

```
U_LL = P_max/Ic_max;
u_inrange = [U_LL:Uce_max/100:Uce_max Uce_max];
u_L = [0 u_inrange Uce_max];
i_L = [Ic_max P_max./u_inrange 0];

u_mask = [u_L Uce_lim Uce_lim 0];
i_mask = [i_L 0 Ic_lim Ic_lim];
```

Побудуємо графіки вихідних характеристик з нанесенням області, обмеженої гранично допустимими значеннями $I_{c\ max} = 0.8\text{ A}$, $U_{ce\ max} = 30\text{ В}$, $P_{ce\ max} = 3\text{ Вт}$:

```
fcalc = figure('Units', 'normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
subplot(2,2,2);
hold on;
patch(u_mask, i_mask, [0.9 0.9 0.9], 'LineStyle', 'none', 'FaceAlpha', 0.8);
plot(u_L, i_L, '--k', 'LineWidth', 1);
plot(Uce, Ic, '-k', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('I_c, A');
xlabel('U_{ce}, V');
title('Вихідні характеристики транзистора для декількох значень струму бази \itI_b');
for k = 1:N_Ic
    text(Uce(N_Uce)+0.5, Ic(N_Uce,k), strcat('I_b = ', num2str(Ib_arr(k)), ' mA'));
end
axis([0 Uce_lim 0 Ic_lim]);
grid on;
```

```
ax1 = gca;
```

Тепер побудуємо лінію навантаження $I_{ce} = -\frac{U_{ce}}{R_c} + \frac{E}{R_c}$. Згідно з вихідними умовами, ЕРС живлення становить $E = 15$ В. Введемо дане значення:

```
Ec = 15;
```

Підберемо таке значення опору колектора R_c , за якого максимальний струм колектора не перевищуватиме 80% від максимально допустимого значення $\frac{E}{R_c} \leq 0.8I_{c\max}$. В нашому випадку $R_c = 25$ Ом. Введемо дане значення:

```
Rc = 25;
```

Примітка. Даний параметр можна підбирати ітераційно, тобто запускаючи скрипт на виконання та коректуючи значення R_c . При цьому за вірного вибору R_c лінія навантаження не має перетинати границю області дозволених значень.

Побудуємо лінію навантаження, нанесемо її на графік вихідних характеристик та знайдемо координати перетину лінії навантаження з 10-ма побудованими вихідними характеристиками для 10-ти значень струму бази:

```
U_load = 0:0.1*Ec:Ec;
I_load = -U_load/Rc + Ec/Rc;
plot(U_load, I_load, '-', 'LineWidth', 1.5, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);

Uce_arr = zeros(1, N_Ic);
Ic_arr = zeros(1, N_Ic);
u=0:Ec/1000:Ec;
Il = interp1(U_load, I_load, u);

for k=1:N_Ic
    Inl = interp1(Uce, Ic(:, k), u);

    Uce_arr(k) = interp1(Inl-Il, u, 0);
    Ic_arr(k) = interp1(u, Inl, Uce_arr(k));
    plot(Uce_arr(k), Ic_arr(k), 'ko');
end
```

Маючи значення 10-ти точок перетину лінії навантаження з вихідними характеристиками, зокрема, відповідних значень струму колектора (які містяться в масиві Ic_arr), побудуємо передатну характеристику транзистора за струмом $I_c(I_b)$:

```
subplot(2,2,1);
set(gca, 'XDir', 'reverse');
hold on;
plot(Ib_arr, Ic_arr, 'ko-');
ylabel('I_c, A');
xlabel('I_b, mA');
title('Передатна характеристика за струмом \it I_c(I_b)');
grid on;
axis([0 ceil(max(Ib_arr)) 0 Ic_lim]);
ax2 = gca;
```

Зчитасмо дані для двох вхідних характеристик $I_b(U_{be})$, отриманих для двох значень напруги «колектор-емітер»: $U_{ce} = 0, U_{ce} = 5$ В:

```
data1 = xlsread('Input_characteristics.xlsx', 'Characteristics','B3:E53');
Ube0 = data1(:,1);
Ib0 = data1(:,2);
Ube5 = data1(:,3);
Ib5 = data1(:,4);
```

Примітка. Діапазон комірок, який містить дані кривих, може відрізнятися від зазначеного 'B3:E53'. Це залежить від кількості точок, для яких було отримано значення струму бази I_b .

Побудуємо вхідну характеристику для $U_{ce} = 5$ В. Вона практично не відрізнятиметься від реальної характеристики для $E = 15$ В в силу слабкої залежності струму бази від напруги «колектор-емітер». Надалі вважатимемо її вхідною характеристикою транзистора:

```
subplot(2,2,3); hold on;
set(gca,'XDir','reverse');
%plot(Ib0*10^3, Ube0, '-k', 'LineWidth',2, 'Color',[0.5 0.5 0.5]);
plot(Ib5*10^3, Ube5, '-k', 'LineWidth',2);
xlabel('I_b, mA');
ylabel('U_{be}, V');
title('Вхідна характеристика транзистора');
%legend('U_{ce} = 0 V','U_{ce} = 5 V','Location','SouthEast');
text(0.97*ceil(max(Ib_arr)),1.05*interp1(Ib5*10^3,Ube5,ceil(max(Ib_arr))), 'U_{ce}=5 V');
axis([0 ceil(max(Ib_arr)) 0 ceil(interp1(Ib5*10^3,Ube5,ceil(max(Ib_arr)))]);
grid on;
```

3.4. Побудова робочої точки та визначення її параметрів

Отримавши передатну характеристику за струмом $I_c(I_b)$, оберемо на ній лінійну ділянку та визначимо середину цієї ділянки. У нашому випадку було обрано значення струму бази, що відповідає робочій точці, $I_{b0} = 2$ мА. Даний процес є ітераційним, тобто його можна повторювати декілька разів, обравши найбільш прийнятне положення робочої точки. Введемо обране значення I_{b0} та обчислимо інші параметри робочої точки (I_{c0}, U_{ce0}, U_{be0}):

```
Ib_op = 2;
Ube_op = interp1(Ib5*10^3,Ube5,Ib_op);
Ic_op = interp1(Ib_arr,Ic_arr,Ib_op);
Uce_op = interp1(I_load,U_load,Ic_op);
```

Нанесемо робочу точку (відображається квадратним маркером чорного кольору) на усі три побудовані раніше графіки (вхідна, передатна та вихідні характеристики):

```
subplot(2,2,1);
plot(Ib_op,Ic_op,'ks','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Ib_op],[Ic_op Ic_op],'--k');
plot([Ib_op Ib_op],[Ic_op 0],'--k');

subplot(2,2,2);
plot(Uce_op,Ic_op,'ks','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Uce_op],[Ic_op Ic_op],'--k');
plot([Uce_op Uce_op],[Ic_op 0],'--k');
```

```
subplot(2,2,3);
plot(Ib_op,Ube_op,'ks','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Ib_op],[Ube_op Ube_op],'--k');
plot([Ib_op Ib_op],[Ube_op 0],'--k');
```

Амплітуда вхідного сигналу відповідно до вихідних умов становить $U_m = 0.1$ В. Побудуємо на усіх трьох характеристиках границі, в межах яких будуть змінюватись параметри сигналу за такої амплітуди:

```
Ube_op_max = Ube_op + Um;
Ib_op_max = interp1(Ube5,Ib5*10^3,Ube_op_max);
Ic_op_max = interp1(Ib_arr,Ic_arr,Ib_op_max);
Uce_op_max = interp1(I_load,U_load,Ic_op_max);

Ube_op_min = Ube_op - Um;
Ib_op_min = interp1(Ube5,Ib5*10^3,Ube_op_min);
Ic_op_min = interp1(Ib_arr,Ic_arr,Ib_op_min);
Uce_op_min = interp1(I_load,U_load,Ic_op_min);

subplot(2,2,1);
plot(Ib_op_max,Ic_op_max,'ko','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Ib_op_max],[Ic_op_max Ic_op_max],'--k');
plot([Ib_op_max Ib_op_max],[Ic_op_max 0],'--k');

plot(Ib_op_min,Ic_op_min,'ko','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Ib_op_min],[Ic_op_min Ic_op_min],'--k');
plot([Ib_op_min Ib_op_min],[Ic_op_min 0],'--k');

subplot(2,2,2);
plot(Uce_op_max,Ic_op_max,'ko','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Uce_op_max],[Ic_op_max Ic_op_max],'--k');
plot([Uce_op_max Uce_op_max],[Ic_op_max 0],'--k');

plot(Uce_op_min,Ic_op_min,'ko','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Uce_op_min],[Ic_op_min Ic_op_min],'--k');
plot([Uce_op_min Uce_op_min],[Ic_op_min 0],'--k');

subplot(2,2,3);
plot(Ib_op_max,Ube_op_max,'ko','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Ib_op_max],[Ube_op_max Ube_op_max],'--k');
plot([Ib_op_max Ib_op_max],[Ube_op_max 0],'--k');

plot(Ib_op_min,Ube_op_min,'ko','MarkerFaceColor','k');
plot([0 Ib_op_min],[Ube_op_min Ube_op_min],'--k');
plot([Ib_op_min Ib_op_min],[Ube_op_min 0],'--k');
```

Виведемо розраховані раніше координати робочої точки $I_{b0}, I_{c0}, U_{be0}, U_{ce0}$ в окрему область у вікні графіків характеристик:

```
subplot(2,2,4); hold on;
axis([0 100 0 100]);
set(gca,'YDir','reverse');
set(gca,'XColor','w','YColor','w','XTick',[],'YTick',[]);
```

```

title('Розрахунки');
text(1,5,'\\bfПараметри робочої точки:');
text(1,15, strcat('I_{b0} = ', num2str(Ib_op), ' mA'));
text(1,25, strcat('U_{be0} = ', num2str(Ube_op), ' V'));
text(40,15, strcat('I_{c0} = ', num2str(Ic_op), ' A'));
text(40,25, strcat('U_{ce0} = ', num2str(Uce_op), ' V'));
text(1,35, strcat('\\bfКоефіцієнт підсилення за напругою: K_U = ', ...
    num2str(abs(Uce_op_max - Uce_op_min) / (2*Um))));

```

В результаті розрахунків зроблено усі необхідні графічні побудови (рис. 3.10) та обчислено такі значення: $I_{b0} = 2 \text{ mA}$; $U_{be0} = 1.01 \text{ V}$; $I_{c0} = 333.5 \text{ mA}$; $U_{ce0} = 6.66 \text{ V}$.

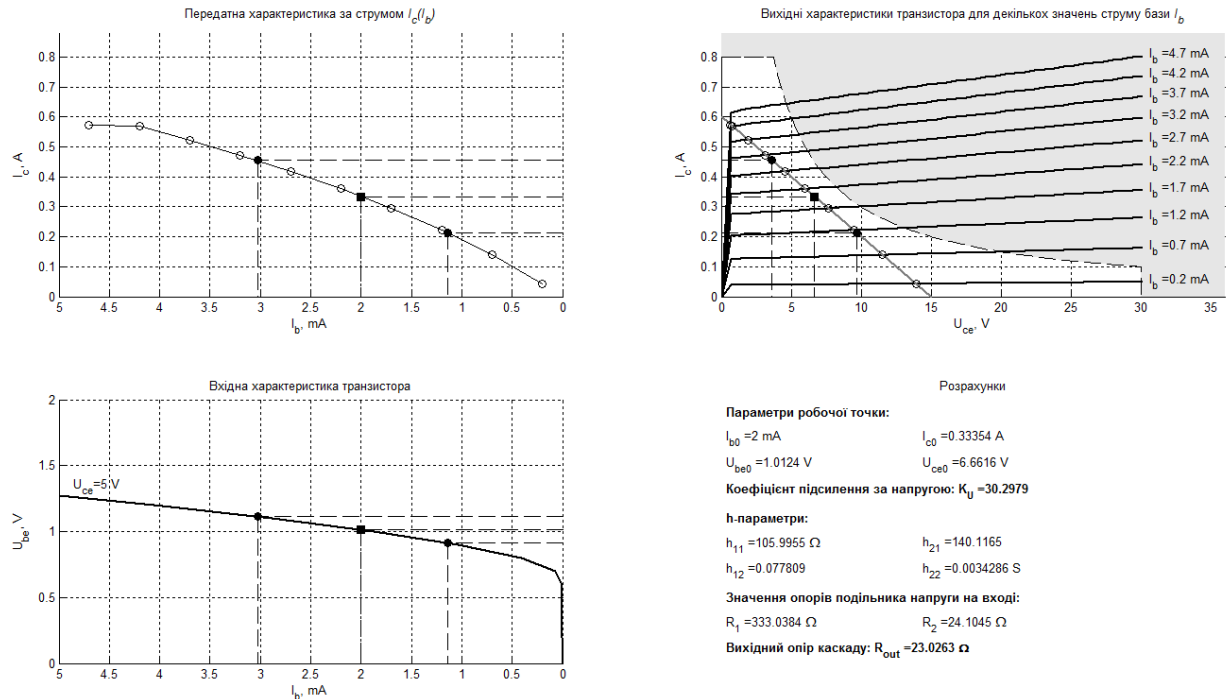


Рис. 3.10. Результати розрахунків режиму роботи транзистора

Примітка. При оформленні результатів роботи необхідно навести усі три графіки, зображені на рис. 3.10, на окремих рисунках.

Коефіцієнт підсилення за напругою було обчислено як відношення діапазону значень напруги на виході U_{ce} до діапазону значень напруги на вході U_{be} :

$$K_U = \frac{U_{ce0 \max} - U_{ce0 \min}}{U_{be0 \max} - U_{be0 \min}} = \frac{U_{ce0 \max} - U_{ce0 \min}}{2U_m},$$

де $U_{ce0 \max}, U_{ce0 \min}$ – граничні значення напруги U_{ce} на виході;

$U_{be0 \max} - U_{be0 \min} = 2U_m$ – граничні значення напруги U_{be} на вході.

Маємо: $K_U \approx 30.3$, що відображено у відповідній області на рис. 3.10.

3.5. Обчислення h -параметрів еквівалентної схеми заміщення

Спочатку створимо окрему область для графічних побудов та нанесемо графіки вхідних та вихідних характеристик для обчислення h -параметрів:

```

fparam = figure('Units', 'normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);

```

```

subplot(2,2,3);
hold on;
patch(u_mask, i_mask, [0.9 0.9 0.9], 'LineStyle', 'none', 'FaceAlpha', 0.8);
plot(u_L, i_L, '--k', 'LineWidth', 1);
plot(Uce, Ic, '-k', 'LineWidth', 1.5);
plot(Uce_op, Ic_op, 'ks', 'MarkerFaceColor', 'k');
ylabel('I_c, A');
xlabel('U_{ce}, V');
title('Розрахунок параметра h_{21}');
for k = 1:N_Ic
    text(Uce(N_Uce)+0.5, Ic(N_Uce,k), strcat('I_b = ', num2str(Ib_arr(k)), 'mA'));
end
axis([0 Uce_lim 0 Ic_lim]);
grid on;
bx1 = gca;

subplot(2,2,4, copyobj(bx1, fparam));
title('Розрахунок параметра h_{22}');

subplot(2,2,1);
hold on;
plot(Ube0, Ib0*10^3, '-', 'LineWidth', 2, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
plot(Ube5, Ib5*10^3, '-k', 'LineWidth', 2);
plot(Ube_op, Ib_op, 'ks', 'MarkerFaceColor', 'k');
ylabel('I_b, mA');
xlabel('U_{be}, V');
title('Розрахунок параметра h_{11}');
legend('U_{ce} = 0 V', 'U_{ce} = 5 V', 'Location', 'SouthEast');
axis([0 ceil(interp1(Ib5*10^3, Ube5, ceil(max(Ib_arr)))) 0 ceil(max(Ib_arr))]);
grid on;
bx3 = gca;

subplot(2,2,2, copyobj(bx3, fparam));
title('Розрахунок параметра h_{12}');

```

Розрахуємо параметр h_{11} та нанесемо відповідні побудови на графік:

```

%Розрахунок та ілюстрація параметра h11
subplot(2,2,1);
plot(Ube_op_max, Ib_op_max, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'k');
plot(Ube_op_min, Ib_op_min, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'k');
plot([Ube_op_max Ube_op_min], [0 Ib_op_max], '--k');
plot([Ube_op_max 0], [Ib_op_max Ib_op_max], '--k');
plot([Ube_op_min Ube_op_min], [0 Ib_op_min], '--k');
plot([Ube_op_min 0], [Ib_op_min Ib_op_min], '--k');

h11 = (Ube_op_max - Ube_op_min)*1e3/(Ib_op_max - Ib_op_min);

```

Розрахуємо параметр h_{12} та нанесемо відповідні побудови на графік:

```

%Розрахунок та ілюстрація параметра h12
subplot(2,2,2);
Ube0_op = interp1(Ib0, Ube0, Ib_op*10^-3);
plot(Ube0_op, Ib_op, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'k');
plot([Ube_op 0], [Ib_op Ib_op], '--k');
plot([Ube_op Ube_op], [0 Ib_op], '--k');

```

```
plot([Ube0_op Ube0_op],[0 Ib_op],'--k');

h12 = (Ube_op - Ube0_op)/5;
```

Розрахуємо параметр h_{21} та нанесемо відповідні побудови на графік:

```
%Розрахунок та ілюстрація параметра h21
subplot(2,2,3);
for k = 1:N_Ic-1;
    Ic_op_down = interp1(Uce,Ic(:,k),Uce_op);
    Ic_op_up = interp1(Uce,Ic(:,k + 1),Uce_op);
    if (Ic_op >= Ic_op_down) && (Ic_op < Ic_op_up)
        plot(Uce_op,Ic_op_down,'ko','MarkerFaceColor','k');
        plot(Uce_op,Ic_op_up,'ko','MarkerFaceColor','k');
        plot([Uce_op Uce_op],[0 Ic_op_up],'--k');
        plot([Uce_op 0],[Ic_op_up Ic_op_up],'--k');
        plot([Uce_op 0],[Ic_op_down Ic_op_down],'--k');
        break;
    end
end
h21 = (Ic_op_up - Ic_op_down)*10^3/(Ib_arr(k+1) - Ib_arr(k));
```

Розрахуємо параметр h_{22} та нанесемо відповідні побудови на графік:

```
%Розрахунок та ілюстрація параметра h22
subplot(2,2,4);
Uce_op1 = 1.7*Uce_op;
Ic_op1 = interp1(Uce,Ic(:,k+1),Uce_op1);
plot(Uce_op,Ic_op_up,'ko','MarkerFaceColor','k');
plot(Uce_op1,Ic_op1,'ko','MarkerFaceColor','k');
plot([Uce_op Uce_op1],[0 Ic_op_up],'--k');
plot([Uce_op1 Uce_op1],[0 Ic_op1],'--k');
plot([Uce_op 0],[Ic_op_up Ic_op_up],'--k');
plot([Uce_op1 0],[Ic_op1 Ic_op1],'--k');

h22 = (Ic_op1 - Ic_op_up)/(Uce_op1 - Uce_op);
```

Виведемо розраховані значення в область виведення (рис. 3.10):

```
%Виведення значень h-параметрів
figure(fcalc);
text(1,45,'\bfh-параметри:');
text(1,55, strcat('h_{11} = ', num2str(h11), ' \Omega'));
text(1,65, strcat('h_{12} = ', num2str(h12), ''));
text(40,55, strcat('h_{21} = ', num2str(h21), ''));
text(40,65, strcat('h_{22} = ', num2str(h22), ' S'));
```

Маємо: $h_{11} \approx 110$ Ом; $h_{12} \approx 0.08$; $h_{21} \approx 140.1$; $h_{22} \approx 0.0034$ См.

Результати графічних побудов для розрахунку h -параметрів зображено на рис. 3.11.

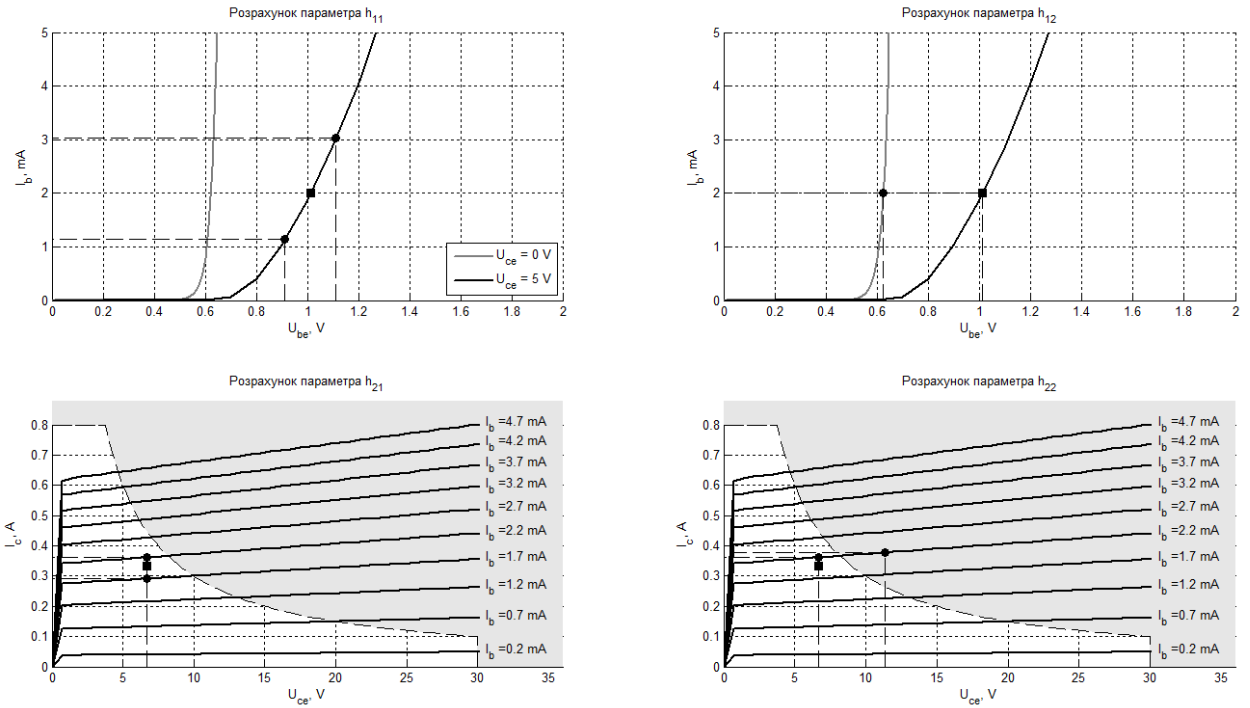


Рис. 3.11. Розрахунок h -параметрів транзистора

Маючи дані величини, можемо обчислити параметри транзистора:

- вхідний опір транзистора $R_{in VT} = h_{11} = 110$ Ом;
- коефіцієнт передачі за струмом $\beta = \frac{I_c}{I_b} = h_{21} = 140.1$;
- вихідний опір транзистора $R_{out VT} = 1/h_{22} = 1/0.0034 = 294.1$ Ом.

3.6. Розрахунок значень елементів схеми

Розрахуємо значень опорів подільника напруги, що створює необхідну напругу зміщення U_{be0} на базі транзистора. Зазвичай струм подільника I_d обирають у діапазоні $(2 \dots 5)I_c$. У нашому випадку вхідний опір транзистора малий у порівнянні з типовими значеннями, тому збільшимо струм дільника:

$$I_d = 20I_c.$$

Тоді значення опорів подільника напруги R_1, R_2 визначатимуться зі співвідношень:

$$R_1 = \frac{E - U_{be0}}{I_d + I_{b0}};$$

$$R_2 = \frac{U_{be0}}{I_d + I_{b0}}.$$

Обчислимо відповідні значення:

```
Id = 20*Ib_op;
R1 = (Ec - Ube_op)*10^3/(Id + Ib_op);
R2 = Ube_op*10^3/(Id + Ib_op);
```

Обчислимо значення вихідного опору каскаду за змінним струмом, який еквівалентний паралельному з'єднанню опору колектора R_c та вихідного опору транзистора:

$$R_{out} = \frac{R_{out VT} \cdot R_c}{R_{out VT} + R_c}.$$

Додамо відповідний код для здійснення даного обчислення (опору R_{out} відповідає змінна `R_load`):

```
Rt_out = 1/h22;
R_out = Rc*Rt_out/(Rc + Rt_out);
```

Розрахуємо вхідний опір каскаду за змінним струмом, який еквівалентний паралельному з'єднанню опорів R_1, R_2 подільника напруги та вхідного опору транзистора $R_{in VT}$:

$$R_{in} = R_1 || R_2 || R_{in VT}.$$

Додамо відповідний код для здійснення даного обчислення:

```
Rb = R1*R2/(R1 + R2);
Rin = Rb*h11/(Rb + h11);
```

Маємо:

- вхідний опір каскаду $R_{in} \approx 18.5$ Ом ;
- вихідний опір каскаду $R_{out} \approx 23$ Ом.

Виходячи з умов, зазначених у п. 2.2., оберемо значення розділювальних ємностей C_1, C_2 :

- $C_1 = 40$ пФ;
- $C_2 = 8$ пФ.

Примітка. Для виведення значення будь-якої змінною достатньо у вікні команд лише записати назву змінної без знаку «;» в кінці рядка, наприклад:

```
>> Rin
Rin =
    18.5449
```

3.7. Моделювання розрахованого каскаду

Після виконання розрахунку параметрів схеми каскаду складемо її модель у програмному забезпеченні Місго-Сар (рис. 3.12). При цьому, відповідно до вихідного завдання, для генератора гармонічної напруги V1 необхідно зазначити амплітуду $U_m = 1$ В та частоту 1 кГц. Певні параметри схеми можна скоректувати, використовуючи режим **Dynamic DC**. При цьому важливо забезпечити ідентичність параметрів робочої точки транзистора $I_{b0}, I_{c0}, U_{be0}, U_{ce0}$ розрахованим. Наприклад, у схемі на рис. 3.12 було скоректовано значення $R_2 = 26$ Ом.

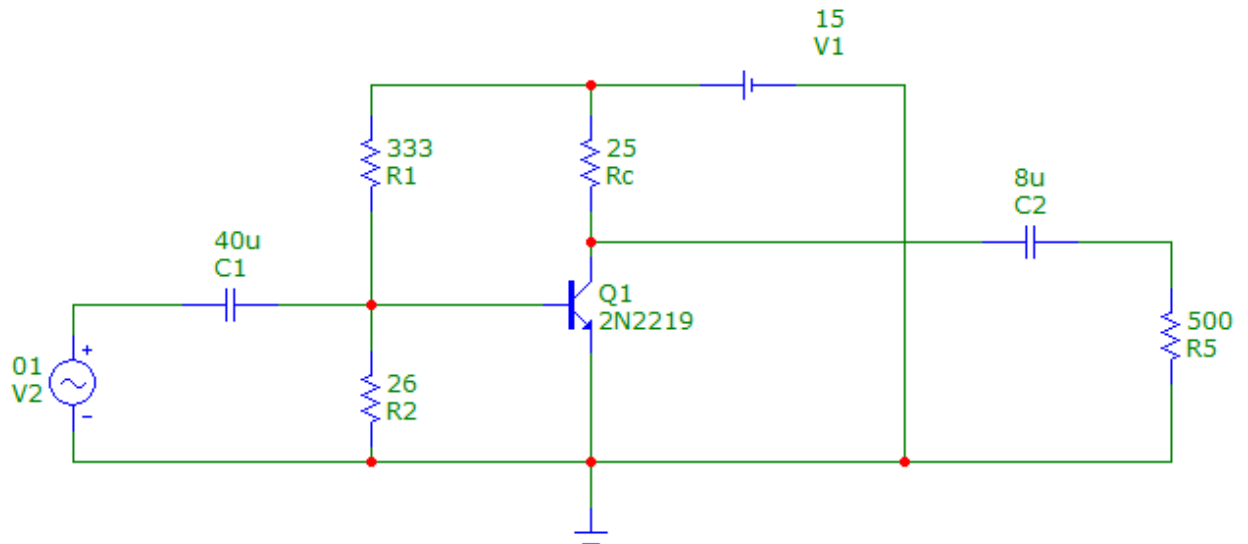


Рис. 3.12. Схема підсилювального каскаду

Перевіримо коректність проведеного розрахунку шляхом моделювання роботи каскаду в режимі **Transient**. Для цього побудуємо на одному графіку епюри вхідної та вихідної напруг $u_{in}(t)$ та $u_{out}(t)$, як наведено на рис. 3.13.

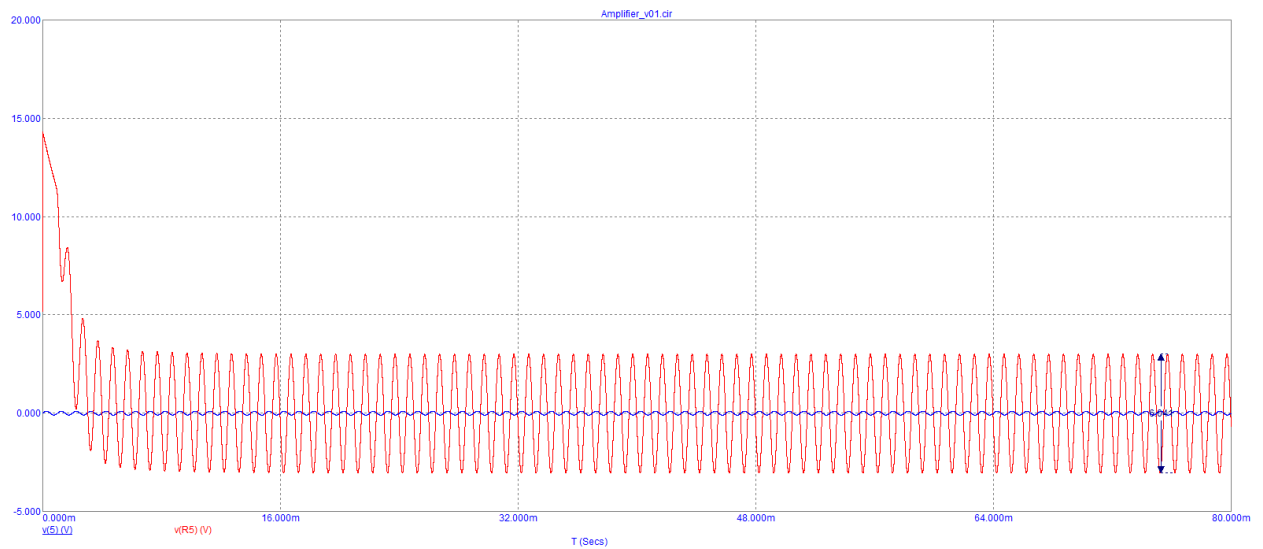


Рис. 3.13

Збільшимо ділянку напруги та виміряємо діапазон зміни вихідної напруги ΔU_{out} (рис. 3.14). У нашому випадку $\Delta U_{out} \approx 0.5 \cdot 6 \text{ В} = 3 \text{ В}$. Тоді можемо обчислити коефіцієнт підсилення за напругою:

$$K_{U \text{ exp}} = \frac{3}{0.1} = 30.$$

Бачимо, що коефіцієнт підсилення змодельованої схеми відповідає розрахованому раніше теоретичному значенню:

$$30 = K_{U \text{ exp}} \approx K_U = 30.3.$$

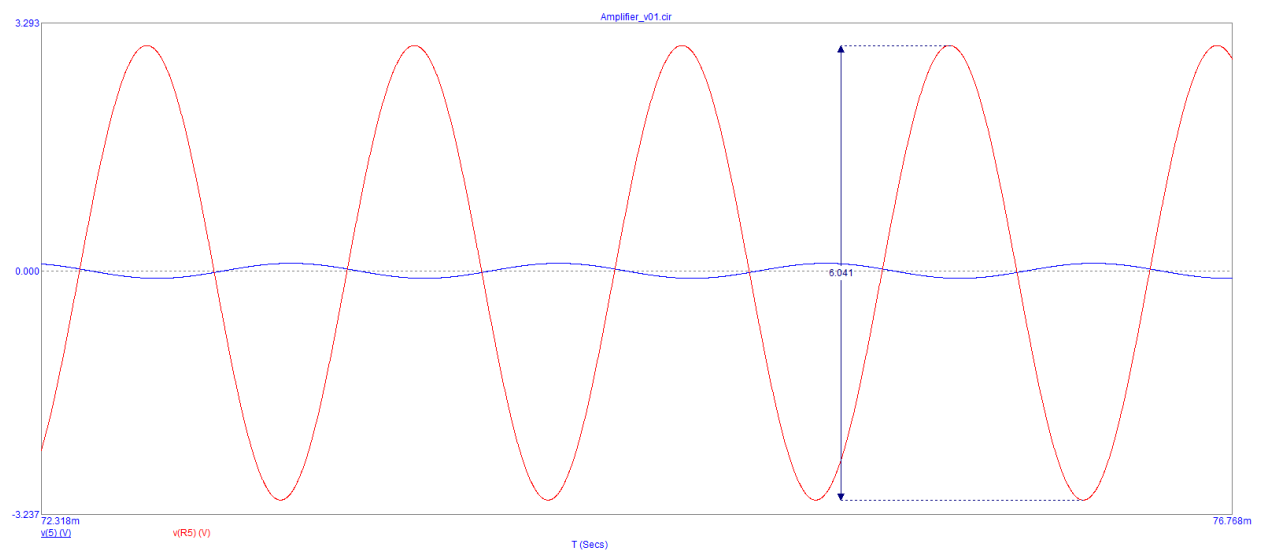


Рис. 3.14

4. Вимоги до оформлення домашньої контрольної роботи

Виконана домашня контрольна робота складається з єдиної частини, що представлена пояснювальною запискою до домашньої контрольної роботи.

Пояснювальна записка містить у наступній послідовності:

- 1) титульний аркуш (див. додаток А);
- 2) завдання на домашню контрольну роботу (див. додаток Б);
- 3) зміст (див. додаток В);
- 4) основну частину ДКР;
- 5) висновки;
- 6) перелік посилань (за необхідністю, див. додаток Г);
- 7) додатки (за необхідністю).

Приклади оформлення титульного аркуша, завдання, змісту та переліку посилань наведено у додатках А – Г відповідно.

ПЗ виконується на аркушах формату А4 (210×297 мм). Текст оформлюється шрифтом *Times New Roman* через 1,5 інтервалу на одному боці аркуша білого паперу. Розмір шрифту – 14пт або 12пт. Нумерація сторінок (аркушів) проставляється в правому нижньому куті сторінки.

Окремі слова і формули, що вписуються в друкований текст, повинні бути чорного кольору і мати близьку до основного тексту густоту. Власні імена наводяться на мові оригіналу (при першому нагадуванні - обов'язково). За наявності скорочень (аббревіатур) вони мають бути оформлені окремим списком з дешифровкою і подаватися після структурного елементу **ЗМІСТ**.

Титульний (перший) аркуш домашньої контрольної роботи оформляється відповідно до додатку А. Найменування структурних елементів **ЗМІСТ**, **ВИСНОВКИ** і **ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ** не нумеруються.

Розділи, підрозділи, пункти і підпункти повинні мати заголовки.

Заголовки структурних елементів і розділів варто розміщати на середині сторінки і виконувати прописними буквами без крапки наприкінці. Заголовки підрозділів, пунктів і підпунктів повинні починатися з абзацу (5 знаків). Абзацний відступ повинен бути однаковим вздовж усього тексту роботи. Якщо заголовок складається з двох або більш речень, їх варто розділяти крапкою.

Переноси слів у заголовку розділу (підрозділу) не допускаються.

Не допускається розміщувати заголовок у нижній частині сторінки, якщо після нього залишається тільки один рядок.

Розділи, підрозділи, пункти і підпункти нумеруються арабськими цифрами:

- розділи - 1, 2 і т.д.,
- підрозділи - 1.1, 1.2, і т.д., 2.1, 2.2, і т.д.,
- пункти - 1.1.1, 1.1.2 і т.д., 2.1.1, 2.1.2 і т.д.,
- підпункти - 1.1.1.1, 1.1.1.2 і т.д., 2.1.1.1, 2.1.1.2 і т.д.

Ілюстрації варто розміщати безпосередньо після тексту, у якому вони вперше згадуються, або на наступній сторінці (якщо безпосередньо після тексту ілюстрацію розмістити неможливо). На всі ілюстрації (у тому числі на запозичені) повинні бути посилання у роботі. Приклад посилання на ілюстрацію: «На рис. 3.5 зображено графік вхідної характеристики транзистора».

Ілюстрації (креслення, малюнки, графіки, схеми, діаграми) повинні нумеруватися арабськими цифрами в межах розділу і називатися «Рисунок», наприклад «Рисунок 2.5. Схема загального виду» (назва малюнка вказується за необхідністю). В наведеному прикладі цифри означають «п'ятий рисунок другого розділу». Допускається наскрізна нумерація малюнків у межах усієї пояснювальної записки (крім додатків).

Таблицю варто розмішувати безпосередньо після тексту, у якому вона вперше згадується, або на наступній сторінці. На всі таблиці повинні бути посилання в тексті. Нумерація таблиць провадиться за аналогією з ілюстраціями. Слово «Таблиця» (із номером) розміщується зліва над таблицею. Назва над таблицею не обов'язкова. При наявності назви вона повинна бути стислою і відбивати зміст таблиці.

Приклад нумерації першої таблиці другого розділу наведений на рис. 4.1.

Таблиця 2.1 Порівняльні характеристики... .

Рис. 4.1

Формули і рівняння розміщуються безпосередньо після тексту, у якому вони вперше згадуються, у середині рядка з полями зверху і знизу не менше одного рядка.

Нумерація формул здійснюється аналогічно нумерації ілюстрацій і таблиць. Номер формули проставляється в круглих дужках на рівні формули в крайньому правому положенні на рядку.

Пояснення символів і числових коефіцієнтів варто розміщати безпосередньо під формулою в тієї ж послідовності, як вони наведені у формулі. Перший ряд пояснення починається з абзацу словом «де» без двокрапки. Пояснення кожного символу варто починати з нового рядка.

Приклад.

«Відомо, що

$$Z = (M1 - M2)/(\sigma1 + \sigma2)0.5 , \quad (3.1)$$

де M1 і M2 - математичне сподівання;

$\sigma1$ і $\sigma2$ - середнє квадратичне відхилення навантаження».

Формули, що слідують одна за другою і не розділені текстом, відокремлюються комою.

При виконанні обчислень по приведеній формулі після знака рівності замість літерних позначень наводяться їхні чисельні значення і (через знак рівності) отриманий результат із вказівкою одиниць виміру.

Переносити формули на наступний рядок допускається тільки на знаках виконуваних операцій, причому знак операції на початку наступного рядка повторюється. При переносі на операції множення застосовується знак « × ».

Посилання на джерела в тексті позначаються порядковим номером за переліком посилань, виділеним двома квадратними дужками, наприклад, «... у роботах [2 -5]...». При посиланні на розділи, підрозділи, пункти і підпункти, ілюстрації, таблиці, формули, додатки вказують їх номери. Для прикладу нижче наведені декілька варіантів:

«... у розділі 2 ...», «... дивися 2.1...», «... по 3.3.2 ...», «... відповідно до 2.3.4.1...», «...на рис. 1.3...» або «... на рисунку 1.3...», «... у таблиці 3.2...» або «... див. табл. 3.2...», «... за формулою (3.1...)», «... у рівняннях (1.23) - (1.25)...», «... у додатку Б...» і т.п.

Перелік буває двох рівнів. Перед кожною позицією переліку варто ставити малу літеру абетки з дужкою, або, не нумеруючи, дефіс (перший рівень деталізації). Для подальшої деталізації переліку варто використовувати арабські цифри з дужкою (другий рівень деталізації). Перелік першого рівня деталізації друкуються малими літерами з абзацного відступу, другого рівня - із відступом щодо місця розміщення першого.

Приклад.

«рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем:

- *перший - фізичний;*
- *другий - каналний:*
 - а) підрівень керування логічним каналом;*
 - б) підрівень доступу до середовища передачі;*
- *третій - мережної;*

і т.д.»

Додатки варто наводити в порядку посилань на них у тексті. Кожний додаток повинен починатися з нової сторінки. Додатки позначаються в середині рядка прописними буквами, наприклад «ДОДАТОК Д». Після цього симетрично до тексту друкується заголовок додатку. Нумерація сторінок додатків є загальною з іншими сторінками роботи.

У разі потреби текст додатку можна розділити на розділи, підрозділи і пункти, як в основній частині роботи, наприклад, А.2.1 (що означає підрозділ 2.1 додатку А). Аналогічно нумеруються у межах кожного додатку ілюстрації, таблиці, формули і рівняння, наприклад, «рисунок Б.4» або «рис. Б.4», «Таблиця Е.2» або «табл. Е.2», «(Д.2)» - друга формула додатка Д.

Якщо додаток є документом, що має самостійне значення, і оформлюється відповідно вимогам до документів даного виду, то перед його копією вставляється аркуш, на якому посередині друкується «ДОДАТОК ____» і його найменування. Сторінки копії цього документу нумеруються як продовження наскрізної нумерації сторінок роботи, незважаючи на наявність власної нумерації сторінок документу.

Література для підготовки

1. Артеменко М.Ю., Дрозденко К.С. Теорія електричних кіл. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 99 с.
2. Сташук, В.Д. Основи теорії та комп'ютерне моделювання електронних кіл [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / В. Д. Сташук, А.В. Булашенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 6,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 400 с. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/30984/1/Posibnyk_OTtaKMEK.pdf
3. Булашенко, А.В. Основи теорії кіл. Збірник задач [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / А.В. Булашенко, М.І. Ястребов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 2,13 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 128 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/34874/1/OTK.pdf>
4. Булашенко, А.В. Основи теорії кіл. Розрахунок лінійних електричних кіл змінного струму. Практикум. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / А.В. Булашенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 809 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 52 с. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/34935/1/Osnovy_teorii_kil.pdf
5. Parodi M., Storace M. Linear and Nonlinear Circuits: Basic & Advanced Concepts. – Cham: Springer International Publishing, 2018. Vol. 441 – 281 p.
6. Parodi M., Storace M. Linear and Nonlinear Circuits: Basic and Advanced Concepts: Volume 2. – Cham: Springer International Publishing, 2020. Vol. 620. – 520 p.
7. Muthuswamy B., Banerjee S. Introduction to Nonlinear Circuits and Networks. – Cham: Springer International Publishing, 2019 – 373 p.
8. Izadian A. Fundamentals of Modern Electric Circuit Analysis and Filter Synthesis: A Transfer Function Approach. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – 689 p.
9. Sundararajan D. Introductory Circuit Theory. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – 300 p.

Додаток А

Приклад оформлення титульного аркуша домашньої контрольної роботи

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ
СИСТЕМ**

Навчальна дисципліна: «Основи теорії кіл. Частина 2»

Спеціальність: G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»

Курс ____ Група ____ Семестр ____

ДОМАШНЯ КОНТРОЛЬНА РОБОТА

з дисципліни «Основи теорії кіл. Частина 2»

на тему: «Розрахунок підсилювального каскаду на біполярному транзисторі в режимі малого сигналу»

Студента(ки) ____ курсу групи ____
(ПІБ)

Керівник: І.В. Трубаров
доц., к.т.н.

Національна шкала: ____
Кількість балів: ____

Прийняв _____ І.В. Трубаров

Київ – 2026

Додаток Б
Приклад оформлення аркуша «ЗАВДАННЯ НА ДКР»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Навчальна дисципліна: Основи теорії кіл. Частина 2

Спеціальність: G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»

Курс _____ Група _____ Семестр _____

ЗАВДАННЯ

на домашню контрольну роботу студента

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розрахунок підсилювального каскаду на біполярному транзисторі в режимі малого сигналу»

2. Термін здачі студентом закінченої роботи:

3. Вихідні дані до роботи:

3.1 Варіант завдання № _____

3.2. Пояснювальна записка повинна включати:

- Опис процесу отримання вхідних та вихідних характеристик транзистора із наведенням схем та характеристик, побудованих у програмному забезпеченні Micro-Cap.
- Розрахунок та побудову лінії навантаження та передатної характеристики транзистора за струмом I_c (I_b). Має бути наведено параметри робочої точки. На графіках вхідної, вихідної та передатної характеристик має бути зображено граничні точки, в межах яких змінюється сигнал.
- Розрахунок h-параметрів схеми заміщення транзистора для лінійного режиму роботи. Необхідно навести графіки вхідної та вихідної характеристик та зобразити графічно процес обчислення h-параметрів на них.
- Розрахунок параметрів R_1 , R_2 , C_1 , C_2 , R_{out} , R_{load} схеми каскаду.
- Результати моделювання схеми в програмному забезпеченні Micro-Cap. Має бути наведено схему каскаду із вказаними значеннями її параметрів та епюри напруги на вході та виході схеми.
- Розрахунок коефіцієнта підсилення за напругою та порівняння його з теоретичним значенням.

Керівник роботи _____
(прізвище та ініціали)

Завдання отримав _____
(підпис студента)

Дата видачі завдання _____

Додаток В
Приклад оформлення розділу «ЗМІСТ»

ЗМІСТ

Вступ	7
1. Аналіз технічних вимог (до проектуваного пристрою)	8
2. Розробка структурної схеми (проектованого пристрою)	11
2.1.	12
2.2.	13
3. Розробка принципової схеми	14
3.1. Вибір елементної бази	15
3.2.	16
4. Конструкторський розрахунок друкованої плати	17
5. Організаційно економічний розділ	18
5.1. Аналіз ринку	19
5.2. Визначення рівня якості виробу	20
6. Охорона праці	21
6.1. Оцінка небезпечних і шкідливих виробничих чинників при складанні і налаштуванні	22
6.2. Електробезпека персоналу	23
6.2.1. Блискавковідводи	24
6.2.2. Заземлення	25
6.3. Пожежна безпека	26
Висновки	27
Перелік посилань	28
Додаток А. Програма розрахунку	29
Додаток Б.	30

Додаток Г
Приклад оформлення розділу «ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ»

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Положення про організацію навчального процесу в НТУУ “КПІ” / Уклад.: Г.Б. Варламов, В.П. Головенкін, В.І. Тимофєєв, В.І. Шеховцов. За заг. ред. Ю.І. Якименко – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2004. – 72 с.
2. ДСТУ 3008-95. Державний стандарт України. Документація. Звіти в сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. -К: Держстандарт України, 1995. - 38 с.
3. ДСТУ Б А.2.4-40:2009. Національний стандарт України. ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ. ПРОВОДОВІ ЗАСОБИ ЗВ'ЯЗКУ. УМОВНІ ГРАФІЧНІ ЗОБРАЖЕННЯ НА СХЕМАХ ТА ПЛАНАХ.