

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«СХЕМОТЕХНІКА»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 171 – «ЕЛЕКТРОНІКА»
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ «ТЕХНОЛОГІЯ,
ОБЛАДНАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ»
ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»

КРЕМЕНЧУК 2023

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Схемотехніка» для студентів денної форми навчання зі спеціальності 171 – «Електроніка» освітньо-професійної програми «Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки» освітнього ступеня «Бакалавр»

Укладачі: к. т. н., доц. М. Г. Когдась;
старш.. викл. С. В. Саньков

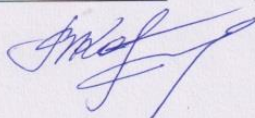
Рецензент к. т. н., доц. О. О. Юрко

Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол № 7 від 27 03 2023 року

Голова методичної ради



проф. В. В. Костін

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Вступ | 4 |
| Перелік практичних робіт | 7 |
| Практична робота № 1 Біполярні транзистори | 7 |
| Практична робота № 2 Польові транзистори | 18 |
| Практична робота № 3 Робота транзисторів у ключовому режимі | 27 |
| Практична робота № 4 Розрахунки динамічних режимів підсилювальних каскадів | 35 |
| Практична робота № 5 Операційні підсилювачі (ОП) | 41 |
| Критерії оцінювання знань студентів | 46 |
| Література | 48 |

ВСТУП

Практичні роботи заплановано у навчальному процесі для поглиблення розуміння теоретичного матеріалу та вироблення вміння здійснювати необхідні розрахунки під час розробки електричних принципових схем. Розв'язання задач допомагає краще зрозуміти процеси роботи електронних пристроїв. Практичні заняття передбачають додаткову самостійну роботу над завданнями, що розглядалися в аудиторії для поглибленого вивчення розрахункових методик і закріплення в пам'яті студентів необхідних рівнянь. Аудиторні практичні заняття допомагають краще зрозуміти внутрішні процеси роботи електронних пристроїв. Практична робота являє собою розв'язання різних задач із практичної електроніки.

Для забезпечення практичних робіт навчально-методичними засобами використовують підручники, навчальні та методичні посібники, конспект лекцій викладача.

Методичні вказівки містять перелік тем, які підлягають опрацюванню, задачі з кожної теми з розв'язанням, необхідні теоретичні пояснення і перелік літератури, що може бути використана для поглибленого вивчення методів розв'язання подібних задач.

Наведені приклади розрахунків параметрів електронних схем є основними для проведення практичних занять в аудиторії. Подібні задачі додаються до екзаменаційних завдань. У бібліотеці КрНУ знаходяться всі необхідні матеріали. За необхідності консультації щодо пояснення розв'язання задач потрібно звертатися до викладача згідно з графіком консультацій.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні бути:

знання:

– ЗН2. Знання способів і методів навчання, методів самоосвіти, підвищення професійної кваліфікації у електроніці та споріднених галузях;

– ЗН3. Знання методів, способів і технологій збору, контент-аналізу й обробки інформації з різних джерел;

– ЗН4. Знання міжнародних стандартів у галузі електроніки, методів забезпечення якості електронних пристроїв та систем;

– ЗН5. Знання основ філософії, політології, історії, релігії та культури, що сприяють розвитку загальної культури й соціалізації особистості, дотриманню етичних цінностей, розуміння причинно-наслідкових зв'язків розвитку суспільства й уміння їх використовувати в професійній і соціальній діяльності;

– ЗН9. Знання основних властивостей провідникових, напівпровідникових, діелектричних та інших матеріалів електроніки;

– ЗН10. Знання про будову, принципи дії, основні характеристики, методи аналізу та синтезу компонентів та пристроїв електронної техніки;

– ЗН12. Знання про сучасні комп'ютерні технології та інструменти інженерних і наукових розрахунків, обробки даних, графіки, моделювання та оптимізації, сучасні засоби інформаційних технологій;

– ЗН13. Знання основ аналогової та цифрової схемотехніки, мікропроцесорної техніки, вимірювальних засобів, основ автоматизації процесів у технології, проектуванні та виробництві;

уміння:

– У2. Оцінювати предмет навчальної діяльності, визначати загальну мету і конкретні задачі, вибирати адекватні засоби їх розв'язання для досягнення результату, здійснювати необхідний самоконтроль, використовувати довідкову літературу і технічну документацію, розвивати та застосовувати у професійній діяльності свої творчі та організаційні здібності, організовувати робоче місце, планувати робочий час;

– У4. Аналізувати проблемні ситуації, ставити певні цілі щодо розв'язання професійних задач і свідомо домагатися їх реалізації, обирати шлях для майбутніх дій, визначати засоби для досягнення мети, приймати обґрунтовані рішення;

– У7. Обирати компоненти та засоби електронної техніки для виконання заданих функцій; діагностувати працездатність та налагоджувати електронні пристрої та системи;

– У8. Вирішувати задачі оптимізації, модифікації та оновлення технології та виробництва електронних пристроїв та систем; розрахунку, моделювання та проектування структури пристроїв електронної техніки;

– У9. Аналізувати науково-технічну літературу (в тому числі іноземну) щодо стану, тенденцій та розвитку електронної техніки, технічної, технологічної та конструкторської документації, використовувати нові технічні рішення;

– У10. Проводити випробування, експериментальні дослідження властивостей матеріалів, компонентів та пристроїв електронної техніки; проводити вимірювання параметрів матеріалів та компонентів електронної техніки, розроблення програм випробувань електронної техніки;

– У12. Оцінювати функціонування електронних приладів, пристроїв та систем, визначати відхилення від норми параметрів та режимів функціонування електронних пристроїв, здійснювати регулювання відповідних електронних приладів та пристроїв для досягнення нормальних режимів функціонування.

ПЕРЕЛІК ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

Практична робота № 1

Тема. Біполярні транзистори

Мета: на прикладах розв'язання нескладних задач з розрахунку схем ознайомити студентів з роботою біполярних транзисторів, навчити визначати основні параметри транзисторів.

Короткі теоретичні відомості

Біполярний транзистор являє собою напівпровідниковий прилад із двома випрямленими електричними переходами, що взаємодіють, і трьома (чи більше) виводами, підсилювальні властивості яких обумовлені інжекцією та екстракцією неосновних носіїв заряду.

Розв'язання завдань може бути досить складне, якщо враховувати всі необхідні впливи під час роботи транзистора. Але на практиці переважно використовують спрощені розрахункові методики, оскільки транзистори мають натуральний розкид параметрів і розраховану електричну схему все одно необхідно доводити на стенді.

Основні співвідношення для розрахунку одностранзисторних схем

$$I_K = \alpha I_E + I_{KB_0}, \quad (1.1)$$

де I_K – повний струм колектора, I_E – повний струм емітера, $\alpha = 0,95 \dots 0,99$ – коефіцієнт передавання струму емітера, I_{KB_0} – зворотний струм колектора.

Ураховуючи, що $I_E \gg I_{KB_0}$, на практиці можна використовувати співвідношення:

$$I_K \approx \alpha I_E, \quad (1.2)$$

$$I_B = I_E - I_K, \quad (1.3)$$

де I_B – повний струм бази.

$$I_K = \beta I_B, \quad (1.4)$$

де $\beta = \frac{\alpha}{1+\alpha}$ – динамічний коефіцієнт передавання струму бази $\beta \gg 1$.

$$K_I = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}}, \quad (1.5)$$

де K_I – коефіцієнт підсилювання за струмом.

$$K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}, \quad (1.6)$$

де K_U – коефіцієнт підсилювання за напругою.

$$K_P = K_I \cdot K_U = \frac{\Delta P_{вих}}{\Delta P_{вх}}, \quad (1.7)$$

де K_P – коефіцієнт підсилювання за потужністю.

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}, \quad (1.8)$$

де $R_{вх}$ – вхідний опір.

$$R_{вих} = \frac{U_{вих}}{I_{вих}}, \quad (1.9)$$

де $R_{вих}$ – вихідний опір.

У схемі із загальною базою (ЗБ):

$$K_{I_B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} = \alpha, \quad (1.10)$$

$$R_{вх_B} = \frac{U_{ЕБ}}{I_E}, \quad (1.11)$$

де $R_{вх_B}$ – опір відкритого емітерного переходу.

$$K_{U_B} = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_{ЕБ}} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_E \cdot R_{вх_B}} = \alpha \frac{R_H}{R_{вх_B}}, \quad (1.12)$$

де R_H і U_H – вхідний опір і вихідна напруга, відповідно.

У схемі із загальним емітером (ЗЕ):

$$K_{I_E} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \beta, \quad (1.13)$$

$$R_{\text{ex}_E} = \frac{U_{EB}}{I_B} = R_{\text{ex}_B} (\beta + 1) \approx \beta R_{\text{ex}_B}, \quad (1.14)$$

$$K_{U_E} = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_{EB}} \approx \frac{R_H}{R_{\text{ex}_B}}. \quad (1.15)$$

У схемі із загальним колектором (ЗК):

$$K_{I_K} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \beta + 1, \quad (1.16)$$

$$R_{\text{ex}_K} = \frac{U_{KB}}{I_B} = \frac{U_{EB} + U_H}{I_B} = (R_H + R_{\text{ex}_B})(\beta + 1), \quad (1.17)$$

$$K_{U_K} = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_{KB}} = \frac{R_H}{R_{\text{ex}_B} + R_H}, \quad (1.18)$$

$$K_{I_K} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \beta + 1. \quad (1.19)$$

Приклади розв'язання задач

Задача 1.1

Визначити вхідний опір кола, якщо $R_H = 2$ кОм, $E_K = -10$ В, $\beta = 50$, $R_E = 1$ кОм.

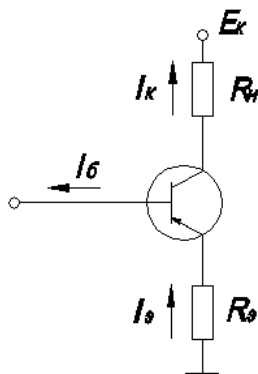


Рисунок 1.1

Розв'язання

$$R_{\text{ex}} = \frac{U_B}{I_B}.$$

Спад напруги на емітерному переході досить малий, тому ним можливо знехтувати:

$$I_B \approx -I_E \cdot R_E, \text{ та } I_E = I_B (\beta + 1),$$

$$R_{BX} = \frac{I_B (\beta + 1) R_E}{I_B} = R_E (\beta + 1) = 1(50 + 1) = 50 \text{ кОм},$$

без урахування внутрішнього опору емітерного (r_E) та базового (r_B) переходів.

Із урахуванням цих значень:

$$R_{BX} = (r_E + R_E) (\beta + 1) + r_B.$$

На практиці $r_E \ll R_E$ і $r_B \ll R_B (\beta + 1)$, тому вважаємо, що $R_{BX} \approx R_E (\beta + 1)$.

Задача 1.2

Визначити, за якої мінімальної вхідної напруги транзистор працює на межі режиму насичення, якщо $\beta = 9$, $E_K = -28 \text{ В}$, $R_H = 2 \text{ кОм}$, $R_B = 15 \text{ кОм}$, $R_E = 1 \text{ кОм}$.

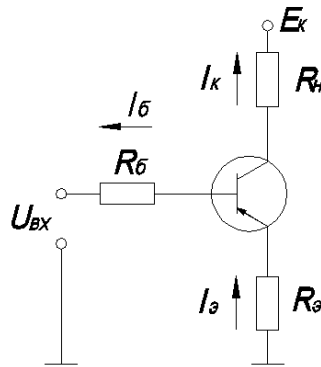


Рисунок 1.2

Розв'язання

У режимі насичення $U_{KE} \approx 0$.

Вхідна напруга $U_{BX} = -I_E R_E - I_B R_B$.

Напруга колекторного джерела живлення:

$$E_K = -I_E R_E - I_C R_H.$$

$I_E \approx I_B (\beta + 1)$ – струм емітера;

$I_C \approx \beta I_B$ – струм колектора.

Тому $U_{BX} = [I_B (\beta + 1) R_E + I_B R_B] = -I_B [R_E (\beta + 1) + R_B]$.

Якщо напруга джерела живлення:

$$E_K = -[I_B (\beta + 1) R_E + I_B R_H \beta] = -I_B [R_E (\beta + 1) + \beta R_H],$$

то струм бази:

$$I_B = \frac{-E_K}{R_E (\beta + 1) + \beta R_H} = \frac{28}{10^3 (9 + 1) + 9 \cdot 2 \cdot 10^3} = 1 \text{ mA}.$$

Підставивши це значення до рівняння для $U_{вх}$, маємо:

$$U_{вх} = -1[1(9+1)+15] = -25 \text{ В}.$$

Задача 1.3

Визначити напругу колектора-емітера (U_{KE}), якщо $\beta = 19$, $R_H = 10 \text{ кОм}$, $E_K = 24 \text{ В}$, $R_B = 50 \text{ кОм}$.

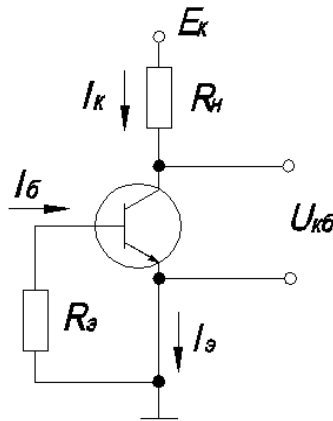


Рисунок 1.3

Розв'язання

Нехтуємо зворотним струмом колектора $I_{КБ0}$, оскільки він дуже малий, тому:

$$I_E = I_B (\beta + 1) \quad I_K = I_E,$$

$$U_{KE} = E_K - I_E R_H = E_K - I_B (\beta + 1) R_H = E_K - \frac{I_B R_B (\beta + 1) R_H}{R_B} = E_K - \frac{U_{KE} (\beta + 1) R_H}{R_B};$$

Перетворимо рівняння відносно U_{KE} :

$$U_{KE} + U_{KE} (\beta + 1) \frac{R_H}{R_B} = E_K,$$

$$U_{KE} \left[1 + (\beta + 1) \frac{R_H}{R_B} \right] = E_K,$$

$$U_{KE} = \frac{E_K}{1 + (\beta + 1) \frac{R_H}{R_B}} = \frac{24}{1 + \frac{10000}{50000}(19 + 1)} = 4,8V.$$

Задача 1.4

У схемі на біполярному транзисторі із загальною базою і фіксованим струмом бази визначити опір базового резистора R_B і колекторного резистора R_K , якщо $\beta = 50$, $U_{вих} = U_K = 6$ В, $I_K = 3$ мА, $E_K = 9$ В.

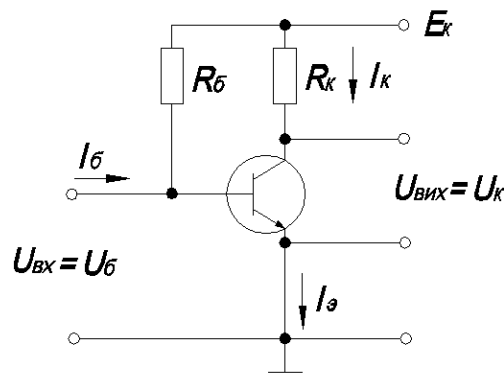


Рисунок 1.4

Розв'язання

$$R_K = \frac{E_K - U_K}{I_K} = \frac{9 - 6}{3 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ кОм}, .$$

Зазвичай напругу на базі транзистора відносно загального проводу визначають 0,6...0,8 В.

Використовуємо середнє значення $U_B = 0,7$ В.

Беремо $I_{КБ0} = 0$, у такому разі:

$$I_B = \frac{I_K}{\beta} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{50} = 0,06 \text{ мА} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ А},$$

$$R_B = \frac{E_K - U_B}{I_B} = \frac{9 - 0,7}{6 \cdot 10^{-5}} = 138333,33 \text{ Ом}.$$

Візьмемо найближче стандартне значення опору резистора $R_B = 15$ кОм.

Задача 1.5

У схемі із загальним емітером і фіксованою напругою бази визначити опір резисторів R_K , R_1 , R_2 , якщо $\beta = 60$, $U_K = 6$ В, $I_K = 0,4$ А, $U_B = 1$ В, $E_K = 9$ В.

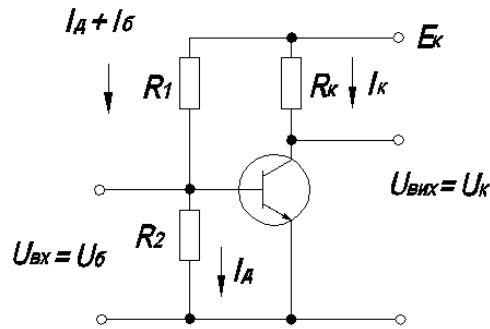


Рисунок 1.5

Розв'язання

$$R_K = \frac{E_K - U_K}{I_K} = \frac{9 - 6}{0,4} = 7,5 \text{ Ом},$$

Позначимо струм через подільник напруги R_1 і R_2 як I_g . У такому разі струм через R_1 складається із I_g і струму бази I_B . Тому:

$$R_1 = \frac{E_K - U_B}{I_g + I_B};$$

$$I_B = \frac{I_K}{\beta} = \frac{0,4}{60} = 6,7 \text{ мА};$$

$$I_g = (5 \dots 10) I_B;$$

$$\text{Беремо } I_g = 7 I_B = 7 \cdot 6,7 = 46,9 \text{ мА}.$$

Підставивши числові значення до рівняння для R_1 , маємо

$$R_1 = \frac{9 - 1}{(46,9 + 6,7) \cdot 10^{-3}} = \frac{8}{0,0536} = 149,2 \approx 150 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \frac{U_B}{I_D} = \frac{1}{0,0469} = 21,3 \text{ Ом} \approx 22 \text{ Ом}.$$

Задача 1.6

У схемі із загальною базою та емітерною стабілізацією визначити номінали резисторів, якщо $I_K = 150$ мА, $I_B = 3,75$ мА, $\beta = 40$, $U_B = 0,9$ В, $E_K = 9$ В.

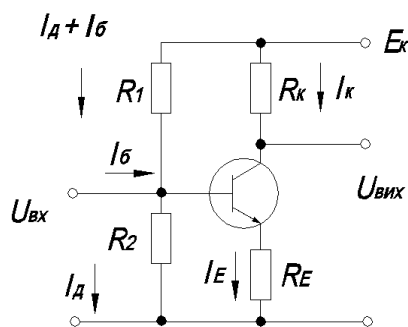


Рисунок 1.6

Розв'язання

Беремо $U_E = (0,05 \dots 0,3) E_K$.

Чим потужніший транзистор, тим менший коефіцієнт.

Беремо $U_E = 0,2 E_K$.

$$I_E = I_K + I_B = 150 + 3,75 = 153,75 \text{ мА.}$$

$$R_E = \frac{0,2 \cdot E_K}{I_E} = \frac{0,2 \cdot 9}{0,15375} = 11,7 \text{ Ом} \approx 12 \text{ Ом.}$$

Для підсилювальних каскадів беремо $U_K = (0,4 \dots 0,6) E_K$.

Беремо $U_K = 0,5 E_K$, тому

$$R_K = \frac{0,5 \cdot E_K}{I_K} = \frac{0,5 \cdot 9}{0,15} = 3000 \text{ Ом} = 3 \text{ кОм.}$$

$I_g = (2 \dots 5) I_B$. Вважаємо $I_g = 3 \cdot I_B = 3 \cdot 3,75 = 11,25 \text{ мА}$.

Струм, що проходить через R_1 , дорівнює

$$I_{R1} = I_g + I_B = 11,75 + 3,75 = 15 \text{ мА.}$$

Струм, що проходить через R_2 , дорівнює $I_g = 11,75 \text{ мА}$.

$$R_2 = \frac{U_B}{I_g} = \frac{0,9}{0,01125} = 80 \text{ Ом.}$$

$$U_{R1} = E_K + U_B = 9 + 0,9 = 8,1 \text{ В.}$$

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_g + I_B} = \frac{8,1}{0,015} = 540 \text{ Ом.}$$

Задача 1.7

У схемі із загальним емітером і фіксованим струмом бази знайти вихідну напругу $U_{\text{вих}}$, якщо $I_{\text{Б}} = 0,5 \text{ мА}$, $\beta = 20$, $R_{\text{К}} = 0,5 \text{ кОм}$, $E_{\text{К}} = 9 \text{ В}$.

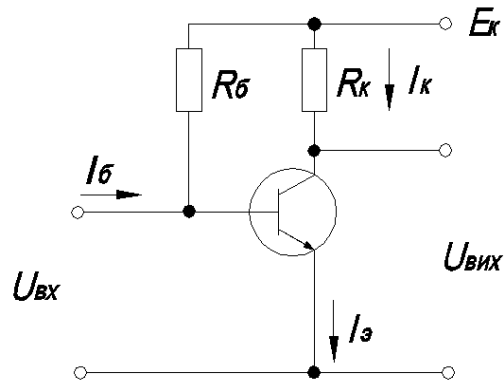


Рисунок 1.7

Розв'язання

$$U_{\text{вих}} = E_{\text{К}} - I_{\text{К}} R_{\text{К}}$$

$$I_{\text{К}} = I_{\text{Б}} \cdot \beta = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ мА}.$$

$$U_{\text{вих}} = 9 - 10 \cdot 0,5 = 9 - 5 = 4 \text{ В}.$$

Задача 1.8

У схемі із загальним емітером і колекторною стабілізацією визначити номінали резисторів, якщо $I_{\text{К}} = 150 \text{ мА}$, $U_{\text{Б}} = 0,9 \text{ В}$, $U_{\text{К}} = 8 \text{ В}$, $E_{\text{К}} = 12 \text{ В}$, $\beta = 50$.

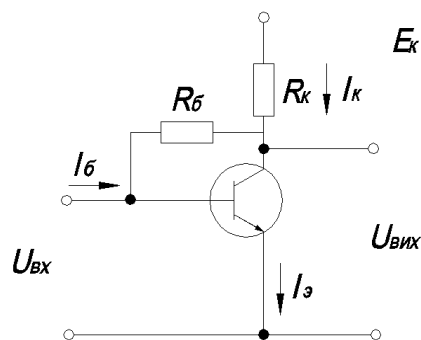


Рисунок 1.8

Розв'язання

$$R_K = \frac{U_{R_K}}{I_K}, \quad U_{R_K} = E_K - U_K = 12 - 8 = 4\text{В.}$$

$$R_K = \frac{4}{0,15} = 26,7\text{Ом}; \quad I_B = \frac{I_K}{\beta} = \frac{150}{50} = 3\text{мА};$$

$$R_B = \frac{E_K - U_{R_K} - U_B}{I_B} = \frac{12 - 4 - 0,9}{0,003} \approx 2,4\text{кОм.}$$

Задача 1.9

Розрахувати ланцюги зміщення, якщо робоча точка має координати: $I_K = 1\text{ мА}$, $U_{KE} = -6\text{ В}$, $E_K = 12\text{ В}$, $K_U = -8$, $\beta = 50$, $R_H = 8\text{ кОм}$.

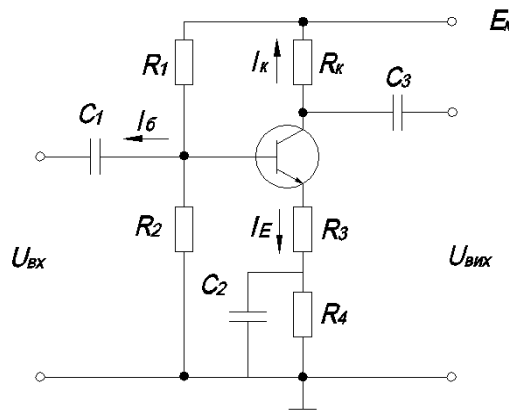


Рисунок 1.9

Розв'язання

Маємо $U_{R_H} = I_K \cdot R_H = 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^3 = 8\text{В}$.

Оскільки $U_{KE} = -6\text{ В}$, маємо сумарну напругу на резисторах у колі емітера.

$$U_E = E_K - U_{KE} - U_{R_H} = 30 - 6 - 8 = 16\text{ В.}$$

Нехтуючи зворотним струмом колектора $I_{КБ0}$, отримаємо:

$$I_B = \frac{I_K}{\beta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{50} = 20\text{мкА.}$$

Тому $I_E = I_K + I_B = 1 + 0,02 = 1,02\text{ мА}$.

При $|K_U| \leq 10$ справедливо $K_U \approx -\frac{R_H}{R_E}$, тому:

$$R_E = \frac{R_H}{|K_U|} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{8} = 1 \text{кОм}.$$

Опором $R_E \in R_3$ і напруга на ньому

$$U_{R3} = I_E \cdot R_3 = 1 \cdot 10^3 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3} \approx 1 \text{В}.$$

Тому спад напруги на R_4 дорівнює

$$U_{R4} = U_E - U_{R3} = 16 - 1 = 15 \text{В};$$

тоді $R_4 = \frac{U_{R4}}{I_E} = \frac{15}{1,02 \cdot 10^{-3}} = 15 \text{кОм}.$

Розрахуємо подільник у колі бази. Для стабільної роботи транзистора необхідно, щоб струм через R_2 був у 5–10 разів більший, ніж струм бази. Оскільки струм бази $I_B = 20 \text{мкА}$, візьмемо $I_{\text{діль.}} = 200 \text{мкА}$.

Нехтуючи спадом напруги на емітерному переході, вважаємо, що

$$U_B \approx U_E \approx -16 \text{В},$$

звідки $R_2 = \frac{U_B}{I_{\text{діль.}}} = \frac{16}{200 \cdot 10^{-6}} = 80 \text{кОм}.$

$$R_1 = \frac{-E_K + U_E}{I_B - I_{\text{діль.}}} = \frac{30 - 16}{220 \cdot 10^{-6}} = 63,5 \text{кОм} \approx 64 \text{кОм}.$$

Контрольні питання

1. У чому полягає відмінність нелінійного елемента від лінійного?
2. У чому полягає принцип використання керованих нелінійних елементів для підсилювання електричних сигналів?
3. Які існують спотворення підсиленого сигналу і яка причина їх появи?
4. Що таке зворотний зв'язок у підсилювачі?
5. Які існують види зворотного зв'язку?
6. Від яких параметрів залежить коефіцієнт підсилювання каскаду на транзисторі, що вимкнений за схемою із загальним емітером?
7. Як визначити параметри каскаду на схемі із загальним емітером, який працює в класі А?
8. Чому робота в класі В супроводжується появою значних спотворень?

9. Доведіть, що коефіцієнт посилення емітерного повторювача завжди менший, ніж одиниця?

10. Чому дорівнює вхідний опір емітерного повторювача?

11. Як впливає емітерний опір на роботу каскаду із загальним емітером?

12. Яке призначення розподільних конденсаторів у підсилювачах?

13. У чому полягає різниця між статичним і динамічним режимами роботи транзистора?

14. Більш ощадливий режим А чи В роботи підсилювального каскаду?

15. Що означає термін «режим насичення транзистора»?

16. Чим відрізняються р-п-р транзистори від п-р-п транзисторів?

Література [1, с. 52–81, 2, с. 90–120, 3, с. 109–270, 4, с. 224–233].

Практична робота № 2

Тема. Польові транзистори

Мета: на прикладах розв'язання задач ознайомити студентів з особливостями роботи польових транзисторів і відмінностями від біполярних транзисторів.

Короткі теоретичні відомості

Це транзистори, у яких є напівпровідниковий канал між витоком і стоком, по якому може текти струм. Площу перерізу, чи закриття цього каналу визначає напруга, яка прикладена до керуючого електрода-затвора. Польові транзистори порозділяють на транзистори з керуючим р-п переходом і на транзистори з ізольованим затвором. Ці транзистори мають дуже великий вхідний опір, що сприяє тому, що на керування не витрачається енергія.

Основні параметри польових транзисторів

1. Крутизна стокзатворної характеристики

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зи}} U_{ci} = const., \quad (2.1)$$

яка визначає вплив зміни напруги на затворі на зміну струму стоку. Із підвищенням напруги $U_{зи}$, струм стоку і крутизна зменшується.

Для пологої частини стокової характеристики крутизну визначають за співвідношенням:

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{|U_{zu}|}{|U_{omc}|} \right), \quad (2.2)$$

де $S_{\max} = \frac{1}{R_{K0}}$ – максимальна крутизна при $U_{зи} = 0$, R_{K0} – мінімальний опір каналу при $U_{зи} = 0$.

2. Внутрішній опір транзистора:

$$R_i = \frac{dU_{cu}}{dI_{cu}} U_{zu} = const. \quad (2.3)$$

3. Коефіцієнт посилення транзистора:

$$\mu = \left| \frac{dU_{cu}}{dU_{zu}} \right| I_c = const. \quad (2.4)$$

$$\mu = S \cdot R_i \quad (2.5)$$

4. Вхідний опір:

$$R_{вх} = \frac{dU_{zu}}{dI_3} U_{cu} = const. \quad (2.6)$$

5. Коефіцієнт посилення за напруздою:

$$|K_U| = S \cdot R_H, \quad (2.7)$$

де R_H – опір навантаження.

6. Струм стоку:

$$I_c = I_{c,max} \cdot \left(1 - \frac{|U_{zu}|}{U_{отс}} \right) \quad (2.8)$$

Приклади розв'язання задач

Задача 2.1

Польовий транзистор з керуючим р-n переходом, що має: $I_{c,max} = 2\text{мА}$ і

$S_{max} = 2 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$, увімкнений у підсилювальний каскад за схемою із загальним ви-

током (рисунок 2.1). Опір $R_H = 10\text{кОм}$. Визначити коефіцієнт посилення за напругою K_U , якщо:

1. $U_{3И} = -1\text{В}$
2. $U_{3И} = -0,5\text{В}$
3. $U_{3И} = 0$.

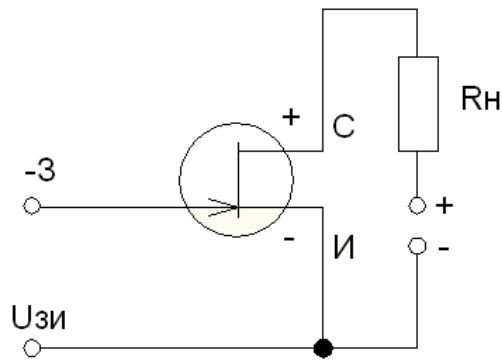


Рисунок 2.1

Розв'язання

Визначимо крутизну характеристики транзистора для $U_{3И} = -1\text{В}$:

$$S = S_{max} \cdot \left(1 - \frac{|U_{3И}|}{|U_{отс}|}\right) = 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{2}\right) = 1 \frac{\text{мА}}{\text{В}}.$$

Коефіцієнт посилення за напругою:

$$|K_U| = S \cdot R_H = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 10.$$

За напруги на затворі $U_{3И} = -0,5\text{В}$: $S = 1,5 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$; $K_U = 15$.

За напруги на затворі $U_{3И} = 0$: $S = 2 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$; $K_U = 20$.

Висновки.

Чим більша крутизна стокзатворної характеристики, тим більший коефіцієнт посилення транзистора. Чим менша напруга на затворі (за абсолютною величиною), тим більша крутизна.

Задача 2.2

Польовий транзистор з керуючим р-п переходом і каналом п-типу використовують у підсилювальному каскаді (рисунок 2.2). Визначити $U_{3И}, S, R_H, R_C$

припускаючи, що внутрішній опір транзистора $R_{и} \gg R_c$ і на робочій частоті ємнісний опір $C_{и}$ зовсім малий. При цьому $U_{омс} = -2B$, $I_{c.max} = 1,8mA$, $I_c = 1mA$, $|K_V| = 10$.

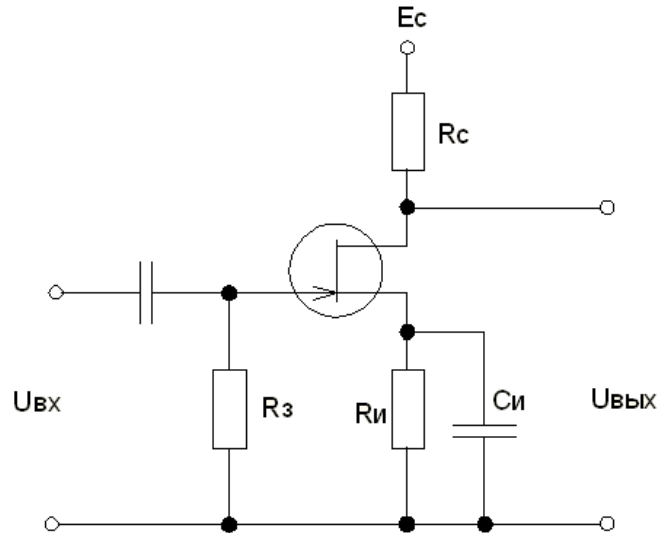


Рисунок 2.2

Розв'язання

Визначимо $U_{зИ}$, використовуючи співвідношення:

$$I_c = I_{c.max} \cdot \left(1 - \frac{|U_{зИ}|}{|U_{омс}|}\right)^2;$$

Перетворюючи це співвідношення відносно $U_{зИ}$, маємо:

$$|U_{зИ}| = U_{омс} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_{c.max}}}\right)$$

Якщо підставити числові значення у цей вираз, то маємо $|U_{зИ}| = 5B$.

Максимальна крутизна транзистора в робочій точці:

$$S_{max} = \frac{2 \cdot I_{c.max}}{U_{омс}} = 1,8 \frac{mA}{B}.$$

Тоді крутизна дорівнюватиме:

$$S = S_{max} \cdot \left(1 - \frac{|U_{зИ}|}{|U_{омс}|}\right) = 1,35 \frac{mA}{B}.$$

$$R_{II} = \frac{|U_{3II}|}{I_c} = 0,5 \text{кОм}.$$

Оскільки $R_{II} \gg R_c$, то $|K_U| = S \cdot R_c$:

$$R_c = \frac{|K_U|}{S} = 7,4 \text{кОм}.$$

Задача 2.3

Використовуючи транзистор КП303Г, розрахувати каскад за схемою, наведеною на рисунку 2.3, щоб він забезпечував отримання на виході максимальної амплітуди вихідної напруги. Вхідні дані: $U_n = 15 \text{В}$, $S = 2,5 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$, $U_{onc} = 2,5 \text{В}$,

$$I_{c.наг} = 5 \text{мА}, R_{ex} = 100 \text{кОм}.$$

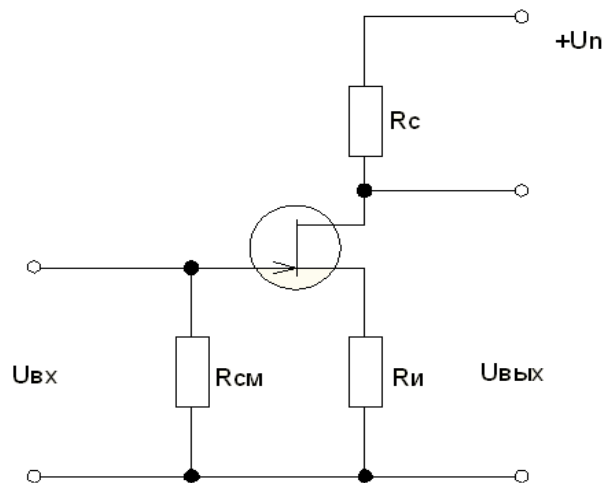


Рисунок 2.3

Розв'язання

1. Визначимо діапазон змін струму стоку:

$$I_{c.max} = I_{c.наг} = 5 \text{мА};$$

$$I_{c.min} = 0,1 \cdot I_{c.наг} = 0,5 \text{мА}.$$

Значення $I_{c.max}$ визначимо за передавальною характеристикою транзистора. При $I_c < 0,5mA$ характеристика має значну нелінійність, що спричиняє значні нелінійні спотворення.

2. Визначимо струм спокою стоку I_{cn} :

$$I_{cn} = \frac{I_{c.max} + I_{c.min}}{2} = \frac{5 + 0,5}{2} = 2,75mA$$

3. Визначимо опір резистора R_u , що забезпечує отримання $I_c = I_{cn}$.

Для цього використовуємо лінійну апроксимацію передавальної характеристики транзистора:

$$I_{cn} = I_{c.naz} = S \cdot U_{3I_n};$$

$$U_{3I_n} = R_u \cdot I_{cn};$$

звідки: $R_u = \frac{I_{c.naz} - I_{cn}}{S \cdot I_{cn}} = \frac{5 - 2,75}{2,5 \cdot 2,75} = 327Om.$

Беремо зі стандартного ряду опорів $R_u = 330Om$. Уточнимо струм I_{cn} :

$$I_{cn} = \frac{I_{c.naz}}{1 + S \cdot R_u} = \frac{5}{1 + 2,5 \cdot 0,33} = 2,74mA.$$

4. Визначимо опір резистора R_c .

Для того, щоб польовий транзистор був у насиченому режимі, має виконуватися умова:

$$U_{cu} \geq U_{3I_{omc}} - U_{3I};$$

Раніше було вибрано, що $I_{c.max} = I_{c.naz}$ – це відповідає $U_{3I} = 0$, тоді

$$U_{cu_{min}} = U_{3I_{omc}}.$$

Максимальний струм стоку, який може протекти в схемі, дорівнює:

$$I_{c.max} = \frac{U_n - U_{cu_{min}}}{R_c + R_u}.$$

Тоді: $R_c = \frac{U_n - U_{cu_{min}}}{I_{c.max} - R_u} = \frac{15 - 2,5}{5 - 0,33} = 2,17kOm.$

Беремо $R_c = 2,2 \text{кОм}$, тоді $I_{c,max} = 4,9 \text{мА}$.

5. Знайдемо діапазон зміни вихідної напруги:

$$U_{вих,max} = U_n - I_{c,min} \cdot R_c = 15 - 0,5 \cdot 2,2 = 13,9 \text{В};$$

$$U_{вих,min} = U_n - I_{c,max} \cdot R_c = 15 - 5 \cdot 2,2 = 4 \text{В};$$

$$\Delta U_{вих} = U_{вих,max} - U_{вих,min} = 13,9 - 4 = 9,9 \text{В};$$

$$U_{т.вих} = \frac{\Delta U_{вих}}{2} = 4,95 \text{В}.$$

6. Напруга спокою стоку U_{cn} :

$$U_{cn} = U_n - R_c \cdot I_{cn} = 15 - 2,2 \cdot 2,74 = 8,97 \text{В}.$$

7. Коефіцієнт посилення за напругою з ВЗЗ:

$$K_{U_{оос}} = \frac{S \cdot R_c}{1 + R_u \cdot S} = \frac{2,5 \cdot 2,2}{1 + 0,33 \cdot 2,5} = 3,01.$$

8. Для одержання $R_{ex} = 100 \text{кОм}$, вважаємо, що

$$R_{ex} = R_{cm} = 100 \text{кОм};$$

$$R_{вих} = R_c = 2,2 \text{кОм}.$$

Задача 2.4

Використовуючи транзистор КП303В, розрахувати параметри каскаду на польовому транзисторі, якщо коефіцієнт посилення за напругою $K_U = 10$, на частотах, більше 50 Гц і $U_n = 15 \text{В}$. Схема каскаду з попереднього прикладу (рис. 2.3).

Розв'язання

Збільшення коефіцієнта посилення вимагає збільшення опору R_c , а це зменшує максимальний струм стоку $I_{c,max}$ і знижує крутизну ВАХ (S) транзистора. Тому для розрахунків каскаду необхідно врахувати залежність $S = \varphi(I_c)$

Апроксимуємо залежність $S = \varphi(I_c)$ для заданого транзистора прямою лінією (рисунок 2.4). Для цього виберемо дві її точки:

$$1. \quad \begin{array}{ll} S_1 = 1 & I_{c1} = 0,6 \text{ мА} \\ S_2 = 3 & I_{c2} = 2 \text{ мА} \end{array}$$

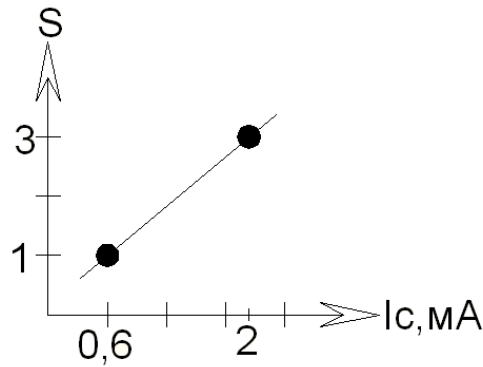


Рисунок 2.4

$$S = S_0 + K \cdot I_c;$$

$$K = \frac{\Delta S}{\Delta I_c} = \frac{3-1}{2-0,6} \approx 1,43 \text{ В}^{-1};$$

$$S_0 = S_2 - K \cdot I_{c2} = 3 - 1,43 \cdot 2 = 0,14 \frac{\text{мА}}{\text{В}};$$

$$S = 0,14 + 1,43 \cdot I_c.$$

2. Задано коефіцієнт посилення на змінному струмі. Можливо скористатися для визначення коефіцієнта посилення виразом $K_{U_0} = S \cdot R_c$, тому:

$$R_c = \frac{K_{U_0}}{S} = \frac{K_{U_0}}{0,14 + 1,43 \cdot I_c}.$$

3. Визначимо напругу спокою стоку:

$$U_{cn} = \frac{U_{\text{вix}_{\text{max}}} + U_{\text{вix}_{\text{min}}}}{2}.$$

Припустимо, що:

$$U_{\text{вix}_{\text{max}}} = U_n;$$

$$U_{вих_{min}} \approx U_{сунас} \approx U_{3И_{нор}} - U_{3И} \approx U_{3И_{нор}}.$$

Тоді
$$U_{cn} = \frac{U_n + U_{3И_{нор}}}{2} = \frac{16 - 1,5}{2} = 8,25В.$$

4. Визначимо струм спокою стоку I_{cn} :

$$I_{cn} = \frac{U_n - U_{cn}}{R_c}, \text{ або}$$

$$R_c = \frac{U_n - U_{cn}}{I_{cn}}.$$

Прирівнюючи це значення R_c , що було отримано в п. 2, знайдемо:

$$\frac{K_{U_0}}{0,14 + 1,43 \cdot I_c} = \frac{U_n - U_{cn}}{I_{cn}};$$

Звідки:
$$I_{cn} = \frac{0,14 \cdot (U_n - U_{cn})}{K_{U_0} - 1,43 \cdot (U_n - U_{cn})} = \frac{0,14 \cdot (15 - 1,5)}{10 - 1,43 \cdot (15 - 1,5)} = 0,58 \text{ мА}.$$

5. Визначимо опір резистора R_c :

$$R_c = \frac{U_n - U_{cn}}{I_{cn}} = \frac{15 - 1,5}{0,58} = 11,63 \text{ кОм}.$$

Вибираємо $R_c = 12 \text{ кОм}$, тоді
$$I_{cn} = \frac{15 - 8,25}{12} = 0,56 \text{ мА}.$$

6. За наведеною передавальною характеристикою транзистора (рисунок 2.4) знайдемо напругу затвора покою $U_{3n} = 1,155В$.

7. Із умови визначимо режим спокою опору резистора зсуву:

$$R_u = \frac{U_{3n}}{I_{cn}} = \frac{1,155}{0,56} = 2,06 \text{ кОм}.$$

Беремо $R_u = 2 \text{ кОм}$.

8. Ємність конденсатора шунтувального резистора R_u визначимо з умови:

$$\frac{I}{\omega \cdot C_u} \leq \frac{R_u}{100}, \text{ або}$$

$$C_u \geq \frac{100}{\omega \cdot R_u} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^3} = 159 \text{ мкФ.}$$

Беремо $C_u = 200 \text{ мкФ}$.

Контрольні питання

1. Як називають електроди польового транзистора?
2. Що таке напруга відсічки?
3. Фізична сутність крутизни стоконатворної характеристики.
4. Чому у польових транзисторах великий вхідний опір?
5. Як коефіцієнт посилення польового транзистора пов'язаний з крутизною?
6. Яку функцію виконує резистор у колі витоку?
7. Як задається режим щодо постійного струму в каскаді на польовому транзисторі, увімкненому за схемою із загальним витоком?
8. Чому транзистори називають польовими?
9. Чим відрізняються польові та біполярні транзистори?

Література: [1, с. 95–110, 2, с. 121–124, 3, с. 215–217].

Практична робота № 3

Тема. Робота транзисторів у ключовому режимі

Мета: ознайомити студентів з особливостями роботи транзисторів у ключовому режимі та його розрахунками.

Короткі теоретичні відомості

Ключі на транзисторах є керованими, тобто їх статичні характеристики визначають значення керування сигналу.

Транзистори, що працюють у ключовому режимі, мають два стійкі стани.

1. Увікнений, що відповідає роботі транзистора в режимі насичення.
2. Вимкнений – транзистор не проводить струм між емітером і колектором, чи витоком і стоком (для польових транзисторів).

Щодо розробки транзисторних ключів найбільшого поширення набула схема із загальним емітером (із загальним витоком – для польових).

Режиму насичення відповідає пряме зміщення як емітерного, так і колекторного переходів. Тому струм бази дорівнює сумі струмів цих двох переходів і виконується нерівність:

$$I_{\delta_{нас}} > \frac{I_{\kappa}}{h_{21\varepsilon}} = I_{\delta_{зр}}, \quad (3.1)$$

де $I_{\delta_{нас}}$ – базовий струм насиченого транзистора; $I_{\delta_{зр}}$ – базовий струм на межі активного режиму роботи і режиму насичення.

Перевищення базового струму насичення над його граничним значення характеризується коефіцієнтом насичення:

$$q_{нас} = \frac{I_{\delta_{нас}}}{I_{\delta_{зр}}}, \quad (3.2)$$

Оптимальним беруть $q_{нас} = 1,5...2$.

Для забезпечення режиму глибокої відсічки опір, що ввімкнений у ланцюг бази (R_{δ}), має бути:

$$R_{\delta} < \frac{U_{зан}}{I_{K_0}}, \quad (3.3)$$

де I_{K_0} – зворотний струм колектора (струм витоку); $U_{зан}$ – напруга замикання джерела.

Вираз для визначення тривалості фронту колекторного струму:

$$t_{\phi} = \tau_{\delta} \cdot \ln \frac{I_{\delta_{нас}}}{I_{\delta_{нас}} - \frac{I_{K_{нас}}}{h_{21\varepsilon}}}, \quad (3.4)$$

де $\tau_{\delta} = \frac{h_{21\varepsilon}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\alpha}}$ – час життя неосновних носіїв в області бази; $h_{21\varepsilon}$ – коефіцієнт посилення струму у схемі із загальним емітером.

Затримка вимкнення біполярного транзистора:

$$t_{pac} = \tau_{нак} \cdot \ln \frac{\Delta I_{\delta}}{I_{K_{нас}} / h_{21e} - I_{\delta_{зат}}}. \quad (3.5)$$

Ключі на польових транзисторах мають нижчу швидкодію і потребують підвищення опору навантаження.

Приклади розв'язання задач

Задача 3.1

Розрахувати елементи схеми ключа на біполярному транзисторі (рисунок 3.1), якщо $U_{ex} = 2B$; $U_{вих_{min}} = 6B$; $R_H = 3k\Omega$; $C_H = 100n\Phi$; $t_u = 30\mu c$; $R_{ex} = 5k\Omega$; $q = 3,5$ – коефіцієнт насичення.

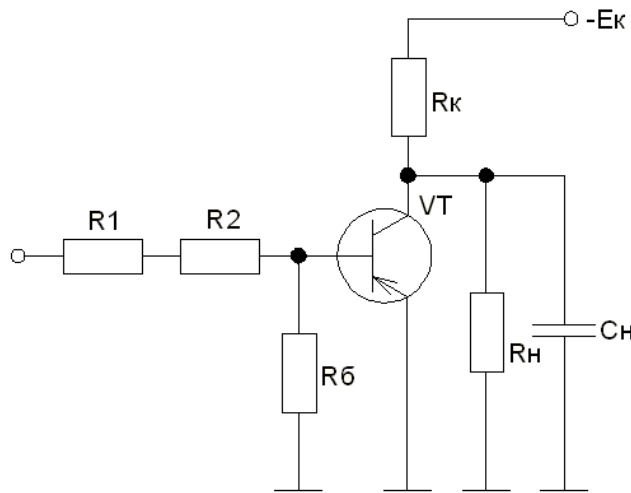


Рисунок 3.1

Розв'язання

Визначимо напругу живлення E_K з умови:

$$E_K = (1,1 \dots 1,8) \cdot U_{вих_{min}}.$$

Беремо $E_K = 9B$.

Оскільки $R_K \ll R_H$ беремо орієнтовно $R_K = 300 \Omega$

Струм відкритого транзистора (колекторний):

$$I_K = \frac{E_K}{R_K} = \frac{9}{300} = 0,03 A = 30 mA.$$

Вибираємо транзистор, ураховуючи, що:

$$U_{K_{max}} \geq 1,5 \cdot E_K \cdot \text{беремо } U_{K_{max}} = 9В.$$

$$I_{K_{max}} \geq 2 \cdot I_{KH} \cdot \text{беремо } I_{K_{max}} = 60мА.$$

$$h_{21e} \geq \frac{5 \dots 8}{t_u} \cdot \text{беремо } h_{21e} = 166 Гц.$$

Із довідника вибираємо транзистор МП40 – він має максимальний зворотний струм колектора за максимальної температури:

$$I_{K\bar{\sigma}_0 max} = 150мкА.$$

Підрахуємо уточнене значення R_K за формулою:

$$R_K \leq \frac{E_K - U_{\text{бух}min}}{I_{K\bar{\sigma}_0 max} + \frac{U_{\text{бух}min}}{R_H}} \leq \frac{9-6}{0,0015 + \frac{6}{3000}} = \frac{3}{0,0015 + 0,002} = 857Ом.$$

Беремо менше стандартне значення опору $R_K = 840$ Ом Умову $R_K \ll R_H$ дотримано.

Розрахуємо потрібну величину базового струму з умови насичення транзистора:

$$I_{\bar{\sigma}} = \frac{q \cdot E_K}{h_{21e} \cdot R_K} = \frac{3,5 \cdot 9}{30 \cdot 840} = \frac{31,5}{25200} = 0,0015А = 1,5мА.$$

Напругу зсуву визначаємо з умови:

$$|E_{зс}| = (0,1 \dots 0,3) \cdot E_K = 0,2 \cdot 9 = 1,8В.$$

Опір бази $R_{\bar{\sigma}}$ розрахуємо з умови:

$$R_{\bar{\sigma}} = \frac{E_{зс}}{I_{K\bar{\sigma}_0 min}} = \frac{1,8}{0,0015} = 1,2кОм.$$

Розсіювальна потужність на $R_{\bar{\sigma}}$:

$$P_{R_{\bar{\sigma}}} = I_{K\bar{\sigma}_0 max}^2 \cdot R_{\bar{\sigma}} = 0,0015^2 \cdot 6000 = 2,7мВт.$$

Можна застосувати резистор на 0,125 Вт чи ще менше. Визначимо сумарний опір резисторів R_1 і R_2 :

$$R_1 + R_2 = \frac{U_{ex} - U_{be_{нас}}}{\frac{q \cdot E_K}{h_{21e} \cdot R_K} + \frac{E_{эм} - U_{be_{нас}}}{R_б}} - R_{вн};$$

$$R_1 + R_2 = \frac{2 - 0,4}{0,0015 + \frac{1,8 - 0,4}{1200}} = \frac{16}{0,0003} = 5,333 \text{кОм} \approx 5,4 \text{кОм};$$

$$R_1 = \frac{2 \cdot U_{ex}}{I_{б_{доп}}} = \frac{4}{0,03} = 133 \text{Ом} \approx 130 \text{Ом},$$

де $I_{б_{доп}}$ – максимально-допустимий струм бази.

$$R_2 = 330 - 130 = 200 \text{Ом}.$$

Потужність, що розсіюється на R_1 :

$$P_{R_1} = 0,25 \cdot I_{б_{доп}}^2 \cdot R_1 = 0,25 \cdot 0,03 \cdot 130 = 0,244 \text{Вт} \approx 0,25 \text{Вт}.$$

Використовуємо резистор з розсіюванням потужності $P_{R_1} = 0,25 \text{Вт}$.

Задача 3.2

Розрахувати параметри ключа на транзисторі КТ312Б і визначити його швидкодію під час подавання на вхід прямокутного імпульсу напруги, якщо нижній рівень вхідного сигналу $E_{Г2} = -1\text{В}$, верхнього – $E_{Г1} = -2\text{В}$, опір генератора $R_Г = 1\text{кОм}$, ступінь насиченості транзистора $q \leq 4$. Мінімальний коефіцієнт передавання струму бази $\beta_{min} = 80$. Схему кола показано на рисунку 3.2.

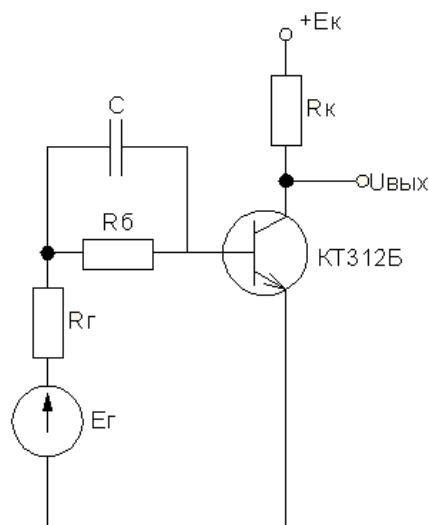


Рисунок 3.2

Розв'язання

Із довідника вибираємо максимальний струм і напругу колектора:

$$E_K = 10B, I_K = 2mA; R_K = \frac{E_K}{I_K} = \frac{10}{2} = 5k\Omega.$$

$$I_{\delta 1} = \frac{q \cdot E_K}{\beta_{min}} = \frac{4 \cdot 2}{80} = 0,1mA.$$

$$R_{\delta} = - \left(\frac{E_{\Gamma 1}}{I_{\delta 1}} \right) - (R_{\Gamma} + r_{\delta}),$$

де r_{δ} – опір базового переходу. Для малопотужних транзисторів $r_{\delta} = 80...150\Omega$. Беремо $r_{\delta} = 100\Omega$.

$$R_{\delta} = - \left(\frac{2}{0,1 \cdot 10^{-3}} \right) - (1000 + 100) = 3,1k\Omega.$$

Замикальний струм бази після подачі напруги $E_{\Gamma 2}$:

$$I_{\delta 2} = \frac{E_{\Gamma 2}}{R_{\Gamma} + r_{\delta}} = \frac{1}{1000 + 100} = 0,9mA.$$

Тривалість фронту під час подавання стрибка напруги $E_{\Gamma 2}$:

$$t_{\phi} = t_c \cdot \ln \frac{I_{\delta 1}(0)}{I_{\delta 1}(0) - \frac{I_K}{\beta}} \approx 0,14mкс,$$

де $I_{\delta 1}(0) = \frac{E_{\Gamma 2}}{R_{\Gamma} - r_{\delta}}$ – мінімальний струм бази на момент подавання $E_{\Gamma 2}$.

$I_{\delta 1}(0)$ мало змінюється за час формування фронту, тому

$$\tau_c = c \left[\frac{R_{\delta} \cdot R_{\Gamma}}{R_{\delta} + R_{\Gamma}} + r_{\delta} \right] \approx 0,2mкс.$$

Оскільки під час подавання $E_{\Gamma 2}$ амплітуда замикального струму в перший момент зростає, то в процесі розсмоктування і формування тривалості зрізу t_c також протікатимуть з постійною часу τ_c .

$$t_{pac} = \tau_c \cdot \ln \left[1 - \frac{q \cdot E_K}{\beta \cdot (I_{\delta 1} + I_{\delta 2})} \right];$$

$$t_c = \tau_c \cdot \ln \frac{I_{\delta H} + I_{\delta 2}(0)}{I_{\delta 2}(0)}; \partial e$$

$$I_{\delta 2}(0) = \frac{E_{\Gamma 2}}{R_{\Gamma} + r_{\delta}}.$$

Задача 3.3

Визначити опір резисторів R_1, R_2, R_K транзисторного ключа, якщо маємо транзистор МП41А (рисунок 3.3), $E_K = 10B$, $U_{вих} \geq 8B$, $R_H = 3k\Omega$, $q = 3$. Температура навколишнього середовища $t^{\circ} = 20 \div 60^{\circ}C$. Опір джерела вхідного сигналу не враховуємо.

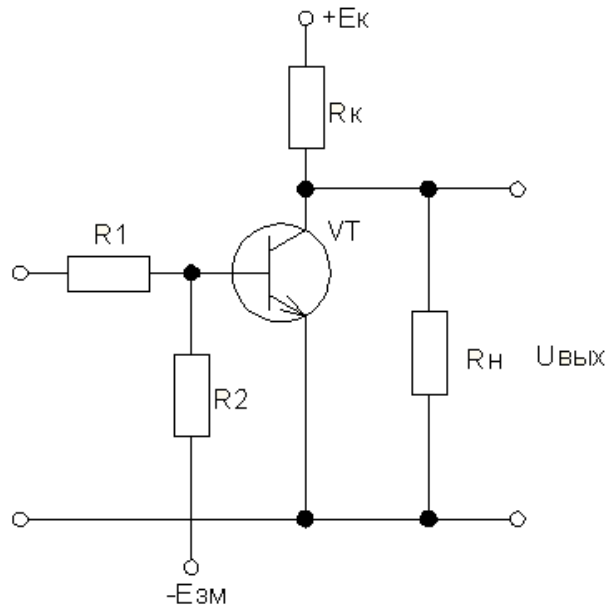


Рисунок 3.3

Розв'язання

1. Напряга зміщення забезпечує закритий стан транзистора за відсутності вхідного сигналу.

$$U_{\delta} = E_{зм} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - I_{K\delta_0 max} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \leq 0, \quad (3.1)$$

де $I_{K\bar{\sigma}_0 max}$ – значення зворотного струму транзистора за максимальної температури. Для МП41А $t^o = 60^o C$, маємо:

$$I_{K\bar{\sigma}_0 max} = 250 \text{ мкА. (довідникові дані)}$$

Із формули (3.1) маємо, що:

$$\frac{|E_{зм}|}{R_2} \geq I_{K\bar{\sigma}_0 max}. \quad (3.2)$$

Вибираємо напругу зміщення з умови:

$$|E_{зм}| = (0,1 \dots 0,3) \cdot E_K. \quad (3.3)$$

Візьмемо $E_{зм} = 0,2 \cdot E_K$.

За формулою (3.2) визначимо опір резистора R_2 :

$$R_2 \leq \frac{|E_{зм}|}{I_{K\bar{\sigma}_0 max}} = \frac{0,2 \cdot E_K}{I_{K\bar{\sigma}_0 max}} = 8 \text{ кОм.}$$

Беремо $R_2 = 4 \text{ кОм.}$

Для замкнутого транзисторного ключа можна записати:

$$E_K - U_{вих} = (I_{K\bar{\sigma}_0} + I_H) \cdot R_K, \quad (3.4)$$

де $I_H = \frac{U_{вих}}{R_H}$.

За формулою (3.4) визначимо R_K , ураховуючи, що для забезпечення мінімального рівня вихідної напруги необхідно брати максимальне значення зворотного струму транзистора $I_{K\bar{\sigma}_0 max}$:

$$R_K \leq \frac{E_K - U_{вих_{min}}}{I_{K\bar{\sigma}_0 max} + \frac{U_{вих_{min}}}{R_H}} = 0,67 \text{ кОм.} \quad (3.5)$$

$$I_{\bar{\sigma}} = \frac{q \cdot E_K}{\beta_{min} \cdot R_K} = 1,5 \text{ мА.} \quad (3.6)$$

Але враховуючі, що напруга на переходах відчиненого транзистора $U_{\bar{o}e} = 0,7B$, маємо:

$$I_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{e}x} - U_{\bar{o}e}}{R_1} - \frac{E_{зм} - U_{\bar{o}e}}{R_2}; \quad (3.7)$$

Підставляючи (3.6) до (3.7) і виражаючи R_1 , маємо:

$$R_1 = \frac{U_{\bar{e}x} - U_{\bar{o}e}}{\frac{q \cdot E_{\kappa}}{\beta_{\min} \cdot R_{\kappa}} + \frac{E_{зм} - U_{\bar{o}e}}{R_2}} = 2,8 \text{кОм}.$$

Контрольні питання

1. Що таке коефіцієнт насичення біполярного транзистора?
2. У чому полягає причина виникнення перехідних процесів під час перемикавання ключа на біполярному транзисторі?
3. Чим відрізняються процеси перемикавання дрейфових і бездрейфових транзисторів?
4. Як перехідні процеси перемикавання біполярного транзистора пов'язані з частотою напруги керування?
5. Назвіть відмінності статичних характеристик передавання транзисторних ключів на польових і біполярних транзисторах.
6. Чим відрізняються процеси перемикавання польового і біполярного транзисторів?
7. Які існують фази вимикання біполярного транзистора?

Література: [1, с. 88–95, 110–114, 3, с. 370–414].

Практична робота № 4

Тема: Розрахунки динамічних режимів роботи підсилювальних каскадів на транзисторах

Мета: засвоєння студентами графоаналітичного методу розрахунку основних параметрів транзисторних схем.

Короткі теоретичні відомості

Для проведення динамічних розрахунків використовують графоаналітичний метод, тому що в цьому випадку необхідно провести обчислення параметрів робочої точки транзистора підсилювального каскаду. Окрім того, використання вхідних і вихідних вольтамперних характеристик транзистора значно спрощує здійснення розрахунків у цілому.

Наведений нижче приклад дозволяє виконати всі можливі розрахунки, що стосуються динамічної роботи транзисторного каскаду. Якщо розрахункам підлягає багатокаскадний підсилювач змінного струму, то статичні розрахунки виконують окремо для кожного каскаду. Для динамічних розрахунків необхідно починати з вихідного каскаду, розраховувати його вхідний опір з урахуванням опору розподільних конденсаторів на нижній частоті діапазону підсилюваних частот. Номінал вхідного опору розрахованого каскаду є опором навантаження попереднього каскаду.

Приклади розв'язання задач

Задача 4.1

Для наведеної схеми підсилювального каскаду, напруга живлення якого $E_{ж} = 10$ В; постійна складова струму бази $I_{Б0} = 0,3$ мА, амплітуда змінної складової струму бази $I_{мБ} = 0,2$ мА, опір навантаження $R_{Н} = 500$ Ом, максимальна потужність розсіювання колектора $P_{К\max} = 150$ мВт, необхідно:

а) побудувати лінію $P_{К\max}$ на вихідних вольт-амперних характеристиках транзистора;

б) за вихідними характеристиками визначити:

- постійну складову струму колектора $I_{К0}$,
- постійну величину напруги колектора-емітера $U_{КЕ0}$,
- амплітуду змінної складової струму колектора $I_{мК}$,
- амплітуду вихідної напруги $U_{m_{Rn}} = U_{m_{KE}}$,
- коефіцієнт посилення за струмом K_I
- вихідну потужність $P_{вих}$,

– потужність, що розсіюється на навантаженні в колекторному ланцюзі P_0 ,

– ККД колекторного ланцюга η .

Перевірити, чи не перевищує потужність P_{K_0} , що виділяється в режимі спокою, максимально допустиму потужність $P_{K_{\max}}$.

в) за допомогою вхідних характеристик визначити

– напругу зсуву U_{BE_0} ,

– амплітуду вхідного сигналу $U_{m_{BE}}$,

– вхідну потужність P_{BX} ,

– коефіцієнт посилення за напругою K_U і за потужністю K_P ,

– вхідний опір каскаду R_{BX} ,

– опір резистора R_B ,

– ємність розподільного конденсатора C_P для діапазону підсилювальних коливань від 80 Гц до 5 кГц.

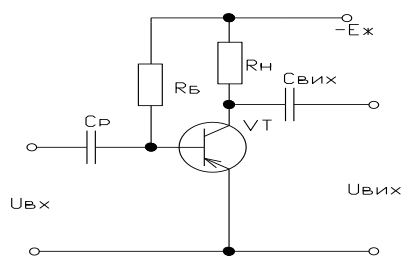


Рисунок 4.1

Розв'язання

На сімействі вихідних характеристик будемо лінію максимально-допустимої потужності, використовуючи рівняння:

$$I_{K_{\max}} = \frac{P_{K_{\max}}}{U_{KE}} = \frac{0,15}{U_{KE}} \text{ мА.}$$

Підставляючи до нього значення U_{KE} , що дорівнює, наприклад $U_{KE} : -7,5 \text{ В}; -10 \text{ В}; -15; -20 \text{ В}$, визначимо $I_{K_{\max}} : 20; 15; 10; 7,5 \text{ мА}$, відповідно.

Зазвичай використовують характеристики вибраного транзистора, які беруть з довідника. Для прикладу маємо готові вихідні характеристики, що зображені на рисунку 4.2.

На рисунку 4.1 зображено електричну принципову схему підсилювального каскаду на одному транзисторі, що підлягає розрахункам. Транзистор увімкнено за схемою із загальним емітером. C_p – вхідний розподільний конденсатор, $C_{вих}$ – вихідний розподільний конденсатор.

Використовуючи рівняння лінії навантаження:
$$I_K = \frac{E_{ж} - U_{KE}}{R_H},$$

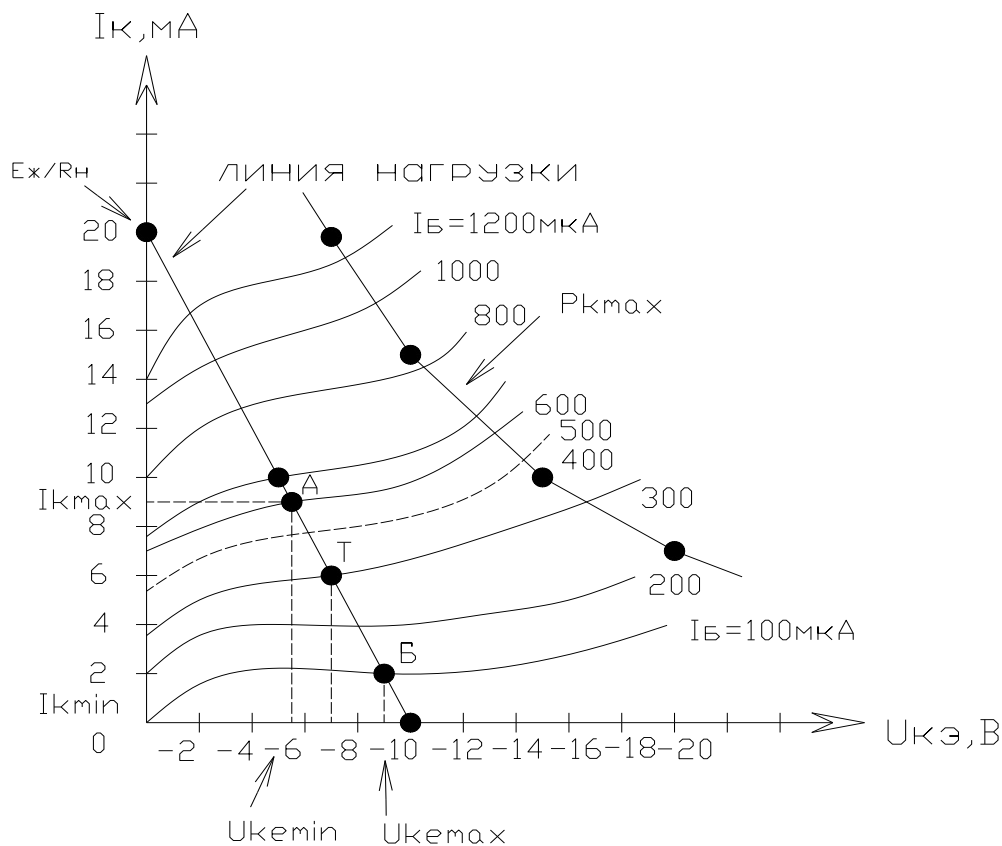


Рисунок 4.2

на сімейство вихідних характеристик наносимо лінію навантаження. Якщо транзистор закритий, то $I_K = 0$; $U_{KE} = E_{ж} = -10$ В – перша точка лінії навантаження.

Якщо транзистор відкритий повністю, то $U_{KE} = 0$; та $I_K = E_{ж}/R_H = 10/500 = 20$ мА – друга точка лінії навантаження.

Точка перетину лінії навантаження з характеристикою відповідної постійної складової струму бази визначить робочу точку $I_{K0} = 6$ мА; $U_{KE0} = -7$ В –

точка Т. Амплітуду змінної складової струму колектора визначимо як середнє значення:

$$I_{mk} = \frac{I_{R\max} - I_{K\min}}{2} = \frac{0,009 - 0,002}{2} = 3,5\text{mA}.$$

Точка А і точка Б на лінії навантаження визначають максимальні та мінімальні значення струму і напруги у динамічному режимі.

Далі розрахунок має вигляд:

Амплітуда змінної напруги на навантаженні:

$$U_{m_{KH}} = U_{m_{KE}} = I_{mk} \cdot R_H = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^3 = 1,75 \text{ В}.$$

Коефіцієнт посилення за струмом:

$$K_I = \frac{I_{mk}}{I_{mB}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 17,5.$$

Вихідна потужність:

$$P_{\text{вих}} = 0,5 I_{mk} U_{m_{KH}} = 0,5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,75 = 3 \text{ мВт}.$$

Повна споживана потужність у колекторному колі:

$$P_0 = E_{\text{ж}} I_{K_0} = 10 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 60 \text{ мВт}.$$

ККД колекторного кола:

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_0} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3}} = 0,05 = 5\%.$$

Потужність, що розсіюється на колекторі постійної складової колекторного струму:

$$P_{K_0} = I_{K_0} U_{KE0} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 7 = 42 \text{ мВт}.$$

Маємо $P_K < P_{K\max} < 150 \text{ мВт}$, тому режим навантаження допустимий.

Далі розрахунок відбудовується за вхідною характеристикою. Переносимо точки А, Т, Б з вихідних характеристик на вхідні. Точці А відповідає значення струму $I_{B\max} = 500 \text{ мкА}$ точці Б відповідає $I_{B\min} = 100 \text{ мкА}$, точці Т відповідає $I_{B_0} = 300 \text{ мкА}$. Ці точки наносимо на перетин значення струму бази і вхідної характеристики. Із графіка визначимо $|U_{BE}| = 0,3 \text{ В}$; $U_{BE\max} = 0,38 \text{ В}$; $U_{BE\min} = 0,2 \text{ В}$.

Амплітуда вхідної напруги:

$$U_{BE} = (U_{BE_{max}} - U_{BE_{min}})/2 = (0,38 - 0,2)/2 = 0,09 \text{ В} = 90 \text{ мВ}$$

Коефіцієнт посилення за напругою:

$$|K_U| = U_{m_{кн}} / U_{m_{бс}} = 1,75 / 0,09 = 19,4$$

Коефіцієнт посилення за потужністю:

$$K_p = |K_I \cdot K_U| = 19,4 \cdot 17,5 = 110,86 \approx 111$$

Вхідна потужність:

$$P_{вх} = 0,5 \times I_K \times U_{BE} = 0,5 \times 0,2 \times 10^{-3} \times 0,09 = 9 \text{ мкВт}$$

Вхідний опір:

$$R_{вх} = U_{m_{бс}} / I_K = 0,09 / 0,0002 = 450 \text{ Ом}$$

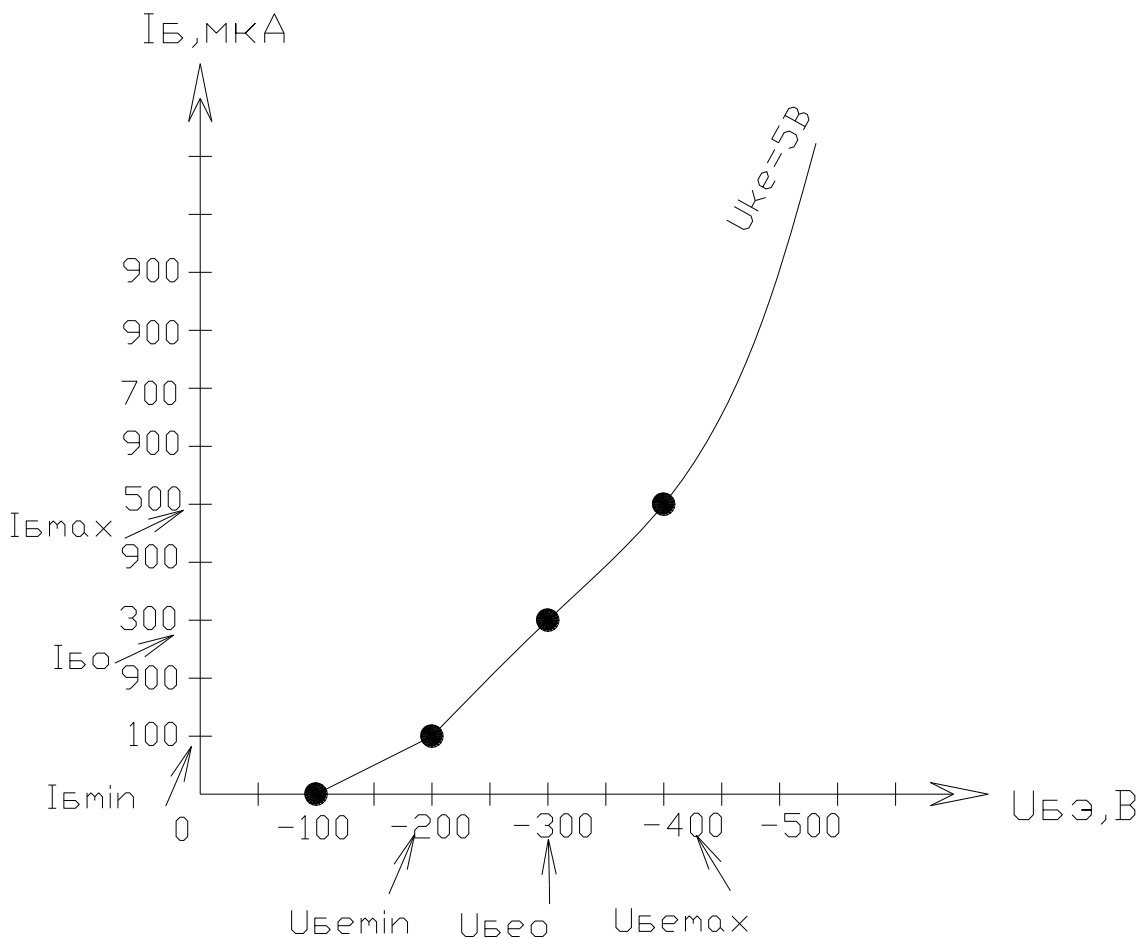


Рисунок 4.3

Опір резистора:

$$R_B = (E_{ж} - |U_{BE}|) / I_{B_0} = (10 - 0,3) / 0,3 \times 10^{-3} = 32,3 \text{ кОм.}$$

Ємність конденсатора визначається з умови:

$$1 / (\omega_i \times C_p) = R_{\text{вх}} / 10,$$

де $\omega_i = 2\pi f_i$ – нижня робоча частота, тоді

$$C_p = 10 / (\omega_i \times R_{\text{вх}}) = 10 / (2\pi \times f_i \times R_{\text{вх}}) = 10 / (6,28 \times 80 \times 450) = 44,2 \text{ мкФ}.$$

Значення ємності беремо ближче в бік, більший до стандартного значення:

$$C_p = 50 \text{ мкФ}.$$

Контрольні питання

1. У чому полягає відмінність нелінійного елемента від лінійного?
2. У чому полягає перевага графоаналітичного методу розрахунку?
3. Які показники можливо визначити з вихідних вольтамперних характеристик транзистора?
4. Які показники можливо визначити з вхідних вольтамперних характеристик транзистора?
5. Поясніть сутність методу перетину характеристик.
6. Як називають електроди біполярного транзистора?
7. Як за допомогою стрілки на умовно графічному позначенні біполярного транзистора визначити напрям струму на кожному електроді та полярність напруги?
8. Чому транзистори називають біполярними?

Література: [1, с. 52–87, 2, с. 90–120, 3, с. 631–672]

Практична робота № 5

Тема. Операційні підсилювачі (ОП)

Мета: ознайомлення з основними параметрами ОП та їх розрахунками.

Короткі теоретичні відомості

Операційний підсилювач являє собою диференціальний підсилювач постійного струму, що має два виходи – прямий та інверсний. Коефіцієнт посилення за напругою прагне до нескінченності ($K_U \rightarrow \infty$);

– вхідний опір також ($R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$);

– вихідний опір прагне до нуля ($R_{\text{вих}} \rightarrow 0$):

підсилює весь діапазон частот, якщо вхідна напруга дорівнює нулю.

5.1. Основні співвідношення для розрахунку параметрів операційних підсилювачів:

$$U_{\text{вих}} = K_{U_0} \times (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}), \quad (5.1)$$

де K_{U_0} – власний коефіцієнт посилення ОП за напругою.

$$K_{U_0} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}}, \quad (5.2)$$

$$\Delta I_{\text{вх}} = |I_{\text{вх1}} - I_{\text{вх2}}|, \quad (5.3)$$

де $\Delta I_{\text{вх}}$ – різниця вхідних струмів (струм зсуву).

Типове значення вхідного опору – сотні кОм, вихідного опору – сотні Ом.

Коефіцієнт придушення синфазного сигналу має типове значення – 50÷70 дБ.

На корпусі мікросхеми є маркування ОП буквами УД.

Наприклад, К140УД11, К140УД1, К157УД1, К153УД4 та ін.

Основні співвідношення для повторювача напруги:

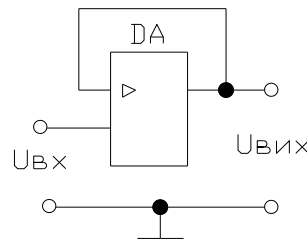


Рисунок 5.1

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вих}};$$

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вх.о}} \times (1 + K_{U_0}) \quad (5.4)$$

$$R_{\text{вих.}} = R_{\text{вих.о}} / (1 + K_{U_0}) \quad (5.5)$$

Повторювач напруги.

Основні співвідношення для неінверсного ОП:

$$K_{U_{\text{взз}}} = (Z_1 + Z_{33}) / Z_1 = 1 + Z_{33} / Z_1 \quad (5.6)$$

Якщо нехтуємо одиницею, то:

$$K_{U_{\text{взз}}} = Z_{33} / Z_1. \quad (5.7)$$

Для інвертувального підсилювача:

$$K_{U_{B33}} = -Z_{33} / Z_1. \quad (5.8)$$

$$R_{ВХ_{B33}} = R_{33} / (1 + K_{U_0}) \quad (5.9)$$

Задача 5.1

Використовуючи ОП типу К140УД5Б, спроектувати неінверсний підсилювач з коефіцієнтами передавання 100 і вхідним опором 1 кОм. Власний вхідний опір ОП $R_{ВХ_0} = 3$ кОм

Розв'язання

Визначимо вхідний опір підсилювача з ВЗЗ.

$$R_{ВХ_{B33}} = R_{ВХ_0} \times (1 + K_{U_0} \beta),$$

де $\beta = Z_1 / (Z_1 + Z_{oc})$

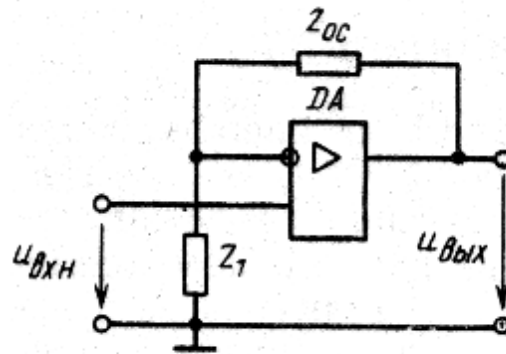


Рисунок 5.2 – Неінверсний підсилювач

Необхідне значення глибини ВЗЗ:

$$1 + K_{U_0} \beta = K_{U_0} / K_{U_{B33}} = 2500 : 100 = 25.$$

Тоді $R_{ВХ_{B33}} = 3 \times 25 = 75$ кОм.

Для отримання потрібного вхідного опору між неінверсним входом ОП і загальною шиною необхідно ввімкнути додатковий резистор $R_{ВХ2}$.

$$R_{ВХ} = R_{ВХ2} R_{ВХ_{B33}} / (R_{ВХ2} + R_{ВХ_{B33}});$$

$$R_{ВХ2} = R_{ВХ} R_{ВХ_{B33}} / (R_{ВХ_{B33}} - R_{ВХ}) = 1 \times 75 : (75 - 1) = 1,014 \text{ кОм.}$$

Беремо $R_{ВХ2} = 1$ кОм

Визначимо потрібний опір резистора R_{33}

$$1 + K_{U_0} \beta = 1 + [K_{U_0} R_1 / (R_1 + R_{33})],$$

звідки беремо $R_1 = R_{BX2}$. Визначимо:

$$R_{33} = \{ [K_{U0} + 1 - (1 + K_{U0} \beta)] / [(1 + K_{U0} \beta) - 1] \} \times R_1 = \\ = (2500 + 1 - 25) / (25 - 1) = 103,17 \text{ Ом.}$$

Використовуючи приблизний вираз: $K_{UV33} \approx 1 / \beta$,

отримаємо: $R_{33} = R_1 \times (K_{U0} - 1) = 99 \text{ Ом.}$

Задача 5.2

Для вихідних даних попереднього прикладу розрахувати інверсний підсилювач. Визначити похибку, яка виникає з використанням точних і наближених виразів.

Розв'язання

Визначимо точні опори резисторів: $Z_1 = R_1$ і $Z_{33} = R_{33}$

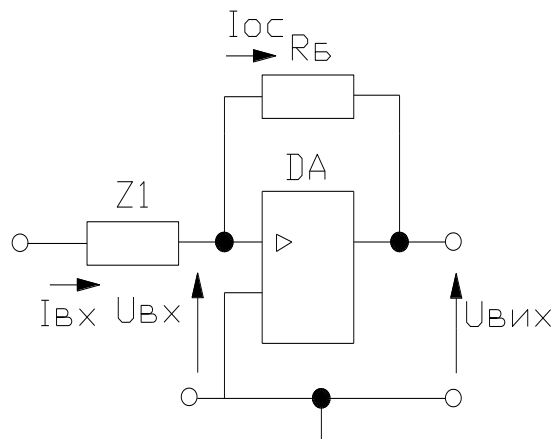


Рисунок 5.3 – Інверсний операційний підсилювач

За першим законом Кірхгофа: $I_{BX} = I_{R1} + I_{33}$.

$$(U_{BX} - U_{BX.0}) / R_{BX} = (U_{ВИХ} - U_{33}) / R_1 + U_{33} / R_{33}.$$

Ураховуючи, що $U_{ВИХ} = -U_{BX} \times K_{U0}$, знайдемо точний вираз для коефіцієнта передавання інвертувального підсилювача:

$$K_{UV33} = -K_{U0} \cdot R_{33} \cdot R_{ВХО} / [R_{BX} R_{ВХО} (1 + K_{U0}) + R_{33} (R_1 + R_{ВХО})].$$

Повний вхідний опір підсилювача:

$$R_{BX} = R_1 + R_{ВХВ33} - \{ R_{33} \cdot R_{ВХО} + R_1 [R_{ВХО} \cdot (1 + K_{U0}) + R_{33}] \} / [R_{33} + R_{ВХО} (1 + K_{U0})].$$

Розв'яжемо рівняння для K_{UV33} відносно R_1 :

$$R_1 = R_{33} \cdot R_{\text{ВХО}} (K_{U_0} - K_{U_{\text{ВЗЗ}}}) / K_{U_{\text{ВЗЗ}}} [R_{33} + R_{\text{ВХО}} (1 + K_{U_0})].$$

Підставивши знайдене значення R_1 до рівняння для $R_{\text{ВХ}}$ і розв'язавши його відносно R_{33} , отримаємо:

$$R_{33} = [1 \cdot 3 \cdot 100 \cdot (1 + 2500)] / [3 \cdot (2500 + 100) - 1 \cdot 100] = 97,44 \text{ Ом};$$

$$R_1 = [97,44 \cdot 3 \cdot (2500 - 100)] / \{100 \cdot [97,44 + 3 \cdot (1 + 2500)]\} = 0,932 \text{ кОм}.$$

Визначимо опір резисторів, використовуючи приблизні вирази:

$$R_1 = R_{\text{ВХ}} - R_{\text{ВХВЗЗ}};$$

$$R_{\text{ВХВЗЗ}} \approx R_{33} / (1 + K_{U_0});$$

$$K_{U_{\text{ВЗЗ}}} \approx R_{33} / R_1.$$

Розв'язуючи наведену систему рівнянь відносно R_{33} , визначимо:

$$\begin{aligned} R_{33} &= [R_{\text{ВХ}} \cdot K_{U_{\text{ВЗЗ}}} \cdot (1 + K_{U_0})] / (1 + K_{U_0} + K_{U_{\text{ВЗЗ}}}) = \\ &= 1 \cdot 100 \cdot (1 + 2500) / (1 + 2500 + 100) = 96,15 \text{ кОм}. \end{aligned}$$

Тоді $R_{\text{ВХВЗЗ}} = 96,15 / (1 + 2500) = 38 \text{ Ом}$; $R = 1000 - 38 = 962 \text{ Ом}$.

Визначимо точне значення $K_{U_{\text{ВЗЗ}}}$ для знайдених приблизних опорів R_1 і R_{33} :

$$K_{U_{\text{ВЗЗ}}} = (2500 \cdot 96,15 \cdot 3) : [3 \cdot 0,96 \cdot (1 + 2500) + 96,15 \cdot (0,96 + 3)] = 95,1.$$

Це значення відмінне від наданого не більш ніж на 5 %, що є допустимим.

Задача 5.3

Визначити вхідну напругу операційного підсилювача з ВЗЗ, якщо $U_{\text{ВХ}} = 25 \text{ В}$, $R_1 = 0,5 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$ і $K_U = 200$.

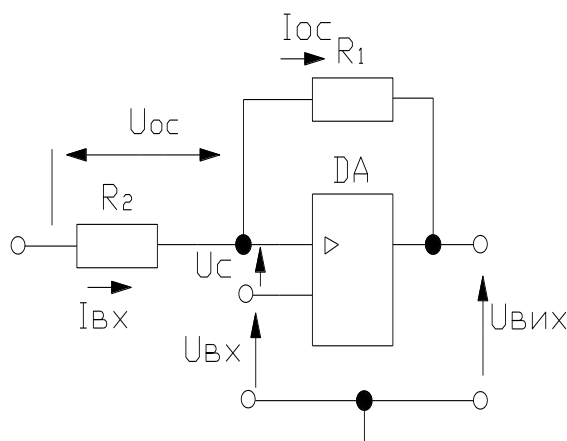


Рисунок 5.4 – Операційний підсилювач з від'ємним зворотнім зв'язком

Розв'язання

$$K_{U_{ВЗЗ}} = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}};$$

звідки $U_{\text{вх}} = U_{\text{вих}} / K_{U_{ВЗЗ}};$

$$K_{U_{ВЗЗ}} = K_U / (1 + K_U \beta),$$

де $K_{U_{ВЗЗ}}$ – коефіцієнт підсилення схеми з ВЗЗ, що на рисунку 5.4, K_U – коефіцієнт посилення самого ОП, $\beta = R_2 / (R_1 + R_2)$.

З урахуванням цих рівнянь маємо:

$$\beta = 10 : (10 + 0,5) = 0,95,$$

$$K_{U_{ВЗЗ}} = 200 : (1 + 200 \times 0,95) = 1,045,$$

$$U_{\text{вхВЗЗ}} = 25 : 1,045 = 23,92 \text{ В.}$$

Зазвичай використовують спрощені рівняння, тому що реальна похибка не перевищує 5 %. Реальні параметри мікросхем операційних підсилювачів мають приблизно такий самий розкид.

Контрольні питання

1. Високий вхідний опір операційного підсилювача є недоліком чи перевагою?
2. Чи має неінвертувальний операційний підсилювач резистор від'ємного зворотного зв'язку, якщо коефіцієнт його підсилювання дорівнює одиниці?
3. Який тип від'ємного зворотного зв'язку використовується у повторювачі напруги?
4. Чому коефіцієнт посилення інвертувального підсилювача не може бути менший, ніж одиниця?
5. Як визначають коефіцієнт підсилення для інвертувального та неінвертувального операційного підсилювача?
6. Доведіть, чому коефіцієнт посилення інвертувального операційного підсилювача може бути зменшений до нуля.
7. Поясніть, чому між входами операційного підсилювача і загальною шиною необхідно вмикати резистори з однаковим опором

8. Чому кола зовнішньої корекції дозволяють компенсувати похибки вихідної напруги операційного підсилювача тільки при одній температурі зовнішнього середовища?

Література [1, с. 135 – 171, 2, с. 186 – 222, 3, 272 – 286].

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ.

Під час вивчення навчальної дисципліни «Схемотехніка» студенти денної форми навчання виконують практичні роботи. Вони охоплюють основні розділи навчальної дисципліни.

Максимальна кількість балів, яку можуть отримати студенти, складає 25 балів. Виконання розрахунків кожної роботи оцінюється 5 балів. Конкретна кількість балів, отримана кожним студентом, залежить від якості підготовки та проведення розрахунків і захисту їх результатів. За несвоєчасне виконання і захист практичних завдань кількість балів знижується.

**Таблиця відповідності результатів контролю знань
за різними шкалами і критерії оцінювання**

| Сума балів за 100-бальною шкалою | Оцінка в ECTS | Значення оцінки ECTS | Критерії оцінювання | Рівень компетентності | Оцінка за національною шкалою |
|----------------------------------|---------------|----------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------|
| | | | | | іспит, диференційований залік |
| 90-100 | A | відмінно | Студент виявляє особливі творчі здібності, вміє самостійно здобувати знання, без допомоги викладача знаходить та опрацьовує необхідну інформацію, вміє використовувати набуті знання і вміння для прийняття рішень у нестандартних ситуаціях, переконливо аргументує відповіді, самостійно розкриває власні обдарування і нахили | високий (творчий) | відмінно |
| 82-89 | B | дуже добре | Студент вільно володіє вивченим обсягом матеріалу, застосовує його на практиці, вільно розв'язує вправи і задачі у стандартних ситуаціях, самостійно виправляє допущені помилки, кількість яких незначна | достатній (конструктивно-варіативний) | добре |
| 74-81 | C | добре | Студент вміє зіставляти, узагальнювати, систематизувати інформацію під керівництвом викладача; в цілому самостійно застосовувати її на практиці; контролювати власну діяльність; виправляти помилки, серед яких є суттєві, добирати аргументи для підтвердження думок | | |

Продовження таблиці

| | | | | | |
|-------|----|--|---|-----------------------------------|---------------|
| 64-73 | D | задовільно | Студент відтворює значну частину теоретичного матеріалу, виявляє знання і розуміння основних положень; з допомогою викладача може аналізувати навчальний матеріал, виправляти помилки, серед яких є значна кількість суттєвих | середній (репродуктивний) | задовільно |
| 60-63 | E | достатньо | Студент володіє навчальним матеріалом на рівні, вищому за початковий, значну частину його відтворює на репродуктивному рівні | | |
| 35-59 | FX | незадовільно з можливістю повторного складання семестрового контролю | Студент володіє матеріалом на рівні окремих фрагментів, що становлять незначну частину навчального матеріалу | низький (рецептивно-продуктивний) | не задовільно |
| 1-34 | F | незадовільно з обов'язковим повторним вивченням залікового кредиту | Студент володіє матеріалом на рівні елементарного розпізнання і відтворення окремих фактів, елементів, об'єктів | | |

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Воробйова О. М., Панфілов І. П., Савіцька М. П., Флейта Ю. В. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2015. 298 с.
2. Гершунський Б. С. Довідник з розрахунку електронних схем. Київ, 1983. 232 с.
3. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. 2-ге вид. / за ред. А. Г. Соскова. Київ: Каравела. 2009. 416 с.
4. Шкрабець Ф. П., Циценков Д. В. Збірник задач з електротехніки та основ електроніки. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. 2006. 258 с.
5. Скаржепа В. А., Луценко А. Н. Електроніка і мікросхемотехніка. Частина 1. Київ, Вища школа. 1989. 431 с.
6. Скаржепа В. А., Сенько В. М. Електроніка і мікросхемотехніка: збірник задач. Київ: Вища школа. 1989. 431 с.
7. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: підручник. Київ: Кондор. 2008. 556 с.
8. Сосков А. Г., Колонтаєвський Ю. П.. Промислова електроніка: Теорія і практикум: підручник / за ред. А. Г. Соскова. Київ: Каравела, 2013. 496 с.
9. Сєдов С. О. Оброблення сигналів на базі операційних підсилювачів. Схемотехніка. Розрахунки: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 132 с.

Додаткова

10. Пристрої аналогової електроніки: конспект лекцій / укладач В. В. Грищенко. Суми: Сумський державний університет, 2015. 272 с.
11. Воробйова О. М., Іванченко В. Д. Основи схемотехніки: підручник. 2-ге вид. Одеса: Фенікс. 2009. 388 с.

11. Руденко В. С., Ромашко В. Я., Трифонюк В. В. Промислова електроніка Київ: Либідь, 1993. 432 с.
12. Основи технічної електроніки: У 2 кн. Кн. 2. Схемотехніка: підручник / Бойко В. І. та ін. Київ: Вища школа, 2007. 510 с.
13. Лавриненко В. Ю. Довідник по напівпровідникових приборах. Київ: Техніка, 1980. 464 с.
14. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: навчальний посібник. / за ред. А. Г. Соскова. 2-ге вид. Київ: Каравела, 2004. 432 с.

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Схемотехніка» для студентів денної форми навчання зі спеціальності 171 – «Електроніка» освітньо-професійної програми «Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки» освітнього ступеня «Бакалавр»

Укладачі: к. т. н., доц. М. Г. Когдась;
старш. викл. С. В. Саньков

Відповідальний за випуск зав. кафедри КІЕ А. Л. Перекрест

Підп. до др. _____. Формат 60×84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.
Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам. № _____. Безкоштовно.

Редакційно-видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, 39600