

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
факультет

На правах рукопису

Розрахунок підсилювача на польовому транзисторі

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність:

Освітня програма:

Курсова робота бакалавра
студента 1 курсу
Іван Петренко

Київ – 2023

Польовий транзистор (ПТ) – це напівпровідниковий прилад, при роботі якого використовуються рухливі носії заряду одного типу (електрони або дірки). Це трьохелектродний пристрій, контакти якого називаються витік (В) стік (С) та затвор (З). У ПТ керування струмом стоку, який проходить у каналі n- або р-типу, здійснюється за допомогою електричного поля, яке виникає при прикладанні напруги між затвором і витоком. Характерною рисою ПТ є високий вхідний опір, тому вони керуються напругою, а не струмом. Виготовляють ПТ двох основних типів: з керуючим затвором р-n-переходу та з ізольованим (шаром діелектрика) затвором. Останні, в свою чергу, можуть бути або з вбудованим каналом або з індукованим каналом. Відповідні позначення ПТ різних типів наведено на Рис.1.

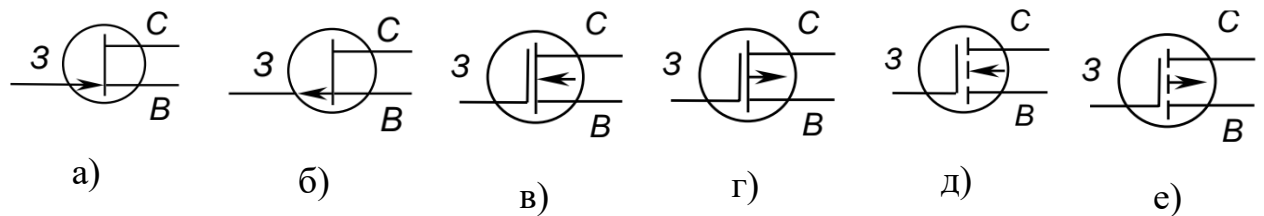


Рис.1. Умовні позначення ПТ з керуючим р-n переходом (а, б), вбудованим (в, г), або індукованим каналом (д, е) та каналом n- (а, в, д) або р-типу (б, г, е).

Основними вольт-амперними характеристиками ПТ є вихідна (або стокова), яка показує залежність струму стоку I_c від напруги стік-витік U_{cv} за фіксованого значення напруги затвор-витік U_{zv} та передатна (сток-затворна), яка відображає залежність струму стоку від напруги затвор-витік при постійній напрузі стік-витік. Типові приклади таких характеристик для ПТ з різною конструкцією та каналом n-типу представлені на рис. 2.

У підсилювальну схему ПТ загалом можна вмикати трьома різними способами: із спільним витоком, спільним стоком та спільним затвором. Найбільш поширені при практичному використанні є перші дві з них. У цій роботі буде розглянуто схему підсилювального каскаду для змінної напруги на ПТ із спільним витоком, яка за властивостями та областю використання близька до схеми із спільним емітером на біполярному транзисторі. Загальний вигляд схеми наведено на Рис.3, де VT1 – польовий транзистор із керуючим р-n переходом і каналом n-типу.

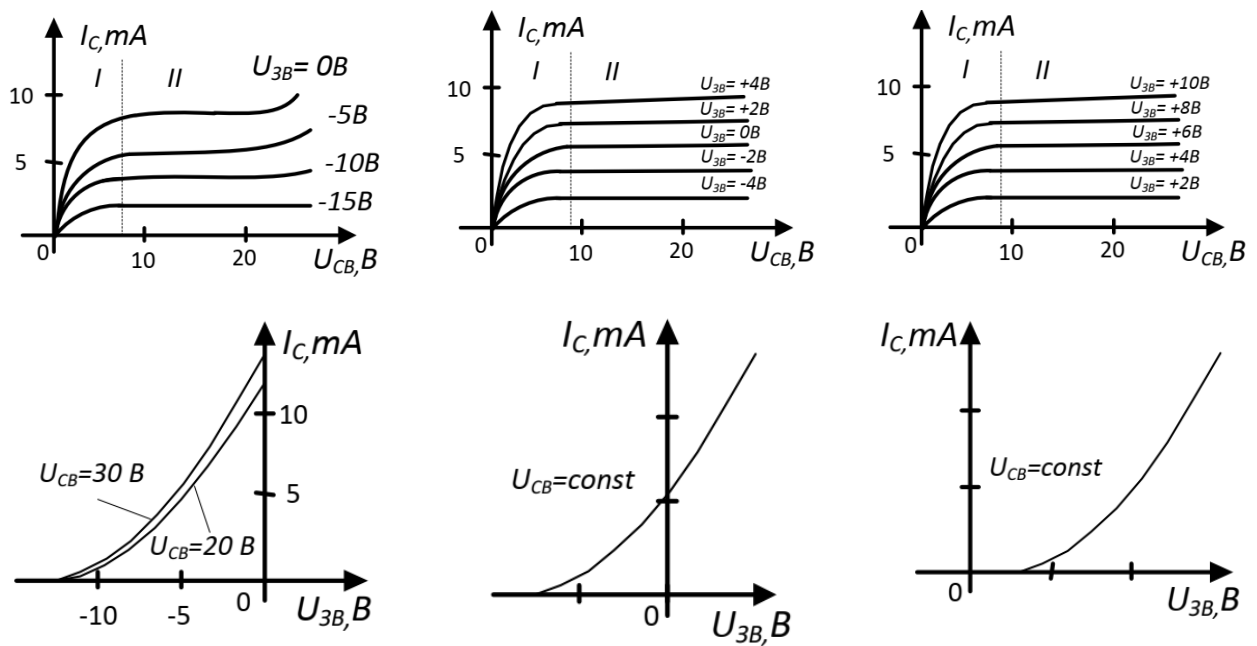


Рис.2. Типові вихідні (верхній ряд) та передатні (нижній ряд) характеристики транзисторів з р-п переходом, вбудованим та індукованим каналами (зліва направо). Наведені приклади відповідають каналам з електронною провідністю. Пунктирна лінія на верхніх графіках відповідає напрузі насичення $U_{нас}$ ПТ, цифрами I та II позначено омичну область та область активної роботи, відповідно.

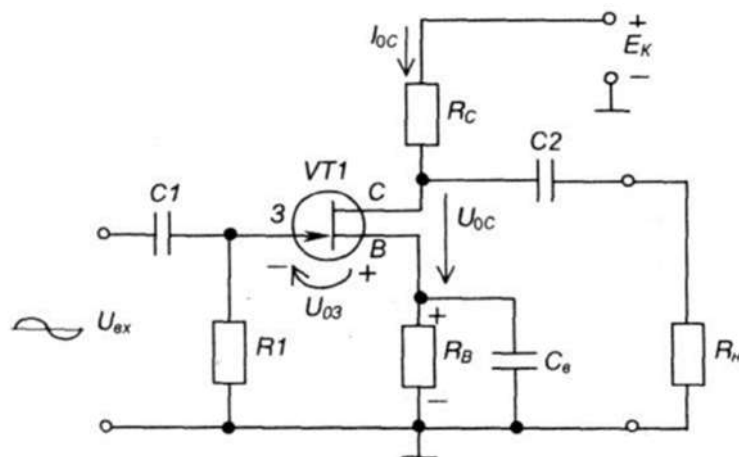


Рис.3. Схема підсилюючого каскаду на ПТ зі спільним витоком

На рисунку E_K – джерело живлення каскаду, резистор R_C – навантаження за постійним струмом. При подачі на вхід каскаду змінної напруги $U_{вх}$ між затвором та витоком змінюється струм стоку I_C , а отже і падіння напруги U_{R_C} на R_C . Оскільки вихідна напруга (напруга на стоці ПТ) $U_{вих} = U_C = E_K - U_{R_C}$, то зпостерігатиметься і її зміна. Причому при збільшенні вхідної напруги струм стоку зростає, а отже вихідна напруга зменшуватиметься, і навпаки. Тобто каскад буде

інвертувати вхідний сигнал. R_H позначає опір навантаження, як правило $R_H \gg R_C$. Крім того, опір навантаження за змінним струмом також можна вважати набагато більшим, ніж R_C і тому коефіцієнт підсилення за напругою можна розрахувати за наступною формулою:

$$K = \frac{U_{BHX}}{U_{BX}} = S \frac{R_i R_C}{R_i + R_C}, \quad (1)$$

де S – крутизна транзистора (відношення зміни струму до зміни напруги на затворі, фактично може бути визначена як нахил передатної характеристики), а R_i – його внутрішній опір (визначається за вихідною характеристикою). Таким чином, знаючи параметри транзистора, який потрібно використати для побудови підсилювача та бажану величину коефіцієнта підсилення, необхідне значення номіналу опору можна оцінити за формулою

$$R_C = \frac{K R_i}{S R_i - K}. \quad (2)$$

Початковий режим роботи ПТ забезпечується постійним струмом стоку I_{OC} і відповідною напругою на стоку U_{OC} . Струм I_{OC} встановлюється за допомогою джерела живлення E_K і початкової напруги зміщення на затворі U_{O3} , яка, в свою чергу, забезпечується I_{OC} , який протікає через резистор R_B у колі витоку

$$|U_{O3}| = I_{OC} R_B. \quad (3)$$

Резистор у колі затвора R_1 з'єднує затвор з корпусом. Так як у ПТ струм затвору практично дорівнює нулеві ($I_3 = I_{vx} \approx 0$, де I_{vx} – вхідний струм), то корпус і затвор за постійним струмом еквіпотенціальні. Таке зміщення називають автоматичним, воно дозволяє стабілізувати режим роботи схеми.

Простим шляхом вибору величини I_{OC} є побудова лінії навантаження на стоковій характеристиці при певному значенні E_K . Величина E_K залежить від наявних джерел живлення і має задовольняти наступним умовам: з одного боку вона не повинна перевищувати граничних значень сток-затворної та сток-витокової напруг, а з іншого боку, для відсутності спотворень у вихідному сигналі,

$$E_k \geq 2U_{BHX}^M + U_H + I_{OC}(R_C + R_B), \quad (4)$$

де U_{BHX}^M - максимальна амплітуда вихідного сигналу, U_H – спад напруги на насиченому транзисторі. Лінія навантаження – це пряма, яка починається у точці $I_C = 0, U_{CB} = E_k$ і, як правило, проходить через вигин стокової характеристики, яка відповідає $U_3 = 0$ або трохи нижче – див. Рис. 4. Точний нахил лінії навантаження визначається сумою R_B та R_C : $U_{CB} = E_k - I_C(R_C + R_B)$. Величина I_{OC} при цьому визначається (як видно з рисунку) значенням U_{O3} , вибір якої має бути таким, щоб розмах напруги на затворі (який визначається максимальним очікуваним сигналом на вході) не виходив за межі від напруги відтинання $U_{від}$ (значення, яке відповідає нульовому струму на передатній характеристиці) до нуля. Зауважимо, що у разі граничного розмаху, коли $U_{O3} = 0,5 U_{від}$, нелінійні спотворення можуть бути достатньо значними. У випадку малих вхідних сигналів для забезпечення більшої крутості доцільно працювати в режимі, при якому $U_{O3} = (0,1-0,15) U_{від}$. При цьому робоча частина лінії навантаження повинна залишатися в області насичення.

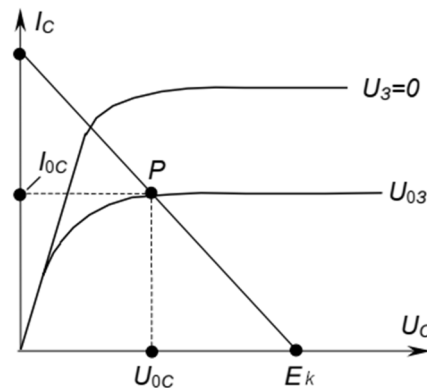


Рис.4. Стокова характеристика ПТ з можливою лінією навантаження

Виходячи зі значень U_{O3} та I_{OC} розраховується значення R_B :

$$R_B = \frac{|U_{O3}|}{I_{OC}}. \quad (5)$$

R_1 ввімкнений паралельно вхідному опору підсилювача і тому повинен мати достатньо велике значення (від десятків кілоом до десятків мегаом). Іншим критерієм для оцінки величини цього опору є врахування реальної величини

струму затвору, який точно дорівнює нулеві лише в ідеалізованому випадку. При такому підході можна вибирати $R_1 = \frac{|U_{O3}|}{(10^3 \div 10^4)I_3}$.

Резистор R_B використовується також для температурної стабілізації режиму роботи підсилювача за постійним струмом. Наприклад, при збільшенні температури ПТ струм стоку зростатиме, а отже зростатиме спад напруги на R_C , а отже вихідна напруга зменшуватиметься. Для того, щоб при проходженні змінного сигналу через каскад не змінювався потенціал затвору внаслідок падіння напруги на R_B , його шунтують за допомогою конденсатора C_B . Таким чином, C_B пригнічує негативний зворотний зв'язок для змінного сигналу, його величина може бути вибрана з умови

$$C_B = \frac{10 \div 20}{2\pi f_{\min} R_B}, \quad (6)$$

де f_{\min} - найнижча частота вхідного сигналу, коефіцієнт у чисельнику відображає умову, що реактивний опір конденсатора має бути набагато меншим, ніж номінал резистора.

C_1 та C_2 – роздільні конденсатори. Наприклад, C_1 використовується для розв'язки підсилювального каскаду по постійному струму від джерела вхідного сигналу і його ємність може бути розрахована за формулою

$$C_1 = \frac{10 \div 20}{2\pi f_{\min} R_1}. \quad (7)$$

Функція конденсатора C_2 зводиться до пропускання змінної складової вихідної напруги і затримання постійної,

$$C_2 = \frac{10 \div 20}{2\pi f_{\min} R_H}. \quad (7)$$

Для прикладу розрахуємо параметри підсилювача, який повинен забезпечувати коефіцієнт підсилення по напрузі $K = 5$ для сигналу, амплітуда якого не перевищує 40 мВ, а частотний діапазон складає $(4 \div 40)$ кГц. Передбачається, що

опір навантаження $R_H = 100 \text{ кОм}$. При цьому використаємо ПТ КП302Б, який цілком може працювати у заданому діапазоні, та джерело живлення $E_k = 15 \text{ В}$. Сімейство вихідних характеристик цього транзистора приведено на Рис. 5. Проведемо лінію навантаження так, як показано на рисунку та виберемо початкову напругу на затворі $U_{0з} = -1,5 \text{ В}$. Як видно з графіка, при цьому струм стоку має бути $I_{0с} = 10,5 \text{ мА}$. Таким чином, використовуючи рівняння (5), можемо отримати

$$R_B = \frac{1,5}{10,5 \cdot 10^{-3}} \approx 143 \text{ (Ом)}.$$

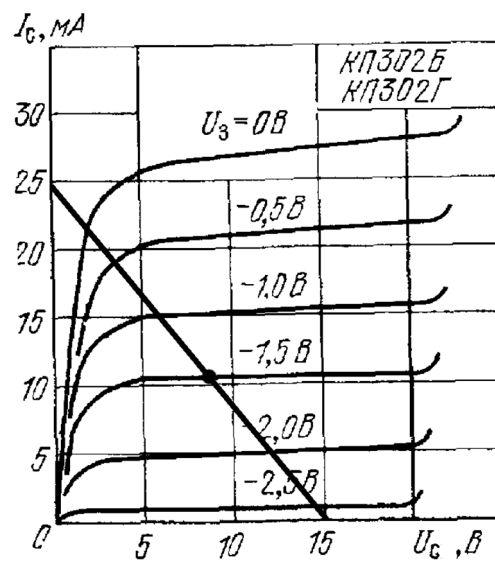


Рис.5. Типова вихідна характеристика транзистора КП302Б з вибраними лінією навантаження та початковою точкою

Відповідно до довідникових даних, струм затвору для КП302Б при напрузі на $U_z < 10 \text{ В}$ та температурі, що не перевищує 25°C має бути меншим 10 нА . Це дозволяє оцінити необхідну величину опору R_1 :

$$R_1 = \frac{1,5}{10^3 \cdot 10^{-8}} = 150 \cdot 10^3 \text{ (Ом)}.$$

Ця величина фактично визначатиме вхідний опір підсилювача. Як видно з Рис. 5, внутрішній опір транзистора близько 50 кОм (зміні напруги стоку $\Delta U_c = 15 \text{ В}$ відповідає зміна струму стоку $\Delta I_c = 0,3 \text{ мА}$). У довідникових даних сказано, що крутизна характеристики транзистора при $U_c \approx 7 \text{ В}$ та поблизу кімнатних температур не менша 7 мА/В . Таким чином, використовуючи вираз (2), можна визначити R_c :

$$R_c = \frac{5 \cdot 5 \cdot 10^4}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^4 - 5} \approx 735 \text{ (Ом)}.$$

Враховуючи, що напруга насичення для КП302Б складає 5 В,
 $U_{ВНХ}^M = 40 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 5 = 0,2 \text{ В}$ отримуємо

$$2 \cdot 0,2 + 5 + 10,5 \cdot 10^{-3} (735 + 143) \approx 14,6 \text{ (В)}.$$

Максимально допустимі напруги між стоком да витоком та затвором та стоком для вибраного транзистора однакові і дорівнюють 20 В. Таким чином, вибране джерело $E_k = 15 \text{ В}$ цілком може бути використане для побудови підсилювача. Для розрахунку ємностей конденсаторів використаємо вирази (5)-(7) з врахуванням того, що $f_{\min} = 4000 \text{ Гц}$:

$$C_B = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 4000 \cdot 143} \approx 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)},$$

$$C_1 = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 4000 \cdot 1,5 \cdot 10^5} \approx 2,7 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)}, \quad C_2 = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 4000 \cdot 10^5} \approx 4,0 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)}.$$

Враховуючи стандартні номінали резисторів та конденсаторів, які випускаються промисловістю, можна вибрати наступні значення елементів схеми: $R_B = 150 \text{ Ом}$, $R_1 = 150 \text{ кОм}$, $R_c = 750 \text{ Ом}$, $C_B = 3,3 \text{ мкФ}$, $C_1 = 3,3 \text{ нФ}$, $C_2 = 4,7 \text{ нФ}$. Остаточна схема підсилювача може виглядати так, як показано на Рис. 6.

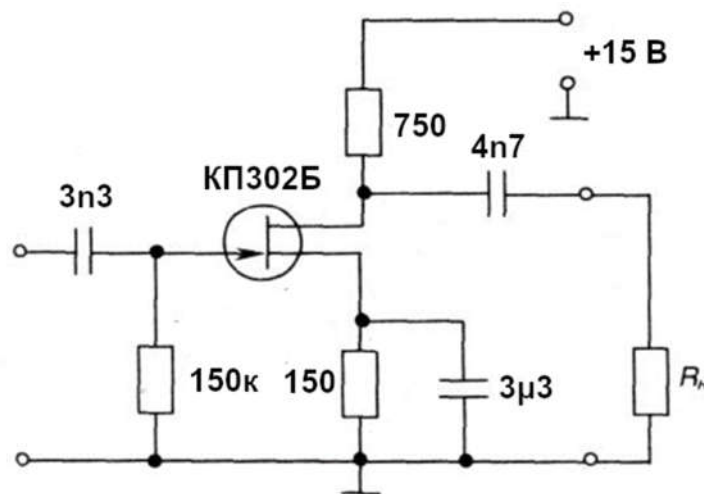


Рис.6. Схема підсилюючого каскаду з використанням КП302Б

Список використаних джерел

- [1] Електроніка та мікросхемотехніка: підручник / О.М. Воробйова, І.П. Панфілов, М.П. Савицька, Ю.В. Флейта. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2015. – 298 с.
- [2] Аналогова схемотехніка / Л. П. Медяний – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 177 с.
- [3] Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид. / За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2009. – 416 с.
- [4] Пристрої аналогової електроніки : конспект лекцій / укладач В. В. Гриненко. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 272 с.
- [5] Конспект лекцій з дисципліни «Аналогові електронні пристрої» освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», укл. Марченко С. В., Кам'янське: ДДТУ, 2019 р. – 118 с.