

Лекція 6. Розрахунок параметрів двохкаскадного підсилювача низької частоти

Початкові дані для розрахунку двохкаскадного підсилювача низької частоти приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Початкові дані для розрахунку двохкаскадного підсилювача низької частоти

Номер варіанта	R_H , кОм	C_H , пФ	f_H , Гц	f_B , Гц	K_U	$U_{вих}$, В	$R_{вх}$, кОм	T_B , °C
N	0,45	200	29	$8 \cdot 10^4$	44	4	1,0	35

Активний елемент (транзистор) спільно зі всіма допоміжними елементами, які забезпечують його нормальну роботу в лінійному режимі, утворюють пристрій, який зветься підсилювальним каскадом. Коли підсилення, яке створюється таким пристроєм, виявляється недостатнім, застосовують послідовне включення декількох каскадів (рис. 6.1).

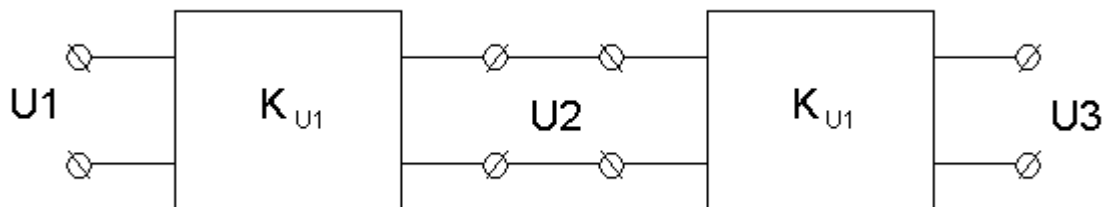


Рисунок 6.1 – Послідовне включення декількох каскадів підсилення

Результуюче підсилення напруги такого підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення окремих каскадів які входять в нього, тобто

$$K_U = \frac{U_3}{U_1} = \frac{U_3}{U_2} \frac{U_2}{U_1} = K_{U2} K_{U1}$$

Реальний коефіцієнт посилення по напрузі K_U завжди менший за коефіцієнт посилення ненавантаженого підсилювача ($R_H \gg R_K$). Ця різниця тим помітніше, чим більше вихідний опір і менше опір навантаження R_H .

6.1 Розрахунок структурної схеми підсилювача

6.1.2 Визначення числа каскадів

Для багатокаскадного підсилювача (рис. 6.2) коефіцієнт підсилення визначається за формулою:

$$K = U_{вих.} / U_{вх} = \sum_{i=1}^n K_i \quad (6.1)$$

де K - коефіцієнт підсилення підсилювача, дБ; K_i - коефіцієнт посилення i -го каскаду, дБ, $i = 1, \dots, n$; n - кількість каскадів підсилювача.

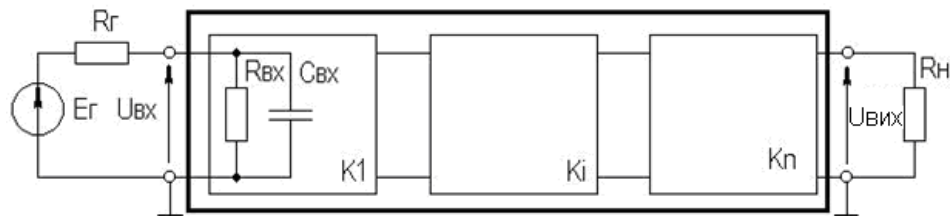


Рисунок 6.2 – Схема електрична структурна багатокаскадного підсилювача

З урахуванням коефіцієнта передачі вхідного кола коефіцієнт підсилення визначається як:

$$K(\text{дБ}) = 20 \lg \left(\frac{R_{вх} + R_{г}}{R_{вх}} \cdot \frac{U_{вих}}{E_2} \right),$$

де E_2 - е.р.с. джерела сигналу; R_2 - внутрішній опір джерела сигналу; $R_{вх}$ - вхідний опір підсилювача.

Для низькочастотних підсилювальних пристроїв орієнтовно кількість каскадів можна визначити, вважаючи в (6.1) усі каскади однаковими з $K_i \approx 20$ дБ, таким чином:

$$n = \frac{K(\text{дБ})}{20}$$

Еман 1. Визначаємо необхідну (мінімальну) кількість каскадів підсилювача низької частоти. Для цього коефіцієнт посилення заданий у вихідних даних переводимо в децибелі і визначаємо кількість каскадів підсилювача

$$K_{dB} = 20 \lg K = 20 \lg 44 = 33 \text{ dB}$$

$$n = \frac{K_{dB}}{20} = \frac{33 \text{ dB}}{20} = 1,65$$

Приймається кількість каскадів рівна двом.

6.1.2 Розподіл спотворень по каскадах

Для багатокаскадних підсилювальних пристроїв результуючий коефіцієнт частотних спотворень визначається наступним чином:

$$M = \sum_{i=1}^{n+1} M_k \quad (6.2)$$

де M - результуючий коефіцієнт частотних спотворень в області низьких або високих частот, дБ; M_k - коефіцієнт частотних спотворень k -го каскаду, дБ.

Підсумовування у виразі (6.2) виконується $(n+1)$ разів через необхідність врахування впливу вхідного кола, утвореного R_e , R_{ex} і C_{ex} (рис. 6.2).

Попередньо розподілити спотворення можна рівномірно, при цьому

$$M_k = \frac{M}{(n+1)}$$

У подальшому, виходячи з результатів проміжних розрахунків, можливий перерозподіл спотворень між каскадами.

Частотні спотворення підсилювальних пристроїв в області нижніх частот (НЧ) визначаються наступним співвідношенням:

$$M_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n M_k \quad (6.3)$$

де M_{Σ} - результуючий коефіцієнт частотних спотворень в області НЧ, дБ; M_k - спотворення, які припадають на k -й елемент, дБ; n - кількість елементів, які вносять спотворення на НЧ.

Кількість елементів, які вносять спотворення на НЧ (зазвичай це конденсатори в колах емітерів і розділові міжкаскадні конденсатори), стає відомим після остаточного вибору топології електричної схеми підсилювача, тому розподіл спотворень в області НЧ проводять на етапі розрахунку номіна-

лів цих елементів. З (6.3) випливає, що при рівномірному розподілі низькочастотних спотворень, їх частка (в децибелах) на кожен з n елементів визначиться зі співвідношення:

$$M_k = \frac{M_\Sigma}{n}$$

На практиці, з метою вирівнювання номіналів конденсаторів, на розділові конденсатори розподіляють більше спотворень, ніж на блокувальні конденсатори.

У зв'язку з можливим розкидом номіналів елементів і параметрів транзисторів необхідно забезпечити запас за основними характеристиками підсилювальних пристроїв в $1,2 \dots 1,5$ рази.

Еман 2. Розподіляємо величину частотних спотворень (для усіх варіантів $M_\Sigma = 3\text{dB}$) між каскадами (M_k) вважаючи, що величина спотворень розподіляється між каскадами рівномірно.

$$M_k = \frac{M_\Sigma}{n} = \frac{3\text{dB}}{2} = 1,5\text{ dB},$$

де $M_\Sigma = 3\text{dB}$.

6.2 Розрахунок параметрів кінцевого каскаду

Еман 3. Схема електрична розрахункова кінцевого каскаду наведена на рисунку 6.3.

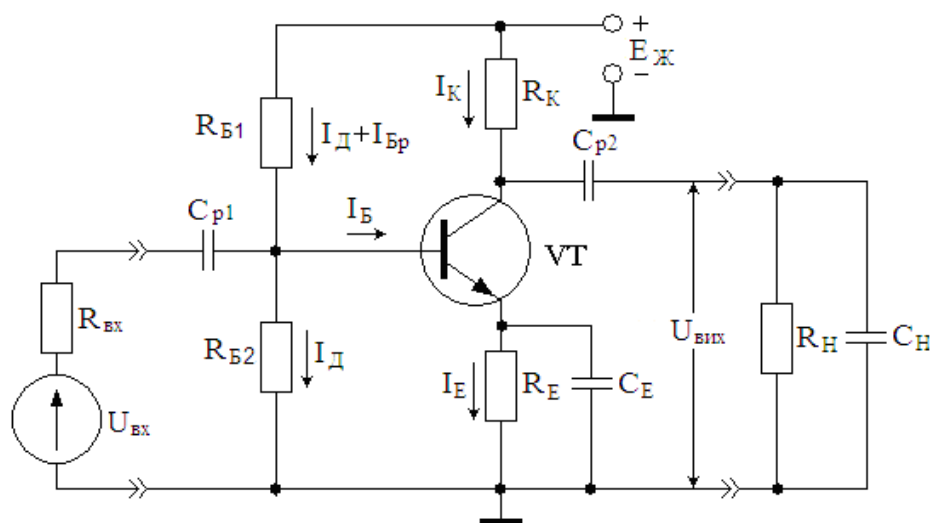


Рисунок 6.3 - Схема електрична розрахункова кінцевого каскаду

Задаємося орієнтовною величиною напруги насичення транзистора:

$$U_{KE\text{ нас}} = IB$$

і розраховуємо необхідну величину напруги джерела живлення для підсилувального пристрою

$$E_{ж} \approx 1,5 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} U_{\text{нас}} \approx 1,5 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 4 \approx 16,8 \text{ (В)}$$

Напруга джерела живлення $E_{жс}$ має відповідати рекомендованому ряду:

$$E_{жс} = (5; 6; 6,3; 9; 10; 12; 12,6; 15; 20; 24; 27; 30; 36) \text{ В.}$$

Вибираємо величину напруги джерела живлення яка дорівнює 20В.

Задаємося опором у колі колектора:

$$R_K = (2 \dots 3) R_H = 2 \cdot 0,45 = 0,9 \text{ (кОм)}.$$

Оберемо опір резистора R_K , використовуючи стандартизовані ряди номінальних значень (табл. 6.2)

Таблиця 6.2 - Стандартизовані ряди номінальних значень для резисторів і конденсаторів

Індекс ряду	Допустиме відхилення опору від номінального значення. %	Числові коефіцієнти, множені на 10^n (n - ціле число від 0 до 7)					
E6	± 20	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
E12	± 10	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7 5,6 6,2 6,8	
		1,2	1,8	2,7	3,9		
E24	± 5	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
		1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5
		1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2
		1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1

Приймаємо опір резистора в колі колектора кінцевого каскаду рівним 910 Ом. В якості резистора R_K застосуємо резистор С2-26-025Вт-910 Ом $\pm 10\%$.

Задаємося падінням напруги на R_E :

$$U_{RE} = 0,25 \cdot E_{жс} = 0,25 \cdot 20 = 5 \text{ (В)}.$$

Визначаємо еквівалентний опір навантаження:

$$R_{екв} = \frac{R_H R_K}{R_H + R_K} = \frac{450 \cdot 910}{450 + 910} = 301 \text{ (Ом)}$$

Визначаємо необхідну значення струму спокою колектора в робочій точці (плюс 10%-й запас з урахуванням можливої його термічної нестабільності):

$$I_{Кр} \geq \frac{1,1U_{вих}}{R_{екв}} = \frac{1,1 \cdot 4}{301} = 15 \text{ (мА)}.$$

Напруга колектор-емітер в робочій точці визначається за формулою:

$$U_{Кр} \geq U_{вих} + U_H \geq 4 + 1 \geq 5 \text{ (В)},$$

де U_H - напруга насичення транзистора.

Розраховуємо величину потужності розсіювання на колекторі транзистора в точці спокою

$$P_K = U_{Кр} \cdot I_{Кр} = 5 \cdot 0,015 \text{ мА} = 0,075 \text{ мВт}$$

Постійна потужність, яка розсіюється на колекторі, не повинна перевищувати граничного значення, взятого з довідкових даних на транзистор.

Розраховуємо розмах імпульсу струму в навантаженні

$$I_{H \max} = \frac{2,82 \cdot U_{вих}}{R_H} = \frac{2,82 \cdot 4}{450} = 25 \text{ (мА)}$$

6.2.1 Вибір транзистора для схеми кінцевого каскаду

Вибір транзистора для кінцевого каскаду здійснюється з урахуванням таких граничних параметрів:

- гранично допустимого струму колектора (при узгодженні на виході)

$$I_{К\max} \geq (1,5 \dots 2) U_{H\max}$$

- гранично допустимої напруги колектор-емітер:

$$U_{КЕ\max} \geq (2 \dots 3) E_{жив}$$

- гранично допустимої потужності розсіювання на колекторі:

$$P_{К\max} \geq (2 \dots 3) P_K$$

- граничної частоти підсилення транзистора по струму в схемі з ЗЕ

$$f_{cp} \geq (10 \dots 100) f_B$$

Еман 4. Знаючи напругу живлення підсилювача і максимальний струм, який протікає через навантаження, виберемо транзистори для вихідного каскаду за наступними умовами:

$$I_{K \max \text{ доп}} \geq 1,5 \times I_{H \max} \geq 1,5 \times 25 \text{ мА} \geq 37,5 \text{ мА}$$

$$U_{KE \max} \geq 2 \times E_{\text{жив}} \geq 2 \times 20 \text{ В} \geq 40 \text{ В}$$

$$P_{K \max} \geq 2 \times P_K \geq 2 \times 75 \text{ мВт} \geq 150 \text{ мВт}$$

$$f_{\text{зр}} \geq f_{\text{с}} \geq 8 \times 10^4 \text{ Гц} \geq 80 \text{ кГц}$$

Для побудови кінцевого каскаду підсилювача низької частоти найбільш підходить транзистор КТ3102Б. Приведемо таблицю основних параметрів обраного транзистора (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Основні параметри транзистора КТ3102Б

$U_{KE \max}$ - максимально допустима напруга колектор-емітер, В	50
$I_{K \max}$ - максимально допустимий постійний струм колектора, мА	100
I_{KE} – струм колектор-емітер, мА	2
$P_{K \max}$ - постійна потужність колектора, Вт не більш	0,25
h_{21E} - статичний коефіцієнт передачі струму в схемі із загальним емітером КТ 3102Б,	200÷500
I_{KB0} - зворотний струм колектора, мкА	0,05
τ_{33} - постійна часу кола внутрішнього зворотного зв'язку в транзисторі на високих частотах, нс	100
C_K – постійна ємності кола колектора, пФ	≤6
$T_{K \max}$ - максимальна температура переходу, °С	125
$f_{\text{зр}3E}$ - гранична частота коефіцієнта передачі струму транзистора для схеми із загальним емітером, МГц.....	≥150

Визначаємо параметри вибраного транзистору на основі довідкових даних таким чином:

- опір бази транзистора

$$r_B = \frac{\tau_{33}}{C_K} = \frac{100\text{нс}}{6\text{нФ}} = 16\text{ Ом}$$

де τ_{33} - постійна часу кола внутрішнього зворотного зв'язку в транзисторі на високих частотах;

- опір емітера транзистора

$$r_E = 25,6 / I_{KE} = 25,6 / 2\text{мА} = 53\text{ Ом}$$

при I_{KE} міліамперах r_E отримується в омах;

- динамічну ємність емітерного переходу транзистора

$$C_{E\partial} = 1 / (2\pi f_{zp} r_E) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{10} \cdot 53) = 7,5\text{ (нФ)}$$

де f_{zp} - гранична частота підсилення по струму транзистора з ЗЕ,

$$f_{zp} = |h_{21E}| \cdot f_{zp3E} = 200 \cdot 200\text{ мГц} = 4 \cdot 10^{10}\text{ Гц}$$

- коефіцієнт передачі струму транзистора в схемі з ЗЕ:

$$\alpha = h_{21E} / (1 + h_{21E}) = 350 / 1 + 350 = 0,997,$$

де h_{21E} - низькочастотне значення коефіцієнта передачі струму транзистора з ЗЕ.

За параметрами еквівалентної схеми біполярного транзистора визначимо його низькочастотне значення крутизни S_0 :

$$S_0 = \frac{h_{21E}}{(1 + h_{21E})(r_B + r_E + \Delta r)} = \frac{350}{(1 + 350)(16 + 53 + 1)} = 14\text{ мА/В},$$

Знаходимо величину вхідної провідності транзистора:

$$Y_{11E} = \frac{(1 - \alpha)}{(r_B + r_E + \Delta r)} = \frac{(1 - 0,997)}{(16 + 53 + 1)} = 4,2 \cdot 10^{-5}\text{ См.}$$

Проводимо побудову прямої, навантаження підсилювального каскаду. Для чого визначаємо дві характерні її точки. При закритому транзисторі характерна точка прямої, навантаження, має параметри $I_K = 0$ і $U_K = E_{жс}$. При відкритому транзисторі характерна точка прямої, навантаження, має параметри $U_K = U_H$ і

$$I_K = \frac{E_{жс}}{R_K} = \frac{20}{4,8} = 22\text{ мА.}$$

Вольт-амперні характеристики транзистора КТ3102Б приведені на рисунку 6.4, згідно яких параметри робочої точки наступні:

- напруга колектора $U_{Kp} = 12\text{В}$,
- струм колектора $I_{Kp} = 10\text{мА}$,
- струм бази $I_{Bp} = 30\text{мкА}$,
- напруга база-емітер $U_{BE} = 0,52\text{В}$.

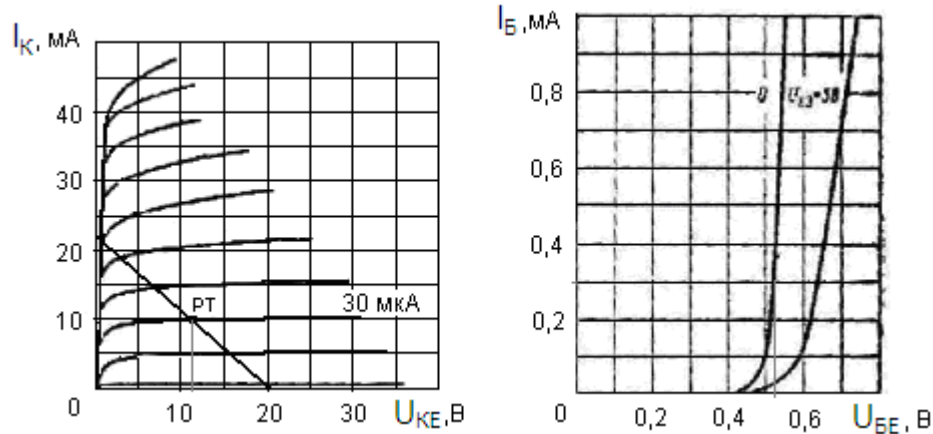


Рисунок 6.4 – Вольт-амперні характеристики транзистора КТ3102Б

Розраховуємо потужність яка розсіюється на колекторі транзистора в робочій точці

$$P_K = U_{Kp} \cdot I_{Kp} = 10\text{В} \cdot 12\text{мА} = 120 \text{ мВт}$$

Потужність яка розсіюється на колекторі транзистора не перевищує максимально-допустиму для цього транзистора.

Розрахуємо потужність яка розсіюється на резисторі в колекторному колі (R_K) в робочій точці

$$P_{RK} = I_{Kp}^2 \cdot R_K = (12 \text{ мА})^2 \cdot 910 \text{ Ом} = (0,012)^2 \cdot 910 = 131 \text{ мВт}$$

Визначаємо величину резистора (R_E) в колі емітера транзистора

$$R_E = \frac{0,2 E_{жс}}{I_{Kp}} = \frac{0,2 \cdot 20\text{В}}{12\text{мА}} = \frac{0,2 \cdot 20}{12 \cdot 10^{-3}} = 333 \text{ Ом.}$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора R_E

$$P_{RE} = I_{Kp}^2 \cdot R_E = (0,012)^2 \cdot 333 = 48 \text{ мВт}$$

В якості резистора R_E застосуємо резистор С2-23-0,125-330 Ом \pm 10%.

Визначимо величину опору резистора в колі емітера з урахуванням, що каскад буде працювати в заданому інтервалі температур і параметри робочої точки (зокрема I_{Kp}) не будуть змінюватися більш ніж на 10%.

$$R_E \geq \frac{\gamma \Delta T}{0,1 I_{K0}} = \frac{2 \text{ мВ} \cdot 35^\circ \text{ C}}{0,1 \cdot 12 \text{ мА}} = 58 \text{ Ом},$$

де $\gamma = 2 \text{ мВ}/^\circ \text{ C}$, ΔT – інтервал робочих температур (35° C).

З даного розрахунку можна зробити висновок, що номінал резистора в колі емітера обраний правильно і каскад буде нормально функціонувати в заданому інтервалі температур.

Розрахуємо величину резистора R_{B1} дільника в колі для зсуву робочої точки транзистора:

$$R_{B1} = \frac{E_{\text{жс}} - (I_{Kp} \cdot R_E + U_{BE})}{3I_B} = \frac{20 \text{ В} - (0,01 \text{ А} \cdot 330 \text{ Ом} + 0,52 \text{ В})}{3 \cdot 0,00003 \text{ А}} = 180 \text{ кОм}$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора R_{B1}

$$P_{RB1} = 3I_B^2 \cdot R_{B1} = 3 \cdot (0,00003)^2 \text{ А} \cdot 180 \text{ кОм} = 0,486 \text{ мВт}$$

В якості резистора R_{B1} застосуємо резистор С2-23-0,125-180 кОм \pm 5%.

Розрахуємо величину резистора (R_{B2}) дільника в колі для зсуву робочої точки транзистора:

$$R_{B2} = \frac{I_{Kp} \cdot R_E + U_{BE}}{3I_B} = \frac{0,01 \text{ А} \cdot 330 \text{ Ом} + 0,52 \text{ В}}{3 \cdot 0,00003 \text{ А}} = 42,4 \text{ кОм}$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора R_{B2} :

$$P_{RB2} = 3I_B^2 \cdot R_{B2} = 3 \cdot (0,00003)^2 \text{ А} \cdot 42,4 \text{ кОм} = 113 \text{ мкВт}$$

В якості резистора R_{B2} застосуємо резистор С2-23-0,125-43 кОм \pm 10%.

Розподілимо величину частотних спотворень які приходяться на кінцевий каскад на окремі його елементи (розділові і блокувальні конденсатори) припускаючи що дані спотворення розподіляються порівну між вказаними колами.

$$M_{np} = M_{нб} = \frac{M_k}{2} = \frac{1,5 \text{ dB}}{2} = 0,75 \text{ dB} = 1,09$$

Визначимо необхідну значення постійної часу для розділових і блокувальних кіл підсилювача з наступних співвідношень:

$$\tau_n = \frac{1}{2\pi f_n \sqrt{M_{np}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 29 \sqrt{1,09^2 - 1}} = 0,012 \text{ с},$$

де M_{np} - частка частотних спотворень в області НЧ, розподілених на розділові й блокувальні кола.

Визначимо величину ємності конденсатора блокування (C_E) в колі емітера транзистора:

$$C_E \geq \tau_n \cdot S_0 \geq 0,012 \cdot 0,014 = 168 \text{ мкФ}$$

В якості конденсатора C_E застосуємо конденсатор К50-33-6,3В-160мкФ (обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом з таблиці 4.2).

Визначимо величину ємності розділового конденсатора (C_{p2}) в колі навантаження:

$$C_{p2} \geq \frac{\tau_n}{R_K + R_H} \geq \frac{0,012c}{9100\text{М} + 4500\text{М}} \geq 8,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \geq 8,8 \text{ мкФ}$$

В якості конденсатор C_{p2} застосуємо конденсатор К50-33-25В-9,1 мкФ (обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом з таблиці 6.2).

Розрахуємо вхідний опір каскаду по змінному струму:

$$R_{ex} = R_{B1} / (1 + Y_{11E} \cdot R_{B1}) = 43000 / (1 + 4,2 \cdot 10^{-5} \cdot 43000) = 16 \text{ кОм}$$

Розрахуємо величину коефіцієнта підсилення каскаду:

$$K_U = S_0 \cdot R_{ex} = 0,014 \cdot 301 = 4,2 = 20 \lg 4,2 = 13 \text{ dB}$$

Розрахуємо величину вхідної напруги підсилювального каскаду

$$U_{ex} = U_{vux} / K_U = 4\text{В} / 4,2 = 0,952 \text{ В}$$

Для підтвердження правильності виконаних розрахунків проводимо моделювання і визначення основних параметрів розрахованого каскаду в середовищі Electronics Workbench (рис. 6.5). Транзистор КТ3102Б замінено аналогом BC107.

Аналіз характеристик: згідно приведенного рисунка коефіцієнт підсилення каскаду складає 4,3 рази, нижня межа смуги пропускання рівна 29 Гц, а верхня межа смуги пропускання складає 8 МГц.

Амплітудно-частотна характеристика розрахованого каскаду приведена на рисунку 6.6. Схема електрична принципова моделі кінцевого каскаду приведена на рисунку 4.7.

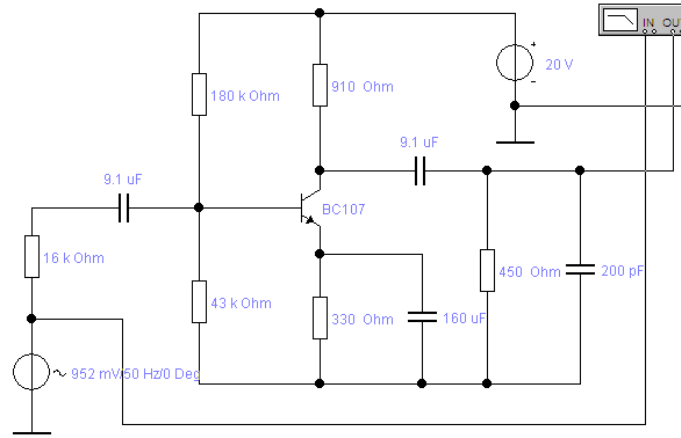


Рисунок 6.5 – Моделювання і визначення основних параметрів розрахованого кінцевого каскаду в середовищі Electronics Workbench

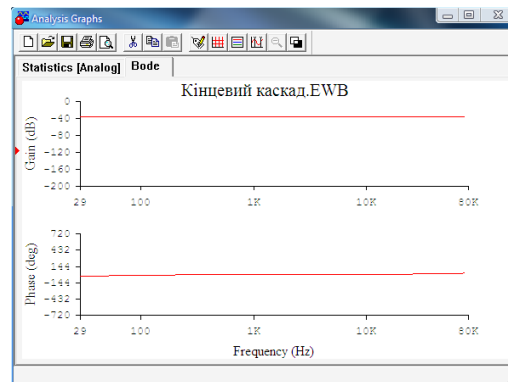
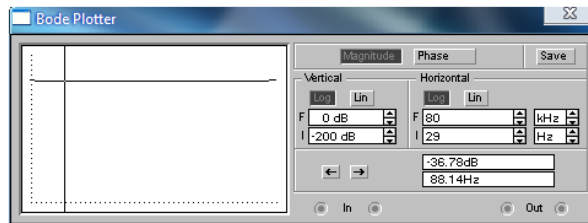


Рисунок 6.6 - Амплітудно-частотна характеристика кінцевого каскаду

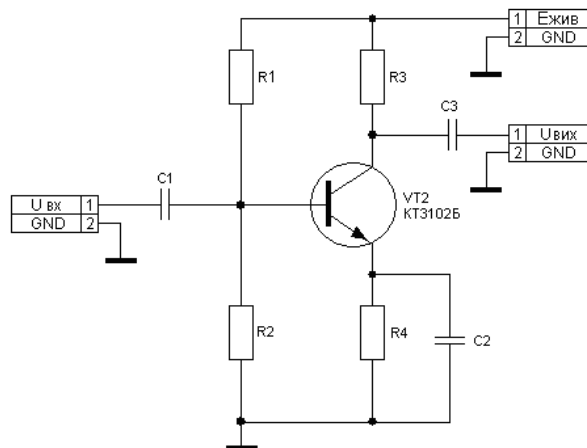


Рисунок 6.7 - Схема електрична принципова моделі кінцевого каскаду

6.3 Розрахунок параметрів каскаду попереднього підсилення

Еман 5. Аналогічно попереднім розрахункам розраховуємо необхідну величину напруги джерела живлення для підсилювального каскаду (рис. 6.8).

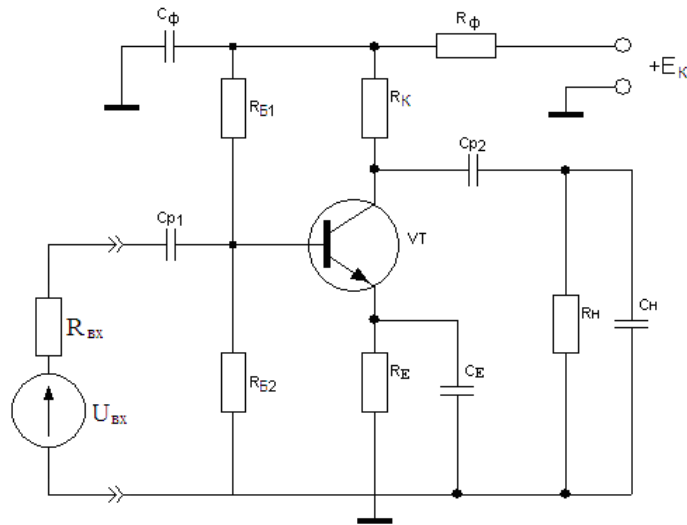


Рисунок 6.8 – Схема електрична принципова каскаду попереднього посилення

$$E_K \approx 1,5 \cdot 2\sqrt{2}U_{вих} \approx 1,5 \cdot 2\sqrt{2} \cdot 0,952 \approx 3,7 \text{ (В)}$$

Вибираємо величину напруги джерела живлення рівної 5 вольт.

Опір у колі колектора:

$$R_K = 0,5R_{вх} = 0,5 \cdot 16 \text{ кОм} = 3 \text{ кОм.}$$

Приймаються опір резистора в колі колектора каскаду попереднього підсилення рівним 3 кОм. В якості резистора R_K застосуємо резистор С2-26-0,125Вт-3 кОм \pm 10%

Падіння напруги на R_E :

$$U_{RE} = 0,25E_K = 0,25 \cdot 5\text{В} = 1,25\text{В}$$

Визначаємо еквівалентний опір навантаження:

$$R_{екв} = \frac{R_H R_K}{R_H + R_K} = \frac{16000 \cdot 3000}{16000 + 3000} = 2,5 \text{ (кОм)}$$

Визначаємо необхідну значення струму спокою колектора в робочій точці:

$$I_{Кр} \geq \frac{1,1U_{вих}}{R_{екв}} = \frac{1,1 \cdot 0,952}{2500} = 418 \text{ (мкА).}$$

Напруга колектор-емітер в робочій точці визначається за формулою:

$$U_{Kp} \geq U_{вих} + U_{нас} \geq 0,952 + 1 \geq 1,952 \text{ (В)},$$

де $U_{нас}$ - напруга насичення транзистора. Приймається значення напруги U_{Kp} яке дорівнює 2,5В.

Розраховуємо величину потужності яка розсіюється на колекторі транзистора в точці спокою

$$P_K = U_{Kp} \cdot I_{Kp} = 2,5В \cdot 418\text{мкА} = 1\text{мВт}$$

Постійна потужність, що розсіюється на колекторі, не повинна перевищувати граничного значення, взятого з довідкових даних на транзистор.

Розраховуємо розмах імпульсу струму в навантаженні

$$I_{H\max} = \frac{2,82 \cdot U_{вих}}{R_{ex}} = \frac{2,82 \cdot 0,952}{16000} = 167 \text{ (мкА)}$$

Знаючи напругу живлення підсилювача і максимальний струм, який протікає через навантаження, виберемо транзистор для попереднього каскаду за наступними умовами:

$$I_{K\max\text{ доп}} \geq 1,5 \times I_{H\max} \geq 1,5 \times 167 \text{ мкА} \geq 250 \text{ мкА}$$

$$U_{KE\max} \geq 2 \times E_K \geq 2 \times 5В \geq 10 \text{ В}$$

$$P_{K\max} \geq 2 \times P_K \geq 2 \times 1 \text{ мВт} \geq 2 \text{ мВт}$$

$$f_{cp} \geq f_{\phi} \geq 8 \times 10^4 \text{ Гц} \geq 80 \text{ кГц}$$

Для побудови каскаду попереднього підсилення підсилювача низької частоти найбільш підходить за параметрами (табл. 6.4) транзистор КТ503Б,

Визначаємо параметри вибраного транзистору на основі довідкових даних таким чином:

- опір бази транзистора

$$r_B = \frac{\tau_{зз}}{C_K} = \frac{20\text{нс}}{20\text{нФ}} = 1\text{Ом}$$

де $\tau_{зз}$ - постійна часу кола внутрішнього зворотного зв'язку в транзисторі на високих частотах (20 нс);

Таблиця 6.4 - Основні параметри транзистора КТ503Б

U_{KEmax} - максимально допустима напруга колектор-емітер, В	40
I_{Kmax} - максимально допустимий постійний струм колектора, мА	300
P_{Kmax} - постійна потужність колектора, Вт не більш	0,35
h_{21E} - статичний коефіцієнт передачі струму в схемі із загальним емітером КТ 503Б,	80÷210
U_{EB} - максимально допустима напруга емітер-база, В	5
τ_{33} - постійна часу кола внутрішнього зворотного зв'язку в транзисторі на високих частотах, пс	20
C_K - ємність колекторного переходу, пФ	20
T_{Kmax} - максимальна температура переходу, °С	150
f_{cp3E} - гранична частота, МГц	5
I_E - струм емітера, мА	1

- опір емітера транзистора

$$r_E = \frac{25,6}{I_E} = \frac{25,6}{1mA} = 25,6 \text{ Ом}$$

при I_E міліамперах r_E отримується в омах;

- динамічна ємність емітерного переходу транзистора

$$C_{E\partial} = \frac{1}{(2\pi f_{cp} r_E)} = \frac{1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^8 \cdot 25,6)} = 12(\text{пФ})$$

$$f_{cp} = |h_{21E}| \cdot f_{cp3E} = 100 \cdot 5 \text{ МГц} = 5 \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

де f_{cp3E} - гранична частота підсилення по струму транзистора з ЗЕ,

- коефіцієнт передачі струму транзистора в схемі з ЗЕ:

$$\alpha = \frac{h_{21E}}{(1 + h_{21E})} = \frac{100}{1 + 100} = 0,99,$$

де h_{21E} - низькочастотне значення коефіцієнта передачі струму транзистора з ЗЕ.

За параметрами еквівалентної схеми біполярного транзистора визначимо його низькочастотне значення крутизни S_0 :

$$S_0 = \frac{h_{21E}}{(1 + h_{21E})(r_B + r_E + \Delta r)} = \frac{100}{(1 + 100)(1 + 25,6 + 1)} = 36 \text{ (мА/В)},$$

Знаходимо величину вхідної провідності транзистора:

$$Y_{11E} = \frac{(1 - \alpha)}{(r_B + r_E + \Delta r)} = \frac{(1 - 0,99)}{(1 + 25,6 + 1)} = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ (См)}.$$

Проводимо побудову прямої, навантаження підсилювального каскаду. Для чого визначаємо дві характерні її точки. При закритому транзисторі характерна точка прямої, навантаження, має параметри $I_K = 0$ і $U_K = E_K$. При відкритому транзисторі характерна точка прямої, навантаження, має параметри $U_K = U_H$ і

$$I_K = \frac{E_K}{R_K} = \frac{5}{3000} = 2 \text{ мА}.$$

Вольт-амперні характеристики транзистора КТ503Б приведені на рисунку 6.9, згідно яких параметри робочої точки наступні:

- напруга колектора $U_{Kp} = 2,8\text{В}$,
- струм колектора $I_{Kp} = 1\text{мА}$,
- струм бази $I_{Bp} = 10\text{мкА}$,
- напруга база-емітер $U_{BEp} = 0,6\text{В}$.

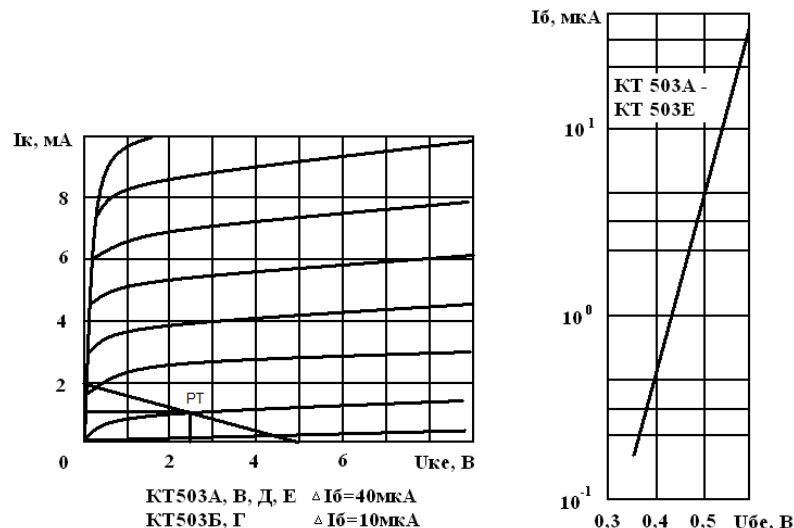


Рисунок 6.9 – Вольт-амперні характеристики транзистора КТ503Б

Розраховуємо потужність яка розсіюється на колекторі транзистора в робочій точці

$$P_K = U_{Kp} \cdot I_{Kp} = 2,8\text{В} \cdot 1\text{мА} = 2,8\text{ мВт}$$

Потужність яка розсіюється на колекторі транзистора не перевищує максимально-допустиму для цього транзистора.

Розраховуємо потужність яка розсіюється на резисторі в колекторному колі (R_K) в робочій точці

$$P_{RK} = I_{Kp}^2 \cdot R_K = (0,001)^2 \cdot 3000 = 3\text{ мВт}$$

Визначаємо величину резистора (R_E) в колі емітера транзистора.

$$R_E = \frac{0,2E_K}{I_{Kp}} = \frac{0,2 \cdot 5}{0,001} = 1\text{ кОм.}$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора R_E

$$P_{RE} = I_{Kp}^2 \cdot R_E = (0,001)^2 \cdot 1000 = 1\text{ мВт.}$$

Визначимо величину опору резистора в колі емітера з урахуванням, що каскад буде працювати в заданому інтервалі температур і параметри робочої точки (зокрема I_{Kp}) не будуть змінюватися більш ніж на 10%.

$$R_E \geq \frac{\gamma \Delta T}{0,1 I_{Kp}} \geq \frac{2\text{мВ} \cdot 35^\circ\text{C}}{0,1 \cdot 1\text{мА}} \geq \frac{0,002 \cdot 35}{0,1 \cdot 0,001} \geq 700\text{ Ом,}$$

де $\gamma = 2\text{мВ}/^\circ\text{C}$, ΔT – інтервал робочих температур (35°C).

З даного розрахунку можна зробити висновок, що номінал резистора в колі емітера обраний правильно.

В якості резистора R_E застосуємо резистор С2-23-0,125-1 кОм \pm 10%.

Розрахуємо величину резистора R_{B1} діляника в колі для зсуву робочої точки транзистора VT2

$$R_{B1} = \frac{E_K - (I_{Kp} \cdot R_E + U_{BE})}{3I_{Bp}} = \frac{5 - (0,001 \cdot 1000 + 0,6)}{3 \cdot 0,00001} = 113,3\text{ кОм}$$

В якості резистора R_{B1} застосуємо резистор С2-23-0,125-110 кОм \pm 5%.

Розрахуємо величину резистора (R_{B2}) діляника в колі для зсуву робочої точки транзистора:

$$R_{B2} = \frac{I_{Kp} \cdot R_E + U_{BE}}{3I_{Bp}} = \frac{0,001 \cdot 1000 + 0,6}{3 \cdot 0,00001} = 53,3\text{ кОм}$$

В якості резистора R_{B2} застосуємо резистор С2-23-0,125-51 кОм \pm 10%.

Розподілимо величину частотних спотворень які приходяться на каскад попереднього підсилення на окремі його елементи (розділові і блокувальні конденсатори) припускаючи що дані спотворення розподіляються порівну між вказаними колами.

$$M_{np} = M_{nb} = \frac{M_k^2}{2} = \frac{1,5dB}{2} = 0,75dB = 1,09$$

де M_{np} - частка частотних спотворень в області НЧ, розподілених на розділові й блокувальні кола.

Визначимо необхідне значення постійної часу для розділових і блокувальних кіл підсилювача з наступних співвідношень:

$$\tau_n = \frac{1}{2\pi f_n \sqrt{M_{np}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 29 \sqrt{1,09^2 - 1}} = 0,03 \text{ с,}$$

Визначимо величину ємності конденсатора блокування (C_E) в колі емітера транзистора:

$$C_E \geq \tau_n \cdot S_0 \geq 0,03 \cdot 0,036 = 0,00108 = 1080 \text{ (мкФ)}$$

В якості конденсатора C_E застосуємо конденсатор К50-33-6,3В-1000 мкФ.

Визначимо величину ємності розділового конденсатора (C_p) в колі навантаження

$$C_p \geq \frac{\tau_n}{R_K + R_H} \geq \frac{0,03}{3000 + 16000} \geq 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)} \geq 1,5 \text{ (мкФ)}$$

В якості конденсатор C_p застосуємо конденсатор К50-33-25В-1,5 мкФ.

Розрахуємо вхідний опір каскаду по змінному струму:

$$R_{ex} = \frac{R_{E2}}{(1 + Y_{11E} \cdot R_{E2})} = \frac{51000}{(1 + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot 51000)} = 2,6 \text{ (кОм)}$$

Розрахуємо величину коефіцієнта підсилення попереднього каскаду:

$$K_U = S_0 \cdot R_{екв} = 0,036 \cdot 2500 \text{ Ом} = 90$$

Розрахуємо величину вхідної напруги підсилювального каскаду:

$$U_{ex} = \frac{U_{max}}{K_U} = \frac{0,952}{90} = 10,5 \text{ (мВ)}$$

Розрахуємо величину опору резистора R_ϕ та ємність конденсатора C_ϕ які утворюють коло фільтру через яке живиться каскад попереднього підсилення $I_o = (3 \div 5) \cdot I_{Br} = 5 \cdot 0,00004 = 200 \mu\text{кА}$:

$$R_\phi = \frac{E_{жс} - E_K}{I_{Kp} + I_o + I_{Br}} = \frac{20 - 5}{0,001 + 0,0002 + 0,00001} = 12,3 \text{ кОм}$$

$$C_\phi = \frac{10 \dots 20}{2\pi f_n R_\phi} = \frac{15}{2 \cdot 3,14 \cdot 29 \cdot 12000} = 6,8 \text{ мкФ}$$

В якості резистора R_ϕ використаємо резистор С2-26-0,25Вт-12 кОм \pm 20%, та в якості конденсатора C_ϕ використаємо конденсатор К50-33 – 25В-6,8 мкФ.

Для підтвердження правильності виконаних розрахунків проводимо моделювання і визначення основних параметрів розрахованого каскаду в середовищі Electronics Workbench. Зважаючи на відсутність в базі даних КТ503Б, транзистор замінений аналогом 2N2712 (рис. 6.10).

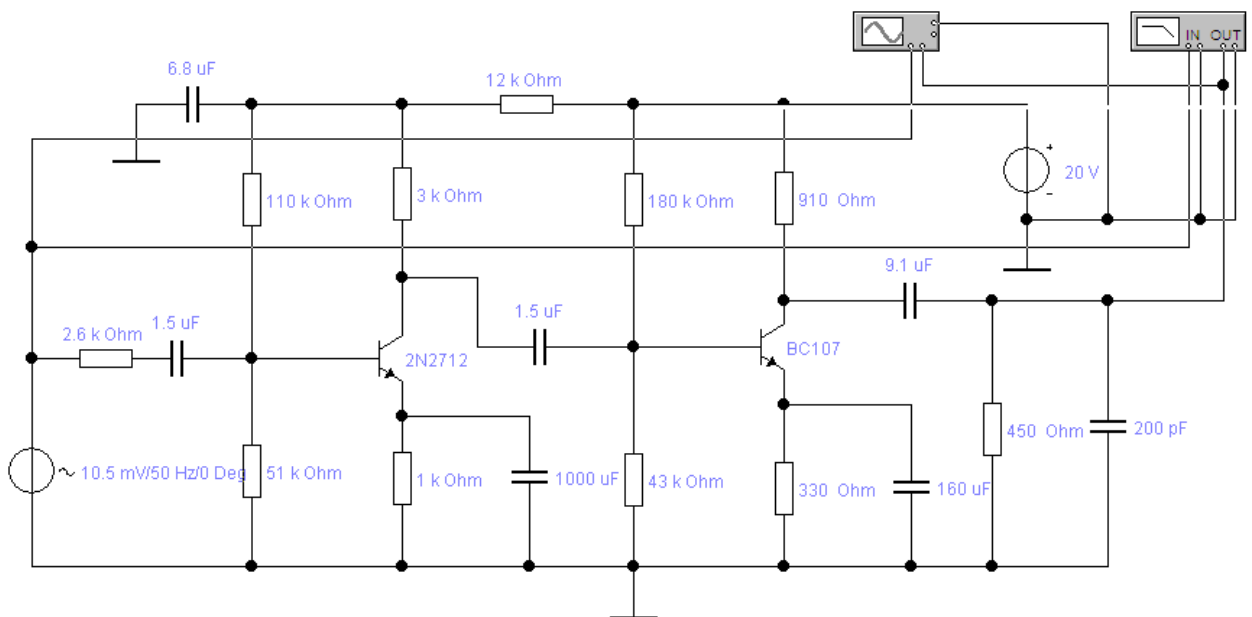


Рисунок 6.10 – Моделювання і визначення основних параметрів розрахованого двохкаскадного підсилувача низької частоти в середовищі Electronics Workbench

Аналіз характеристик: згідно приведенного рисунка коефіцієнт підсилення каскаду складає 55,9 дБ, нижня межа смуги пропускання рівна 29 Гц, а верхня межа смуги пропускання складає 8 МГц.

Амплітудно-частотна характеристика розрахованого двохкаскадного підсилювача низької частоти приведена на рисунку 6.11.

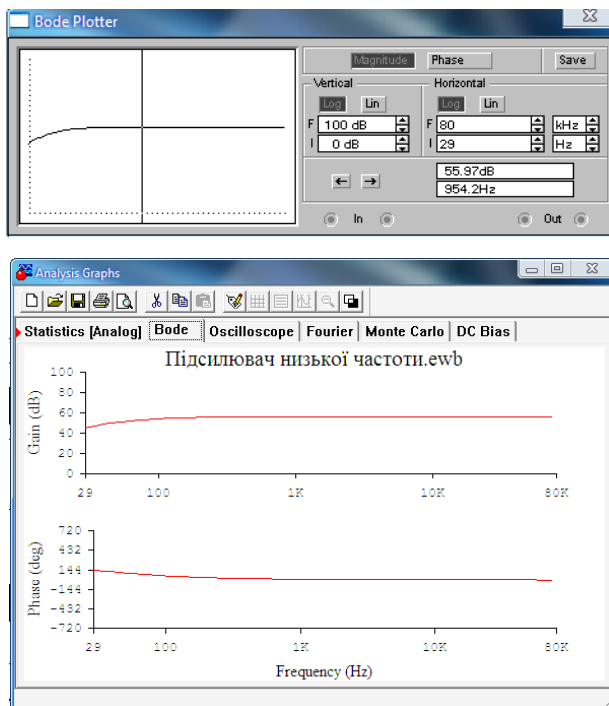


Рисунок 6.11 – Амплітудно-частотна характеристика розрахованого двохкаскадного підсилювача низької частоти

Принципова схема двохкаскадного підсилювача низької частоти приведена на рисунку 6.12. Номінали елементів приведені в додатку А (рис. 6.13).

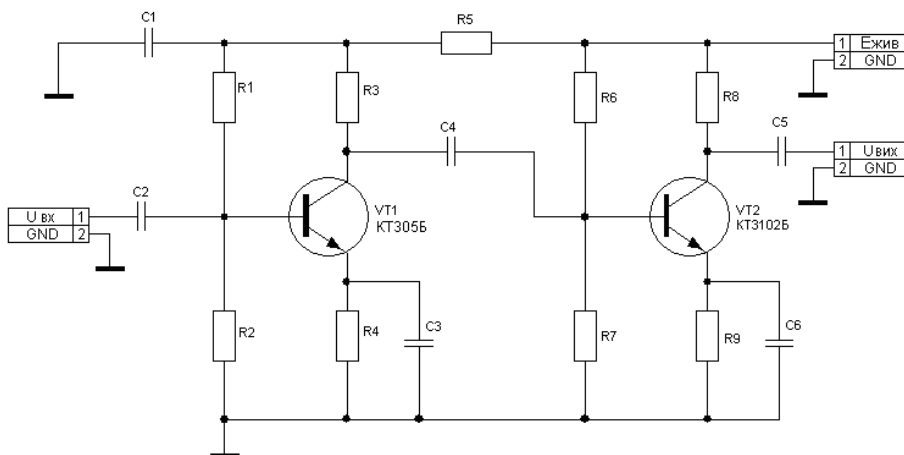


Рисунок 6.12 – Схема електрична принципова двохкаскадного підсилювача низької частоти

Поз. Познач	Найменування	Кільк	Прим.					
<i>Конденсатори</i>								
C1	КМ-5-Б-60В-6,8мкф	1						
C2	КМ-5-Б-60В-2,4мкФ	1						
C3	КМ-5-Б-60В-1,5 мкф	1						
C4	КМ-5-Б-60В-6,8 мкф	1						
C5	КМ-5-Б-60В-4,3 мкф	1						
C6	КМ-5-Б-60В-5 мкф	1						
<i>Резистори</i>								
R1	C2-23-0,125-15кОм-±10%	1						
R2	C2-23-0,125-6,8кОм-±10%	1						
R3	C2-23-0,125-1,8кОм-±10%	1						
R4	C2-23-0,125-1кОм-±10%	1						
R5	C2-23-0,125-39кОм-±10%	1						
R6	C2-23-0,125-300кОм-±10%	1						
R7	C2-23-0,125-62кОм-±10%	1						
R8	C2-23-0,125-6.2кОм-±10%	1						
R9	C2-23-0,125-1,2Ом-±10%	1						
<i>Транзистори</i>								
VT1	КТ3102Б	1						
VT2	КТ305А	1						
<i>Роз'єднувач</i>								
X1	DBF-5 (розетка)	1						
X2	DBF-5 (виделка)	1						
X3	DBF-5 (розетка)	1						
ІННІ 153 КП								
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА ПІДСИЛЮВАЧА НИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ	Лім	Маса	Масштаб
Розроб.						Лист	Листів	
Керівник								
Консульт.								
Н. контр.								
Затвердив								6.1532

Рисунок 6.13 – Перелік елементів у Додатку 1