

*Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю. М. Потєбні*

*Кафедра: Електроніки, інформаційних систем та програмного  
забезпечення*

## **Практичне заняття 5**

з дисципліни Аналогова та оптохемотехніка

### **Розрахунок параметрів підсилювача низької частоти**

Студента (ки) 2 курсу, групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Викладач \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів: \_\_\_\_\_ Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

м. Запоріжжя – 2024 рік

Метою вивчення теми є засвоєння методики розрахунку параметрів підсилювача низької частоти.

Ключові терміни та поняття: транзистор, розділовий конденсатор, напруга, потужність, резистор, постійний струм, змінний струм.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти поняття лінії навантаження за постійним струмом.
2. Засвоїти поняття лінії навантаження за змінним струмом.
3. Засвоїти технічні показники схеми підсилювача з загальним емітером.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

Початкові дані для розрахунку підсилювача низької частоти приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Початкові дані для розрахунку параметрів підсилювача низької частоти

Номер варіанта	$R_{\text{н}}, \text{кОм}$	$C_{\text{н}}, \text{пФ}$	$f_{\text{н}}, \text{Гц}$	$f_{\text{в}}, \text{Гц}$	$K_{\text{U}}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$R_{\text{вх}}, \text{кОм}$	$T_{\text{в}}, \text{°C}$

Схема електрична розрахункова підсилювача низької частоти наведена на рисунку 5.1.

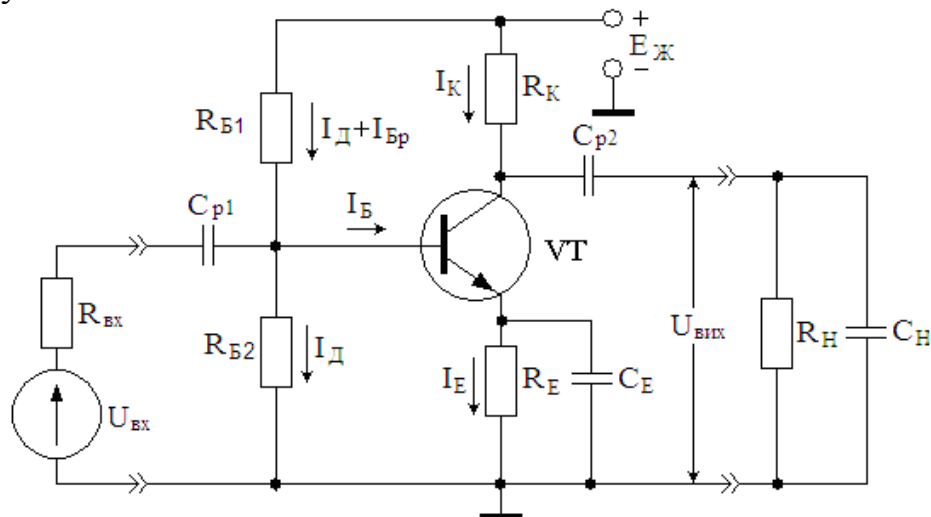


Рисунок 5.1 - Схема електрична розрахункова підсилювача низької частоти

Заданося орієнтовною величиною напруги насичення транзистора:

$$U_{KE \text{ нас}} = 1\text{В}$$

і розраховуємо необхідну величину напруги джерела живлення для підсилювального пристрою

$$E_{\text{ж}} \approx 1,5 \cdot 2\sqrt{2}U_{\text{вих}} \approx 4,3U_{\text{вих}} \text{ (В)}$$

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

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

Якщо в результаті розрахунку  $E_{жс}$  не буде відповідати значенню з рекомендованого ряду слід привести значення  $E_{жс}$  під найближче з рекомендованого ряду.

Здаємось опором у колі колектора:

$$R_K = (2...3)R_H \text{ (кОм).}$$

У якості резистора  $R_K$  застосуємо резистор С2-23-0,125-Н кОм $\pm$ 10%. Н обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом (*Додаток А*).

Здаємося падінням напруги на  $R_E$ :

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

Визначаємо еквівалентний опір навантаження:

$$R_{екв} = \frac{R_H R_K}{R_H + R_K} \text{ (кОм)}$$

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

$$I_{Кр} \geq \frac{1,1U_{вих}}{R_{екв}} \text{ (мА).}$$

Напруга колектор-емітер в робочій точці визначається за формулою:

$$U_{Кр} \geq U_{вих} + U_{нас} \text{ (В),}$$

де  $U_{нас}$  - напруга насичення транзистора.

Розраховуємо величину потужності розсіювання на колекторі транзистора в точці спокою

$$P_K = U_{Кр} \cdot I_{Кр} \text{ (мВт)}$$

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

Розраховуємо розмах імпульсу струму в навантаженні

$$I_{Hmax} = \frac{2,82 \cdot U_{вих}}{R_H} \text{ (мА)}$$

Знаючи напругу живлення підсилювача і максимальний струм, який протікає через навантаження, обираємо транзистор (*Додаток Б*) для вихідного каскаду за наступними умовами:

$$I_{Kmax\ доп} \geq 1,5 \times I_{Hmax} \text{ (мА)}$$

$$U_{KEmax} \geq 2 \times E_{жс} \text{ (В)}$$

$$P_{Kmax} \geq 2 \times P_K \text{ (мВт)}$$

$$f_{зр} \geq f_{\epsilon} \text{ (кГц)}$$

**Привести таблицю основних параметрів обраного транзистора.**

$U_{KEmax}$	$I_{Kmax}$	$I_{KE}$	$P_{Kmax}$	$h_{21E}$	$I_{KB0}$	$\tau_{33}$	$C_K$	$T_{Kmax}$	$f_{зр3E}$
В	мА	мА	Вт	-	мкА	нс	пФ	°С	МГц

Визначаємо параметри вибраного транзистору на основі довідкових даних таким чином:

- опір бази транзистора

$$r_B = \tau_{33} / C_K \text{ (Ом)}$$

де  $\tau_{33}$  - постійна часу кола внутрішнього зворотного зв'язку в транзисторі на високих частотах (100 нс);

- опір емітера транзистора

$$r_E = 25,6 / I_{KE} \text{ (Ом)}$$

при  $I_{KE}$  міліамперах  $r_E$  отримується в омах;

- динамічну ємність емітерного переходу транзистора

$$C_{E0} = 1 / (2\pi f_{ep} r_E) \text{ (пФ)},$$

$$f_{2h} = |h_{21E}| \cdot f_{ep3E} \text{ Гц}$$

де  $f_{ep3E}$  - гранична частота підсилення по струму транзистора з ЗЕ;

- коефіцієнт передачі струму транзистора в схемі з ЗЕ:

$$\alpha = h_{21E} / (1 - h_{21E}),$$

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

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

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

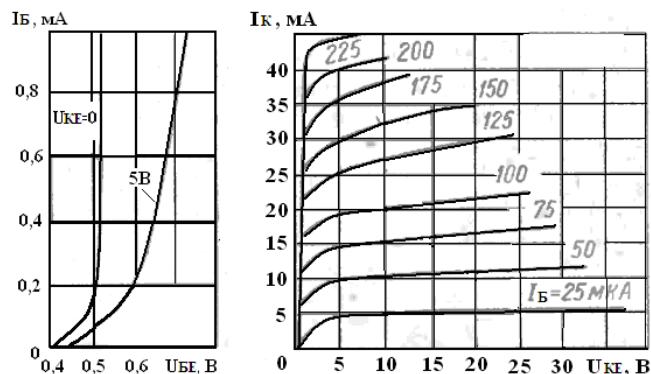
Знаходимо величину вхідної провідності транзистора:

$$Y_{11E} = (1 - \alpha) / (r_B + r_E + \Delta r) \text{ (См)}.$$

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

$$I_K = \frac{E_{жс}}{R_K} \text{ (мА)}.$$

**Привести вольт-амперні характеристики обраного транзистора.**



Обираємо параметри робочої точки:

- напруга колектора  $U_{Kp}$ , В;

- струм колектора  $I_{Kp}$ , мА;
- струм бази  $I_{Bp}$ , мкА;
- напруга база-емітер  $U_{BE}$ , В.

Розраховуємо потужність яка розсіюється на колекторі транзистора в робочій точці

$$P_K = U_{Kp} \cdot I_{Kp} \text{ (мВт)}$$

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

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

$$P_{RK} = I_{Kp}^2 \cdot R_K \text{ (мВт)}$$

Визначаємо величину резистора ( $R_E$ ) в колі емітера транзистора

$$R_E = \frac{0,2E_{жс}}{I_{Kp}} \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора  $R_E$

$$P_{RE} = I_{Kp}^2 \cdot R_E \text{ (мВт)}$$

У якості резистора  $R_E$  застосуємо резистор С2-23-0,125-Н кОм $\pm$ 10%. Н обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом (Додаток А).

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%.

$$R_E \geq \frac{\gamma \Delta T}{0,1 I_{Kp}} \text{ (Ом)},$$

де  $\gamma = 2 \text{ мВ/}^\circ\text{С}$ ,  $\Delta T$  – інтервал робочих температур (44  $^\circ\text{С}$ ).

З даного розрахунку 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:

$$R_{B1} = \frac{E_{жс} - (I_{Kp} \cdot R_E + U_{BE})}{3I_B} \text{ (кОм)}.$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора  $R_{B1}$ :

$$P_{RB1} = 3I_B^2 \cdot R_{B1} \text{ (мВт)}.$$

У якості резистора  $R_{B1}$  застосуємо резистор С2-23-0,125-Н кОм $\pm$ 10%. Н обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом (Додаток А).

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

$$R_{B2} = \frac{I_{Kp} \cdot R_E + U_{BE}}{3I_B} \text{ (кОм)}$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора  $R_{B2}$ :

$$P_{RB2} = 3I_B^2 \cdot R_{B2} \text{ (мВт)}.$$

У якості резистора  $R_{B2}$  застосуємо резистор С2-23-0,125-Н кОм $\pm$ 10%. Н обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом (*Додаток А*).

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.

$$M_{np} = M_{nb} = \frac{M_k}{2} \text{ (разів)}$$

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

$$\tau_n = \frac{1}{2\pi f_n \sqrt{M_{np}^2 - 1}} \text{ (с)}.$$

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

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

$$C_E \geq \tau_n \cdot S_0 \text{ (мкФ)}.$$

У якості конденсатора  $C_E$  застосуємо конденсатор К50-33-6,3В-Н мкФ. Н обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом (*Додаток А*).

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

$$C_{p2} \geq \frac{\tau_n}{R_k + R_n} \text{ (мкФ)}$$

У якості конденсатора  $C_{p2}$  застосуємо конденсатор К50-33-6,3В-Н мкФ. Н обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом (*Додаток А*).

Розрахуємо вхідний опір каскаду по змінному струму:

$$R_{вх} = R_{B2} / (1 + Y_{11E} \cdot R_{B2}) \text{ (кОм)}.$$

Розрахуємо величину коефіцієнта підсилення каскаду:

$$K_U = S_0 \cdot R_{екв}.$$

Розрахуємо величину вхідної напруги підсилювального каскаду:

$$U_{вх} = U_{вих} / K_U \text{ (В)}.$$

Для підтвердження правильності виконаних розрахунків проводимо моделювання і визначення основних параметрів розрахованого підсилювача низької частоти за допомогою програмного забезпечення Electronics Workbench (рис. 5.2). Обрати транзистор (аналог) згідно з *Додатком В*.

Привести аналіз характеристик підсилювача низької частоти, які отримані на Bode Plotter.

Привести амплітудно-частотну характеристику, яка отримана функцією Analysis Graphs (рис. 5.3).

Привести схему електричну принципову моделі підсилювача низької частоти (рис. 5.4).

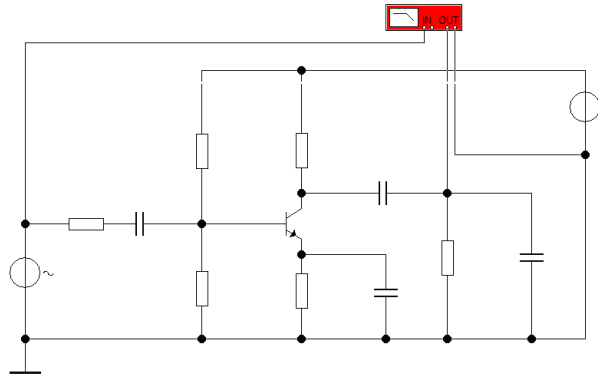


Рисунок 5.2 - Моделювання і визначення основних параметрів розрахованого каскаду за допомогою програмного забезпечення Electronics Workbench

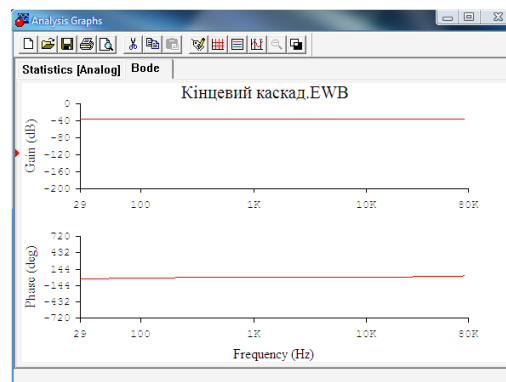
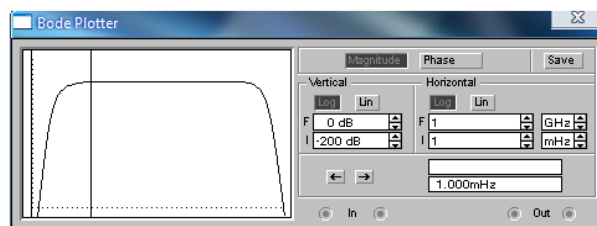


Рисунок 5.3 - Амплітудно-частотна характеристика кінцевого каскаду

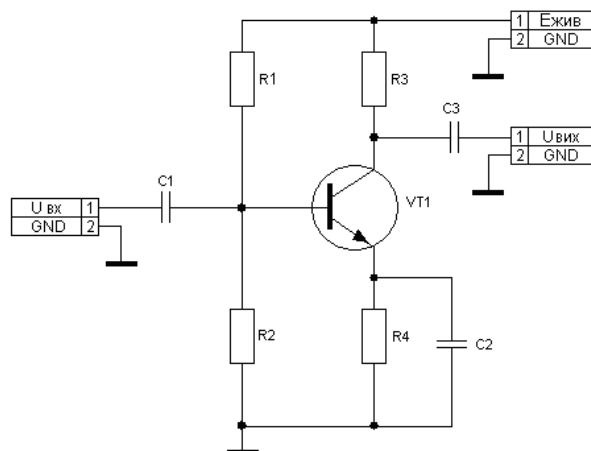


Рисунок 5.4 - Схема електрична принципова моделі кінцевого каскаду

### Практичне завдання.

Розрахувати підсилювач низької частоти за заданими параметрами (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Таблиця варіантів завдання

Номер варіанта	$R_H$ , кОм	$C_H$ , пФ	$f_H$ , Гц	$f_B$ , Гц	$K_U$	$U_{вих}$ , В	$R_{вх}$ , кОм	$T_B$ , °С
1	3,0	5	29	$8 \cdot 10^4$	44	4	3,0	35
2	3,2	5	26	$9 \cdot 10^4$	56	8	1,0	40
3	3,4	5	27	$7 \cdot 10^4$	67	5	1,5	45
4	3,5	5	28	$5 \cdot 10^4$	75	7	2,0	50
5	3,6	5	28	$3 \cdot 10^4$	89	6	2,5	35
6	3,7	5	20	$4 \cdot 10^4$	94	8	2,7	40
7	3,9	5	21	$2 \cdot 10^4$	46	4	2,9	45
8	4,0	5	25	$7 \cdot 10^4$	57	7	3,0	50
9	4,6	5	27	$9 \cdot 10^4$	65	5	3,5	45
10	5,0	5	26	$8 \cdot 10^4$	79	8	3,7	40

Привести аналітичне описання методики, розрахунки, схеми, характеристики, висновки.

### Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. Визначення параметрів підсилювача НЧ по вольт-амперним характеристикам біполярних транзисторів.
2. Вибір транзистора згідно з розрахованими параметрами.
3. Аналіз характеристик підсилювача НЧ за допомогою функцій EWB.

### Література

1. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем: підручник. Київ : Вища шк., 2004. 527 с.
2. Гельжинський І. І., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., Марусенкова Т. А. Мікросхемотехніка: підручник. Львів : Ліга - Прес, 2015. 492 с.
3. Бойко В. І., Зорі А. А. Основи електронних систем : вступ до фаху. Донецьк : ДНТУ, 2002. 207 с.
4. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Критська Т.В. Аналогова та опто-схемотехніка. Методичні рекомендації до курсового проекту на тему «Розрахунок двохкаскадного підсилювача низької частоти» для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 49 с.



## 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	$\pm 20$	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8		
E12	$\pm 10$	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	5,6	6,2	6,8
E24	$\pm 5$	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		

## Додаток Б

## Параметри транзисторів

Тип	$I_{К.доп.},$ мА	$I_{КЕ.доп.},$ мА	$P_{К.макс.},$ мВт	$U_{БЕ},$ В	$f,$ МГц	$h_{21E}$	$U_{КЕ.нас.},$ В
Транзистори середньої потужності							
<i>n-p-n</i>							
КТ503А	150	40	350	5	5	40÷120	0,6
ГТ404А	500	25	600	5	1	30÷80	0,3
ГТ400Г	500	40	600	5	1	60÷150	0,3
<i>p-n-p</i>							
КТ104А	50	30	150	2	5	9÷36	1
КТ208Д	150	30	200	2	5	40÷120	0,4
КТ502Г	150	60	350	5	5	80÷240	0,6
КТ501Г	300	30	350	2	5	20÷60	0,4
ГТ405Г	500	40	600	5	1	60÷150	0,35
Транзистори потужні							
<i>n-p-n</i>							
КТ807А	500	100	$10^4$	4	5	15÷45	1
КТ815А	$1,5 \cdot 10^3$	40	$10^4$	5	3	40÷70	2
КТ840А	$6 \cdot 10^3$	400	$6 \cdot 10^4$	5	1	10÷100	3
КТ819Б	$10^4$	50	$6 \cdot 10^4$	5	12	20÷30	5
КТ819Г	$10^4$	100	$6 \cdot 10^4$	5	10	12÷30	5
КТ827А	$2 \cdot 10^3$	100	$125 \cdot 10^4$	5	14	750÷1800	2
<i>p-n-p</i>							
КТ626Б	$0,5 \cdot 10^3$	60	$6,5 \cdot 10^3$	5	45	30÷100	1
КТ814Б	$1,5 \cdot 10^3$	50	$10^4$	5	3	40	0,6
КТ837А	$7,5 \cdot 10^3$	70	$3 \cdot 10^4$	15	0,01	10÷40	2,5
КТ818А	$10^4$	40	$5 \cdot 10^4$	5	7	15	1,5
ГТ806Б	$15 \cdot 10^3$	100	$3 \cdot 10^4$	1,5	10	10÷100	0,6
КТ825	$2 \cdot 10^4$	90	$125 \cdot 10^3$	5	10	750	2

Тип транзистора	Аналог EWB	Тип транзистора	Аналог EWB
КТ 313 А	2N2906	КТ342 Б	BC109 В
КТ361 Г	2N3906	КТ3102 А	2N 2368
КТ208 К	2N2946	КТ373 А	2N3390
КТ349 В	BC178А	КТ3117А	2N2222А
КТ 3107 Б	BC212А	КТ375 А	2N3903