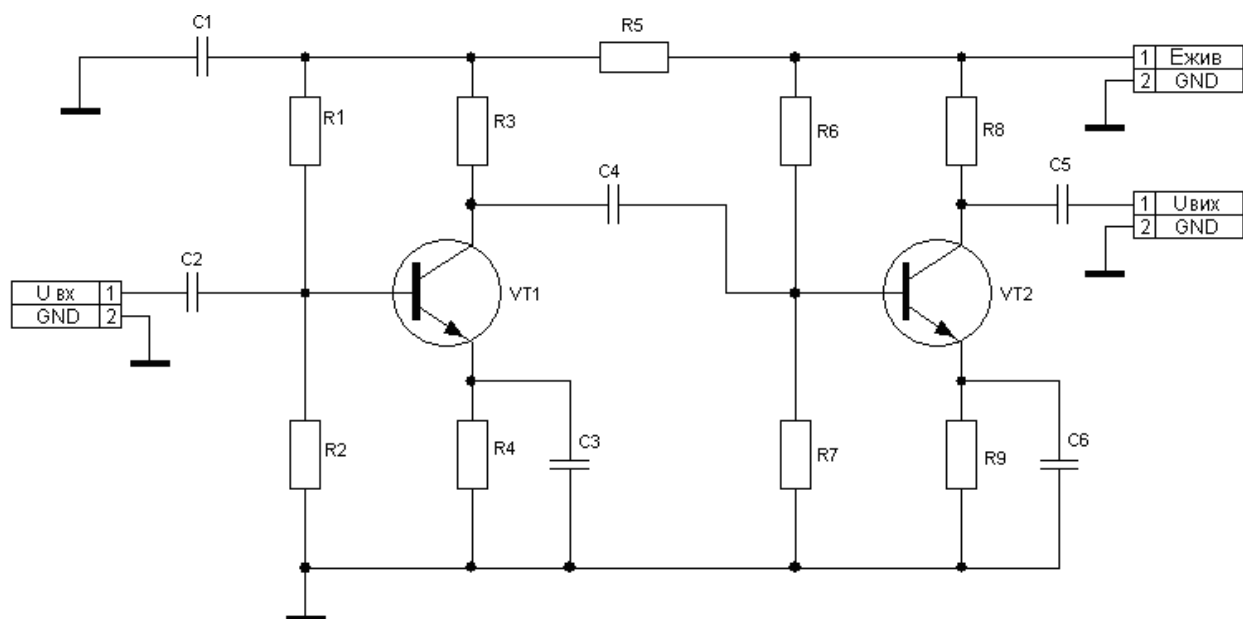


Верьовкін Л.Л., Світанько М.В.

АНАЛОГОВА ТА ОПТОСХЕМОТЕХНІКА

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»



Міністерство освіти і науки України
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Верьовкін Л.Л., Світанько М.В.

АНАЛОГОВА ТА ОПТОСХЕМОТЕХНІКА

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»

Затверджено
Вченою
радою ЗНУ
Протокол №
від

Запоріжжя
2024

УДК 621.38
В

Верьовкін Л.Л., Світанько М.В. Аналогова та оптосхемотехніка. 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. 51 с.

Методичні рекомендації до курсового проекту на тему «Розрахунок двохкаскадного підсилювача низької частоти» з дисципліни «Аналогова та оптосхемотехніка» розроблено для студентів денної та заочної форм навчання інженерно-технічних спеціальностей та освітньо-професійних програм Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні. Викладена методика проведення розрахунку, обробки результатів і побудови схеми підсилювача низької частоти. Для практичного виконання розрахунків та самостійної проробки матеріалу студенти можуть використати приведені теоретичні відомості з курсу.

Рецензент

Коваленко В.Л., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем

Відповідальний за випуск

Критська Т.В., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Зміст

	Стор.
Вступ	5
1 Теоретичні відомості	8
1.1 Типи підсилювачів	8
1.2 Параметри підсилювачів	10
1.3 Частотні і фазові характеристики підсилювачів	13
1.4 Резистивний підсилювальний каскад на біполярному транзисторі	15
2 Розрахунок структурної схеми підсилювача	19
2.1 Визначення числа каскадів	19
2.2 Розподіл спотворень по каскадах	20
2.3 Вибір транзистора	21
3 Розрахунок схеми двохкаскадного підсилювача низької частоти	22
3.1 Розрахунок схеми кінцевого каскаду	22
3.2 Розрахунок параметрів каскаду попереднього підсилення	29
4 Порядок виконання курсового проекту	37
4.1 Варіанти тем до виконання літературного огляду	37
4.2 Варіанти розрахункової частини курсового проекту	38
Перелік джерел	39
Додатки	40

Вступ

Метою дисципліни є засвоєння основ проектування радіoeлектронної апаратури (РЕА), щоб на основі набутих знань отримати необхідну інженерну підготовку майбутніх фахівців вказаної спеціальності.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Аналогова та оптоелектротехніка» є: ознайомлення з особливостями, конструкціями, застосуванням приладів аналогової електроніки в залежності від призначення, вимог до приладів електронної техніки та умов експлуатації:

- отримати знання із фізичних основ функціонування пристроїв аналогової електроніки;
- уміти використовувати фізичні та математичні моделі при проектуванні систем керування та обробки інформаційних сигналів аналогових та оптичних інформаційних систем;
- отримати навички із застосування приладів аналогової та оптичної електроніки в сучасних інформаційних системах.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких компетентностей:

- ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- ЗК6. Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- СК1. Здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.
- СК5. Здатність ідентифікувати, класифікувати, оцінювати і описувати процеси у мікро- та наносистемній техніці за допомогою побудови і аналізу їх фізичних і математичних моделей.
- СК8. Здатність визначати та оцінювати характеристики та параметри матеріалів мікро- та наносистемної техніки, аналогових та цифрових електронних пристроїв, мікропроцесорних систем.

- СК12. Здатність використовувати знання з оптичної аналогової та цифрової схемотехніки, оптоелектроніки, фотовольтаїки та геліоелектроніки.

- СК13. Здатність застосовувати знання з моделювання функціональних вузлів мікроелектроніки та конструювання приладів на їх основі.

Методичні рекомендації містять теоретичні відомості до кожної теми, яка розглядається у змістових модулях і використовується для вирішення питань варіантів, приклад виконання завдання та додатковий матеріал до курсового проєкту з дисципліни «Аналогова та оптосхемотехніка».

Курсовий проєкт оформлюється у вигляді пояснювальної записки обсягом 40 – 50 сторінок і графічного матеріалу на 2 аркушах формату А3.

Курсовий проєкт складається з наступних частин: титульний лист, лист завдань, реферат, зміст, вступ, літературний огляд (згідно з варіантом), розрахункова частина (згідно з варіантом), висновки, перелік посилань.

Літературний огляд виконується по заданій темі, відповідно до варіанту.

Розрахункова частина являється типовою для усіх варіантів курсового проєкту і відповідає загальній схемі двохкаскадного підсилювача низької частоти. Окремі функціональні вузли розраховуються згідно з варіантом.

Розрахунково – пояснювальна записка повинна бути надрукована. Текст друкується на одному боці аркуша білого паперу формату А4 (210×297 мм) шрифтом Times New Roman, кегль 14 пт, міжрядковий інтервал – 1,5, абзацний відступ дорівнює п'яти знакам. Текст роботи необхідно друкувати, залишаючи поля таких розмірів: ліве – 30 мм, праве – 15 мм, верхнє – 20 мм, нижнє – 20 мм. Нумерація сторінок проставляється у верхньому правому куті сторінки.

Заголовки структурних частин та підрозділів друкують маленькими літерами (крім першої великої) в один і той же спосіб. Симетрично до тексту. Крапку в кінці заголовків і підзаголовків не ставлять. Відступ між заголовком розділу (підрозділу) і наступним або попереднім текстом має бути не

менше подвійного інтервалу. Кожен розділ починається з нової сторінки. Підрозділи (параграфи) повинні мати назви, які відповідають їх змісту. Підрозділи можуть включати пункти та підпункти.

Ілюстрації позначають словом «Рисунок» і нумерують послідовно в межах розділу; їх номер складається з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, між якими ставиться крапка. Наприкінці номера крапка не ставиться, а ставиться тире і далі з великої літери друкується назва рисунка. Крапку в кінці назви рисунка не ставлять. Назву ілюстрації друкують з абзацу, нижче рисунка, через подвійний інтервал.

Номер таблиці складається з номера розділу і порядкового номера таблиці, між якими ставиться крапка. Наприкінці номера крапка не ставиться, а ставиться тире і далі з великої літери друкується назва таблиці. Крапку в кінці назви таблиці не ставлять. Назву таблиці друкують з абзацу, зверху таблиці через подвійний інтервал.

Формули, якщо їх більше однієї, нумерують у межах розділу. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули, між якими ставиться крапка. Наприкінці номера крапка не ставиться. Номер формули пишуть у круглих дужках.

При написанні роботи автор зобов'язаний в усіх її частинах і розділах, включно з ілюстраціями і таблицями, посилатися на першоджерело, з якого представлені ці матеріали. Порушення цих вимог може призвести до кваліфікації дій автора як плагіату. Посилання в тексті роботи на джерело слід зазначати порядковим номером за переліком посилань. Номер джерела ставиться у квадратних дужках, наприклад: [7], [9-15], [6, 18].

Для позитивної оцінки розрахунки та схеми повинні бути виконані у повному обсязі, згідно з рішеннями і рекомендаціями наведеними у представленому у методичних рекомендаціях прикладі.

Приклад оформлення титульного листа та завдання до курсового проєкту у додатку А. Приклади оформлення реферату, змісту, схем та діаграм, таблиць, літератури, графічної частини у додатку Б.

1 Теоретичні відомості

Підсилення сигналу є процес збільшення його амплітуди. Зазвичай цей процес супроводжується деякою зміною форми сигналу який підсилюється. Відхилення форми підсиленого вихідного сигналу від форми вхідного називається спотворенням, тому необхідні відомості про підсилювач повинні включати не лише кількісну оцінку самого ефекту підсилення, але і міру спотворень сигналу який підсилюється. Перелік відомостей, які характеризують основні властивості підсилювача, називають його показниками.

До основних показників підсилювача відносяться: коефіцієнт підсилення, амплітудна, частотна, фазова і перехідна характеристики підсилювача, допустимий рівень лінійних і нелінійних спотворень сигналу, рівень власних шумів підсилювача, його коефіцієнт корисної дії, необхідний рівень напруги вихідного сигналу на заданому навантаженні, динамічний діапазон зміни вхідного і вихідного сигналів.

1.1 Типи підсилювачів

По роду вхідних електричних сигналів підсилювачі можна розділити на дві групи:

1. Підсилювачі гармонійних сигналів (або гармонійні підсилювачі), призначені для підсилення квазіперіодичних сигналів різної величини і форми, тобто сигналів, гармонійні складові яких змінюються багато повільніше за тривалість процесів, що встановлюються, в колах підсилювача. До гармонійних підсилювачів відносяться: мікрофонні і магнітофонні підсилювачі, підсилювачі відтворення грамзапису, звукового кіно, багато вимірювальних підсилювачів і так далі.

2. Підсилювачі імпульсних сигналів (або імпульсні підсилювачі), призначені для підсилення імпульсних сигналів різної величини і форми. Процеси, які встановлюються, в колах цих підсилювачів повинні протікати з такою швидкістю, аби не спотворювати недопустимим чином форму імпульсів які

підсилюються. До імпульсних підсилювачів відносяться підсилювачі імпульсних систем зв'язку, імпульсних пристроїв радіолокації і радіонавігації, багато підсилювачів систем регулювання і управління, підсилювачі рахунково-вирішальних пристроїв, телевізійні відео-підсилювачі і так далі.

По ширині смуги і абсолютним значенням робочих частот підсилювачі ділять на наступних типів.

Підсилювачі постійного струму (точніше, підсилювачі повільно змінної напруги і струмів), призначені для підсилення електричних коливань будь-якої частоти в межах від нижчої робочої частоти $f_H = 0$ до вищої робочої частоти f_B , тобто підсилювачі, які підсилюють як змінні складові сигналу, так і його постійну складову.

Підсилювачі змінного струму, призначені для підсилення електричних коливань будь-якої частоти в межах від $f_H > 0$ до f_B , але нездібні підсилювати постійну складову сигналу.

Підсилювачі високої частоти (ПВЧ), призначені для підсилення електричних коливань несучої частоти (як модульованої, так і не модульованої), яка, наприклад, приймається приймальною антеною радіоприймального пристрою. ПВЧ можна підрозділити на підсилювачі радіочастоти, які підсилюють електричні коливання несучої частоти і підсилювачі проміжної частоти, які підсилюють електричні коливання перетвореної частоти. ПВЧ характеризуються відношенням вищої робочої частоти до нижчої, близьким до одиниці ($f_B / f_H < 1,1$), оскільки спектральні складові модульованого коливання тісно групуються поблизу несучої частоти або проміжної.

Підсилювачі низької частоти (ПНЧ), призначені для підсилення гармонійних складових не перетвореного сигналу який передається або сигналу який приймається. Таку назву цей тип підсилювачів отримав на початку розвитку радіотехніки, коли по радіо передавалися лише мова, музика і телеграфні сигнали невисокої швидкості, і гармонійні складові не перетвореного сигналу дійсно мали низьку частоту, яка не перевищує десятка кілогерц.

Підсилювачі низької частоти характеризуються великим відношенням вищої робочої частоти до нижчої, лежачим в межах $10 \dots 500$ для підсилювачів звукових частот і які перевищує 10^5 для деяких типів відео-підсилювачів. Підсилювачі з вищою робочою частотою порядку сотні кілогерц і вище, які одночасно мають велике відношення вищої робочої частоти до нижчої, зазвичай називають широкосмуговими підсилювачами.

Крім того, підсилювачі розділяються на підсилювачі прямого підсилення, в яких електричні коливання підсилюються безпосередньо, без перетворення частоти цих коливань, і підсилювачі з перетворенням, в яких спектр частот вхідних коливань перетворюється (відбувається зміщення по частоті).

Вибіркові підсилювачі підсилюють електричні сигнали у вузькій смузі частот; їх підсилення різко падає на частотах як вище, так і нижче за середню частоту. Вибіркові підсилювачі підрозділяють на резонансні, підсилення яких із зміною частоти змінюється згідно із законом зміни повного опору паралельного резонансного контуру, і вузькосмугові, підсилення яких майже постійно у вузькій смузі частот і різко падає за її межами.

За призначенням підсилювачі ділять на телевізійні, радіолокаційні, широсмугові, магнітофонні, вимірникові і так далі.

По роду використаних підсилювальних елементів підсилювачі підрозділяються на лампові, транзисторні, магнітні, надпровідникові (кріотронні) і др. Дві перші групи зазвичай називають електронними підсилювачами.

1.2 Параметри підсилювачів

Коефіцієнт підсилення – один з найважливіших показників підсилювача. Він показує, в яку кількість разів корисний сигнал в заданому навантаженні на виході підсилювача більше сигналу, що створюється джерелом на його вході. Корисний сигнал на виході може визначатися напругою, струмом або потужністю. Відповідно до цього підсилювач характеризують його коефіцієнтами підсилення напруги K_U , струму K_I або потужності K_P . Вони визначаються в сталому режимі при синусоїдальному вхідному сигналі. Коефі-

цієнтом підсилення потужності K_P називають число, яке показує в скільки разів потужність P_2 , яка віддається підсилювачем в його кінцеве навантаження R_H , більше потужності P_1 , яка підводиться до його вхідних затисків:

$$K_P = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.1)$$

Зазвичай інтерес представляє активна потужність P_2 , яка віддається підсилювачем в навантаження, і активна потужність P_1 , яка забирається їм при цьому від джерела вхідних сигналів. В цьому випадку K_P визначається дійсним числом.

Коефіцієнтом підсилення напруги (струму) підсилювача зветься відношення його вихідної напруги U_2 (струму I_2) до вхідної напруги U_1 (струму I_1):

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} \quad (1.2)$$

$$K_I = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.3)$$

Наявність в схемі підсилювача і його навантаженні реактивних елементів наводить до залежності коефіцієнтів підсилення від частоти. Особливий інтерес при розрахунку підсилювачів мають значення коефіцієнтів підсилення в області середніх частот, в межах якої вони практично не залежать від частоти. Зазвичай їх називають номінальними коефіцієнтами підсилення і приписують їм додатковий індекс – «нуль». Таким чином

$$K_{0U} = \frac{U_{02}}{U_{01}}$$

$$K_{0I} = \frac{I_{02}}{I_{01}},$$

представляють номінальні коефіцієнти підсилення в області середніх частот і характеризуються дійсними числами.

Для оцінки відношення двох величин однакової розмірності широке вживання в підсилювальній техніці знаходить спеціальна логарифмічна одиниця -

децибел. Для вираження коефіцієнтів підсилення в децибелах користуються наступними співвідношеннями:

$$\begin{cases} K_{P(\text{Дб})} = 10 \lg K_P = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \\ K_{U(\text{Дб})} = 20 \lg K_U = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \\ K_{I(\text{Дб})} = 20 \lg K_I = 20 \lg \frac{I_2}{I_1} \end{cases} \quad (1.4)$$

Активний елемент (лампа, 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. 1.1).

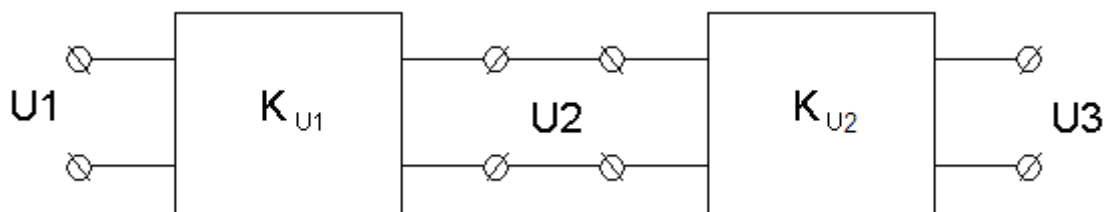


Рисунок 1.1 – Послідовне включення декількох каскадів підсилення

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

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

Аналогічний результат має місце, якщо розглядати результуючий коефіцієнт підсилення струму або потужності. Таким чином, в загальному випадку

$$K_n = \prod_{j=1}^n K_k, \quad (1.5)$$

де K_k – коефіцієнт підсилення k -го каскаду по напрузі, струму або потужності, n – число каскадів, K_n – результуючий коефіцієнт підсилення по напрузі, струму або потужності.

Дуже великий вхідний опір електронних ламп приводить до того, що лампові підсилювачі практично не споживають струму від джерела вхідного сигналу

($U_1 = 0$). Природно, що використання коефіцієнтів підсилення струму і потужності для оцінки властивостей таких підсилювачів позбавляється сенсу. Тому їх підсилювальні властивості характеризують лише коефіцієнтом підсилення напруги K_U .

Транзисторні підсилювачі, на відміну від лампових, володіють порівняно малим вхідним опором і споживають від джерела сигналів помітний струм. Тому для транзисторних підсилювачів мають сенс всі три коефіцієнти підсилення

1.3 Частотні і фазові характеристики підсилювачів

Форма сигналу на виході лінійного підсилювача може відрізнятися від форми сигналу на його вході в двох випадках:

- 1) коли окремі гармонійні складові вхідного сигналу підсилюються неоднаково;
- 2) коли фазові зрушення, які набувають гармонійні складові сигналу, пройшовши через підсилювач, змінюють їх взаємне зміщення в часі.

Спотворення форми сигналу в лінійній системі, викликані цими причинами, називаються лінійними спотвореннями.

Характер і величину лінійних спотворень можна розглянути по частотній і фазовій характеристиках.

Частотною характеристикою підсилювача називається залежність модуля коефіцієнта підсилення $K(f)$ від частоти. Зразковий вигляд частотної характеристики приведений на рисунку 1.2, а. Для осі ординат використовують зазвичай лінійний масштаб, для осі абсцис – логарифмічний. Необхідність в останньому викликається широким частотним діапазоном сучасних підсилювачів. Граничними частотами f_H і f_B називають частоти, на яких підсилення зменшується до заданої (допустимої) величини, відносно підсилення K . Діапазон частот від f_H до f_B , який дорівнює Δf , називається смугою пропускання підсилювача.

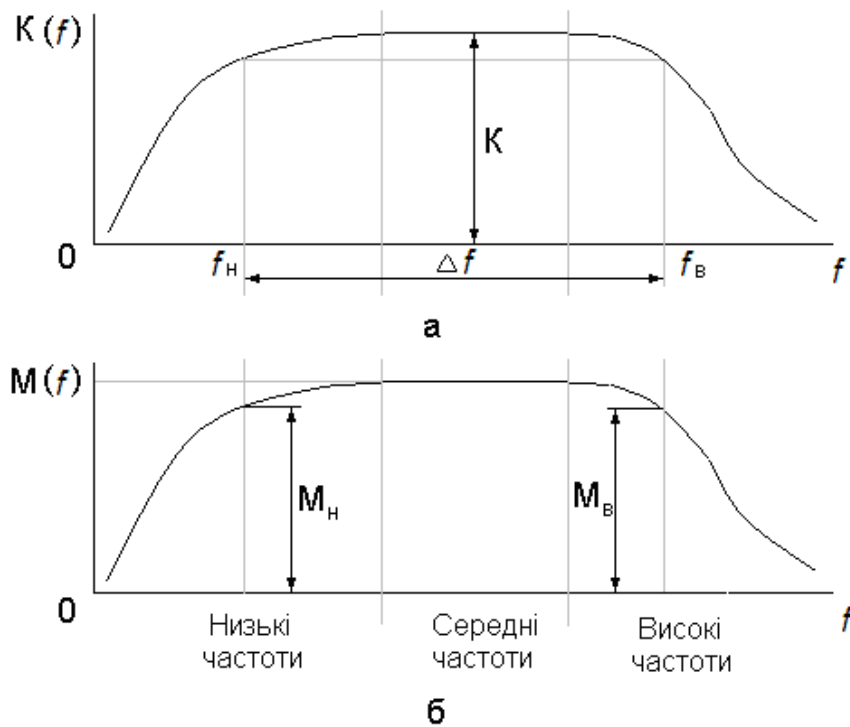


Рисунок 1.2 – Частотна характеристика підсилювача

Весь діапазон частот підсилювача умовно розбивають на область середніх частот, в межах якої підсилення практично не залежить від частоти, і області нижчих і вищих частот (рис. 1.2, б), в межах яких підсилення істотно міняється з частотою. Значення K_0 в області середніх частот визначає номінальний коефіцієнт підсилення. Зміна з частотою коефіцієнта підсилення в області нижчих і вищих частот характеризує частотні спотворення сигналу що підсилюється.

Фазова характеристика підсилювача $\varphi(f)$ показує залежність від частоти фазового зрушення вихідного гармонійного вагання відносно вхідного. Ця залежність визначається аргументом комплексного коефіцієнта підсилення. Типовий вигляд фазової характеристики показаний на рисунку 1.3, а. По осі ординат відкладений фазовий кут в градусах або радіанах в лінійному масштабі, по осі абсцис – частота в лінійному масштабі. На рисунку 1.3, б та ж фазова характеристика представлена у логарифмічному масштабі осі частот. Фазова характеристика, яка не створює спотворень форми коливань які підсилюються, характеризується лінійною залежністю фазового кута від частоти

$$\varphi(f) = -t_3 f \quad (1.6)$$

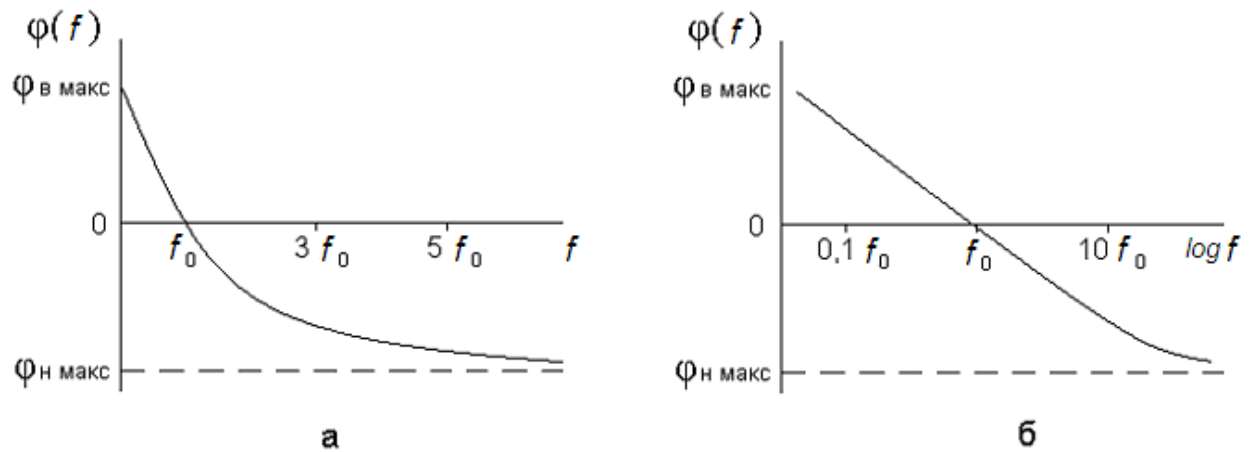


Рисунок 1.3 – Фазова характеристика підсилювача

Залежність (1.6) визначає вигляд ідеальної фазової характеристики підсилювача. Вона є прямою, яка виходить з початку координат. Тангенс кута нахилу цієї прямої

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\varphi(f)}{f} = -t_3$$

визначає час запізнювання t_3 .

При оцінюванні спотворень, які створюються фазовими зрушеннями в підсилювачі, інтерес представляє не сама величина фазового зрушення, а характер його зміни з частотою. Якщо забезпечується постійність t_3 , тобто $\varphi(f)$ лінійно змінюється з частотою, то спотворення форми сигналу відсутні. Інакше виникають спотворення. Таким чином, спотворення форми сигналу викликане відхиленням Δf реальної фазової характеристики від ідеальної і зобов'язано нелінійності фазової характеристики.

1.4 Резистивний підсилювальний каскад на біполярному транзисторі

Проста схема резистивного підсилювального каскаду із загальним емітером і живленням від одного джерела показана на рисунку 1.4.

Вхідний сигнал поступає на базу і змінює її потенціал відносно заземленого емітера. Це наводить до зміни струму бази, а отже, до зміни струму колектора і напруги на опорі навантаження R_K . Розділовий конденсатор C_{p1} служить для запобігання протіканню постійної складової струму бази через джерело вхідного сигналу.

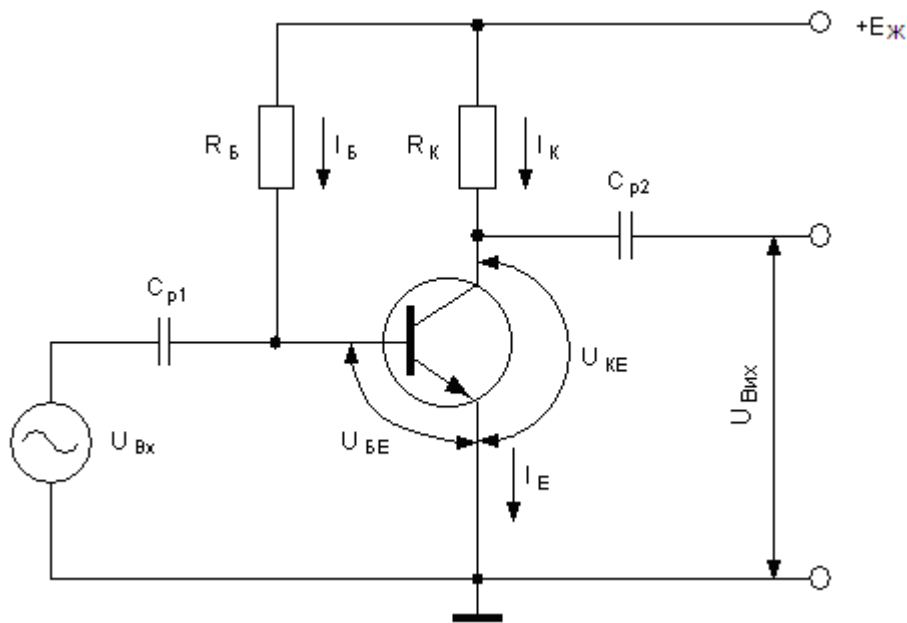


Рисунок 1.4 - Схема резистивного підсилювального каскаду із загальним емітером

За допомогою конденсатора C_{p2} на вихід каскаду подається змінна складова напруги U_{KE} , яка змінюється за законом вхідного сигналу, але що значно перевищує його по величині. Важливу роль грає резистор R_B в колі бази, який забезпечує вибір вихідної робочої точки на характеристиках транзистора і визначальний режим роботи каскаду по постійному струму. Процес підсилення можна відобразити наступним взаємозв'язком електричних величин:

$$U_{m_{вх}} \rightarrow I_{Bm} \rightarrow I_{Km} \rightarrow I_{Km} R_K \rightarrow (U_{KEm} = E_{ж} - I_{Km} R_K) = U_{m_{вих}} \gg U_{m_{вх}}$$

Дійсно розглядаючи спочатку рисунок 1.5, а, а потім рисунок 1.5 б, можна переконатися в тому, що напруга вхідного сигналу з амплітудою $U_{m_{вх}} = U_{BEm}$ змінює величину струму бази. Ці зміни базового струму викликають в колекторному колі пропорційні зміни струму колектора і напруги на колекторі, причому амплітуда колекторної напруги (з врахуванням масштабу по осі абсцис) виявляється значно більше амплітуди напруги на базі.

Для здобуття найменших спотворень вихідного сигналу робочу точку P слід розташовувати на середині прямої навантаження AB , побудованої в сімействі вихідних характеристик транзистора.

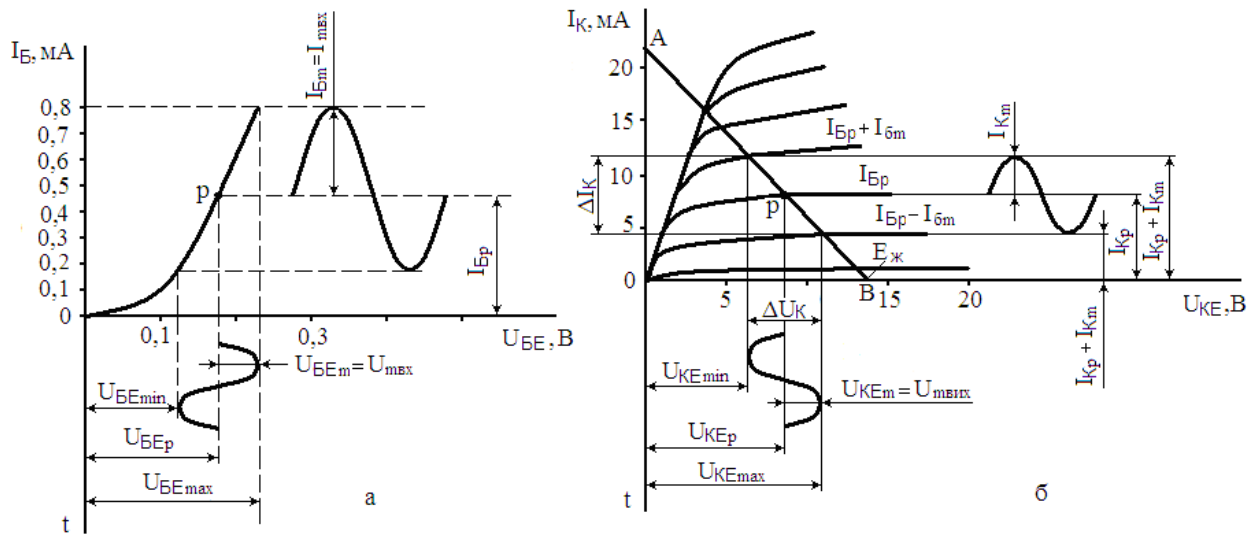


Рисунок 1.5 – Графічне пояснення процесу підсилення сигналу схемою із загальним емітером

З рисунку 1.5, б видно, що положення робочої точки Р відповідає струму зсуву в колі бази $I_{Бр}$. Для здобуття вибраного режиму необхідно в підсилювачі забезпечити необхідну величину струму зсуву в колі бази. Для цього служить резистор R_B в схемі на рисунку 1.4. Величину опору цього резистора розраховують по формулі:

$$R_B = \frac{E_{ж} - U_{БЕр}}{I_{Бр}} \approx \beta \frac{E_{ж}}{I_{Кр}}, \quad (1.7)$$

де $I_{Бр}$ та $I_{Кр}$ – постійні складові струму бази і колектора у вибраних робочих точках Р відповідно. Схема, яка приведена на рисунку 1.4 зветься схема з фіксованим базовим током.

Схема з фіксованою напругою зсуву на базі представлена на рисунку 1.6. У цій схемі резистори R_1 і R_2 підключені паралельно джерелу живлення $E_{ж}$, складають ділник напруги. Опори ділника визначаються із співвідношень:

$$R_1 = \frac{E_{ж} - U_{БЕр}}{I_{Д} + I_{Бр}} \quad (1.8)$$

$$R_2 = \frac{U_{БЕр}}{I_{Д}} \quad (1.9)$$

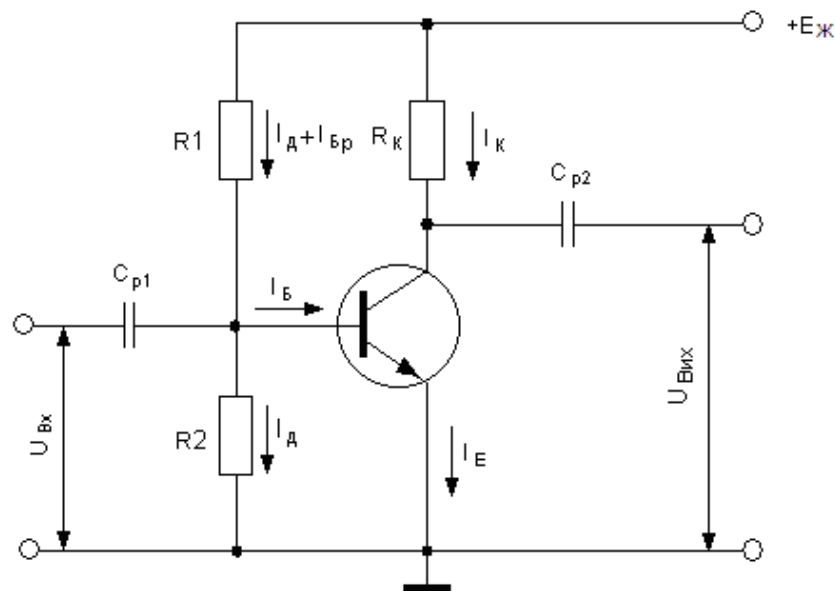


Рисунок 1.6 - Резистивний підсилювальний каскад на біполярному транзисторі з фіксованою напругою зсуву на базі

Струм діляника I_D зазвичай вибирають в межах:

$$I_D = (2 \div 5)I_{Bp} \quad (1.10)$$

При побудові схем транзисторних підсилювачів доводиться приймати заходи для стабілізації положення робочої точки на характеристиках. Основний дестабілізуючий чинник, який порушує стійку роботу транзисторної схеми – вплив температури. Найбільшого поширення набула схема приведена на рисунку 1.7.

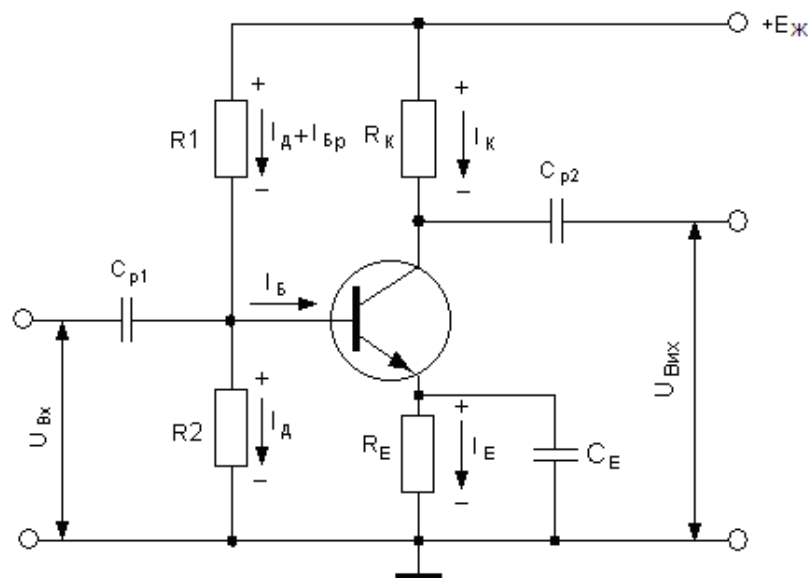


Рисунок 1.7 – Схема термостабілізації режиму транзисторного каскаду

У цій схемі назустріч фіксованій прямій напрузі зсуву, яка знімається з резистора R_2 , включена напруга, що виникає на резисторі R_E при проходженні через нього струму емітера I_E .

При збільшенні температури, постійна складова колекторного струму зростає.

При збільшенні температури, постійна складова колекторного струму зростає. Оскільки $I_E = I_K + I_B$, це збільшення струму I_K приведе до збільшення струму емітера I_E і падіння напруги на резисторі R_E . В результаті напруга між емітером і базою U_{BE} зменшиться, що приведе до зменшення струму бази I_B , а отже і струму колектора I_K . Навпаки, якщо з якої-небудь причини колекторний струм зменшиться, то зменшиться і напруга на резисторі R_E , а пряма напруга U_{BE} зростає. При цьому збільшиться струм бази і струм колектора.

У більшості випадків резистор R_E шунтується конденсатором C_E досить великої ємкості. Це робиться для відведення змінної складової струму емітера від резистора R_E .

2 Розрахунок структурної схеми підсилювача

2.1 Визначення числа каскадів

Для багатокаскадного підсилювача (рис. 2.1) коефіцієнт підсилення визначається за формулою:

$$K = U_{\text{вих.}} / U_{\text{вх.}} = \sum_{k=1}^n K_k \quad (2.1)$$

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

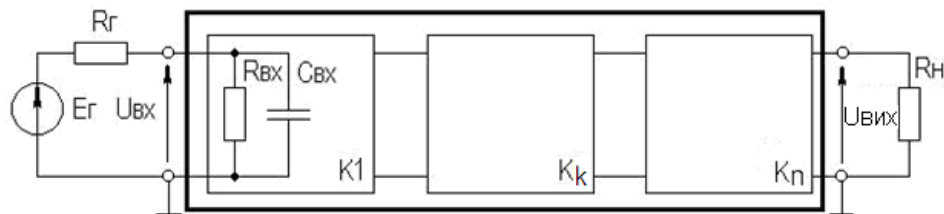


Рисунок 2.1 – Схема електрична структурна багатокаскадного підсилювача

З урахуванням коефіцієнта передачі вхідного кола коефіцієнт підсилення визначається як:

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

де E_{Γ} – електро-рухаюча сила (ЕРС) джерела сигналу; R_{Γ} - внутрішній опір джерела сигналу; $R_{\text{вх}}$ - вхідний опір підсилювача.

Для низькочастотних підсилювальних пристроїв орієнтовно кількість каскадів можна визначити, вважаючи в (4.1) усі каскади однаковими з $K_k \approx 20$ дБ, таким чином:

$$n = \frac{K(\text{дБ})}{20}$$

2.2 Розподіл спотворень по каскадах

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

$$M = \sum_{i=1}^{n+1} M_k \quad (2.2)$$

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 (4.2) виконується $(n+1)$ разів через необхідність врахування впливу вхідного кола, утвореного R_{Γ} , $R_{\text{вх}}$ і $C_{\text{вх}}$ (рис. 2.1).

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:

$$M_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n M_k \quad (2.3)$$

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 блокувальні 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 номіналів цих елементів. З (4.3) випливає, що при рівномірному розподілі низькочастотних спотворень, їх частка (в децибелах) на кожен з n -елементів визначається 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...1,5 рази.

2.3 Вибір транзистора

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

- гранично допустимого струму колектора (при узгодженні на виході)

$$I_{K_{\max}} \geq (1,5...2)U_{H_{\max}}$$

- гранично допустимої напруги колектор-емітер:

$$U_{KE_{\max}} \geq (2...3)E_{\text{ж}}$$

- гранично допустимої потужності розсіювання на колекторі:

$$P_{K_{\max}} \geq (2...3)P_K$$

- граничної частоти підсилення транзистора по струму в схемі з 3Е

$$f_{ep} \geq (10...100)f_B$$

3 Розрахунок схеми двохкаскадного підсилювача низької частоти

3.1 Розрахунок схеми кінцевого каскаду

1. Схема електрична розрахункова кінцевого каскаду наведена на рисунку 3.1.

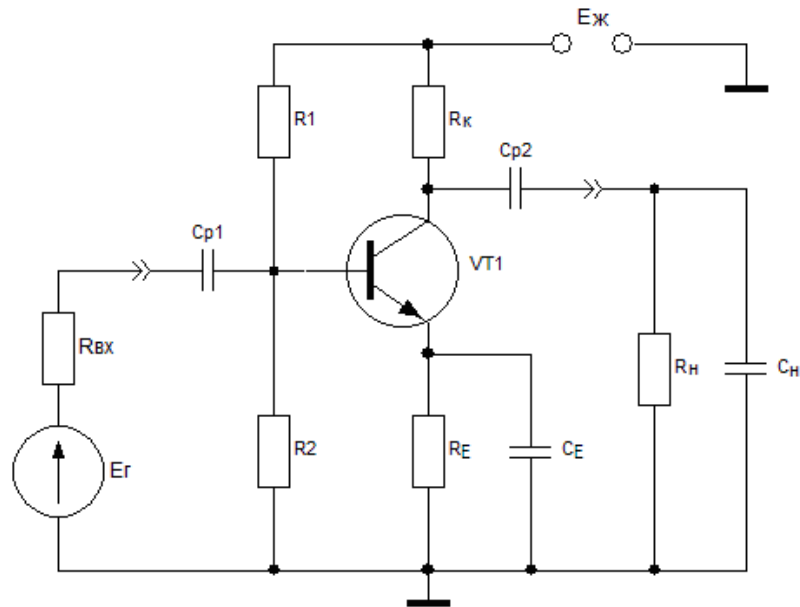


Рисунок 3.1 - Схема електрична розрахункова кінцевого каскаду

2. Задамося орієнтовною величиною напруги насичення транзистора:

$$U_{KE \text{ нас}} = 1\text{В}$$

і розраховуємо необхідну величину напруги джерела живлення для підсилювального пристрою

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

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

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

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

3. 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 В).

4. Здаємося падінням напруги на R_E :

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

Визначаємо еквівалентний опір навантаження:

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

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

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

Напруга колектор-емітер в робочій точці визначається за формулою:

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

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

6. Розраховуємо величину потужності розсіювання на колекторі транзистора в точці спокою

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

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

7. Розраховуємо розмах імпульсу струму в навантаженні

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

8. Знаючи напругу живлення підсилювача і максимальний струм, який протікає через навантаження, обираємо транзистор для вихідного каскаду за наступними умовами:

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

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

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

$$f_{cp} \geq f_{\phi} \text{ (кГц)}$$

Привести таблицю основних параметрів обраного транзистора.

9. Визначаємо параметри вибраного транзистору на основі довідкових даних таким чином:

- опір бази транзистора

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

де τ_{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

$$C_{E\partial} = 1 / (2\pi f_{ep} r_E) \text{ (нФ)},$$

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

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.

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

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

11. Знаходимо величину вхідної провідності транзистора:

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

12. 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.

13. 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.

14. 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.

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

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

16. Визначаємо величину резистора (R_E) в колі емітера транзистора

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

17. 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 В).

18. 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 $\gamma = 2\text{мВ}/^\circ\text{C}$, ΔT – інтервал робочих температур (44 $^\circ\text{C}$).

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

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

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

20. 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 В).

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

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

22. 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 В).

23. 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.

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

24. 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.

25. Визначимо величину ємності конденсатора блокування (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 В).

26. 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 В).

27. Розрахуємо вхідний опір каскаду по змінному струму:

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

28. Розрахуємо величину коефіцієнта підсилення каскаду:

$$K_U = S_0 \cdot R_{екв}.$$

29. Розрахуємо величину вхідної напруги підсилювального каскаду:

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

30. Для підтвердження правильності виконаних розрахунків проводимо моделювання і визначення основних параметрів розрахованого каскаду за допомогою програмного забезпечення Electronics Workbench (рис. 3.2).

31. Привести аналіз характеристик кінцевого каскаду, які отримані на Bode Plotter. Привести амплітудно-частотну характеристику, яка отримана функцією Analysis Graphs (рис. 3.3).

32. Привести схему електричну принципову моделі кінцевого каскаду (рис. 3.4).

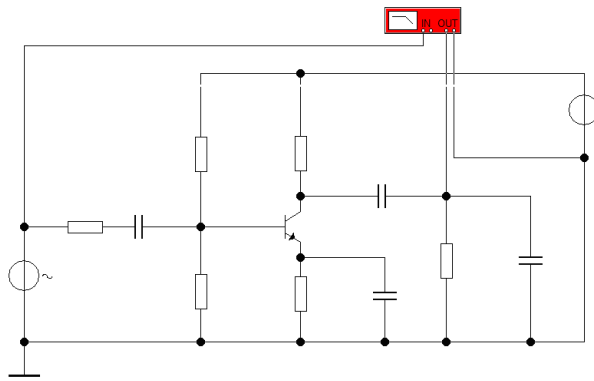


Рисунок 3.2 - Моделювання і визначення основних параметрів розрахованого каскаду за допомогою програмного забезпечення Electronics Workbench

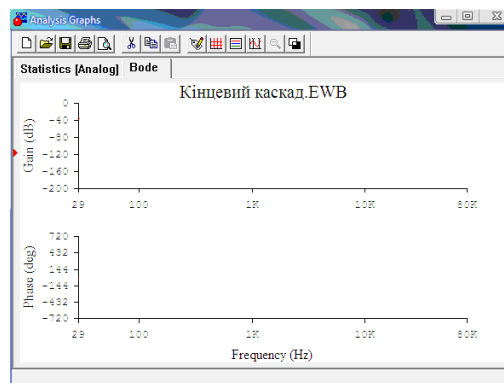
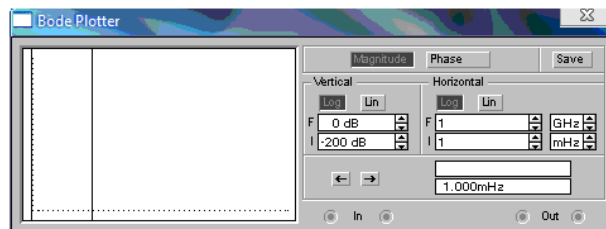


Рисунок 3.3 - Амплітудно-частотна характеристика кінцевого каскаду

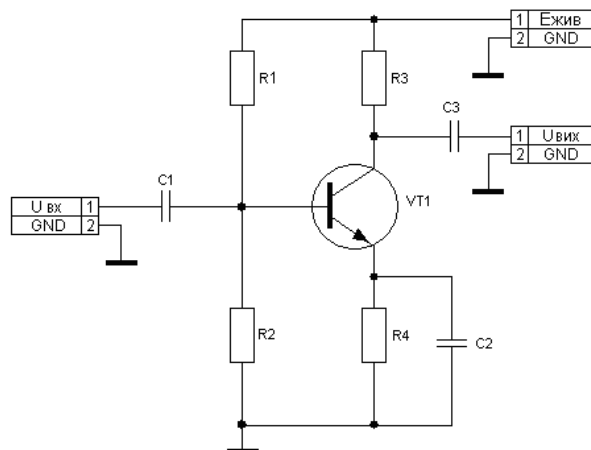


Рисунок 3.4 - Схема електрична принципова моделі кінцевого каскаду

3.2 Розрахунок параметрів каскаду попереднього підсилення

33. Аналогічно попереднім розрахункам розраховуємо необхідну величину напруги джерела живлення для підсилювального каскаду (рис. 3.5).

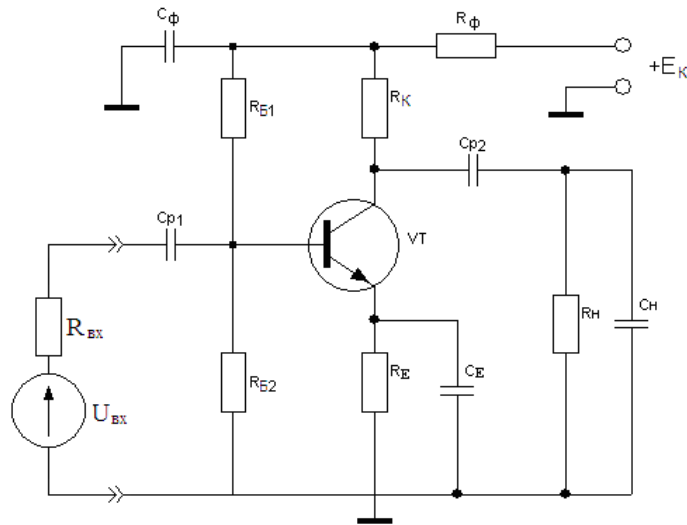


Рисунок 3.5 – Схема електрична розрахункова каскаду попереднього підсилення

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

Обираємо величину напруги джерела живлення.

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

34. Опір у колі колектора:

$$R_K = 0,5R_{вх} \text{ (Ом).}$$

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

35. Падіння напруги на R_E :

$$U_{RE} = 0,25E_K \text{ (В).}$$

36. Визначаємо еквівалентний опір навантаження:

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

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

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

38. Напруга колектор-емітер в робочій точці визначається за формулою:

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

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

39. Розраховуємо величину потужності яка розсіюється на колекторі транзистора в точці спокою:

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

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

40. Розраховуємо розмах імпульсу струму в навантаженні

$$I_{H \max} = \frac{2,82 \cdot U_{вих}}{R_{вх}} \text{ (мкА)}$$

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

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

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

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

$$f_{cp} \geq f_{с} \text{ (кГц)}$$

Привести таблицю основних параметрів обраного транзистора.

42. Визначаємо параметри вибраного транзистору на основі довідкових даних таким чином:

- опір бази транзистора

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

де $\tau_{зз}$ - 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

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

$$f_{ep} = |h_{21E}| \cdot f_{ep3E} \text{ (Гц)}$$

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.

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

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

44. Знаходимо величину вхідної провідності транзистора:

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

45. 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

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

Привести вольт-амперні характеристики обраного транзистора.

46. 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.

47. 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.

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

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

49. Визначаємо величину резистора (R_E) в колі емітера транзистора

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

50. Розрахуємо потужність розсіювань резистора R_E

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

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

51. 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%.

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

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

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

52. Розрахуємо величину резистора R_{B1} діляника в колі для зсуву робочої точки транзистора:

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

53. Розрахуємо потужність розсіювань резистора R_{B1} :

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

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

54. Розрахуємо величину резистора ($R_{Б2}$) дільника в колі для зсуву робочої точки транзистора:

$$R_{Б2} = \frac{I_{Кр} \cdot R_E + U_{БЕ}}{3I_{Бр}} \text{ (кОм)}$$

55. Розрахуємо потужність розсіювань резистора $R_{Б2}$:

$$P_{РБ2} = 3I_{Бр}^2 \cdot R_{Б2} \text{ (мВт)}.$$

У якості резистора $R_{Б2}$ застосуємо резистор С2-23-0,125-**Н** кОм $\pm$ 10%. **Н** обираємо згідно з стандартизованим номінальним рядом (Додаток В).

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

$$M_{нр} = M_{нб} = \frac{M_k^2}{2} \text{ (разів)}$$

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

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

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

58. Визначимо величину ємності конденсатора блокування (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 В).

59. 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 В).

60. Розрахуємо вхідний опір каскаду по змінному струму:

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

61. Розрахуємо величину коефіцієнта підсилення каскаду:

$$K_U = S_0 \cdot R_{екв}.$$

62. Розрахуємо величину вхідної напруги підсилювального каскаду:

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

63. Розрахуємо величину опору резистора R_ϕ та ємність конденсатора C_ϕ які утворюють ланку фільтру через яку живиться каскад попереднього підсилення:

$$I_\phi = (3 \div 5) \cdot I_{Br} \text{ (мкА)}$$

$$R_\phi = \frac{E_{ж} - E_{к}}{I_{кр} + I_\phi + I_{Br}} \text{ (кОм)}$$

$$C_\phi = \frac{10 \dots 20}{2\pi f_n R_\phi} \text{ (мкФ)}$$

У якості резистора R_ϕ застосуємо резистор С2-23-0,125-Н кОм $\pm$ 10%.

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

64. Для підтвердження правильності виконаних розрахунків проводимо моделювання і визначення основних параметрів розрахованого каскаду в середовищі Electronics Workbench.

Привести схему моделювання і визначення основних параметрів розрахованого каскаду в середовищі Electronics Workbench. (рис. 3.6).

Привести амплітудно-частотну характеристику розрахованого двохкаскадного підсилювача низької частоти, яка отримана на Bode Plotter і функцією Analysis Graphs (рис. 3.7).

Висновок. Згідно приведеного рисунка коефіцієнт підсилення каскаду складає ____ дБ, нижня межа смуги пропускання рівна ____ Гц, а верхня межа смуги пропускання складає ____ кГц.

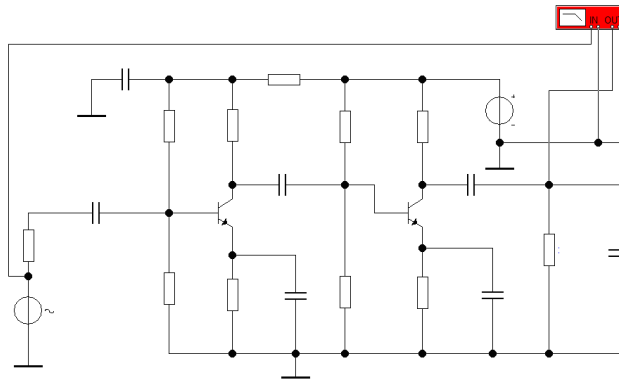


Рисунок 3.6 - Схема електрична принципова моделі двохкаскадного підсилювача

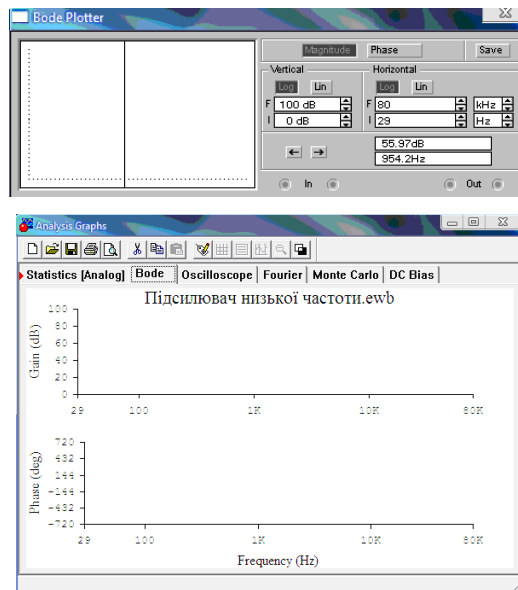


Рисунок 3.7 - Амплітудно-частотна характеристика двохкаскадного підсилювача

Привести принципову схему моделі двокаскадного підсилювача (рис. 3.8). Номінали елементів приведені в Додатку 1 до курсового проєкту.

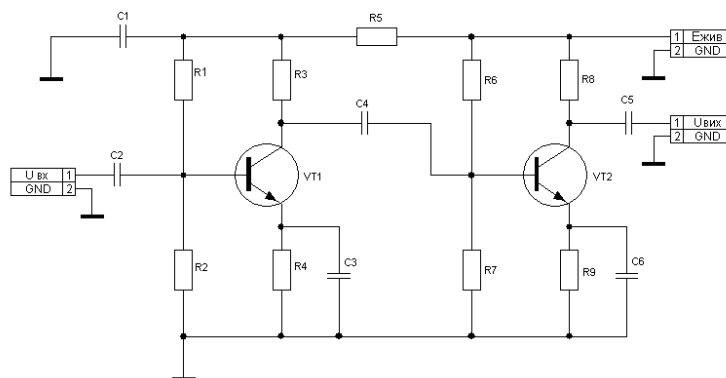


Рисунок 3.8 – Схема електрична принципова двохкаскадного підсилювача низької частоти

Привести таблицю переліку елементів принципової схеми двокаскадного підсилювача низької частоти (рис. 3.8).

[illegible]

Рисунок 3.9 – Перелік елементів у Додатку Е до курсового проекту

Висновки (приклад)

У курсовій роботі розглянуті принципи розрахунку вузлів двокаскадного підсилювача низької частоти. Розраховані схеми кінцевого та попереднього каскадів.

Результати моделювання підтверджують правильність виконаних розрахунків.

Аналіз функціонування розроблених схем показує відповідність завданню та загальній теорії функціонування підсилювачів низької частоти. Відхилення коефіцієнтів посилення від розрахованих свідчать про необхідності коригування вхідних даних завдання.

При виконанні курсового проекту використані програмні засоби побудови електричних схем Electronics Workbench 5.12, та SPlan 5.

5 Порядок виконання курсового проекту

5.1 Варіанти тем до виконання літературного огляду

1. Пасивні компоненти аналогової схемотехніки.
2. Діодні схеми аналогової схемотехніки.
3. Схеми включення біполярних транзисторів.
4. Статичні вольт-амперні характеристики біполярних транзисторів.
5. Типи та схеми включення польових транзисторів.
6. Основні особливості та класифікація тиристорів.
7. Параметри та характеристики тиристорів.
8. Ключі на біполярних транзисторах.
9. Ключі на польових транзисторах.
10. Ключі на тиристорах.
11. Класифікація підсилювачів.
12. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі.
13. Підсилювальний каскад на польовому транзисторі.
14. Диференціальний каскад.
15. Складені транзистори.
16. Однотактні вихідні каскади.
17. Двотактні вихідні каскади.
18. Широкосмугові підсилювачі.
19. Структурні схеми операційних підсилювачів.
20. Диференціальний підсилювач.
21. Зворотні зв'язки в операційному підсилювачі.
22. Інвертуючий підсилювач на ОП.
23. Неінвертуючий підсилювач на ОП.
24. Повторювач напруги на ОП.
25. Підсилювач, який підсумовує, на ОП.
26. Інтегруючий підсилювач на ОП.
27. Диференціюючий підсилювач на ОП.

28. Логарифмуючий підсилювач на ОП.

29. Компаратор напруги на ОП.

30. Підсилювач потужності на ОП.

5.2 Варіанти розрахункової частини курсового проекту

Таблиця 5.1 - Вихідні дані для розрахунку підсилювача

Номер варіанта	R _н , кОм	C _н , пФ	f _н , Гц	f _в , Гц	K _У	U _{вих} , В	R _{вх} , кОм	T _в , °С
1	0,30	200	100	5·10 ⁴	70	4	2,0	35
2	0,49	170	26	9·10 ⁴	56	8	1,5	40
3	0,46	200	27	7·10 ⁴	67	5	2,0	45
4	0,47	150	28	5·10 ⁴	75	7	2,5	50
5	0,47	150	28	3·10 ⁴	89	6	2,7	35
6	0,50	100	20	4·10 ⁴	94	8	2,9	40
7	1,1	50	21	2·10 ⁴	46	4	3,0	45
8	1,2	45	25	7·10 ⁴	57	7	1,0	50
9	1,3	40	27	9·10 ⁴	65	5	1,5	35
10	1,4	40	26	8·10 ⁴	79	8	2,0	40
11	1,5	40	29	5·10 ⁴	88	6	2,5	45
12	1,6	30	27	3·10 ⁴	97	5	2,7	50
13	1,7	25	20	2·10 ⁴	34	7	2,9	35
14	1,8	20	28	7·10 ⁴	45	6	3,0	40
15	1,9	10	25	8·10 ⁴	56	8	1,0	45
16	2,0	10	27	9·10 ⁴	69	4	1,5	50
17	2,2	10	26	5·10 ⁴	77	5	2,0	35
18	2,4	8	29	6·10 ⁴	84	8	2,5	40
19	2,6	8	21	4·10 ⁴	98	6	2,7	45
20	2,8	8	25	2·10 ⁴	99	7	2,9	50
21	3,0	5	29	8·10 ⁴	44	4	3,0	35
22	3,2	5	26	9·10 ⁴	56	8	1,0	40
23	3,4	5	27	7·10 ⁴	67	5	1,5	45
24	3,5	5	28	5·10 ⁴	75	7	2,0	50
25	3,6	5	28	3·10 ⁴	89	6	2,5	35
26	3,7	5	20	4·10 ⁴	94	8	2,7	40
27	3,9	5	21	2·10 ⁴	46	4	2,9	45
28	4,0	5	25	7·10 ⁴	57	7	3,0	50
29	4,6	5	27	9·10 ⁴	65	5	3,5	45
30	5,0	5	26	8·10 ⁴	79	8	3,7	40

Перелік джерел

1. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Схемотехніка електронних систем: Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник. Київ : Вища шк., 2004. 366 с.
2. Воробйова. О. М., Іванченко В. Д.. Основи схемотехніки: підручник. [2-е вид.]. Одеса : Фенікс, 2009. 388 с.
3. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Критська Т.В. Аналогова та оптосхемотехніка. Методичні рекомендації до лабораторних занять для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 82 с.
4. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Критська Т.В. Аналогова та оптосхемотехніка. Методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 68 с.

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

Кафедра: Електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення

КУРСОВИЙ ПРОЄКТ **(РОБОТА)**

з дисципліни *Аналогова та оптосхемотехніка*

на тему: «Розрахунок двохкаскадного підсилювача низької частоти»

Студента (ки) _____ курсу, групи _____
спеціальності _____

(прізвище та ініціали)

Керівник _____

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

Національна шкала _____

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя – 20__ рік

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

Кафедра: Електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення

ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ)

студенту групи _____
(шифр групи) _____ (П.І.Б.)

з дисципліни _____

на тему: _____

Термін здачі проєкту (роботи) _____
(тиждень або дата)

Вихідні данні до проєкту (роботи) _____

_____ (можливі додаткові вихідні данні у вигляді схем, таблиць тощо, які додаються до бланку завдання)

Виконав: _____ студент групи _____
(підпис) _____ (шифр групи) _____ (П.І.Б.)

Зміст пояснювальної записки _____

Перелік графічного матеріалу _____

Дата видачі завдання _____

Керівник проєкту (роботи) _____
(підпис) _____ (наук. ступінь, вчене звання) _____ (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис) _____ (шифр групи) _____ (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Курсовий проект містить: 25 сторінок, 9 рисунків, 2 таблиці, 5 джерел літератури.

Мета проекту: розрахунок двокаскадного підсилювача низької частоти за заданими параметрами

Задачі проекту:

- провести розрахунок заданих вузлів двокаскадного підсилювача низької частоти;
- провести аналіз функціонування розробленої схеми підсилювача

В курсовому проекті розглядаються методи розрахунку вузлів двокаскадного підсилювача низької частоти, принципи побудови їх схем електричних принципів.

КОЕФІЦІЄНТ ПОСИЛЕННЯ, ТРАНЗИСТОР, КАСКАД, ГРАНІЧНА ЧАСТОТА, СТРУМ, НАПРУГА, ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, РЕЗИСТОР

Зміст

	Стор.
Вступ	3
1. Типи підсилювачів	3
1.1 Коефіцієнти посилення	5
2. Розрахунок двокаскадного підсилювача низької частоти	8
2.1 Розрахунок параметрів кінцевого каскаду	9
2.2 Розрахунок параметрів каскаду попереднього підсилення	25
Висновки	34
Література	38

Вступ

Посилення сигналу зазвичай супроводиться деякою зміною його форми. Відхилення форми посиленого вихідного сигналу від форми вхідного називається спотворенням. Необхідні відомості про підсилювач повинні включати не лише кількісну оцінку самого ефекту посилення, але і міру спотворень підсилюваних коливань. Суму відомостей, які характеризують основні властивості підсилювача, називають його показниками.

До основних показників підсилювача відносяться: коефіцієнт посилення, амплітудна, частотна, фазова і перехідна характеристики підсилювача, допустимий рівень лінійних і нелінійних спотворень, рівень власних шумів пристрою, його коефіцієнт корисної дії, необхідний рівень вихідного сигналу на заданому навантаженні, динамічний діапазон зміни вхідного і вихідного сигналів.

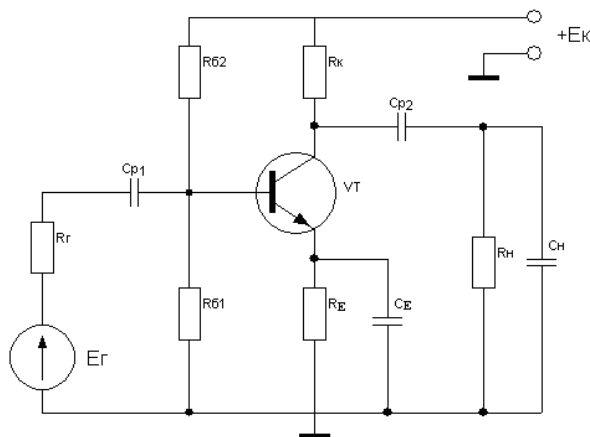


Рисунок 2.1 – Схема електрична принципова кінцевого каскаду

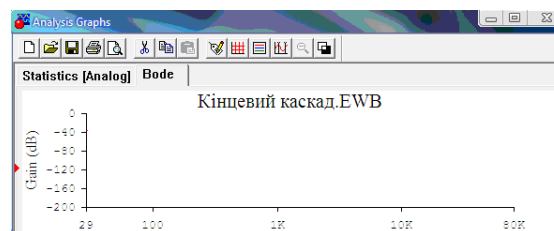


Рисунок 2.8 – Амплітудно-частотна характеристика каскаду

Таблиця 2.1 – Основні параметри транзистора КТ3102Б

$U_{\text{кетмах}}$ - максимально допустима напруга колектор-емітер, В	60
$I_{\text{кмах}}$ - максимально допустимий постійний струм колектора, мА	100
$P_{\text{кмах}}$ - постійна потужність колектора, Вт не більш	0,25
h_{21e} - статичний коефіцієнт передачі струму в схемі із загальним емітером КТ 3102Б,	200÷500
$I_{\text{кбо}}$ - зворотний струм колектора, мА	0,05
$\tau_{\text{ос}}$ - постійна часу ланцюга колектора, пс	100
$C_{\text{к}}$ – постійна часу ланцюга колектора, пФ	6
$T_{\text{кмах}}$ - максимальна температура переходу, °С	125
$f_{\text{гр}}$ – граничная частота, МГц	0,2

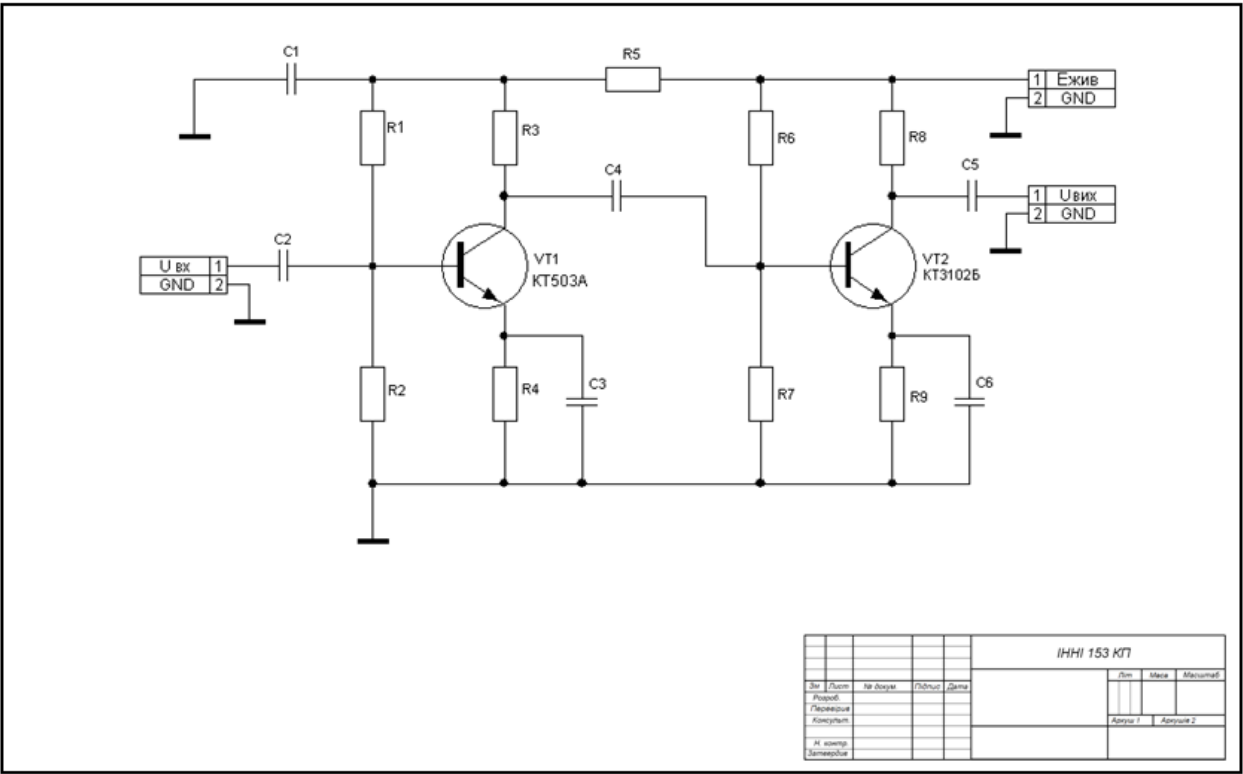
Література

1. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Схемотехніка електронних систем: Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник. Київ : Вища шк., 2004. 366 с.
2. Воробйова. О. М., Іванченко В. Д.. Основи схемотехніки: підручник. [2-е вид.]. Одеса : Фенікс, 2009. 388 с.
3. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В Аналогова та оптосхемотехніка. 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. 43 с.
4. Верьовкін Л.Л., Світанько М.В., Критська Т.В. Аналогова та оптосхемотехніка. Методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 176 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 68 с.

Оформлення штампу графічної частини

					ІННІ 153 КП					
						Лім		Маса	Масштаб	
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.										
Перевірів										
Консульт.						Аркуш 1		Аркушів 2		
Н. контр.										
Затвердив										

Оформлення креслення



Додаток В

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

Додаток Г

Параметри і характеристики транзисторів, що рекомендуються до застосування в підсилювачах низької частоти

Найменування	Тип	U_{KE} , В	I_{Kmax} , мА	P_{Kmax} , Вт	h_{21E}	I_{KBp} , мкА
КТ502А	р-п-р	25	150(350)	0.35	40-120	<1
КТ502Б		25	150(350)	0.35	80-240	<1
КТ502В		40	150(350)	0.35	40-120	<1
КТ502Г		40	150(350)	0.35	80-240	<1
КТ502Д		60	150(350)	0.35	40-120	<1
КТ502Е		80	150(350)	0.35	40-120	<1
КТ503А	п-р-п	25	150(350)	0.35	40-120	<1
КТ503Б		25	150(350)	0.35	80-240	<1
КТ503В		40	150(350)	0.35	40-120	<1
КТ503Г		40	150(350)	0.35	80-240	<1
КТ503Д		60	150(350)	0.35	40-120	<1
КТ503Е		80	150(350)	0.35	40-120	<1
КТ315А		25	100	0.15	30-120	<0.5
КТ315Б		20	100	0.15	50-350	<0.5

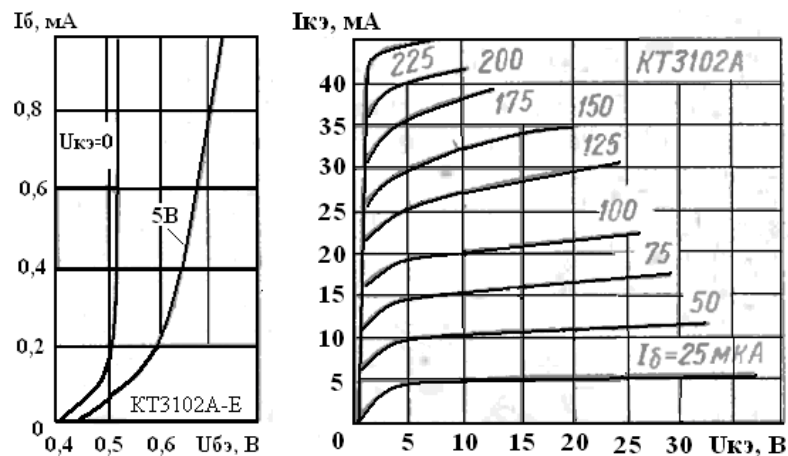
Найменування	Тип	U_{KE} , В	I_{Kmax} , мА	P_{Kmax} , Вт	h_{21E}	I_{KBp} , мкА
КТ315В		40	100	0.15	30-120	<0.5
КТ315Г		35	100	0.15	50-350	<0.5
КТ315Г1		35	100	0.15	100-350	<0.5
КТ315Д		40	100	0.15	20-90	<0.6
КТ315Е		35	100	0.15	50-350	<0.6
КТ315Ж		20	50	0.1	30-250	<0.01
КТ315И		60	50	0.1	>30	<0.1
КТ315Н		20	100	0.1	50-350	<0.6
КТ315Р		35	100	0.1	150-350	<0.5
КТ361А	р-п-р	25	100	0.15	20-90	<1
КТ361Б		20	100	0.15	50-350	<1
КТ361В		40	100	0.15	40-160	<1
КТ361Г		35	100	0.15	50-350	<1
КТ361Г1		35	100	0.15	100-350	<1
КТ361Д		40	50	0.15	20-90	<1
КТ361Е		35	50	0.15	50-350	<1
КТ361Ж		10	50	0.15	50-350	<1
КТ361И		15	50	0.15	>250	<1
КТ361К		60	50	0.15	50-350	<1
КТ3102А	п-р-п	50	100(200)	0.25	100-200	<0.05
КТ3102Б		50	100(200)	0.25	200-500	<0.05
КТ3102В		30	100(200)	0.25	200-500	<0.015
КТ3102Г		20	100(200)	0.25	400-1000	<0.015
КТ3102Д		30	100(200)	0.25	200-500	<0.015
КТ3102Е		20	100(200)	0.25	400-1000	<0.015
КТ3102Ж		20	100(200)	0.25	100-250	<0.05

Найменування	Тип	U_{KE} , В	I_{Kmax} , мА	P_{Kmax} , Вт	h_{21E}	I_{KBp} , мкА
КТ3102И		20	100(200)	0.25	200-500	<0.05
КТ3102К		20	100(200)	0.25	200-500	<0.015
КТ3102АМ		50	100(200)	0.25	100-200	<0.05
КТ3102БМ		50	100(200)	0.25	200-500	<0.05
КТ3102ВМ		30	100(200)	0.25	200-500	<0.015
КТ3102ГМ		20	100(200)	0.25	400-1000	<0.015
КТ3102ДМ		30	100(200)	0.25	200-500	<0.015
КТ3102ЕМ		20	100(200)	0.25	400-1000	<0.015
КТ3102ЖМ		20	100(200)	0.25	100-250	<0.05
КТ3102ИМ		20	100(200)	0.25	200-500	<0.05
КТ3102КМ		20	100(200)	0.25	200-500	<0.015

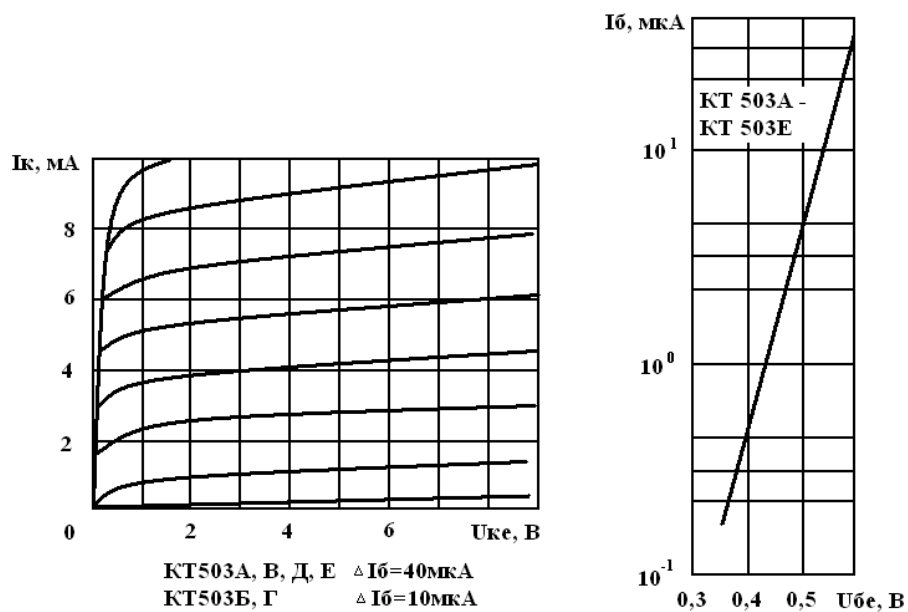
Додаток Д

Вольт-амперні характеристики деяких рекомендованих транзисторів

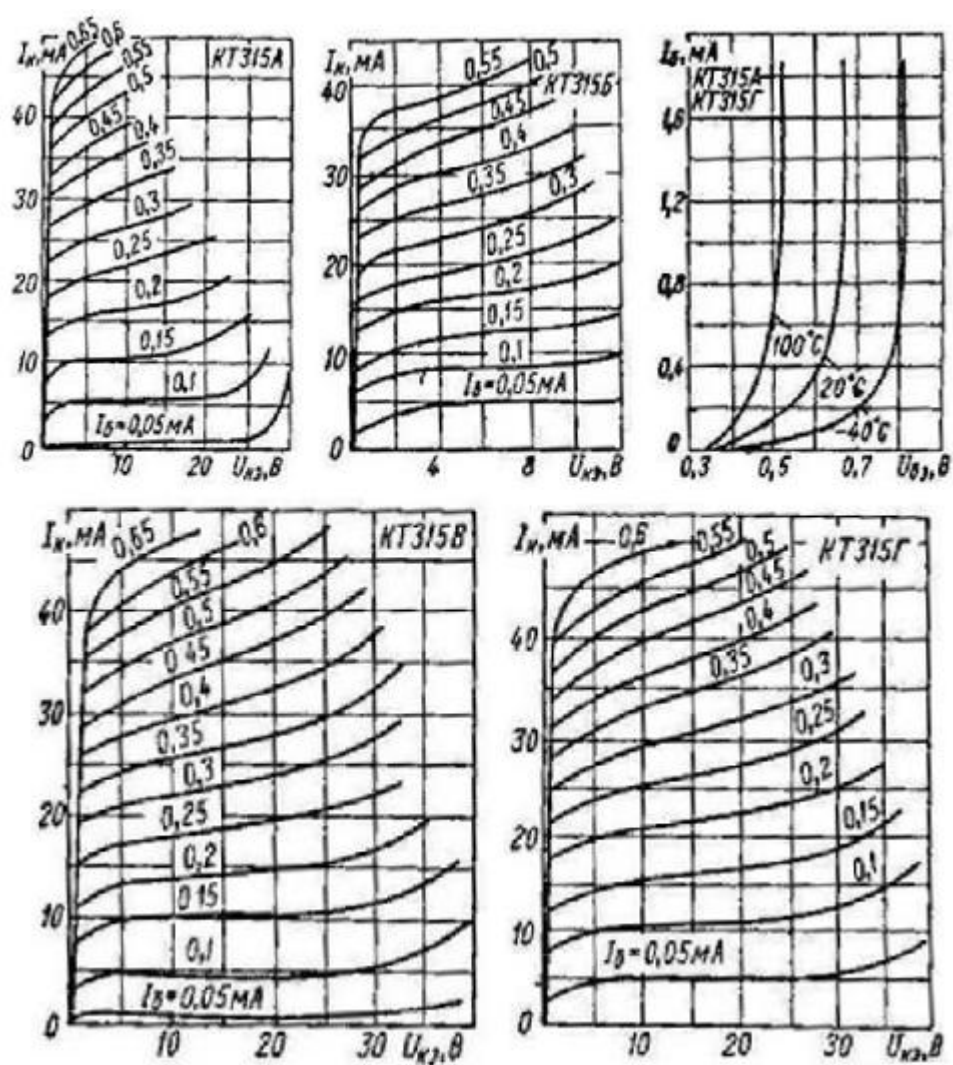
КТ3102



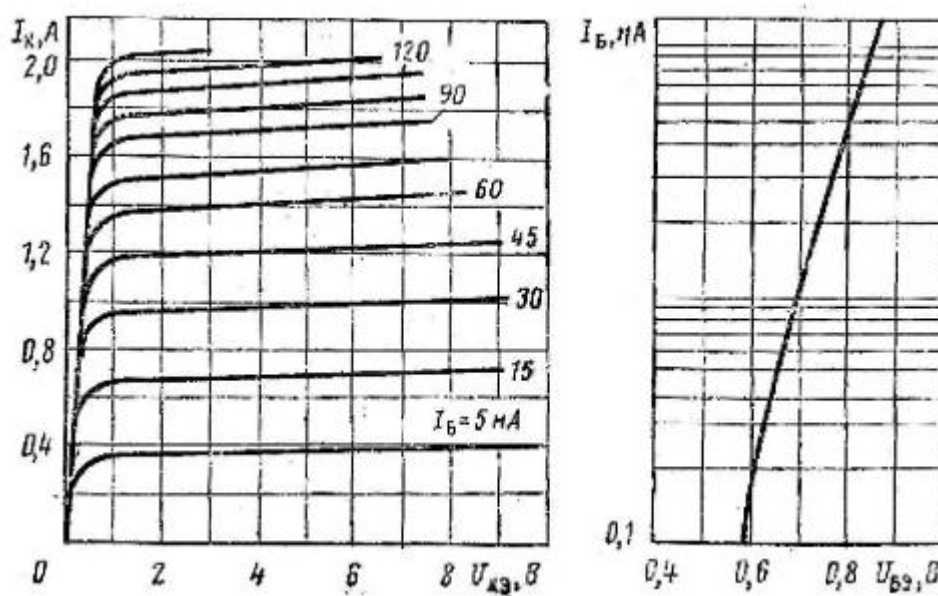
KT 503



KT315



KT817



KT815

