

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсової роботи з дисципліни

«ПРИСТРОЇ АНАЛОГОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ»

(для здобувачів вищої освіти денної та заочної форми навчання спеціальностей

171 «Електроніка», 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,

153 «Мікро- та наносистемна техніка»)

(Електронне видання)

ЗАТВЕРДЖЕНО

на засіданні кафедри

електронних апаратів

Протокол № 9 від 21.04 2021 р.

Сєверодонецьк 2021

УДК: 621.38 (076)

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Пристрої аналогової електроніки» (для здобувачів вищої освіти спеціальностей: 171 «Електронні апарати», 172 «Телекомунікації та радіотехніка» та 153 «Мікро- та наносистемна техніка») (Електронне видання) / Уклад.: Ю.Е. Паеранд, М.І. Карманов. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. – 37 с.

Вказівки розроблені в відповідності до нормативної навчальної програми, містять теоретичні відомості, необхідні для виконання курсової роботи за змістом робочої програми дисципліни, приклад розрахунку параметрів підсилювача потужності, перелік рекомендованої літератури, додатки та варіанти завдань курсової роботи.

Методичні вказівки розраховані на здобувачів вищої освіти денної та заочної форми навчання.

Укладачі:

Ю.Е. Паеранд, к.т.н., проф.

М.І. Карманов, ст., викладач

Рецензент:

О.І. Захожай, д.т.н., доц.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ.....	4
1 Загальні теоретичні відомості	6
1.1 Основні показники якості підсилювачів	6
1.2 Зворотні зв'язки в підсилювачах	8
1.3 Вплив паразитних зворотних зв'язків.....	11
1.4 Багатокаскадні підсилювачі	11
1.5 Підсилювачі потужності	13
1.6 Режими роботи транзисторів у вихідних каскадах	14
1.7 Схеми безтрансформаторних вихідних каскадів	14
2 Розробка структурної і принципової схем підсилювача	16
2.1 Розробка та обґрунтування структурної схеми підсилювача	16
2.2 Розробка та обґрунтування принципової схеми підсилювача	18
3 Приклад виконання курсової роботи	22
3.1 Електричний розрахунок підсилювача	22
3.2 Принцип роботи підсилювача	26
Список літератури	28
Додаток А. Ряди номінальних опорів резисторів та ємностей конденсаторів	29
Додаток Б. Стандартний ряд номінальних потужностей резисторів	29
Додаток В. Стандартний ряд для вибору напруги живлення	29
Додаток Г. Параметри операційних підсилювачів	30
Завдання для курсової роботи	35

ВСТУП

В наш час електричні сигнали використовують у всіх галузях науки та техніки. Так, у пристроях електроніки, радіо, телебачення, електрозв'язку, електровимірювань вони передають інформацію на відстань. Процеси у техніці, як і у живій природі, супроводжуються появою електричних потенціалів та струмів. У більшості випадків значення електричних сигналів, відображаючих інформацію про процеси та явища у техніці, дуже малі. Тому, щоб скористатися цими сигналами, їх необхідно підсилити за допомогою підсилюючих пристроїв – підсилювачів. Підсилювачі у складі вимірювальних та спеціальних пристроїв застосовуються сьогодні у всіх галузях народного господарства. За їх допомогою слабкі електричні сигнали значно підсилюються, в результаті чого значення цих сигналів стають достатніми для приводу у дію різноманітних виконуючих пристроїв. Підсилювачі вперше почали застосовувати на початку XX століття для підсилення електричних сигналів, використовуючи схеми на базі електронних ламп. З середини двадцятого століття в електронній апаратурі почали застосовуватися напівпровідникові транзистори. З подальшим розвитком мікроелектронної бази в схемах підсилювачів додалися мікросхеми. Та, завдяки позитивним якостям транзисторів, і тепер електронна апаратура будується з їх застосуванням. Напівпровідникові елементи, є основою інтегральних мікросхем. Переважно на інтегральних мікросхемах в наш час виготовляють складні та високонадійні електронні підсилювачі малих розмірів, що також є досить важливою характеристикою пристроїв.

Напівпровідникові приладі завдяки малим габаритам та масі, незначному споживанню електроенергії, високій надійності та довговічності, швидкодії, точності, високій чутливості, постійно зростаючій економічності, мають широке використання. Застосування напівпровідників в електронних приладах дає можливість вирішувати проблему досягнення високих експлуатаційних параметрів при забезпеченні необхідних техніко-економічних показників [1,2].

Хоча в наш час цифрова електроніка домінує в обробці сигналів, аналогова також залишається затребуваною і розвивається достатньо швидкими темпами, так як вузлами інтегральних мікросхем є окремі функціонально визначені напівпровідникові пристрої..

Дисципліна «Пристрої аналогової електроніки» висвітлює питання обробки сигналів в аналоговому виді. Тому є сенс фахівцям зі спеціальностей 171 «Електроніка» і 172 «Телекомунікації та радіотехніка» знати основні питання аналогової електроніки та її схемні пристрої, навчитися розраховувати типові електронні схеми, які можуть бути запрограмованими та входити до складу великих інтегральних структур сучасної електроніки.

1. ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Основні показники якості підсилювачів

Коефіцієнт посилення напруги K_U - відношення напруги сигналу на виході підсилювача до напруги сигналу, підведеного до його входу.

Коефіцієнт посилення потужності K_P - відношення потужності сигналу на виході підсилювача до потужності сигналу, підведеної до його входу. Часто коефіцієнт посилення виражають в децибелах $K_{дБ} = 20 \lg K_U = 10 \lg K_P$.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) — залежність коефіцієнта посилення напруги від частоти. Елементами АЧХ є номінальний діапазон відтворюваних частот і її нерівномірність в цьому діапазоні.

Нерівномірність АЧХ — відношення найбільшого і як найменшого коефіцієнтів посилення напруги в заданому діапазоні частот.

Діапазон відтворюваних частот — діапазон частот, в межах якого нерівномірність АЧХ не перевищує заданої.

Вхідний опір — опір входу підсилювача для змінного струму. Звичайно нормують активну складову вхідного опору і вхідну ємність.

Вихідний опір — опір виходу підсилювача для змінного струму. Чим менше вихідний опір підсилювача, тим краще АЧХ по звуковому тиску.

Амплітудна характеристика підсилювача — залежність амплітуди вихідної напруги сигналу від амплітуди напруги сигналу на вході.

Нелінійні спотворення обумовлені нелінійністю вольт-амперної характеристики (ВАХ) транзисторів і характеристик намагнічування магнітопроводів трансформаторів. Ці спотворення виявляються у вигляді нових компонентів спектру частот, які відсутні у вхідному сигналі. Спотворення, пов'язані з появою на виході підсилювачів комбінаційних компонентів, називають інтермодуляційними спотвореннями. Рівень нелінійних спотворень оцінюють коефіцієнтами гармонік і інтермодуляційних спотворень (інтермодуляції).

Коефіцієнт гармонік — відношення середньої квадратичної суми вищих гармонік до середньої квадратичної суми всіх гармонік сигналу.

Коефіцієнт інтермодуляційних спотворень — відношення середньої квадратичної суми комбінаційних компонентів до компоненту вихідного сигналу, частота якого рівна частоті більш високочастотного вхідного сигналу. Коефіцієнти інтермодуляції і інтермодуляційних спотворень визначають при заданому співвідношенні амплітуд вхідних гармонійних сигналів. Коефіцієнти гармонік і інтермодуляційних спотворень взаємозв'язані. При нелінійності низького порядку (другого або третього) вони мають близькі значення. При вищих порядках нелінійності коефіцієнт інтермодуляційних спотворень перевищує коефіцієнт гармонік. Тому нормувати і визначати їх при оцінці якості підсилювачів потужності (ПП) слід окремо. Суб'єктивне сприйняття нелінійних спотворень при звуковідтворенні залежить в основному від відносних амплітуд комбінаційних компонентів.

Динамічні спотворення - особливий вид спотворень, які виявляються в транзисторних ПП, охоплених глибоким негативним зворотнім зв'язком (НЗЗ). Ці спотворення обумовлені перевантаженням каскадів підсилювача унаслідок запізнювання напруги НЗЗ по відношенню до напруги вхідного сигналу. Динамічні спотворення залежать, зокрема, від швидкості наростання вихідного сигналу, яку можна визначити по перехідній характеристиці підсилювача.

Перехідна характеристика підсилювача — залежність вихідної напруги від часу, що пройшов після подачі на вхід підсилювача стрибка вхідної напруги.

Динамічні спотворення можна розділити на гармонійні і інтермодуляційні. При гармонійних динамічних спотвореннях змінюється форма синусоїдального сигналу, якщо його амплітуда і частота перевищують критичні значення, які визначаються максимальною швидкістю наростання вихідної напруги. Інтермодуляційні динамічні спотворення виникають за тих же умов, якщо посилюється складний сигнал. Завади в підсилювачах обумовлені власними шумами, фоном (пульсації живлячих напруг) і наведеннями електромагнітних полів.

Рівень власних шумів підсилювача — відношення середньої квадратичної напруги шумів (у заданій смузі частот) на виході підсилювача до напруги, відповідної номінальній потужності. Рівень шумів прийнято виражати в децибелах (дБ).

Рівень фону — відношення середньої квадратичної напруги суми складових фону (гармонік частоти живлячої мережі) до вихідної напруги при номінальній потужності. Аналогічно оцінюють і рівень наведень.

Максимальна вихідна потужність — вихідна електрична потужність, при якій обмеження по максимуму вихідного сигналу збільшує коефіцієнт гармонік по напрузі до 10%.

Номінальна вихідна потужність — вихідна потужність, що вказана в нормативно-технічній документації (НТД) і є необхідною умовою при вимірюванні інших параметрів, наприклад, коефіцієнта гармонік, рівня перешкод і ін.

Чутливість підсилювача — напруга сигналу на вході, при якому вихідна потужність рівна номінальній.

Динамічний діапазон амплітуд — відношення в дБ амплітуд найсильнішого і найслабкішого сигналів, які можуть бути посилені даним підсилювачем при допустимих спотвореннях і рівнях перешкод. Рівень найслабкішого підсилюваного сигналу обмежується рівнем перешкод, рівень найсильнішого — нелінійними спотвореннями. Для хорошої якості відтвореного (підсиленого) сигналу динамічний діапазон амплітуд повинен складати 60 дБ [1].

1.2 Зворотні зв'язки в підсилювачах

Зворотним називається зв'язок між вихідними і вхідними ланцюгами будь-якого пристрою. Залежно від співвідношення фаз коливань, які поступають на вхід підсилювача від джерела сигналу і з виходу підсилювача через ланцюг зворотного зв'язку. Зворотний зв'язок може бути позитивним або негативним. При позитивному зворотному зв'язку (ПЗЗ) фази цих коливань співпадають і

коефіцієнт посилення зростає. При НЗЗ фази цих коливань не співпадають і коефіцієнт посилення менше, ніж без зворотного зв'язку. Зворотні зв'язки діляться на корисні, які спеціально вводяться і шкідливі, або паразитні (зокрема внутрішні). За способом здійснення розрізняють зворотний зв'язок за напругою, за струмом і змішаний (комбінований), а за способом введення сигналу зворотного зв'язку у вхідний ланцюг підсилювача — з паралельним або послідовним ввімкненням.

Щоб визначити, яким є зворотний зв'язок — за струмом чи за напругою, необхідно враховувати, що зворотний зв'язок по струму зникає при обриві навантаження, а зворотний зв'язок по напрузі — при короткому замиканні. Щоб визначити яким є зворотний зв'язок, паралельним чи послідовним, необхідно враховувати, що послідовний зворотний зв'язок зникає при обриві джерела сигналу, а паралельний — при короткому замиканні джерела сигналу. При дуже малому вихідному опорі джерела сигналу паралельний зворотний зв'язок неможливий, оскільки джерело сигналу закорочується ланцюгом зворотного зв'язку. При дуже великому вихідному опорі джерела сигналу неможливий послідовний зворотний зв'язок — ланцюг зворотного зв'язку розірваний.

Вплив НЗЗ на параметри підсилювача залежить від виду зв'язку. Характер зміни коефіцієнтів посилення напруги і струму, а також вхідного опору повністю визначається способом підключення ланцюга НЗЗ до входу підсилювача. При послідовному НЗЗ коефіцієнт посилення струму не змінюється. При паралельному НЗЗ коефіцієнт посилення напруги не змінюється, коефіцієнт посилення струму і вхідний опір зменшуються в n разів.

Вплив НЗЗ на вихідний опір підсилювача залежить тільки від способу зняття сигналу зворотного зв'язку з виходу підсилювача, тобто від виду зв'язку (за струмом або за напругою). При введенні НЗЗ за струмом вихідний опір збільшується, при введенні НЗЗ за напругою — зменшується.

Параметри підсилювача стабілізуються при введенні НЗЗ, що часто є визначальним чинником при рішенні питання про доцільність застосування

зворотного зв'язку. При частото-незалежному НЗЗ за напругою стабілізується вихідна напруга, отже, зменшується нерівномірність АЧХ. За допомогою частотно-залежного НЗЗ можна надати АЧХ підсилювача різну форму.

При введенні послідовного НЗЗ за напругою зменшується коефіцієнт гармонік за умови, що зворотний зв'язок є негативним як для першої, так і для вищих гармонік сигналу. Якщо для якої-небудь вищої гармоніки зворотний зв'язок виявиться позитивним (унаслідок фазових зрушень на вищих частотах), то коефіцієнт гармонік може зрости. Якщо фазово-частотні характеристики (ФЧХ) підсилювача і ланцюга зворотного зв'язку лінійні, а коефіцієнт посилення постійний в діапазоні частот до даної гармоніки, то в цьому випадку коефіцієнт гармонік при послідовному НЗЗ за напругою зменшується в рази.

Проте введенням НЗЗ не можна зробити спотворення меншими, ніж вони були на вході підсилювача. Рівень власних шумів підсилювача при введенні послідовного НЗЗ по напрузі також зменшується.

Стійкість підсилювача з НЗЗ залежить від коефіцієнта посилення і коефіцієнта передачі ланцюга зворотного зв'язку, тобто від глибини НЗЗ. При глибокому НЗЗ фазові зсуви на вищих і нижчих робочих частотах обумовлюють появу ПЗЗ, який викликає нестійкість роботи підсилювача, а іноді і самозбудження. У зв'язку з цим в підсилювачах з глибоким НЗЗ необхідно розширювати діапазон частот з лінійною ФЧХ.

Для поліпшення ФЧХ підсилювача з НЗЗ в ньому не слід використовувати частотно-залежні регулювання і трансформатори. Якщо застосування трансформатора неминуче, то його конструюють так, щоб індуктивність розсіяння і власна ємність були якомога мінімальними. Для додаткового поліпшення ФЧХ підсилювача можна застосовувати спеціальні корегуючі ланцюги.

Використання ПЗЗ дозволяє підвищити коефіцієнт посилення або одержати негативний вихідний опір підсилювача, що є необхідною умовою для поліпшення роботи навантаження підсилювача. Одночасно з ПЗЗ необхідно обов'язково застосовувати НЗЗ. Інакше робота підсилювача буде нестійкою [2,3].

1.3 Вплив паразитних зворотних зв'язків.

При слабких паразитних зв'язках з'являються додаткові частотні, фазові і нелінійні спотворення. При сильному паразитному зворотному зв'язку підсилювач може самозбуджуватися.

У ПП паразитні зворотні зв'язки обумовлені наступними причинами:

- 1) електричними (гальванічними) зв'язками між ланцюгами;
- 2) магнітними зв'язками між окремими каскадами (унаслідок розсіювання магнітного потоку трансформаторів);
- 3) живленням від загального джерела.

Для послаблення паразитних електричних і магнітних зв'язків застосовують відповідне екранування. Ослаблення зв'язку через джерело живлення досягається зменшенням його вихідного опору і включенням розв'язуючих фільтрів. Також не повинно бути надлишкового запасу посилення [1,3].

1.4 Багатокаскадні підсилювачі

У двокаскадних підсилювачах на біполярних транзисторах (БТ) використовуються різні комбінації включення транзисторів. Якщо вихідний опір джерела сигналу і опір навантаження підсилювача приблизно рівні і складають одиниці або десятки кілоом, тоді слід застосовувати каскади з загальним емітером (ЗЕ); при малих опорах (менше 100 Ом) — перший каскад з ЗЕ, другий каскад з загальним колектором (ЗК), а при великих опорах (більше 100 кОм) — перший каскад з ЗК, другий з ЗЕ. Якщо опір навантаження підсилювача значно перевищує опір джерела сигналу, слід використовувати обидва каскади з ЗЕ. При опорі навантаження підсилювача меншому, ніж вихідний опір джерела сигналу, рекомендується використовувати обидва каскади з ЗЕ або перший каскад з ЗЕ, а другий — з ЗК. Для багатокаскадних підсилювачів приведені вище рекомендації

відносяться до першого і останнього каскадів. Проміжні каскади виконуються з ЗЕ. Гібридні підсилювачі, які містять польові транзистори (ПТ) та БТ, мають істотні переваги в порівнянні з підсилювачами, в яких використовуються транзистори тільки якого-небудь одного типу. Наприклад, в підсилювачах, в яких чергуються каскади на ПТ і БТ, досягається значно більший коефіцієнт посилення потужності, оскільки ПТ, включені з загальним витоком (ЗВ) або загальним стоком (ЗС), дозволяють одержати дуже великий коефіцієнт посилення струму, а БТ — велике посилення напруги (при навантаженні високим вхідним опором ПТ. Вхідний опір таких підсилювачів легко зробити високим, а вихідний — низьким. Гібридні підсилювачі можуть бути однонаправленими, тобто володіти наступною властивістю: при подачі напруги сигналу на вихід, напруга на вході відсутня. Однонаправленість підсилювача дозволяє досягти великого посилення напруги при стійкій роботі. Підсилювачі з вхідними каскадами на ПТ характеризуються дуже великим вхідним опором.

Двокаскадний підсилювач, в якому перший каскад з ЗВ, другий - з загальним затвором (ЗЗ), характеризується високими коефіцієнтом посилення напруги і вхідним опором, а також якісною АЧХ. Такий підсилювач є практично однонаправленим. Для отримання великого коефіцієнта посилення напруги опір навантаження повинен бути великим, проте при цьому погіршується АЧХ підсилювача у області вищих частот. Підсилювачі з безпосереднім зв'язком між каскадами характеризуються простотою (містять мало деталей), високими показниками якості (порівняно широким діапазоном робочих частот і малими нелінійними спотвореннями), стабільністю параметрів при заміні транзисторів, змінах напруги живлення і температури навколишнього середовища. Стабільність параметрів досягається введенням великого сигналу НЗЗ за постійним струмом, що подається з виходу підсилювача на перший каскад або разом охоплює два-три каскади. З великого числа можливих варіантів подібних схем стабілізації режиму роботи транзисторів доцільно застосовувати тільки такі, які дозволяють досягти високої стабільності режиму і містять меншу кількість елементів. Одним з критеріїв високої ефективності стабілізації є малий опір резисторів, включених в

ланцюзі баз транзисторів. При збільшенні опору в ланцюзі бази різко зростає дія зворотного струму колектора, який є дестабілізуючим фактором. Підсилювачі з RC - зв'язком між каскадами також, як і підсилювачі з безпосереднім зв'язком, характеризуються простотою, малими габаритними розмірами і масою. Проте унаслідок впливу реактивних елементів зв'язку вони мають дещо гіршу АЧХ та менш економічні при однакових вимогах, що пред'являються до стабільності параметрів [4].

1.5 Підсилювачі потужності

Потужним каскадом вважається каскад, в якому транзистори віддають в навантаження потужність, близьку до максимально можливої. Основними вимогами, які пред'являються до потужних вихідних каскадів, є отримання необхідної потужності в навантаженні і максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) при допустимих спотвореннях сигналу. Вимога максимального ККД має найбільше значення для підсилювачів з живленням від автономних джерел.

Максимальне посилення потужності — другорядна вимога, оскільки необхідне посилення може бути одержане в інших каскадах. Чим вищий ККД каскаду, тим менш потужний транзистор потрібний для отримання необхідної потужності. Максимальний ККД досягається при оптимальному навантаженні, номінальне значення якого, як правило, буває заданим. Якщо воно значно відрізняється від оптимального, то для отримання високого ККД навантаження включають через узгоджувальний трансформатор. Використання узгоджувального трансформатора також дозволяє одержати мінімальний рівень спотворень при заданій потужності в навантаженні підсилювача. Застосування таких трансформаторів в малогабаритних підсилювачах приводить до зниження ККД, оскільки малогабаритні недорогі трансформатори мають порівняно невеликий ККД [3,5].

1.6 Режими роботи транзисторів у вихідних каскадах

Транзистори можуть працювати в режимах класів A , B або AB .

Режимом класу A є такий режим, при якому при будь яких допустимих миттєвих значеннях вхідного сигналу вихідний струм протікає протягом всього періоду підсилення. Підсилюючий елемент не відключається від навантаження, і тому форма струму через навантаження повторює вхідний сигнал. *Режимом класу B* називають такий режим (з відсіченням), при якому вихідний струм протікає практично тільки протягом одного будь якого напівперіоду сигналу.

Проміжний режим, при якому вихідний струм протікає протягом значної частини періоду, називають *режимом класу AB* . При цьому одна напівхвиля вхідного сигналу підсилюється без спотворень, друга сильно спотворюється.

Вибір режиму здійснюється подачею відповідної напруги між базою та емітером (затвором та витоком) біполярних та уніполярних транзисторів. У режимах класів AB і B можуть працювати тільки двотактні каскади.

Однотактні вихідні каскади застосовуються також і в підсилювачах з малою вихідною потужністю, оскільки їх ККД не перевищує 40 % дБ [4].

1.7 Схеми безтрансформаторних вихідних каскадів

Безтрансформаторні вихідні каскади виконуються за різними схемами і відрізняються видом провідності транзисторів, способом їх включення, режимом роботи (класи AB і B), а також видом зв'язку з попереднім каскадом і навантаженням. Кращі показники якості мають каскади, в яких використовуються транзистори різного виду провідності з достатньо близькими значеннями параметрів (комплементарні пари) [5]. Каскади, в яких використовуються транзистори одного виду провідності (квазікомплементарні пари), є принципово

несиметричними, оскільки транзистори повинні бути включені за різними схемами (звично з ЗЕ і ЗК). Щоб зменшити нелінійні спотворення, вводиться глибокий НЗЗ, що створює умови для появи динамічних спотворень. Тому квазікомплементарні пари транзисторів використовуються за відсутності комплементарних в підсилювачах, до яких не пред'являються вимоги високої якості відтворення сигналів, або в підсилювачах, в яких спотворення зменшуються спеціальними методами.

Для отримання малого вихідного опору підсилювача транзистори вихідного каскаду включають за схемою з ЗК. Режим транзисторів установлюють змінюючи опір між базами транзисторів. Для стабілізації режиму способом термокомпенсації між базами включається елемент з негативним температурним коефіцієнтом опору (ТКО) - термістор або напівпровідниковий діод в прямому включенні. При безпосередньому зв'язку з попереднім каскадом для стабілізації режиму вводять глибокий НЗЗ по постійному струму.

При включенні транзисторів вихідного каскаду по схемі з ЗК коефіцієнт посилення напруги завжди менше одиниці, тому амплітуда вхідного сигналу перевищує амплітуду напруги на навантаженні. Максимальна амплітуда напруги на навантаженні, для отримання високого ККД каскаду, повинна бути близька до половини напруги джерела живлення. При живленні підсилювача від однополярного джерела живлення каскади включаються через розділовий конденсатор. В цьому випадку корисна потужність в навантаженні і ККД каскаду на нижчих частотах зменшуються унаслідок падіння напруги на конденсаторі [4,6,7].

2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ І ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПІДСИЛЮВАЧА

2.1 Розробка та обґрунтування структурної схеми підсилювачів

В підсилювачах використовуються різноманітні структурні схеми (рис. 2.1), на якій прямокутниками з функціональними написами зображують основні частини пристрою, які виконують певні функції, та основні взаємозв'язки між ними.

Переважно підсилення сигналу, яке створюється одним каскадом, є недостатнім, тому застосовують багатокаскадні схеми підсилювачів. Сигнал, підсилений першим каскадом, подається на вхід другого, з виходу другого - на вхід третього і т.ін. Тобто, здійснюється послідовне підсилення сигналу декількома ділянками каскадів.



Рисунок 2.1 – Структурна схема підсилювача

Вхідний каскад є входом підсилювача та призначений для забезпечення узгодження вихідного опору джерела сигналу з вхідним опором першого каскаду попереднього підсилювання. Якщо вихідний опір джерела сигналу рівний вхідному опору попереднього каскаду або набагато більший, то в

цьому випадку вхідний каскад не застосовується, а якщо менше, то застосовується.

Якщо у вхідному каскаді використовують схеми з ЗК та ЗВ - такі каскади називають повторювачами.

Вимоги до каскадів попереднього підсилення виходять з їх призначення - підсилювати напругу або струм, які подаються на вхід, до величини, необхідної для збудження каскадів підсилення потужності. Тому найбільш важливими показниками для попередніх каскадів є коефіцієнти підсилення напруги (K_U) та струму (K_I), частотна характеристика і частотні спотворення.

Передкінцевий каскад (драйвер) є джерелом сигналу для кінцевого каскаду. Він повинен забезпечити такі умови роботи вхідного кола кінцевого каскаду, при яких останній зможе віддати в навантаження максимальну неспотворену потужність. Основні вимоги, які ставлять до передкінцевого каскаду - велика амплітуда неспотвореного сигналу на виході та малий вихідний опір. Вибір схеми передкінцевого каскаду в конкретному підсилювачі залежить від виду та режиму роботи кінцевого каскаду.

Кінцеві каскади відрізняються від каскадів попереднього підсилювання, великим рівнем потужності сигналу. Умови роботи каскадів потужності залежить також від характеру зовнішнього навантаження. Наприклад, для підсилювачів низької частоти навантаженням часто є електродинамічні гучномовці, опір яких носить комплексний характер - містить індуктивну складову і отже, зростає зі збільшенням частоти. Однак на середніх звукових частотах (сотні герців), на яких ведуть розрахунок корисної потужності, яка віддається підсилюючими елементами, опір корисного навантаження можна вважати активним, що сильно спрощує побудову ліній навантаження і динамічних характеристик. Тому розрахунки таких каскадів переважно ведуться на активне навантаження.

Отже обґрунтуванням вибору структурної схеми підсилювача є його якісні і кількісні характеристики, параметри складових частин (елементів) і їх сукупність [2,3].

2.2 Розробка та обґрунтування принципової схеми підсилювача

За способами підключення кінцевого каскаду до навантаження каскади можна розподілити на каскади з безпосереднім включенням навантаження, резистивні, дросельні та трансформаторні.

Найбільш високий ККД мають дросельні та трансформаторні каскади великого підсилення. Максимальний ККД в них вдвічі більше, ніж при безпосередньому підключенні навантаження, та майже в шість разів більше, ніж у резистивного. Однак у резистивного каскаду смуга підсилених частот більш широка, ніж у дросельного, і значно ширше трансформаторного. Вартість, маса, габаритні розміри дросельного і трансформаторного каскадів набагато більші від резистивного.

Найпростішим способом підключення навантаження до вихідного каскаду підсилювача є безпосереднє введення навантаження у вихідне коло підсилювального елемента без вихідного пристрою. До переваг такої схеми відноситься її простота, відсутність додаткових деталей, втрат потужності у вихідному каскаді, додаткових нелінійних, частотних та перехідних спотворень і можливість посилення сигналів у широкій смузі частот. До недоліків - протікання через навантаження постійної складової струму живлення.

В резистивному каскаді підсилення потужності навантаження підключається у вихідне коло через резистивно-ємнісний ланцюг RC. Струм живлення в цьому випадку через навантаження не проходить, крім того, навантаження поєднано з загальним дротом схеми, що часто буває необхідною умовою. Резистивний каскад простий, але має недоліки в порівнянні з каскадом з безпосереднім включенням, в якому наявність конденсатора, звужує смугу пропуску підсилювача, так як реактивний опір конденсатора збільшується зі зменшенням частоти.

Навантаження, яке підключене безпосередньо та через конденсатор - застосовується в безтрансформаторних кінцевих каскадах, а навантаження, підключене через дросель та трансформатор - у трансформаторних кінцевих каскадах.

Можливість використання безтрансформаторних схем саме в транзисторних кінцевих каскадах обумовлена, по перше тим, що транзистори працюють при порівняно низькій напрузі живлення (тому безпосереднє підключення гучномовця безпечно при обслуговуванні), по друге, вони можуть працювати з меншим номінальним значенням опору навантаження. В безтрансформаторних схемах в основному застосовується послідовне живлення транзисторів від одного чи двох джерел постійної напруги.

Також в кінцевих каскадах великої потужності застосовують схеми на складених транзисторах [6,7]. Складені транзистори мають великі коефіцієнти по струму, великий вхідний і малий вихідний опори. До їх недоліків тільки слід віднести звуження частотного діапазону складеного транзистора в порівнянні з одинарним.

Основні вимоги до передкінцевого каскаду підсилювача потужності - одержання максимального підсилення за напругою для компенсації малих коефіцієнтів підсилення за напругою вихідного та вхідного каскадів.

При одноктактному вихідному каскаді та двотактному безтрансформаторному каскаді з послідовним збудженням плеч або з паралельним збудженням транзисторів різного типу ($p-n-p$ і $n-p-n$), від передкінцевого каскаду потрібна однофазна вихідна напруга. У цьому випадку передкінцевий каскад може виконуватися у вигляді звичайного резисторного каскада, в якому транзистор частіше всього ввімкнутий за схемою з ЗЕ, з безпосереднім або ємнісним зв'язком з кінцевим каскадом. Функцію передкінцевого каскаду в схемі (рис. 2.2), виконує транзистор VT1.

З можливих способів стабілізації режиму в попередніх каскадах найбільше поширення отримала емітерна стабілізація як найбільш ефективна і проста за схемою. При використанні безпосередніх зв'язків поряд з емітерною стабілізацією вводиться загальний НЗЗ за постійним струмом. Для підвищення лінійності підсилювача, одержання великого вхідного опору, розв'язання за постійним струмом входу підсилювача та кола зворотного зв'язку, більш високої

температурної стабільності, поліпшення динамічних характеристик у ролі вхідного каскаду застосовують диференційний каскад (рис. 2.2).

В таких каскадах застосовується НЗЗ за змінним та постійним струмом, що дозволяє зменшити лінійні і нелінійні спотворення, які вносяться підсилювачем, знизити вихідний опір підсилювача потужності.

НЗЗ за постійним струмом стабілізує напругу спокою транзисторів кінцевого каскаду. Застосування грубого НЗЗ (40-50 дБ) не рекомендується, бо це приводить до виникнення динамічних спотворень. Якщо потрібно одержати коефіцієнт загальних гармонійних спотворень менше 0,1-0,5 %, в підсилювач вводиться НЗЗ більше 50 дБ.

Для підвищення амплітуди вихідної напруги застосовують вихідні транзистори з можливо меншим значенням опору насичення, а попередній каскад будується за схемою, яка забезпечує найбільшу амплітуду сигналу на базах транзисторів фазоінверсного каскаду. Для цього в схемі попереднього каскаду підсилювача повинен обов'язково бути "вольтододаток", а опір в емітерному колі транзистора повинен бути мінімальним або зовсім відсутнім.

"Вольтододаток" вводиться за допомогою ПЗЗ, напруга якого з виходу підсилювача подається на опір навантаження передкінцевого каскаду, що приводить до збільшення опору підсилювача.

В безтрансформаторних вихідних каскадах найбільш часто застосовують в транзисторах режими роботи *B* або *AB*. При застосуванні режиму класу *B* у підсилювачах на ділянці малих струмів виникають перехідні спотворення, які виявляються у вигляді відсічки струму. Кількісно перехідні спотворення оцінюються часом переключення підсилюючих елементів. Зменшення перехідних спотворень досягається застосуванням режиму класу *AB*, при якому на вхід підсилюючого елемента подається відповідна напруга зміщення. Напруга зміщення створюється за допомогою транзисторної схеми або за допомогою діодного кола.

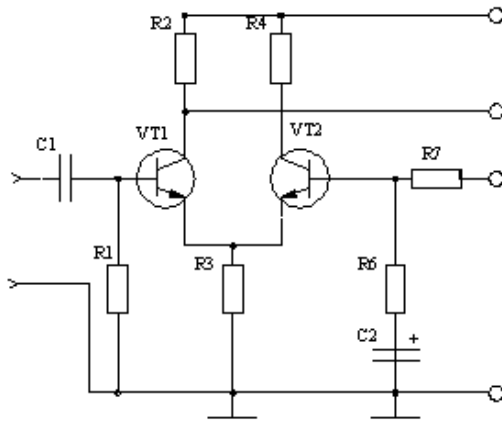


Рисунок 2.2 – Електрична схема диференційного каскаду

Зміна температурних умов призводить до зміни струму спокою і, відповідно, режиму роботи транзисторів кінцевого каскаду, що приводить до збільшення нелінійних перехідних спотворень. Найбільш часто в підсилювачах використовується діодна стабілізація струму, заснована на температурній залежності ВАХ діоду. Напруга зміщення забезпечується характеристиками діоду. Для більшої точності підстроювання напруги зміщення послідовно з діодами включається додатковий опір [2].

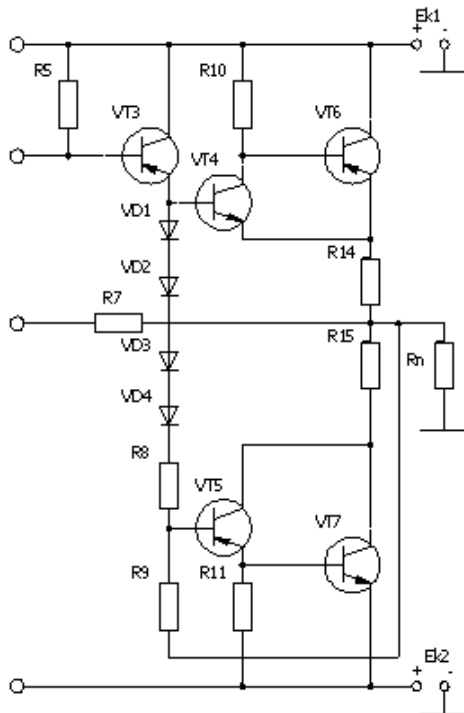


Рисунок 2.3 – Електрична схема кінцевого каскаду на складених комплементарних транзисторах

3. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Вихідні дані: Розрахувати параметри підсилювача потужності за наведеними даними, та описати принцип роботи заданої схеми (рис.3.1),:

$$U_{\text{вих.м}} = 9 \text{ В}; \quad U_{\text{вх.м}} = 5 \text{ В}; \quad R_{\text{н}} = 20 \text{ Ом}; \quad f_{\text{нес}} = 100 \text{ кГц}; \quad f_{\text{м}} = 20 \text{ кГц}.$$

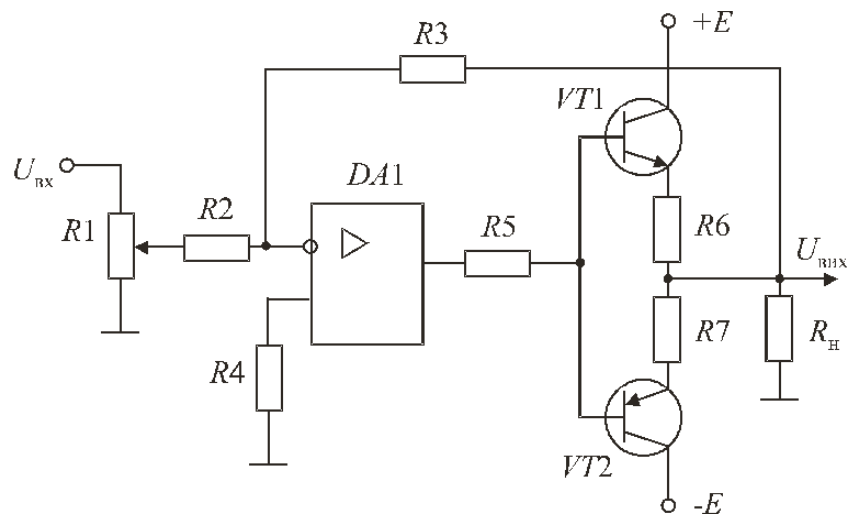


Рисунок 3.1 – Електрична схема підсилювача потужності на операційному підсилювачі

3.1 Електричний розрахунок підсилювача

Рішення

3.1.1 Відповідно до [2] та додатку А визначаємо ЕРС джерела живлення вихідного каскаду за формулою:

$$E = U_{\text{вих.м}} + 1...2V, \quad (1)$$

де $U_{\text{вих.м}}$ – напруга живлення каскаду зі стандартного ряду (В).

$$E = 9 + 1 = 10V.$$

3.1.2 Визначаємо верхню граничну частоту спектру амплітудної модуляції сигналу, враховуючи перші три гармоніки сигналу за формулою:

$$f_{\text{в}} = f_{\text{нес}} + 3f_{\text{м}}, \quad (2)$$

де $f_{нес}$ – несуча частота сигналу (Гц) ;

f_m – частота модуляції (Гц).

$$f_B = 1 \times 10^3 + 3 \times (2 \times 10^2) = 160 \times 10^3 \text{ Гц.}$$

3.1.3 Розрахуємо амплітуду вихідного струму за формулою:

$$I_{\text{вих.м}} = U_{\text{вих.м}} / R_n, \quad (3)$$

де R_n – опір навантаження (Ом).

$$I_{\text{вих.м}} = 9/20 = 0,45 \text{ А.}$$

3.1.4 Розрахуємо амплітуду вихідної потужності, вважаючи, що тривалість імпульсу амплітудної модуляції сигналу дорівнює тривалості паузи, тобто шпаруватість дорівнює двом, за формулою:

$$P_{\text{вих.м}} = \frac{U_{\text{вих.м}}^2}{4R_n}; \quad (4)$$

$$P_{\text{вих.м}} = \frac{81}{80} = 1,0125 \text{ Вт.}$$

3.1.5 Обираємо комплементарну пару транзисторів [6] з параметрами, які мають задовольняти наступним вимогам:

$$U_{\text{КЕ доп}} > 2,2 E,$$

$$I_{\text{К доп}} > 1,2 I_{\text{вих.м}}, \quad (5)$$

$$P_{\text{К доп}} > 1,2 P_{\text{вих.м}},$$

$$f_{\text{гр}} > 10 f_B,$$

де $U_{\text{КЕ доп}}$ – допустима напруга між колектором та емітером транзистора (В),

$I_{\text{К доп}}$ – допустимий колекторний струм (А),

$P_{\text{К доп}}$ – допустима потужність розсіювання на колекторі (Вт),

$f_{\text{гр}}$ – гранична частота транзистора (Гц).

Згідно з довідниковою літературою [7] вибираємо кремнієву транзисторну пару КТ814А (*p-n-p*) та КТ815А (*n-p-n*), які за параметрами задовольняють зазначеним умовам:

$$U_{\text{КЕ доп}} = 25\text{В}, \quad \text{так як } 25 > 2,2 \times 10;$$

$$I_{\text{К доп}} = 3,0\text{А}, \quad \text{так як } 3 > 1,2 \times 0,45; \quad (6)$$

$$P_{\text{К доп}} = 1,0\text{Вт}, \quad \text{так як } 1,0 \approx 1,2 \times 1,0125 \text{ (допустимо);}$$

$$f_{\text{гр}} = 3 \times 10^6, \quad \text{так як } 3 \times 10^6 > 10,0 \times 160 \times 10^3.$$

3.1.6 Відповідно до додатку Б обираємо номінальний опір обмежуючих резисторів R6, R7 у відповідності до стандартних рядів.

$$R6 = R7 = 10 \text{ Ом}.$$

3.1.7 Визначаємо потужність розсіювання для резисторів R6, R7 за формулою:

$$P_{R6} = P_{R7} = \frac{I_{\text{вих.м}}^2 \times R6}{4}. \quad (7)$$

$$P_{R6} = P_{R7} = \frac{0,45^2 \times 10}{4} = \frac{0,2025 \times 10}{4} = 0,51 \text{ Вт}.$$

Номінальну потужність резисторів обираємо зі стандартного ряду (додаток В):

$$P_{R6} = P_{R7} = 1,0 \text{ Вт}.$$

3.1.8 Обираємо тип операційного підсилювача (ОП) з параметрами, які задовольняють наступним вимогам:

$$U_{\text{вих.мах}} > U_{\text{вих.м}}; \quad (8)$$

$$f_{1\text{в}} > 100 \times f,$$

де $U_{\text{вих.мах}}$ – максимальна вихідна напруга ОП (В),

$f_{1\text{в}}$ – частота одиничного підсилення ОП (Гц).

Відповідно до додатку Г обираємо ОП на базі мікросхеми

К 140 УД 1101, який має великий коефіцієнт підсилення K_D за напругою та великий вхідний опір $R_{DВХ}$:

3.1.9 Обираємо опір обмежуючого резистора R_5 за формулою:

$$R_5 = 1,2 R_{н\text{ мін}}, \quad (9)$$

де $R_{н\text{ мін}}$ – мінімально допустимий опір навантаження для обраного ОП (Ом).

$$R_5 = 1,2 \times 2 \times 10^3 = 2,4 \times 10^3 \text{ Ом.}$$

Отримане значення відповідає стандартному номіналу (додаток Б).

3.1.10 Визначаємо потужність розсіювання на резисторі R_5 за формулою:

$$P_{R_5} = \frac{U_{ВХ.М}^2}{R_5} \quad (10)$$
$$P_{R_5} = \frac{9^2}{2400} = \frac{81}{2400} = 0,034 \text{ Вт.}$$

Згідно з рядом номінальної потужності резисторів (додаток В) приймаємо

$$P_{R_5} = 0,05 \text{ Вт.}$$

3.1.11 Визначаємо необхідний коефіцієнт підсилення за напругою за формулою:

$$K_U = 1,5 \times \frac{U_{ВХ.М}}{U_{ВХ.М}}, \quad (11)$$

де $U_{ВХ.М}$ - амплітуда напруги на вході підсилювача потужності (В).

$$K_U = 1,5 \times \frac{9}{5} = 2,7.$$

3.1.12 Відповідно з додатком Б обираємо номінальне значення резистора $R_2 = 10 \times 10^3 \text{ Ом.}$

3.1.13 Визначаємо потужність розсіювання на резисторі R_2 за формулою:

$$P_{R_2} = \frac{U_{ВХ.М}^2}{R_2}, \quad (12)$$
$$P_{R_2} = \frac{5^2}{10 \times 10^3} = 0,0002 \text{ Вт.}$$

Згідно з рядом номінальної потужності резисторів (додаток В) приймаємо

$$P_{R_2} = 0,05 \text{ Вт.}$$

3.1.14 Значення опору резистора R3 розраховуємо за формулою:

$$R3 = K_U \times R2, \quad (13)$$

$$R3 = 2,7 \times 10^3 = 27 \times 10^3 \text{ Ом.}$$

3.1.15 Визначаємо потужність розсіювання на резисторі R3 за формулою:

$$P_{R3} = \frac{U_{\text{ВХ.М}}^2}{R3}, \quad (14)$$

$$P_{R3} = \frac{5^2}{27 \times 10^3} = 0,0093 \text{ Вт.}$$

Згідно з рядом номінальної потужності резисторів (додаток Б) приймаємо

$$P_{R3} = 0,05 \text{ Вт.}$$

3.1.16 Визначаємо номінальне значення опору резистора R4 за формулою

$$R4 = \frac{R2 \times R3}{R2 + R3}, \quad (15)$$

$$R4 = \frac{(10 \times 10^3) \times (27 \times 10^3)}{(10 + 27) \times 10^3} = \frac{270 \times 10^3}{37} = 7297 \text{ Ом.}$$

Відповідно до стандартного ряду (додаток Б) обираємо номінальне значення резистора R4

$$R4 = 7,5 \times 10^3 \text{ Ом.}$$

Згідно з рядом номінальної потужності (додаток В) резисторів приймаємо

$$P_{R4} = 0,05 \text{ Вт.}$$

3.1.17. Відповідно до [2] обираємо номінальний опір резистора

$$R1 = 500 \text{ Ом}$$

3.1.18 Розраховуємо потужність розсіювання для резистора R1 за формулою:

$$P_{R1} = \frac{U_{\text{ВХ.М}}^2}{4R1}, \quad (16)$$

$$P_{R1} = \frac{5^2}{4 \times 500} = 0,0125 \text{ Вт.}$$

Згідно з рядом номінальної потужності резисторів (додаток В) приймаємо

$$P_{R1} = 0,05 \text{ Вт.}$$

3.2 Принцип роботи підсилювача

Підсилювач потужності складається з операційного підсилювача на ІМС типу К140УД1101 (*DA1*), який включений за інвертуючою схемою, та двотактного вихідного каскаду на комплементарних транзисторах КТ814А та КТ815А (*VT1*, *VT2*). Подача вхідного сигналу здійснюється через вхідний резистивний дільник на змінному резисторі *R1*, що забезпечує можливість регулювання рівня вихідної напруги. Транзистори працюють у режимі *B* без кола базового зміщення. При цьому нелінійні спотворення, які вносяться вихідними транзисторами, компенсуються за рахунок використання загального глибокого НЗЗ через резистори *R3*, *R2*. Резистор *R5* обмежувальний, необхідний для захисту вихідного каскаду операційного підсилювача від перевантаження. Завдяки включенню невеликих за номінальним значенням опорів *R6*, *R7* в емітерні кола транзисторів, забезпечується захист вихідного каскаду від короткого замикання. Вихідний каскад підсилювача підключений на резистивне навантаження, що забезпечує більш широку смугу підсилених частот. Номінальний опір резистора *R4* вибраний рівним еквівалентному опору резисторів *R2*, *R3*, що дозволяє зменшити вплив температурних коливань вхідних струмів операційного підсилювача. Комплементарна пара вихідних транзисторів забезпечує симетрію вихідного каскаду, а використання двохполярного джерела живлення $\pm E$, дає можливість не застосовувати роздільний конденсатор у вихідному колі підсилювача потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 2371-94 Апаратура радіоелектронна побутова. Терміни та визначення
2. Гольцев В.Р., Богун В.Д., Хиленко В.И. Электронные усилители: Учебное пособие. -Москва.: Изд-во стандартов, 1990.- 224 с
3. Войшвило Г.В. Современная техника усиления сигналов. -Москва.:Сов. радио, 1978.- 104 с
4. Варакин Л.Е. Бестрансформаторные усилители мощности. Справочник. -Москва.: Радио и связь, 1984. -128 с
5. Г.И.Изъюрова и др. Расчёт электронных схем. Примеры и задачи. -Москва: Высшая школа.1987. - 335 с
6. Лавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. - К.: Техника, 1980. - 199 с
7. Транзистори для апаратури широкого применения. Справочник. Под ред. Б.Л.Перельмана. - Москва.: Радио и связь, 1981.- 656 с
8. ГОСТ 29322-2014 (IEC 600386:2009) Напряжения стандартные
9. ДСТУ2172-93Транзистори польові. Терміни, визначення та буквені позначення електричних параметрів

10. ДСТУ2307-93Транзистори біполярні. Терміни, визначення та буквені позначення електричних параметрів

ДОДАТОК А

Стандартний ряд для вибору напруги живлення постійного струму
(ГОСТ 29322-2014):

5 В; 6 В; 9 В; 12 В; 15 В; 18 В; 24 В; 36В; 48В; 60 В.

ДОДАТОК Б

Ряди номінальних опорів резисторів та ємностей конденсаторів (ГОСТ 28884-90
(МЭК 63-63))

Індекс ряду	Номінальні значення (одиниці, десятки, сотні Ом, кілоом, мегаом, пікофарад, нанофарад, мікрофарад)											
E3	1, 0				2, 2				4, 7			
E6	1, 0		1, 5		2, 2		3, 3		4, 7		6, 8	
E12	1, 0	1, 2	1, 5	1, 8	2, 2	2, 7	3, 3	3, 9	4, 7	5, 6	6, 8	8,2
E24	1, 0	1, 2	1, 5	1, 8	2, 2	2, 7	3, 3	3, 9	4, 7	5, 6	6, 8	8,2
	1, 1	1, 3	1, 6	2, 0	2, 4	3, 0	3, 6	4, 3	5, 1	6, 2	7, 5	9,1

ДОДАТОК В

Стандартний ряд номінальних потужностей резисторів (ГОСТ 2.728-74):
0,01 Вт; 0,025 Вт; 0,05 Вт; 0,062; 0,125 Вт; 0,25 Вт; 0,5 Вт; 1,0 Вт; 2,0 Вт;
5,0 Вт; 10,0 Вт; 16 Вт; 25 Вт; 40 Вт; 63 Вт; 100 Вт; 160 Вт; 250 Вт; 500 Вт.

ДОДАТОК Г

Параметри аналогових схем

оп	$U_{\text{жнвл.}}^{\text{в}}$	$U_{\text{жнвл. ном.}}^{\text{в}}$	$K_D \times 10^{-3}$	$I_D, \text{мА}$	$U_{\text{зм}}^{\text{мВ}}$	$TKU_{\text{см}}^{\text{мкВ/К}}$	$I_D, \text{нА}$	$I_{\text{с}}, \text{нА}$	$U_{\text{дф}}^{\text{В}}$	$U_{\text{сф max}}^{\text{В}}$	$K_{\text{сф}}, \text{дБ}$	$f_i, \text{МГц}$	$V_U, \text{В/мкс}$	$\pm U_{2m \text{ max}}^{\text{В}}$	$R_{2m \text{ min}}^{\text{кОм}}$	$R_{D \text{ вх}}^{\text{МОм}}$
К140УД1А, КР140УД1А	-	2х6,3	0,5	6	7	20	5000	1500	1,5	3	60	3	0,2	2,8	5	0,004
К140УД1Б, КР140УД1Б	-	2х12,6	1,3	12	7	20	8000	1500	1,5	6	60	8	0,5	5,7	5	0,004
К140УД5А ¹	2х(6..13)	2х12	0,5	12	10	35	5000	1000	3	6	50	5	6	6,5	5	0,05
К140УД5Б ¹	2х(6..13)	2х12	1	12	7	10	10000	5000	3	6	60	10	6	6,5	5	0,003
К140УД6, КР140УД608	2х(5..20)	2х15	30	3	8	20	50	15	30	11	70	1	2	12	1	1
К140УД7, КР140УД708	2х(5..20)	2х15	30	2,8	9	10	400	200	20	15	70	0,8	0,3	10,5	2	0,4
К140УД8, КР140УД8	-	2х15	50	5	50	50	0,2	0,1	6	10	70	1	2	10	2	10
К140УД9	2х(9..18)	2х12,6	35	8	5	20	350	100	4	7	80	1	0,2	10	1	0,3
К140УД10	2х(5..18)	2х15	50	10	5	50	250	70	4	6	70	15	30	12	2	0,4
К140УД11, КР140УД1101	2х(5..18)	2х15	30	8	10	50	500	200	10	11	70	15	50	12	2	0,4
К140УД12, КР140УД1208 ²	2х(1,5..18)	2х3/15	25/50	0,03/0,17	6	5/6	10/50	6/28	-	1,2/12	70	0,2/1	0,1/0,8	2/12	5	50/5
К140УД14, КР140УД1408	2х(5..18)	2х15	50	1	5	20	5	1	13	13	85	0,5	0,1	12	1	30
К140УД17	2х(3..18)	2х15	200	5	0,25	1,3	10	5	15	13	100	0,4	0,1	12	2	30
КР140УД18	2х(6..18)	2х15	25	-	10	-	0,2	0,2	-	16	80	2,5	5	11	2	10 ⁶
К140УД20	2х(5..20)	2х15	50	3	5	2	100	30	10	12	70	0,5	0,3	11	1	0,4
К153УД1	2х(9..18)	2х15	15	6	7,5	30	1500	500	5	8	70	1	0,2	10	2	0,2
К153УД2	2х(5..18)	2х15	25	3	7,5	30	1500	500	30	12	70	1	0,5	10	2	0,3
К153УД3	2х(9..18)	2х15	25	4	2	15	200	50	5	8	80	1	0,2	10	2	0,4
К153УД4	2х(3..18)	2х6	5	0,8	5	50	400	150	2	5	70	0,7	0,1	4	5	0,2
К153УД5	2х(5..16)	2х15	500	3,5	2	10	100	20	5	13	100	0,2	0,01	10	2	1
К153УД6	2х(5..18)	2х15	50	3	2	15	75	10	30	12	80	0,7	0,5	10	2	0,3
К154УД1	2х(4..18)	2х15	150	0,15	5	30	40	20	10	10	80	1	10	11	2	1

Продовження додатка Г

К154УД2	2х(5..18)	2х15	100	6	2	20	100	20	10	10	70	15	+150/-75 ³	10	2	0,5
К154УД3	2х(5..18)	2х15	8	7	10	30	200	50	10	10	80	15	80	10	2	1
К154УД4	2х(5..17)	2х15	8	7	6	50	1200	300	-	10	70	30	400	10	2	1
К157УД1	2х(3..20)	2х15	50	9	5	50	500	150	-	20	70	0,5	0,5	12	0,02	1
К157УД2	2х(3..18)	2х15	50	7	10	50	500	150	-	18	70	1	0,5	13	0,3	0,5

K544УД1, КР544УД1	2х(8.16,5)	2х15	50	3,5	20	50	0,1	0,05	10	10	80	1	3	10	2	10
K544УД2, КР544УД2	2х(6..17)	2х15	20	7	50	50	0,5	0,1	10	10	70	15	20	10	2	10
K551УД1	2х(5 16,7)	2х15	500	5	1,5	5	100	20	5	13,5	100	0,8	0,01	10	2	1
KМ551УД1	2х(5.16,7)	2х15	500	5	2	10	120	35	5	13	100	0,8	0,01	12	2	1
KМ551УД2	2х(516,7)	2х15	5	10	5	20	2000	1000	5	8	70	1	0,25	12	2	0,5
KМ553УД1	2х(9..18)	2х15	10	6	7,5	30	200	60	5	8	65	1	0,2	10	2	0,2
KМ553УД2	2х(5..18)	2х15	20	3	7,5	30	1500	500	30	12	70	1	0,5	10	2	0,3
KМ553УД3	2х(9..18)	2х15	30	4	2	15	200	50	5	8	80	1	0,2	10	2	0,3
574УД1, КР574УД1	-	2х15	50	8	50	50	0,5	0,2	10	30	80	10	50	10	2	10
K574УД2, КР574УД2	-	2х15	25	10	50	30	1	0,5	10	10	60	2	10	10	10	103
K574УД3, КР574УД3	2х(3..16,5)	2х15	20	7	5	5	0,5	0,2	-	10	80	15	30	10	10	103
K1401УД1	4..15	2х15	2	8	5	30	150	-	-	-	70	2,5	0,5	12	-	1
K1401УД2	2х(2..15)	2х15	25	3	5	30	150	30	-	-	70	1	0,5	12	2	-
K1407УД1, КР1407УД1	2х(3..12)	2х5	10	8	10	50	10	2	2,5	4	70	20	10	3	1	-
K1407УД2, КР1407УД2	2х(1,2.13,2)	2х12	50	0,1	0,5	-	150	50	2,5	10	100	3	0,5	10	2	-
K1407УД3, КР1407УД3	2х(2..12)	2х12	10	2	5	20	5	1	2,5	4	75	5	5	3	2	-
KФ1407УД4	2х(1,5..6)	2х5	3	2	5	-	0,5	0,06	2,5	1,5	70	1	1	0,65	0,25	-
K1408УД1, КР1408УД1	2х(7..40)	2х27	70	5	8	-	40	10	20	21	70	0,5	2	18	2	1
K1408УД1	2х(5..20)	2х15	50	2,8	4	-	200	70	-	15	70	0,8	0,7	11,5	2	0,4
K1409УД1	2х(5..15)	2х15	20	6	15	-	0,05	0,03	10	10	70	1	4	12	2	100

1 Схеми мають пари: високоомний вхід - 8 і 11, низькоомний вхід - 9 і 10.

2 Параметри К140УД5Б для низькоомного входу (вивід 8 з'єднаний з виводом 9, вивід 10 - з'єднаний з виводом 11).

3 Параметри вказані для двох значень керуючого струму $I_{\text{кер.}} = 1,5 / 15 \text{ мкА}$.

Позначення, прийняті в таблиці:

$U_{\text{живл.}}$ - напруга живлення;

KD - мінімальний коефіцієнт посилення;

I_{Π} - струм;

$U_{\text{зм}}$ - напруга зсуву "нуля";

$TKU_{\text{зм}}$ - температурний коефіцієнт напруги зсуву "нуля";

I_1 - вхідний струм;

ΔI_1 - разностной вхідний струм;

$U_{\text{дф max}}$ - допустиме значення диференціального вхідного напруги;

$U_{\text{сф max}}$ - допустиме значення синфазного вхідного напруги;

$K_{\text{сф}}$ - коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу;

f_1 - частота одиничного посилення;

VU - швидкість збільшення вихідної напруги;

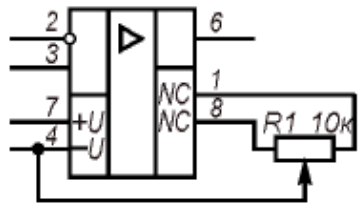
$\pm U_{2m \text{ max}}$ - найбільша амплітуда вихідної напруги;

$R_{2m \text{ min}}$ - найменший опір навантаження;

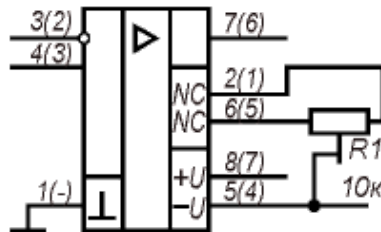
$RD_{\text{вх}}$ - вхідний опір.

Цоколювка найбільш вживаних мікросхем з елементами частотної корекції і установкою нуля, параметрами коригувальних ланцюгів і ланцюгів зворотного зв'язку для реалізації різних режимів роботи ОП.

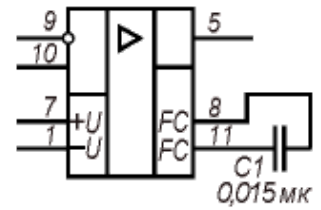
**K140УД6, КР140УД608,
K140УД7, КР140УД708,
КР140УД18, K140УД1**



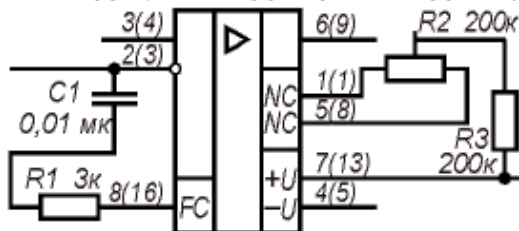
K140УД8 (КР140УД8)



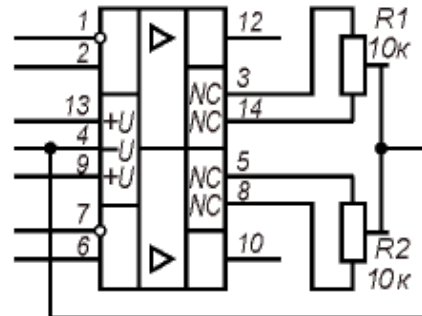
K140УД9



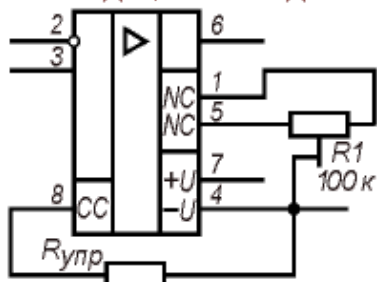
K140УД10, K140УД11 (КР140УД1101)



K140УД20, K140УД2

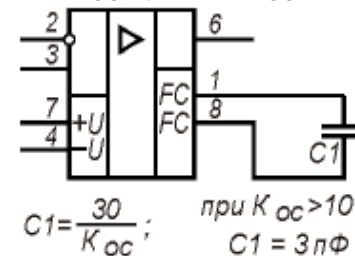


K140УД12, КР140УД1208



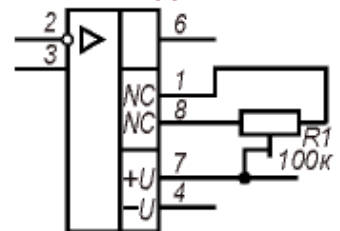
$$I_{упр} = (2U_{пит} - 0,7)/R_{упр}$$

K140УД14, КР140УД1408

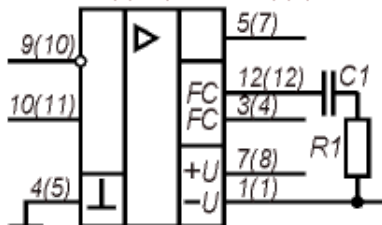


$$C1 = \frac{30}{K_{ос}}; \quad \text{при } K_{ос} > 10 \quad C1 = 3 \text{ пф}$$

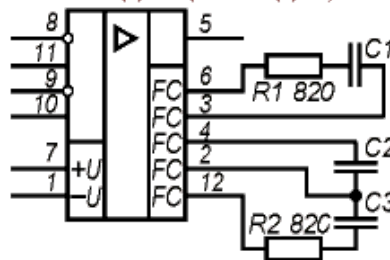
K140УД17



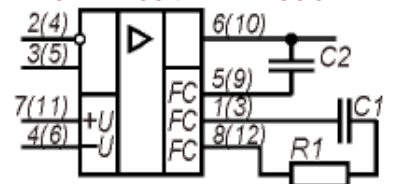
K140УД1 (КР140УД1)



K140УД5А (К140УД5Б)



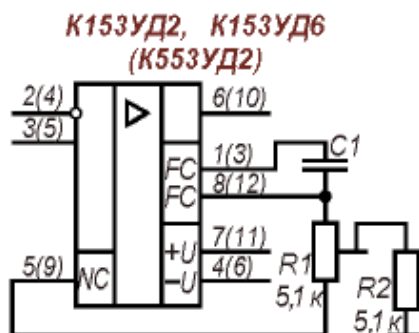
**K153УД1, K153УД3
(К553УД1, К553УД3)**



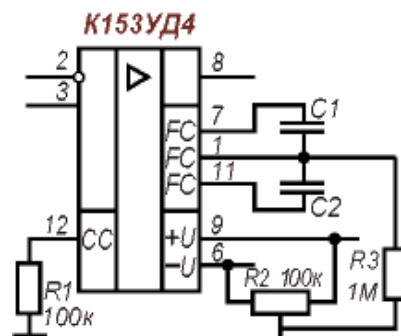
$K_{ос}$	$R1, \text{кОм}$	$C1, \text{нф}$
1	0,02	10000
10	0,2	1000
100	2	100

$K_{ос}$	$C1, \text{нф}$	$C2, \text{нф}$	$C3, \text{нф}$
1	10(15)	51(15)	10(13)
>10	-	-	430

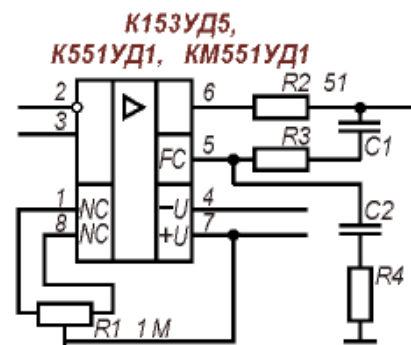
$K_{ос}$	$R1, \text{кОм}$	$C1, \text{пф}$	$C2, \text{пф}$
1	1,5	5100	200
10	1,5	510	20
100	1,5	110	3



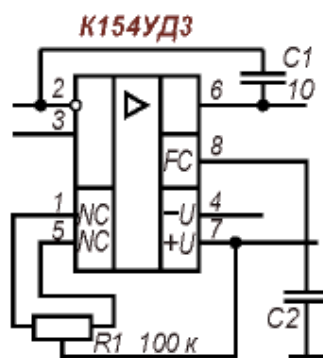
K_{oc}	1	10	100
$C1, n\phi$	30	5	3



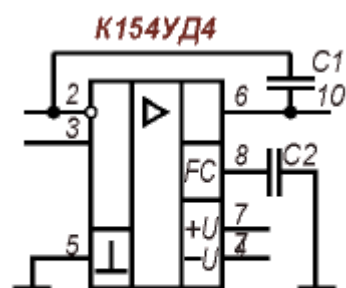
K_{oc}	$C1, n\phi$	$C2, n\phi$
$1..10$	$\sim 150/K_{oc}$	$\sim 50/K_{oc}$
≥ 10	15	5,1



K_{oc}	1	10	100	1000
$R4, O\phi$	10	27	47	470
$C2, n\phi$	47000	47000	10000	1000
$R3, O\phi$	39	270	-	-
$C1, n\phi$	22	1,5	-	-



K_{oc}	$C2, n\phi$
≤ 3	$30/K_{oc}$
> 3	10



$C1 \quad 3..10 \text{ } n\phi$
 $C2 \quad 30..50 \text{ } n\phi$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Розрахувати параметри двотактного підсилювача потужності та описати принцип роботи заданої схеми, наведеної на рисунку 1. Вихідні дані для розрахунків задаються в таблиці 1.

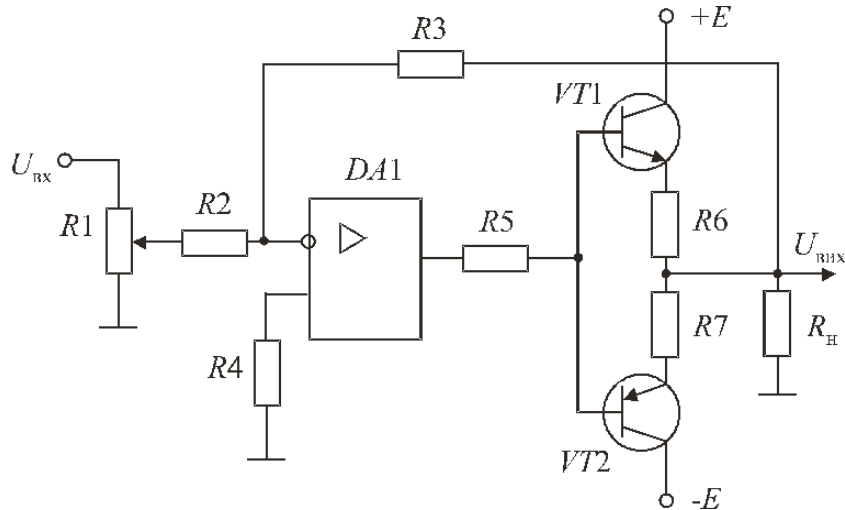


Рисунок 1

Таблиця 1- Вихідні дані для розрахунків курсової роботи

Варіант завдання	$U_{вх.м}$ (В)	$U_{вх.м}$ (В)	R_n (Ом)	$f_{нec}$ (Гц)	f_m (Гц)
1	5	2	20	90×10^3	10×10^3
2	9	2	20	90×10^3	10×10^3
3	6	2	20	90×10^3	10×10^3
4	8	2	20	90×10^3	10×10^3
5	12	2	20	90×10^3	10×10^3
6	10	2	20	90×10^3	10×10^3
7	5	1	10	90×10^3	$5,0 \times 10^3$
8	9	1	10	90×10^3	$5,0 \times 10^3$
9	6	1	10	90×10^3	$5,0 \times 10^3$
10	8	1	10	90×10^3	$5,0 \times 10^3$
11	12	1	10	90×10^3	$5,0 \times 10^3$
12	10	1	10	90×10^3	$5,0 \times 10^3$
13	5	2	15	90×10^3	$7,5 \times 10^3$
14	6	2	15	90×10^3	$7,5 \times 10^3$
15	8	2	15	90×10^3	$7,5 \times 10^3$
16	12	2	15	90×10^3	$7,5 \times 10^3$
17	10	2	15	90×10^3	$7,5 \times 10^3$

Продовження таблиці 1

18	5	2	10	90×10^3	$2,5 \times 10^3$
19	9	1	15	90×10^3	$2,5 \times 10^3$
20	6	2	20	90×10^3	$2,5 \times 10^3$
21	8	1	19	90×10^3	$2,5 \times 10^3$
22	12	2	15	90×10^3	$2,5 \times 10^3$
23	10	1	20	90×10^3	$4,0 \times 10^3$
24	5	2	10	90×10^3	$4,0 \times 10^3$
25	9	1	20	90×10^3	$4,0 \times 10^3$

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Пристрої аналогової електроніки» для здобувачів вищої освіти спеціальностей: 171 «Електронні апарати», 172 «Телекомунікації та радіотехніка» та 153 «Мікро- та наносистемна техніка» розроблені в відповідності до нормативної навчальної програми дисципліни.

- Сєверодонецьк: СНУ ім. В.Даля. 2021. – 37 с.

Укладачі: Паєранд Юрій Едуардович, к.т.н.,проф.
Карманов Микола Іванович, ст.викладач

Орігінал-макет *Карманов М.І.*

Підписано до друку _____
Формат 60×84^{1/16} Папір типограф. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 3,8. Обл.-вид. арк. _____.
Тираж __ прим. Вид. № _____. Замов № _____. Ціна договірна.

*Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля*

Адреса видавництва: 93406, м. Сєверодонецьк, пр. Центральний, 59-а
Телефон: +38(050) 218-04-78, факс (06452) 4-03-42
E-mail: vidavnictvosnu.ua@gmail.com

