

Електронні прилади та підсилювачі

Модуль 2

админ

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ КОЛЕДЖ**

*Для спеціальності
151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»*

Конспект лекцій

з навчальної дисципліни

Електронні прилади та підсилювачі»

МОДУЛЬ 2. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ

ХДПК – 2018 р.

Конспект лекцій з дисципліни «Електронні прилади та підсилювачі» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, спеціалізації» 5.151.2 «Обслуговування пристроїв електрозв'язку».

Укладач: Слобожанюк Р.І. – ХДПК, 2018. – 33 с.

Конспект лекцій розглянутий та рекомендований цикловою комісією

«Транспорту та електрозв'язку»

(назва циклової комісії)

Протокол № _____ від “ ____ ” _____ 2018 р.

Голова циклової комісії _____ (Руденко А.І.)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Схвалено методичною радою Харківського державного політехнічного коледжу

Протокол № _____ від “ ____ ” _____ 2018р.

Голова методичної ради _____ (Величко В.О.)

(Підпис)

(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програмою дисципліни, незалежно від її назви в навчальному плані конкретної спеціальності, передбачено вивчення елементної бази електроніки та сучасної схемотехніки.

Курс лекцій написаний для студентів спеціальності № 5.05020204 "Обслуговування та ремонт пристроїв електрозв'язку на транспорті" денної та заочної форм навчання.

Об'єм кожної лекції розрахований на дві академічні години.

Структура дисципліни «Електронні прилади та підсилювачі».

Вид заняття	Всього годин	Семестр
		5
Аудиторні заняття (всього)	90	
В тому числі:		
Лекції	50	
Практичні заняття (ПЗ)	10	
Лабораторні роботи (ЛР)	30	
Самостійна робота (всього)	126	
Загальна кількість годин	216	Екзамен

Даний конспект лекцій є складовою частиною методичного забезпечення дисципліни, а також може бути використаний студентами в їх навчальній діяльності.

Дисципліна «Електронні прилади та підсилювачі» має дві основні частини. Це «Напівпровідникові прилади» та «Електронні підсилювачі». Перша частина конспекту лекцій передбачає викладення навчального матеріалу з тем: Напівпровідникові (н/п) прилади, які можна поділити на: н/п резистори, н/п фотоелектронні пристрої, н/п діоди, біполярні транзистори, польові транзистори, тиристори, н/п інтегральні мікросхеми та комбіновані н/п прилади.

Друга частина конспекту лекцій передбачає викладення навчального матеріалу з тем: Електронні підсилювачі.

Їх вивчення має на меті завершення формування знань з основ електроніки, необхідних для подальшого засвоєння навчального матеріалу зі спеціальних дисциплін.

Електронні прилади та пристрої застосовуються практично в усіх галузях науки і техніки, промисловості і транспорту, зв'язку і побуту. Тому студенти будь-якої технічної

спеціальності мають вивчити основи електронної техніки з метою подальшого застосування набутих знань при вивченні фахових дисциплін, в своїй практичній діяльності.

Метою засвоєння дисципліни є вивчення фізики електронних процесів та роботи електронних приладів різного призначення.

Целями освоєння дисципліни являються изучение физики электронных процессов в вакууме, газах, твердых телах, на границах раздела сред и принципов построения и работы электронных приборов различного назначения.

Дисципліна відноситься до базових дисциплін профілю, базується на результатах вивчення дисциплін природничо-наукового циклу, в тому числі математики, фізики, хімії.

Основное внимание при изучении дисциплины отводится строению, физическим процессам, параметрам и характеристикам, применению электронных приборов и основам теории и схемотехники, методам анализа и инженерного расчета параметров и характеристик аналоговых и цифровых электронных устройств.

Модуль 2. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ		
		Змістовий модуль 14. Призначення та класифікація підсилювачів
лекція 16	2/2	Структурна схема підсилювача. Принцип підсилення.
		Змістовий модуль 15. Зворотний зв'язок в підсилювачах
лекція 17	2/4	Види і способи здійснення зворотного зв'язку
		Змістовий модуль 16. Принцип побудови підсилювальних каскадів
лекція 18	2/6	Режими роботи підсилювального каскаду
		Змістовий модуль 17. Каскади попереднього підсилення
лекція 19	2/8	Каскад попереднього підсилення на біполярному транзисторі
		Змістовий модуль 18. Вихідні каскади підсилювачів
лекція 20	2/10	Підсилювачі потужності. Схеми однотактних та двотактних вихідних каскадів.
лекція 21	2/12	Емітерний повторювач
		Змістовий модуль 19. Підсилювачі постійного струму
лекція 22	2/14	Підсилювачі постійного струму прямого підсилення
лекція 23	2/16	Балансний підсилювач постійного струму
		Змістовий модуль 20. Підсилювачі на інтегральних мікросхемах
лекція 24	2/18	Структурні схеми операційних підсилювачів. Найважливіші показники операційних підсилювачів

МОДУЛЬ 2. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ

Змістовий модуль 14. Призначення та класифікація підсилювачів

Лекція 16

Тема: Структурна схема підсилювача. Принцип підсилення.

План

- 1 Підсилювачі та їх місце в електронних пристроях
- 2 Структурна схема підсилювача.
- 3 Класифікація підсилювачів

1 Підсилювачі та їх місце в електронних пристроях

Напівпровідникові електронні пристрої діляться на два великі класи: аналогові і цифрові (дискретні). В основі класифікації лежить можливість зміни в устрої електричного сигналу, що несе інформацію. Якщо інформаційний сигнал змінюється безперервно і може приймати довільні значення в широкому діапазоні, аналоговий пристрій, якщо ж сигнал змінюється дискретно і може приймати тільки два фіксованих значення, відповідні двом цифрам двійкової системи числення - нулю і одиниці, то пристрій відноситься до цифрових, або дискретним. У аналогових пристроях сам електричний сигнал і його параметри - рівень, частота і фаза електричного коливання - несуть інформацію про фізичну величину. У цифрових пристроях інформація про величину закодована цифровим кодом, що складається з безлічі двійкових розрядів, кожен з яких може приймати тільки одне з двох фіксованих значень, яким відповідають два рівня напруги (зазвичай вони забезпечуються відкритим чи закритим станом транзистора, що працює в ключовому режимі).

Інформацію про різних фізичних величинах і контрольованих процесах отримують за допомогою датчиків, званих також вимірювальними перетворювачами. Ці пристрої здійснюють перетворення вимірюваної величини в пропорційний їй електричний сигнал. Дуже часто ці сигнали невеликі, вимірювані тисячними частками вольт. Після передачі по електричним, радіочастотним або оптичним каналам зв'язку сигнали приходять сильно ослабленими, і для нормальної роботи приймачів інформації з цими сигналами потрібно їх попереднє посилення. Також невеликий рівень електричних сигналів, зчитувальних з носіїв інформації у всіляких магнітних і оптичних запам'ятовуючих пристроях. Таким чином, для нормальної роботи різних електронних пристроїв і систем необхідне посилення слабких сигналів. Це відноситься не тільки до чисто аналоговим пристроям, а й до цифрових, так як первинним інформаційним сигналом все одно залишається малопотужний електричний сигнал, який повинен бути

посилений. Тому підсилювачі є одними з основних вузлів різної апаратури в пристроях автоматики, обчислювальної та інформаційно-вимірювальної техніки.

Підсилювач - це пристрій, що збільшує інтенсивність вхідного сигналу, використовуючи енергію джерела живлення. Залежно від призначення розрізняють підсилювачі напруги та потужності, підсилювачі сигналу змінного і постійного струму, підсилювачі, призначені для посилення сигналів в різних діапазонах частот.

У аналогових електронних пристроях підсилювачі не тільки забезпечують просте посилення вхідного сигналу. На їх основі виконуються найрізноманітніші пристрої функціональної обробки сигналів, а також різні генератори електричних сигналів.

1 Структурна схема підсилювача

Функції підсилювачів різноманітні: електронні основні вузли АТ і ТМ, радіо-технічної апаратури.

Електронним підсилювачем називають пристрій, який використовують для підвищення потужності вхідного електричного сигналу до номінального значення, яке забезпечує нормальне функціонування вузла, приладу або електронної системи.

При цьому підсилення малопотужного вхідного сигналу досягається за рахунок енергії зовнішнього джерела напруги (струму) значно більшого рівня потужності. Оскільки далі розглядатимемо лише лінійні електронні підсилювачі, вважатимемо незмінною частоту та форму підсилюваного сигналу.

Підсилювач включає в себе нелінійний елемент, керований вхідним електричним сигналом, джерело живлення і навантажувальний пристрій з певним опором.

Загальна функціональна схема підсилювального пристрою приведена на рис.1

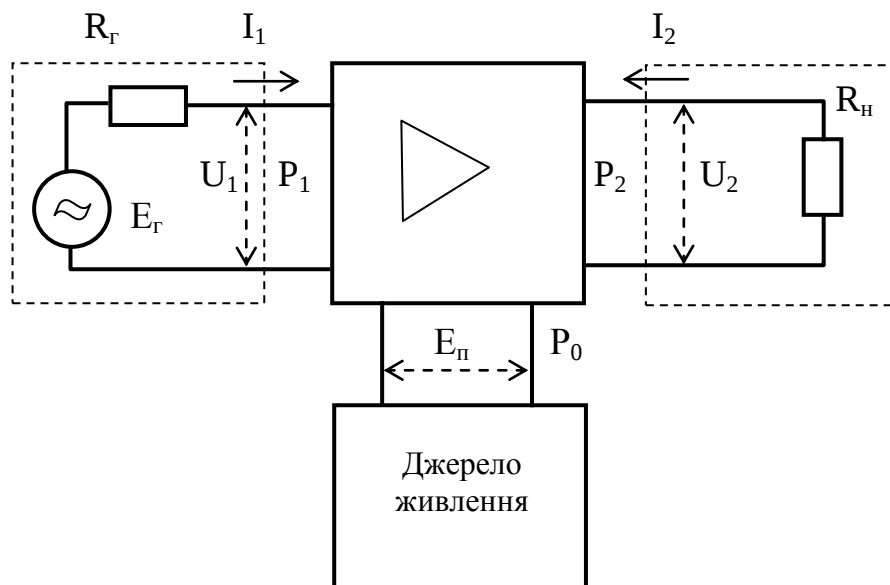


Рисунок 1

Структурна схема відображує основні складові частини підсилювача і зв'язок між ними (рис.1).

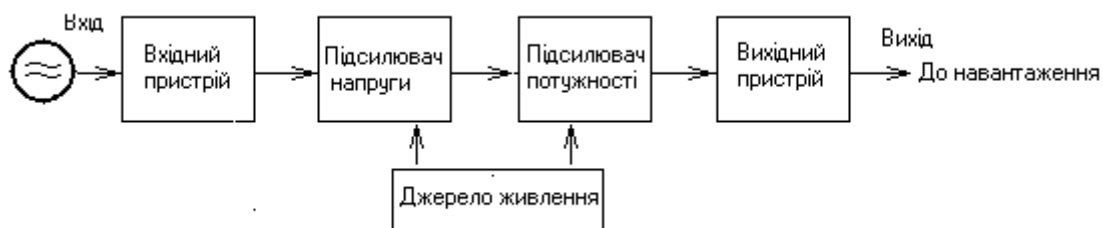


Рисунок 2 - Структурна схема підсилювача

До входу підсилювача підключене джерело вхідного сигналу, до виходу – навантаження, тобто споживач підсилених сигналів.

Основні складові частини схеми підсилювача:

- вихідний підсилювач (підсилювач потужності) – призначений для підсилення сигналу за потужністю;

- попередній підсилювач (підсилювач напруги) – призначений для підсилення сигналу за напругою до величини, достатньої для роботи підсилювача потужності;

- вхідний пристрій призначений для узгодження опору джерела вхідного сигналу з вхідним опором підсилювача напруги;

- вихідний пристрій призначений для узгодження вихідного опору підсилювача потужності з опором навантаження;

Живлення схеми здійснюється від джерела живлення.

2 Класифікація підсилювачів

Класифікація підсилювачів здійснюється за різними ознаками:

- **по виду підсилюваного сигналу** вони діляться на підсилювачі гармонійних і імпульсних сигналів;

- **за типом підсилюваного сигналу** підсилювачі поділяють на підсилювачі напруги, струму і потужності;

- **за діапазоном підсилюваних частот** розрізняють підсилювачі

- *постійного струму ППС* які по суті є підсилювачами повільно мінливих сигналів з діапазоном від нуля до сотень кілогерц (діапазон частот від $f=0$);

- *підсилювачі змінного струму:*

- підсилювачі низької частоти – ПНЧ від десятків герц до десятків кілогерц; (діапазон частот становить $20 \div 20000$ Гц);

- підсилювачі високої частоти (радіочастоти) – ПРЧ (діапазон частот від 20 ГГц);

- виборчі, смугові, підсилювачі, які підсилюють сигнал в дуже вузькому діапазоні частот;

- широкосмугові (імпульсні) підсилювачі – ШСП (діапазон частот від декількох кГц до декількох МГц);

У свою чергу *підсилювачі змінного струму* в залежності від діапазону підсилюються частот *діляться* на підсилювачі:

- низької частоти (УНЧ);

- високої частоти (УВЧ);

- широкосмугові;

- виборчі підсилювачі.

Останні забезпечують посилення у вузькому діапазоні частот;

- **по виду навантаження** розрізняють підсилювачі з активним, з активно-індуктивним і ємнісним навантаженням.

- **за типом підсилювальних елементів:**

- лампові;
- транзисторні;
- інтегральні;
- магнітні.

- **за способами живлення:** з живленням від електричної мережі; автономного живлення; подвійного живлення.

Підсилювачі можуть бути *однокаскадним* і *багатокаскадними* з гальванічним, ємнісним і індуктивним зв'язком.

Залежно **від режиму роботи** можна виділити два класи підсилювачів:

- підсилювачі з лінійним режимом роботи
- підсилювачі з нелінійним режимом роботи.

Залежно від призначення розрізняють підсилювачі *струму, напруги, потужності*.

За *характером зміни підсилюваного сигналу* вони діляться на підсилювачі:

- постійного струму;
- змінного струму, а підсилювачі змінного струму в свою чергу діляться на підсилювачі НЧ і ВЧ.

За конструктивним оформленням розрізняють підсилювачі:

- в інтегральному виконанні (всі елементи підсилювача сформовані в межах одного кристалу);
- підсилювачі, конструюються методом монтажу окремих радіодеталей.

В складі підсилювача можуть бути 1, 2 або декілька послідовно ввікнених каскадів підсилення.

Для того щоб отримати необхідну вихідну величину при малому вхідному сигналі часто недостатньо одного каскада підсилення, тому застосовують багатокаскадний підсилювач.

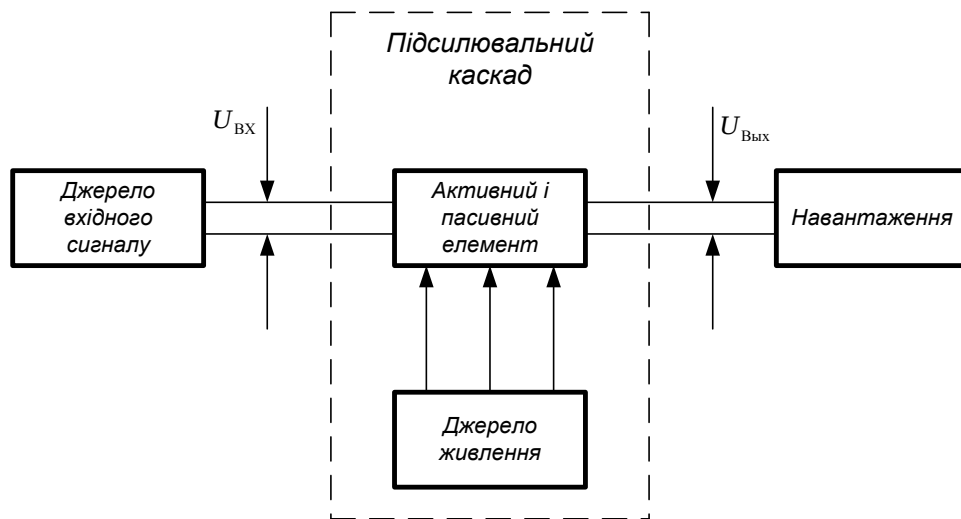


Рисунок 1. – Структурная схема підсилювального каскаду

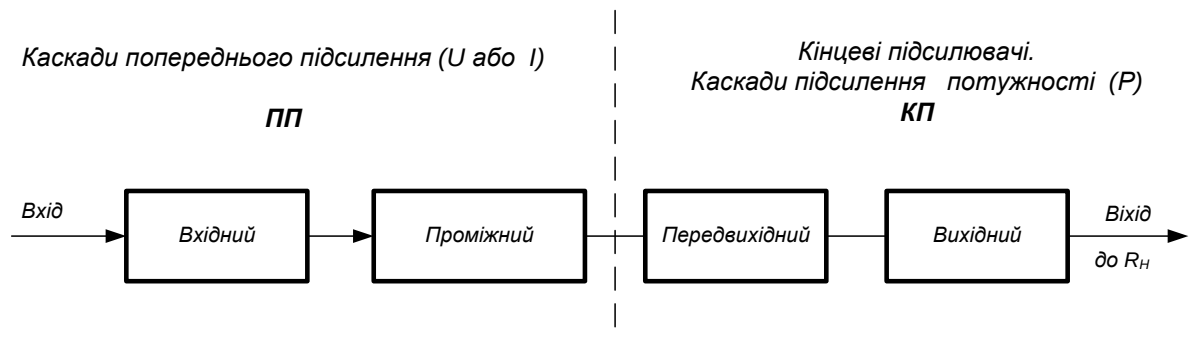


Рисунок 2 – Структурна схема багатокаскадного підсилювача

Бувають однотипні каскади підсилення і різнотипні.

Змістовий модуль 15. Зворотний зв'язок в підсилювачах

Лекція 17

Тема: Види і способи здійснення зворотного зв'язку

1 Зворотний зв'язок в підсилювачах: поняття основні і визначення

Крім каналу прямого проходження сигналу (основне коло) підсилювальний каскад може мати кола, по яких частина енергії корисного сигналу передається з виходу каскаду на його вхід або на вхід одного з попередніх каскадів у випадку багатокаскадного. При цьому в підсилювачі діє *зворотний зв'язок*.

Зворотній зв'язок в підсилювачах - це зв'язок між вхідним і вихідним ланцюгом.

Зворотним зв'язком (ЗЗ) називається явище передачі частини енергії підсилених коливань з вихідного ланцюга підсилювача в її вхідний ланцюг.

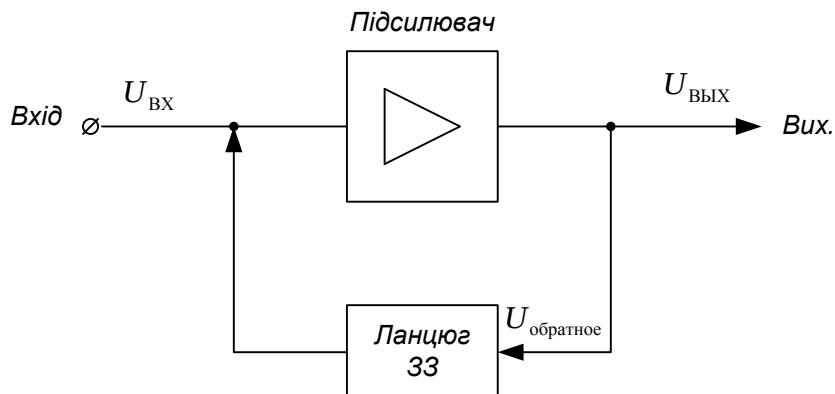


Рисунок 1 – Зворотній зв'язок в підсилювачах

Передача частини енергії сигналу з виходу підсилювача на його вхід **називається зворотним зв'язком (ЗЗ)**.

Кола, по яких подається сигнал зворотного зв'язку, називають *колами зворотного зв'язку*.

Замкнутий контур, утворений під'єднанням до підсилювача кола зворотного зв'язку, називають *петлею зворотного зв'язку*.

Розрізняють *однопетльові* та *багатопетльові* зворотні зв'язки.

2 Види зворотного зв'язку

Ланцюги, через які здійснюється зворотний зв'язок, називаються ланцюгами зворотного зв'язку і можуть бути:

- спеціально вводимими;
- паразитними (самонавідними).

Спеціально вводимі в свою чергу можуть бути:

- частотнозалежними;
- частотннезалежними.

Перші містять реактивні елементи, другі - ні.

Найчастіше ланцюги ЗЗ пасивні - це лінійні ланцюги.

Ланцюги ЗЗ можуть бути зовнішніми і внутрішніми, отже зв'язок може бути зовнішнім і внутрішнім.

У першому випадку ланцюг можна представити у вигляді чотириполюсника, включеного між виходом підсилювача і його входом, або між виходом і входом частини підсилювача або

окремих його каскадів.

У першому випадку ЗЗ називається загальним, у другому - місцевим

У разі внутрішнього зворотного зв'язку елемент ЗЗ, як правило, активний (резистор), і є невід'ємною частиною схеми і при його вилученні схема втрачає працездатність.

Елемент паразитних зворотних зв'язків - це паразитні ємності монтажу або паразитні індуктивності, або корозії, реактивні елементи, активні елементи.

За способом підключення кола зворотного зв'язку до виходу підсилювача розрізняють зворотний зв'язок за напругою та за струмом. При зворотному зв'язку за напругою напруга зворотного зв'язку пропорційна вихідній напрузі, а при зворотному зв'язку за струмом вона пропорційна вихідному струмові. Крім того, можливий змішаний зворотний зв'язок.

Для визначення способу зняття і введення сигналу ЗЗ в конкретній схемі можна скористатися наступними правилами, заснованими на застосуванні короткого замикання і холостого ходу щодо навантаження і джерела сигналу:

якщо при умовному замиканні вихідних затискачів підсилювача (R_n) механізм дії ЗЗ зникає, а в режимі холостого ходу залишається, то діє ЗЗ **по напрузі**;

якщо при умовному замиканні вихідних затискачів підсилювача механізм дії ЗЗ залишається, а в режимі холостого ходу зникає, то діє ЗЗ **по струму**;

За способом подачі зворотного зв'язку на вхід підсилювача розрізняють паралельний та послідовний зворотний зв'язок.

якщо при умовному замиканні вхідних затискачів підсилювача механізм дії ЗЗ залишається, а в режимі холостого ходу зникає, то така ЗЗ називається **послідовним**;

якщо при умовному замиканні вхідних затискачів підсилювача ($E_{дж}$) механізм дії ЗЗ зникає, а в режимі холостого ходу залишається, то діє **паралельний ЗЗ**;

якщо ж ЗЗ не зникає ні при короткому замиканні, ні при холостому ходу, то ЗЗ щодо цієї пари затискачів (входу або виходу) називають **комбінованим**.

В залежності від фазового співвідношення між напругою зворотного зв'язку і напругою на виході підсилювача розрізняють позитивний (ПЗЗ) і негативний (НЗЗ) зворотний зв'язок.

Зворотний зв'язок називають **позитивним** (ПЗЗ), якщо його напруга знаходиться точно в фазі з напругою сигналу, який підводиться до входу пристрою, і складається з останнім, збільшуючи в такий спосіб напругу сигналу на вході. При позитивному зворотному зв'язку напруга зворотного зв'язку і напруга на виході підсилювача співпадають по фазі. ПЗЗ приводить до самозбудження підсилювача і є паразитним.

При позитивній зворотній напрузі U_{OC} співпадає по фазі з U_{BX} , і тоді маємо:
 $U'_{BX} = U_{BX} + U_{OC}$.

При негативному зворотному зв'язку напруга U_{OC} знаходиться в протифазі з U_{BX} , і тоді маємо: $U'_{BX} = U_{BX} - U_{OC}$.

Якщо ж напруга зворотного зв'язку знаходиться точно в протифазі з вхідним, а отже, віднімається з нього, зменшуючи сигнал на вході, зворотний зв'язок називають **негативним** (НЗЗ).

При негативному зворотному зв'язку напруга зворотного зв'язку і напруга на виході підсилювача знаходяться в протифазі. При цьому зменшується коефіцієнт підсилення:

$$K_{зв} = K / (1 + \beta K) ;$$

де $K_{зв}$ – коефіцієнт підсилення за умови дії НЗЗ;

K – коефіцієнт підсилення без НЗЗ.

Негативний зворотний зв'язок знижує рівень амплітудно-частотних спотворень в підсилювачі, спрямляє його АЧХ, а також зменшує нелінійні спотворення за рахунок зменшення амплітуди вищих гармонік. Таким чином, негативний зворотний зв'язок є засобом покращання якісних показників підсилювача і широко використовується в підсилювальній схемотехніці.

При зміщенні фаз між напругою зворотного зв'язку і вхідною напругою, яке відрізняється як від 0° , так і від 180° , зворотний зв'язок називають **комплексним**.

Якщо ланцюг зворотного зв'язку не містить реактивних опорів (індуктивностей, ємностей), а тому відношення напруги зворотного зв'язку на виході ланцюга до напруги на її вході від частоти не залежить, зворотний зв'язок називають **частотнонезалежним**. Якщо ж ланцюг зворотного зв'язку містить реактивні опору і вказане відношення напруг залежить від частоти, зв'язок називають **частотнозалежним**.

Величина (глибина) зворотного зв'язку оцінюється коефіцієнтом зворотного зв'язку β . Він показує, яка частина вихідної напруги колом зворотного зв'язку подається на вхід:

$$\beta = U_{зв} / U_{вих} ,$$

де $U_{зв}$ – напруга зворотного зв'язку;

$U_{вих}$ – напруга на виході підсилювача.

Зворотний зв'язок є надзвичайно дієвим інструментом для отримання необхідних

характеристик перетворювачів. Суть зворотного зв'язку полягає в передачі сигналу з виходу перетворювача на його вхід. Зворотний зв'язок (ЗЗ) широко застосовується в електронних пристроях, наприклад, в генераторах коливань і підсилювачах. Якщо в генераторах застосовується позитивний зворотний зв'язок (ПЗЗ), що підтримує коливання, то в підсилювачах застосовується негативний зворотний зв'язок (НЗЗ), що дозволяє зменшити нелінійні спотворення, змінити в бажану сторону вхідний і вихідний опори і головне підвищити стабільність характеристик. В той же час, некерований (паразитний) ЗЗ призводить до погіршення роботи перетворювачів. Наприклад, можуть з'явитися автоколивання, зменшиться стабільність і лінійність перетворення.

Література: [Л.1] с.117-121, [Л.2] с.90-94, [Л.5] с.336-340.

Змістовий модуль 16.

Принцип побудови підсилювальних каскадів

Лекція 18

Тема: Режим роботи підсилювального каскаду

Характер роботи підсилювального каскаду і його параметри залежать від режиму роботи активного елемента за постійним струмом. Розглянемо це на прикладі транзисторного підсилювального каскаду за схемою ЗЕ, який є основою більшості схем підсилювачів, включаючи й операційні підсилювачі.

Початковий режим транзистора (режим спокою) визначається положенням робочої точки P на динамічній характеристиці транзистора. Від положення робочої точки залежать значення постійних складових струмів вхідного та вихідного електродів транзистора і напруг на цих електродах), тобто потужність, яку споживає підсилювач від джерела. В свою чергу, вибір робочої точки в значній мірі регламентується амплітудою, формою і полярністю вхідного змінного сигналу.

Розрізняють три основні режими роботи підсилюючого каскаду — A , B і C .

Розглянемо особливості режимів роботи підсилюючого каскаду при дії на вході змінного сигналу синусоїдальної форми.

Клас А.

В режимі класу А вибір положення точки спокою проводиться таким чином, щоб вхідний сигнал не виходив за межі лінійної ділянки АВ вхідної ВАХ транзистора, а значення струму

спокою $I_{б0}$ знаходилося на середині цієї ділянки. На вихідних характеристиках транзистора робоча точка при цьому розташовується на навантажувальній прямій так, щоб амплітудні значення сигналів не виходили за межі ділянки, де зміни струму колектора прямо пропорційні струму бази ділянку $A'B'$.

В режимі підсилення A початкове положення робочої точки вибирають приблизно посередині відрізка динамічної характеристики, де зміні базового (вхідного) струму відповідає пропорційна зміна колекторного (вихідного) струму, а її переміщення, пов'язане з дією подвійної амплітуди вхідного сигналу, обмежується цим відрізком. Слід зазначити, що, залежно від нахилу динамічної характеристики, переміщення робочої точки в режимі підсилення A може проходити навіть в межах *робочого* відрізка динамічної характеристики, що показує на не критичність амплітуди підсилюваного сигналу в цьому режимі. Так чи інакше напруга зміщення в колі бази $U_{б0}$ більша за $U_{вм}$ вхідного сигналу, а струм спокою в колекторному колі $I_{ок}$ перевищує амплітуду змінної складової колекторного струму $I_{кт}$. Тому вихідний колекторний струм протікає за час всього періоду підсилюваного сигналу, що є характерною особливістю *режиму підсилення A* .

Оскільки робоча точка не виходить за межі лінійного відрізка вхідної динамічної характеристики, то лінійні спотворення, які вносяться підсилювачем, невеликі і тим менші, чим менша амплітуда вхідного сигналу. Але при цьому низький ККД підсилювача, оскільки корисна потужність $P_{вих}$, яка віддається в навантаження, задається змінною складовою колекторного струму з амплітудою $I_{кт}$. При цьому $I_{кт}$ менший за постійну складову струму $I_{ок}$, яка обумовлює потужність P_k , що споживається від джерела живлення. ККД підсилювачів в режимі A , які, як правило, використовуються як попередні підсилювачі або як малопотужні кінцеві каскади, не перевищує 20 %.

Таким чином, в режимі класу A підсилювач потужності матиме мінімальні нелінійні спотворення: струм і напруга в вихідний ланцюга повністю повторюють форму струму і напруги у вхідному ланцюзі (рис 1). Амплітудні ж значення вихідного струму і напруги досить малі, тому невелика і вихідна потужність підсилювача $P_{вих} = I_{тк} \cdot U_{ткк} / 2$.

Крім того, в вихідному ланцюзі підсилювального приладу протікає незмінений, досить великий, постійний струм $I_{кс}$ як при будь-якому рівні вхідного сигналу, так і при його відсутності. Тому потужність, споживана каскадом від джерела живлення $P_{спож} = I_{кс} \cdot E_k$ велика. З цих причин коефіцієнт корисної дії каскаду в режимі класу A виявляється невисоким ($\eta \approx 30\%$).

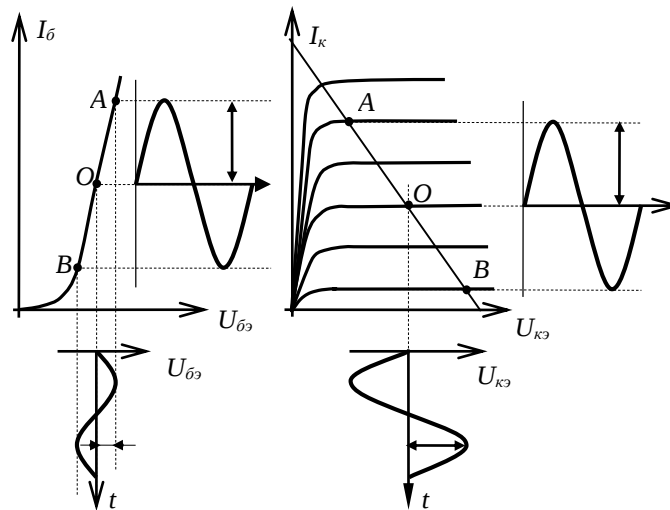


Рисунок 1 - Ілюстрація режиму роботи класу А

Клас В. Більш потужні варіанти вихідних каскадів підсилювачів частіше працюють в режимі класу В, коли робоча точка спокою вибирається при $I_{bo} = 0$, коли $U_{be} = 0$ (рис. 2).

В режимі підсилення В початкове положення робочої точки на динамічній характеристиці вибирають при струмі колектора близькому до I_{ko} . Тому при наявності змінного вхідного сигналу змінна складова колекторного струму з амплітудою I_{kt} протікає лише за половину періоду сигналу, а в другій половині періоду транзистор закритий, тобто працює з відсічкою струму. В цьому випадку амплітуда вихідного сигналу обмежена лише лінійністю вихідних характеристик транзистора (перехід його в режим насичення), але при цьому посилюється тільки його позитивна напівхвиля. У вихідному ланцюзі протікає досить великий струм протягом позитивного напівперіоду вхідного сигналу. При цьому кут відсічки струму θ приблизно дорівнює $\pi/2$ електричних градусів.

Для посилення двополярних сигналів застосовують двотактну схему, в якій два транзистора, працюючи по черзі, підсилюють сигнал в позитивному і негативному напівперіодах

В режимі класу В потужність, споживана від джерела живлення $P_{спож}$ дуже мала, так як дуже малий струм колектора в режимі спокою. Вихідна коливальна потужність досить велика, тому каскад має високий ККД ($\eta \approx 70\%$). Платою за високий ККД є великі нелінійні спотворення підсилювача (рис. 2), величина яких залежить від ступеня нелінійності вхідних характеристик транзистора

Важливою особливістю режиму В є високий ККД підсилювача (60... 70 %), оскільки постійна складова колекторного струму від джерела живлення при відсутності підсилюваного сигналу приблизно дорівнює нулю. Тому такий режим найкраще використовувати в каскадах підсилення великої потужності, коли вони працюють при великих рівнях підсилюваних сигналів, незважаючи на високий рівень нелінійних спотворень у підсилювачі.

Внаслідок високої економічності підсилювачі в режимі *B* застосовують в переносних пристроях навіть при вихідній потужності в сотні міліват.

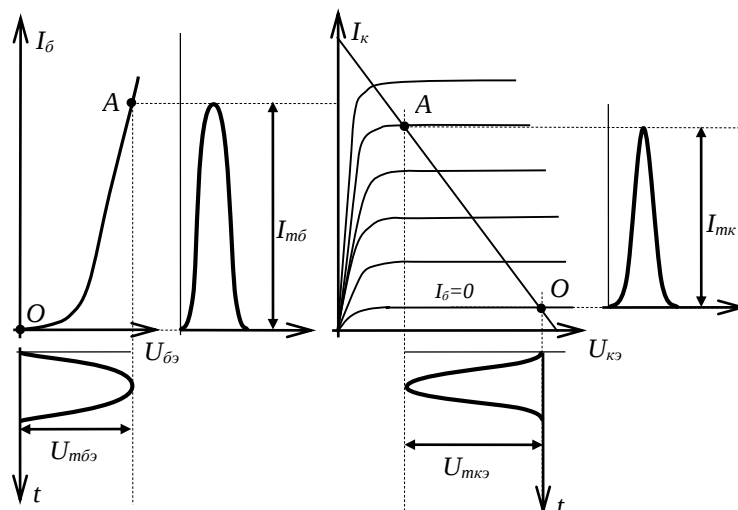


Рисунок 2 - Ілюстрація режиму роботи класу В.

Клас АВ.

У деяких випадках використовують проміжний *режим підсилення АВ*, який характеризується кутом відсічки в 120... 130 ел. град., і меншими нелінійними спотвореннями, але виявляється економічнішим, ніж режим підсилення *A*.

Щоб зменшити нелінійні спотворення вихідного сигналу і зберегти вихідну потужність і ККД значними, необхідно організувати роботу підсилювального каскаду в режимі АВ.

При цьому робочу точку спокою вибирають трохи вище на навантажувальній прямій, ніж в режимі В, тобто зберігаючи невеликим значення струму колектора $I_{ко}$ (а значить і $P_{спож}$). На вхідних же характеристиках робоча точка буде знаходитися трохи вище нелінійної ділянки, але цього буде достатньо, щоб нелінійні спотворення вихідного сигналу стали значно менше, ніж в режимі класу В (рис. 3). Режим класу АВ також застосовується в двотактних пристроях.

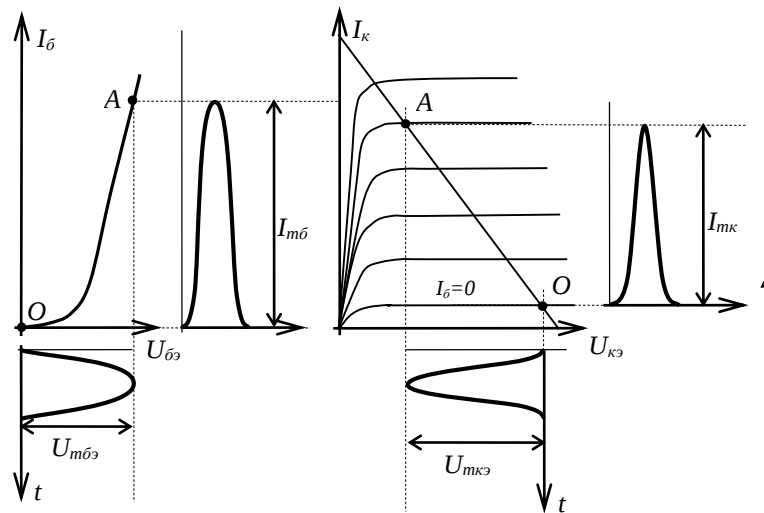


Рисунок 3 - Ілюстрація режиму роботи класу АВ.

Режим С.

Початкове зміщення і положення робочої точки в транзисторі, що працює в *режимі підсилення С*, відповідає режиму відсічки, а кут відсічки $\theta < \pi/2$. Цей режим найекономічніший (ККД 85 %), оскільки при відсутності підсилюваного сигналу транзистор практично не споживає енергії.

Режим *С* використовують у підсилювачах-формуваках, які працюють при перевищенні вхідним сигналом деякого порогового значення, а також в автогенераторах.

Змістовий модуль 17. Каскади попереднього підсилення

Лекція 19

Каскад попереднього підсилення на біполярному транзисторі

- 1 Каскад попереднього підсилення. Загальна характери
- 2 Каскад підсилення на біполярному транзисторі
- 3 Принцип роботи підсилювача на біполярному транзисторі

1 Каскад попереднього підсилення. Загальна характеристика.

Каскад попереднього підсилення призначені для підсилення сигналів за напругою до рівня, який забезпечує нормальну роботу вихідного каскаду підсилювача.

Каскади попереднього підсилення будуються на дискретних біполярних або польових транзисторах, а також в інтегральному виконанні. Елементарні підсилювальні каскади являють собою однокаскадні схеми. До таких каскадів на біполярних транзисторах відносять каскади із загальним емітером (ЗЕ), загальним колектором (ЗК) і загальною базою (ЗБ).

При цьому як правило застосовується схема вмикання транзистора з загальним емітером (загальним витоком).

Схема ЗЕ забезпечує як підсилення напруги, так і підсилення струму.

Каскад за схемою з ЗК (емітерний повторювач) повторює на виході вхідну напругу, але із-за підсилення струму забезпечує підсилення потужності.

Схема ЗБ повторює на виході струм, що надходить у вхідне коло каскаду (повторювач струму). Підсилення потужності в цьому каскаді забезпечується за рахунок підсилення напруги.

Найбільше підсилення потужності має схема із ЗЕ.

Транзистори попереднього підсилювача працюють в режимі А.

Попередній підсилювач може бути одно- або багатокаскадним, в залежності від необхідного коефіцієнту підсилення.

Однокаскадні підсилювачі звичайно працюють в режимі малого сигналу. Тому для аналізу їх якостей і одержання динамічних параметрів — вхідного і вихідного опорів, коефіцієнтів підсилення за струмом і напругою — складають схему заміщення каскаду.

При проведенні аналізу допускають, що на вхід каскаду подається стале синусоїдальне електричне коливання (для підсилювачів сигналів незмінної чи повільно змінної амплітуди) або миттєвий стрибок напруги (для підсилювачів імпульсних сигналів).

Для зменшення числа каскадів в них застосовують транзистори з високим коефіцієнтом підсилення.

В багатокаскадних підсилювачах використовуються такі види міжкаскадного зв'язку: безпосередній (гальванічний); ємнісний (через розділюючий конденсатор); трансформаторний.

Безпосередній зв'язок використовується найчастіше, особливо в інтегральних підсилювачах. Ємнісний використовується в основному в підсилювачах низької частоти на дискретних елементах. Трансформаторний зв'язок використовується обмежено, лише при необхідності узгодження опорів каскадів, оскільки трансформатор вносить значні амплітудно-частотні спотворення.

АЧХ попереднього підсилювача рівномірна в області середніх частот. В області нижніх частот коефіцієнт підсилення знижується в основному через вплив розділюючих конденсаторів. В області верхніх частот коефіцієнт підсилення також знижується через вплив так званих паразитних ємностей схеми, які складаються з вхідних і вихідних ємностей транзисторів та ємностей монтажу.

Крім біполярних транзисторів, в підсилювальних каскадах використовуються польові транзистори.

По аналогії з каскадами на біполярних транзисторах елементарні каскади на польових транзисторах діляться на каскади із загальним витоком (ЗВ), загальним стоком (ЗС) та загальним затвором (ЗЗ).

2 Каскад підсилення на біполярному транзисторі

Являє собою схему на одному підсилювальному елементі, яка має всі складові частини, необхідні для забезпечення його роботи.

Основні елементи каскаду:

- біполярний транзистор. Може вмикатися за схемою з загальним емітером, загальним колектором, загальною базою. В подальшому розглядається каскад на транзисторі з ЗЕ;

- колекторне навантаження R_k – для забезпечення динамічного режиму роботи транзистора;

- коло живлення;

- елементи зміщення. Забезпечують встановлення положення робочої точки на динамічній характеристиці транзистора у відповідності до вибраного режиму роботи. Використовуються різноманітні схеми зміщення. Найбільш поширеними є зміщення фіксованою напругою за допомогою подільника напруги R_1R_2 в колі бази (рис.1а) та зміщення фіксованим струмом бази (встановлюється резистором R_b) (рис.1б);

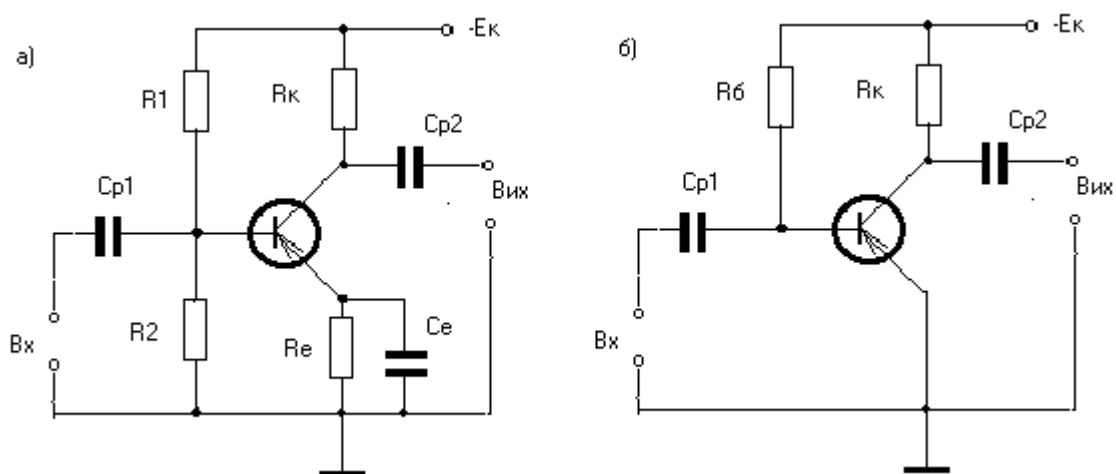


Рисунок 1 - Елементарні каскади підсилення на біполярних транзисторах

- елементи температурної стабілізації (термостабілізації) режиму. Забезпечують стабільне положення робочої точки при зміні температури. Принцип термостабілізації полягає в застосування в каскаді негативного зворотного зв'язку. Використовують декілька методів термостабілізації, а найчастіше – так звану емітерну. Для її реалізації в коло емітера транзистора вмикається резистор R_e і конденсатор C_e ;

- На вході і виході каскаду можуть також вмикатися розділюючі конденсатори, які не пропускають в коло входу і на вихід постійну складову сигналу.

Каскади підсилення на біполярних транзисторах є основою для побудови підсилювальних схем різного призначення.

Література: [Л.1] с.121-135, [Л.2] с.69-75, **с.76-82**; [Л.5] с.347-357, **с.357-362**.

3 Принцип роботи підсилювача на біполярному транзисторі

Серед схем транзисторних каскадів найбільше поширення набула схема із загальним емітером (ЗЕ) (рис.1) завдяки ряду переваг:

- щодо великого вхідного опору;
- можливості посилення сигналу як по струму, так і по напрузі;
- можливості живлення схеми від одного джерела напруги.

Резистивний подільник R_1, R_2 задає напругу на базі транзистора U_{B0} (рис.2), якщо знехтувати малим струмом бази то можна записати

$$U_{B0} = \frac{E_K}{R_1 + R_2} \times R_2$$

При цьому напруга зсуву $U_{зс}$, яке забезпечує роботу транзистора в режимі спокою (під час відсутності вхідного сигналу) і визначає клас роботи підсилювача, визначається виразом

$$U_{зс} = U_{BE0} = U_{B0} - I_{E0} \times R_E$$

Елементи схеми R_1, R_2, R_E, C_E створюють негативний зворотний зв'язок (НЗЗ) по постійному струму, яка забезпечує температурну стабілізацію робочої точки. Якщо в результаті нагріву транзистора струм колектора I_{K0} отримує деяке позитивне збільшення, то таке ж збільшення отримає і струм емітера, оскільки $I_{E0} = I_{K0} - I_{B0} \sim I_{K0}$. Падіння напруги на резисторі R_E збільшиться, в результаті напруга U_{BE0} зменшиться, що приводить до зменшення I_{K0} .

Розділовий конденсатор C_{p1} запобігає потраплянню в ланцюг бази транзистора VT постійної складової вхідного сигналу, яка могла б спотворити режим роботи транзистора по постійному струму.

Крім того цей конденсатор перешкоджає протіканню постійного струму від джерела живлення E_K через ланцюга джерела вхідного сигналу.

Конденсатор зв'язку C_{p2} на виході підсилювального каскаду забезпечує виділення з колекторного напруги U_{KE} змінної складової (рис.2), яка подається в навантаження R_H або наступний каскад підсилення напруги (в багатокаскадному підсилювачі).

Вихідна напруга U_{KE} створюється за допомогою резистора в колекторному ланцюзі R_K при зміні колекторного струму транзистора.

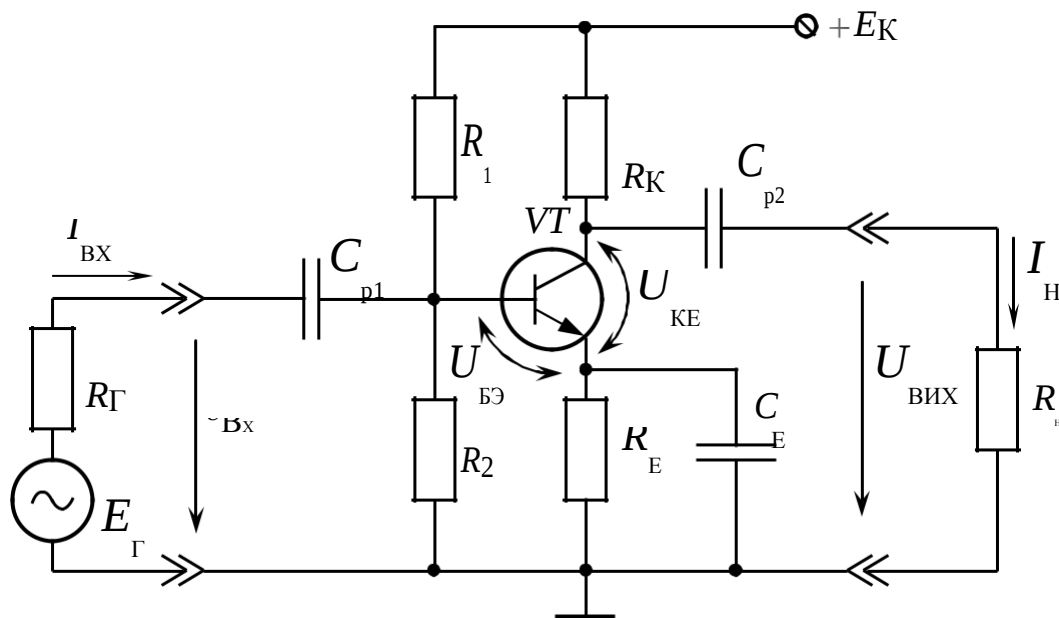


Рисунок 1 – Схема транзисторного підсилювача з ЗЕ

Для колекторного ланцюга підсилювального каскаду у відповідності з другим законом Кірхгофа можна записати наступне рівняння електричного стану

$$E_K = U_{KE} + R_K \times I_K$$

В даному випадку мається на увазі, що на частоті сигналу опором емітерного ланцюга можна знехтувати. З рівняння видно, що збільшення струму колектора при відкритті транзистора призводить до зростання падіння напруги на R_K і, відповідно, до зменшення вихідної напруги. Вихідний сигнал знаходиться в протифазі до вхідного, тобто транзисторний підсилювач з ЗЕ інвертує сигнал

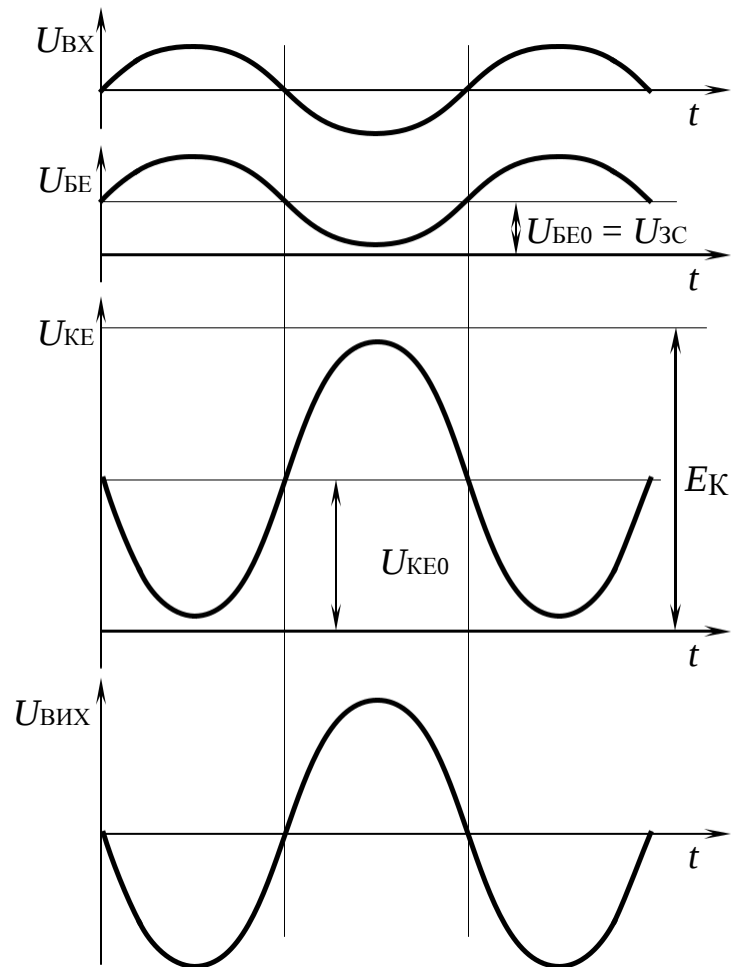


Рисунок 2 – Сигнали напруги, що діють в підсилювачі

Вихідні каскади підсилювачів

Лекція 20

Тема: Підсилювачі потужності.

Схеми однотактних та двотактних вихідних каскадів.

План

- 1 Призначення підсилювачів потужності
- 2 Схема однотактного вихідного каскаду
- 3 Схема двотактного вихідного каскаду

1 Призначення підсилювачів потужності

Призначені для підсилення сигналів за потужністю. Основні вимоги до них:

- віддача навантаженню потрібної потужності сигналу;
- мінімальні нелінійні і амплітудно-частотні спотворення;
- висока економічність;
- узгодженість вихідного опору підсилювача з опором навантаження.

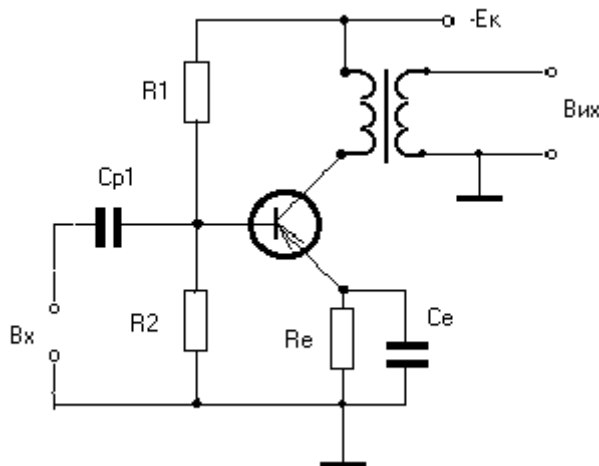


Рисунок 1 - Однотактний вихідний каскад

Необхідна вихідна потужність забезпечується застосуванням відповідних типів транзисторів (середньої або великої потужності). Зменшення рівня нелінійних спотворень забезпечується правильним вибором режимів роботи транзисторів, а амплітудно-частотних – побудовою схем на елементах з незначними реактивними складовими, а також застосуванням негативного зворотного зв'язку. Для високої економічності в вихідних каскадах доцільно використовувати режим “В”. Узгодженість вихідного каскаду з навантаженням забезпечується використанням спеціальних узгоджувальних пристроїв.

Схема однотактного вихідного каскаду.

Однотактним називається вихідний каскад, який будується на одному підсилювальному елементі, що працює в режимі “А” (рис.1). Для узгодження вихідного опору каскаду з опором низькоомного навантаження призначений вихідний трансформатор. Найчастіше каскад будується за схемою з ЗЕ, яка має високий коефіцієнт підсилення потужності. Використовується також схема з загальною базою, яка забезпечує менший рівень нелінійних спотворень. Оскільки однотактний каскад працює в режимі “А”, він має невисокий ККД і є малоекономічним.

Схема двотактного вихідного каскаду.

Двотактним називається вихідний каскад, який побудований на двох підсилювальних елементах, які можуть працювати як в режимі “А”, так і в режимі “В” (рис.8а).

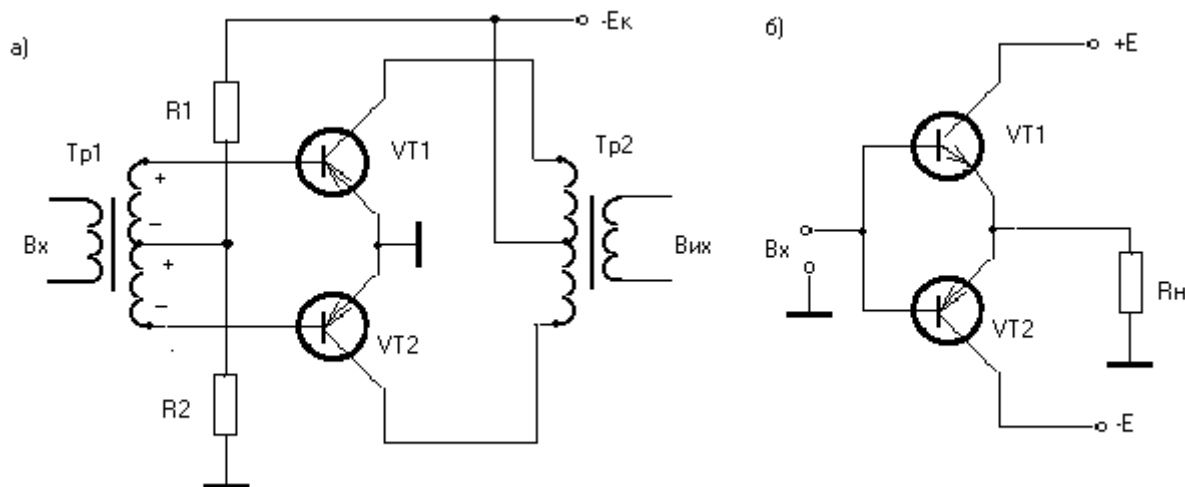


Рисунок 2 - Схеми двотактних вихідних каскадів

Схема двотактного вихідного каскаду симетрична, оскільки має два однакових підсилювальних плеча, які працюють на спільне навантаження. Двотактні каскади можуть бути з трансформаторним (рис.2а) і безтрансформаторним (рис.2б) виходом. Схема з безтрансформаторним виходом простіша і, крім того, дає значно менші спотворення, тому використовується у високоякісних підсилювачах. Важливою перевагою двотактних схем є більш високий ККД при використанні режиму “В”. Разом з тим двотактні каскади потребують ідентичності плеч, особливо стосовно параметрів транзисторів.

Література: [Л.1] с.149-152, [Л.2] с.101-103, [Л.5] с.363-373.

Лекція 21

Тема: Емітерний повторювач

Емітерним повторювачем (ЕП) називається каскад підсилення, побудований на транзисторі з загальним колектором (рис.1). При самостійному опрацюванні схеми зверніть увагу, що навантажувальний резистор R_e увімкнено в коло емітера і саме з емітера знімається вихідний сигнал

Резистори R_1 і R_2 є елементами зміщення.

На відміну від каскаду з загальним емітером ЕП має високий вхідний і низький вихідний опір. Ця властивість і зумовила його використання як узгоджуючого каскаду. Найчастіше ЕП

вмикається як вихідний каскад в підсилювачах з безтрансформаторним виходом. Навантажувальний резистор, увімкнений в коло емітера, утворює в каскаді глибокий негативний зворотний зв'язок, який забезпечує досить рівномірну АЧХ. Оскільки вихідний сигнал, який знімається з емітера, повторює за фазою вхідний сигнал на базі, схема й дістала назву „емітерний повторювач”. Аналогом емітерного повторювача в пристроях на польових транзисторах є схема з загальним стоком

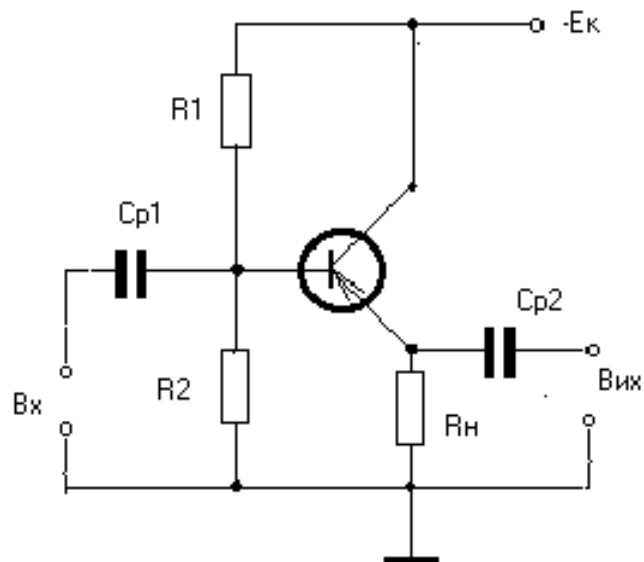


Рисунок 1 - Емітерний повторювач

Контрольні запитання:

- Поясніть призначення емітерного повторювача.
- Поясніть призначення окремих елементів схеми.
- В чому полягає особливість параметрів емітерного повторювача?
- Для чого використовуються емітерні повторювачі?

Література: [Л.1], с.130-131.

Змістовий модуль 19. Підсилювачі постійного струму

Лекція 22

Тема: Підсилювачі постійного струму прямого підсилення

Підсилювачами постійного струму (ППС) називаються електронні пристрої, які можуть підсилювати дуже повільні електричні сигнали; їх нижча робоча частота $f_n = 0$, а вища робоча частота f_v визначається призначенням підсилювача.

У вимірювальній техніці широко застосовують датчики. Вони є перетворювачами неелектричних величин в електричні, часто - в напругу постійного струму. Їх вихідна напруга пропорційна таким неелектричним величинам, як температура, тиск, освітленість і т.ін. Рівень вихідних напруг датчиків невеликий, з часом вони малозмінні або взагалі незмінні.

Для підсилення таких сигналів і використовуються підсилювачі постійного струму (ППС).

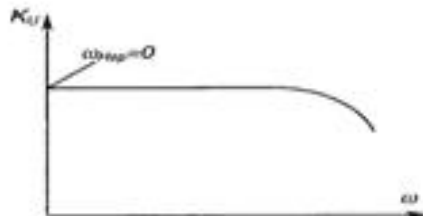


Рисунок 1- АЧХ ППС

Її особливість полягає у тому, що нижня гранична частота діапазону підсилюваних сигналів дорівнює нулю. Отже, є можливість підсилення сигналів постійного струму.

Схемотехнічно це забезпечується відсутністю розділових конденсаторів або трансформаторів між джерелом струму, каскадами і навантаженням. Тобто, ППС є підсилювачем з безпосередніми зв'язками.

Перевага наявності розділових елементів, які забезпечують розділення за постійним струмом і зв'язок за змінним - режим і-го каскаду за постійним струмом не впливає на роботу інших каскадів, джерела сигналу або навантаження.

У підсилювачах з безпосереднім зв'язком вплив дестабілізуючих факторів (наприклад, змін з часом температури або напруги живлення) на режим спокою каскаду призводить до того, що навіть за відсутності вхідного сигналу на виході підсилювача може з'являтися напруга, яка навантаженням буде сприйматися як результат підсилення деякого вхідного сигналу. Це явище називається дрейфом нуля ППС.

Дрейф нуля обумовлюється зміною вихідної напруги за зазначений проміжок часу при відсутності вхідного сигналу

$$d = (U_{\text{др. max}} - U_{\text{др. min}}) / K_U,$$

де $U_{\text{др. max}}$, $U_{\text{др. min}}$ - відповідно максимальне та мінімальне значення вихідної напруги за зазначений проміжок часу;

K_U - коефіцієнт підсилення.

Для зменшення дрейфу в ППС застосовують термозалежні елементи (термокомпенсація), запроваджується жорстка стабілізація напруги живлення та, найчастіше, використовують спеціальні балансні схеми, застосування ВЗЗ.

У ППС завжди має бути пристрій установлення нуля, який дає змогу перед роботою встановити нуль на виході ППС (рис.2).

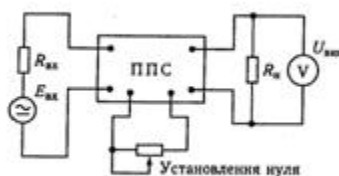


Рисунок 2

Найпростішим представником ППС є підсилювач прямого підсилення з безпосередніми зв'язками. Розглянемо схему двокаскадного підсилювача прямого підсилення, зображену на рис. 3.

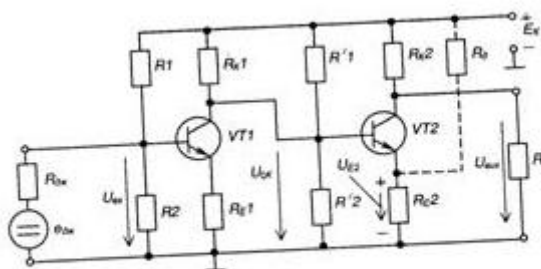


Рисунок 3 - Двокаскадний підсилювач постійного струму прямого підсилення

Він складається з двох каскадів, виконаних за схемою зі СЕ. Призначення елементів те ж саме, що і у підсилювачах змінного струму. Вхідний сигнал, що надходить до входу першого каскаду, підсилюється і з колектора транзистора VT1 подається на вхід другого каскаду, виконаного на транзисторі VT2. Після повторного підсилення, сигнал надходить на навантаження R_n .

На відміну від підсилювача змінного струму, де режим спокою вибирається з умов найліпшого підсилення вхідного сигналу і не впливає на навантаження завдяки наявності реактивних елементів зв'язку, у цьому підсилювачі процеси протікають по-іншому. Напруга спокою першого каскаду $U_{ок}$ безпосередньо подається на вхід другого і, якщо не прийняти спеціальних заходів, під її дією транзистор насичується. Тобто ні про яке підсилення не може йти мови. Для того, щоб виключити це явище, до емітерного кола VT2 вводять резистор R_{E2} , на якому виділяється напруга U_{E2} , що компенсує напругу $U_{ок}$, оскільки спрямована зустрічно.

Тобто виконується умова

$$U_{ок} - U_{E2} = U_{об}; U_{E2} = R_{E2}I_{0E2},$$

де I_{0E2} – струм емітера в режимі спокою.

Наявність великих R_{E1} та R_{E2} призводить до виникнення в схемі глибоких НЗЗ, що значно знижує коефіцієнт підсилення. Тому такі підсилювачі мають обмежену кількість каскадів (зазвичай не більше двох).

Для того, щоб знизити величину емітерної напруги, можна використати ділник напруги R_{E2} , R_d (зображений на рис. 3 пунктиром). У цьому випадку навіть на малому опорі R_{E2} можна одержати потрібний рівень напруги. Але зменшення НЗЗ призводить до підвищення втрат потужності, а отже, до зниження к.к.д.

Даний підсилювач має велике значення дрейфу нуля і використовується у випадках, коли немає високих вимог до якості підсилення. Для підвищення стабільності схеми в якості R_{E1} і R_{E2} використовують терморезистори.

Основними методами підвищення стійкості ППС є:

- застосування балансних (мостових) схем.
- перетворення постійної напруги в змінну і підсилення змінної напруги з подальшим випрямленням (підсилення з модуляцією і демодуляцією сигналу – МДМ).

Лекція 23

Балансний підсилювач постійного струму

Балансні ППС будуються на основі чотириплечого моста з паралельним балансом, схема якого наведена на рис. 1

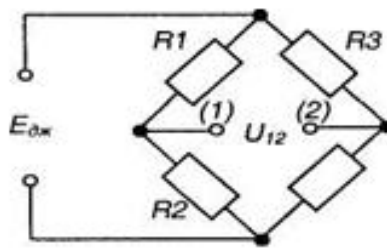


Рисунок 1 - Чотириплечий міст

Умова балансу моста: $R_1/R_2 = R_3/R_4$. Тут $U_{12} = 0$.

Напруга на виході мосту не залежить від змін напруги живлення чи від пропорційних змін параметрів плечей.

На рис. 2 зображена найпростіша схема балансного підсилювача.

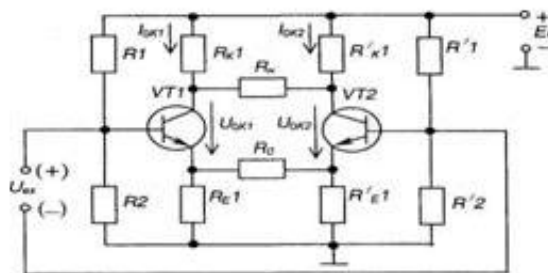


Рисунок 2 - Балансний підсилювач

Він складається з двох каскадів на транзисторах VT1 і VT2. Причому параметри елементів обох каскадів повинні бути практично однаковими (в тому числі і транзисторів, що досить важко виконати):

$$R_1 = R'_1 ; R_2 = R'_2 ; R_{K1} = R'_{K1} ; R_{K2} = R'_{K2}.$$

Навантаження R_n вмикається між колекторами транзисторів.

Підсилювач являє собою чотириплечий міст, де роль резистора R_1 виконує R_{K1} ; R_2 - опір транзистора VT1; R_3 - R'_{K1} ; R_4 - опір транзистора VT2.

Якщо вхідний сигнал відсутній, напруга на навантаженні дорівнює нулю (коли схема абсолютно симетрична). Дрейф нуля практично у 20 - 30 разів менший, ніж у підсилювача з безпосередніми зв'язками, оскільки визначається різницею I_{0K1} та I_{0K2} .

Дія вхідної напруги будь-якої полярності приводить до розбалансу моста, оскільки на бази транзисторів подаються напруги різних знаків. При цьому потенціали колекторів одержують

однакові по абсолютній величині, але протилежні по знаку прирости, через опір навантаження проходить струм, що створює на R_n напругу $U_{вих}$, величина і полярність якої залежать тільки від величини і полярності вхідної напруги. Таким чином, амплітудна характеристика балансної схеми принципово не повинна відрізнятися від прямої лінії, яка проходить через початок координат.

За наявності вхідного сигналу з полярністю, що вказана на рис. 2, транзистор VT1 трохи відкривається, його колекторний струм зростає, а транзистор VT2 пропорційно закривається і його колекторний струм зменшується. Внаслідок цього на навантаженні R_n з'являється напруга розбалансу.

Коефіцієнт підсилення становить

$$K = \beta R'_K / R_{вх},$$

де $R'_K = R_K / 2$.

Недоліком такого ППС є наявність значного ВЗЗ, зумовленого великими значеннями R_{E1} і R_{E2} . Виключити цей недолік дозволяє схемотехнічне рішення, наведене на рис. 4.

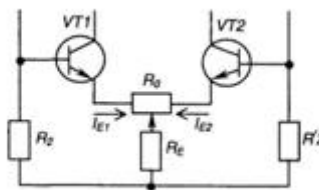


Рисунок 4 - Вилучення впливу ВЗЗ у баланському підсилювачі

У реальних балансних схемах завжди є деяка асиметрія. Тому напруга дрейфу на виході повністю не зникає. Проте дрейф нуля в балансних схемах визначається різницею струмів обох транзисторів і тому значно менше, ніж в звичних схемах прямого підсилення.

Контрольні запитання:

- 1 Де застосовуються підсилювачі постійного струму (ППС)?
- 2 Що таке дрейф і як його зменшити?

Лекція 24

Тема: Структурні схеми операційних підсилювачів.

Найважливіші показники операційних підсилювачів

- 1 Загальне визначення поняття ОП
- 2 Основні складові ОП
- 3 Найважливіші показники операційних підсилювачів

Основне призначення аналогових, або лінійних інтегральних схем (ІС) — перетворення безперервних сигналів, які передаються напругою й струмом. Розроблена широка номенклатура аналогових ІС – операційні підсилювачі, підсилювачі потужності, високочастотні підсилювачі, стабілізатори напруги й струму, джерела опорної напруги, функціональні генератори, модулятори й демодулятори, компаратори, цифро-аналогові й аналого-цифрові перетворювачі й ін. Особливе місце в цьому ряді приділяється операційному підсилювачу.

Історична довідка. Операційний підсилювач, створювався для виконання математичних операцій в аналогових обчислювальних машинах. Перший ламповий ОП К2 був розроблений в 1942 році Л. Джули (США) і містив два подвійні електровакуумні тріоди.



Вигляд першого лампового ОП К2

В 1959 році Р. Малтер (США) розробив ОП Р2, що включав сім германієвих транзисторів. В 1958 г у лабораторії фірми Texas Instruments (США) була винайдена технологія інтегральних мікросхем.

Перший інтегральний ОП $\mu A702$, був розроблений Р. Уїдларом (25 років, США) в 1963 році. Поширення інтегральних ОП почалося із великосерійного випуску в 1964 р. фірмою Fairchild Semiconductor ОП типу $\mu A702$ (140УДІ), потім $\mu A709$ (153УДІ), $\mu A740$ і ін. У тому ж році фірма Burr-Brown (США) опублікувала «Довідник по застосуванню операційних підсилювачів», де ОП розглядається як універсальна мікросхема. В 1971 р. співробітники цієї

фірми видали фундаментальну працю «Проектування й застосування операційних підсилювачів» під ред. Дж. Грема, Дж. Тобі, Л. Хьюлсмана.

Питання застосування ОП викладені в інформаційних матеріалах фірм Fairchild Semiconductor, National Semiconductor, Analog Devices, Motorola Semiconductor, Texas Instruments, Burr-Brown, (Precision Monolithic). Безліч оригінальних застосувань ОП опубліковане в журналі «Електроніка» (США)

Термін «операційний підсилювач», у цей час істотно змінив своє початкове значення. Якщо раніше з ним зв'язувалася яка-небудь математична операція – підсумовування, інтегрування, диференціювання і т.д., то сьогодні ці функції займають, лише рядове місце в довгому списку можливих застосувань ОП у вимірювальній техніці.

ОП відіграє в області аналогових пристроїв не менш універсальну роль, чим логічний інвертор у цифровій техніці. Однак ОП являє собою набагато більш складний елемент – для його повного опису потрібно кілька десятків параметрів.

Перетворення сигналу схемою на ОП обумовлюється тільки властивостями зовнішнього кола НЗЗ і відрізняється високою стабільністю й відтворюваністю. Універсальність інтегрального ОП дозволяє розроблювачу ставитися до ОП як до елемента, не вникаючи в його внутрішню, досить складну структуру.

По розмірах ОП практично не відрізняються від окремого транзистора. Реалізація електронних схем на основі ОП виявляється значно простіше, чим на окремих транзисторах, тому ОП майже повністю витиснули транзистори як елементи схем у аналоговій схемотехніці.

Розвиток ОП йде по шляху спеціалізації різних груп, так з'явилися ОП прецизійні, що трансформувалися в інструментальні підсилювачі, малошумлячі, швидкісні, високовольтні, потужні, з великими напругою живлення й розмахом сигналу. Особливий напрямок розвитку – ОП для мобільних малогабаритних пристроїв з однополярним живленням зниженого рівня (ОП типу «rail – to – rail»).

Пристрої на ОП працюють у безперервному й імпульсному режимах, як підсилювачі струму й напруги, фазозсувні і буферні підсилювачі, підсилювачі неузгодженості для схем автоматичного регулювання, генератори синусоїдальних, прямокутних і складних сигналів, одновібратори, пікові і лінійні детектори, дискримінатори фази й амплітуди, тригери Шмідта, світ-генератори, стабілізатори напруги, джерела опорних потенціалів, каскади з реактивними властивостями (інтегровальні, диференціальні, смугові) і ін.

У вимірювальній техніці на ОП будують схеми нуль-компараторів, трансформаторів провідності й опору, електрометричних підсилювачів, підсилювачів вибірки-зберігання, виконання обчислювальних операцій – алгебраїчних, інтегрування, диференціювання, логарифмування й т.ін.

Інтегральний ОП – підсилювач постійного струму з малим дрейфом нуля, великим вхідним і малим вихідним опором, посиленням 500 ... 1000 000 тис. і більше у смузі пропускання від нуля до десятків мегагерц. Дуже велика чутливість ОП не передбачає його вмикання для прямого перетворення. Запас чутливості ОП необхідний для побудови на його основі перетворювачів із глибоким НЗЗ і чудовими метрологічними характеристиками (встановлюваним від дуже малого до дуже великого вхідним і вихідним опором, точним високостабільним коефіцієнтом перетворення). Подальший розгляд будемо вести стосовно до інтегрального ОП.

2 Основні складові ОП

Операційним підсилювачем (ОП) називається високоякісний інтегральний підсилювач постійного струму з диференціальним входом і однотактним виходом (рис.1).

Основні вимоги до ОП: максимально можливий вхідний опір; мінімально можливий вихідний опір; максимально можливий коефіцієнт підсилення напруги.

Основні складові частини ОП:

- диференціальний каскад. Він забезпечує наявність двох входів ОП – інвертуючого і неінвертуючого. Диференціальний каскад визначає високий вхідний опір ОП;
- підсилювач напруги. Повинен мати високий коефіцієнт підсилення напруги. Може бути одокаскадним чи двокаскадним.
- емітерний повторювач. Забезпечує низькоомний вихід підсилювача.

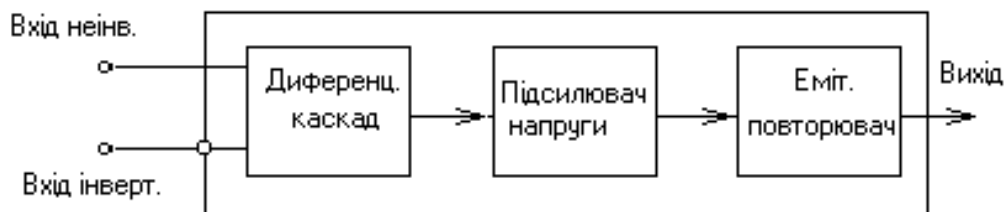


Рисунок 1- Структурна схема операційного підсилювача

Операційні підсилювачі мають високі якісні показники і використовуються як універсальні багатофункціональні пристрої (в схемах підсилювачів, генераторів, тощо).

За принципом дії операційний підсилювач (ОУ) схожий з звичайним. Як і звичайний підсилювач, він призначений для посилення напруги або потужності вхідного сигналу. Однак властивості і параметри звичайного підсилювача повністю визначені його схемою, у той час як властивості і параметри ОУ визначаються переважно параметрами ланцюга зворотного зв'язку.

Операційний підсилювач забезпечує посилення як повільно, так і швидко мінливих сигналів, спектр частот яких може бути від нуля до декількох мегагерц. Він має дуже високий коефіцієнт посилення по напрузі, високий вхідний і низький вихідний опору, дуже низький вхідний струм - частки мікроампер і навіть наноампер (10^{-9} А). Раніше подібні високоякісні підсилювачі використовувалися виключно в аналогових обчислювальних пристроях для виконання таких математичних операцій, як підсумовування та інтегрування. Звідси і пішла їх назва - операційні підсилювачі.

Операційні підсилювачі виконують у вигляді монолітних інтегральних мікросхем, і за своїми розмірами і ціною вони майже не відрізняються від окремо взятого транзистора. Завдяки практично ідеальним характеристикам операційних підсилювачів реалізація схем на їх основі виявляється значно простіше, ніж на окремих транзисторах.

Властивості операційних підсилювачів

Позначення ОП на принципових електричних схемах відповідно до ГОСТ наведено на рис. 2, а.

Для пояснення принципу дії операційного підсилювача і схем на його основі скористаємося умовним позначенням ОУ, застосовуваним раніше (рис. 2, б).

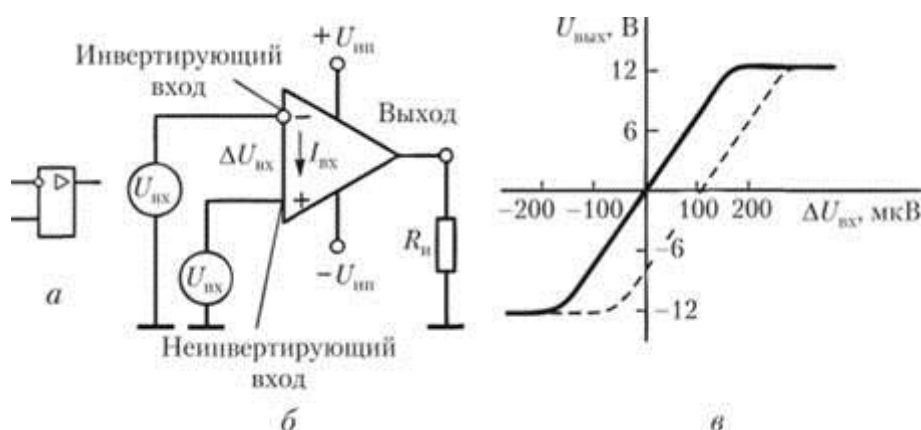


Рисунок 2 - Умовне позначення О У відповідно до ГОСТ (а); позначення ОУ на функціональних схемах (б); залежність вихідної напруги від диференціального вхідного сигналу (в)

Його вхідний каскад виконується у вигляді диференціального підсилювача, так що операційний підсилювач має два входи. Вхід, позначений знаком "плюс", називається неінвертуючого, а вхід, позначений знаком "мінус", - інвертуючим. Вхідним сигналом для ОУ є різниця між напругами на входах:

$$\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}+} - U_{\text{вх}-}$$

Щоб забезпечити можливість роботи ОП як з позитивними, так і з негативними вхідними сигналами, використовується двополярна напруга живлення (на рис. 2, **б** це $+U_{\text{ип}}$ і $-U_{\text{ип}}$). Як правило, стандартні операційні підсилювачі працюють з напругою живлення ± 15 В.

Насправді, зрозуміло, не існує ідеальних ОП.

Характеристики ОП

Для того щоб можна було оцінити, наскільки той чи інший ОП близький до ідеалу, наводяться технічні характеристики підсилювачів.

Диференціальний коефіцієнт посилення операційного підсилювача визначається як:

$$K_D = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вих}}}{(U_{\text{вх}+} - U_{\text{вх}-})}$$

$$= \begin{cases} \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{вх}+} & \text{при } U_{\text{вх}-} = \text{const} \\ \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{вх}-} & \text{при } U_{\text{вх}+} = \text{const} \end{cases}$$

Він має кінцеву величину, яка становить від 10^4 до 10^6 , і називається також **власним коефіцієнтом посилення** ОП, тобто посилення при відсутності зворотного зв'язку.

На рис. 2, **в** показана типова залежність вихідної напруги підсилювача від вхідного сигналу. У діапазоні від -12 В до $+12$ В воно залежить від $\Delta U_{\text{вх}}$ майже лінійно. Нелінійність спостерігається тільки при наближенні до границь діапазону. Цей діапазон вихідної напруги називається **областю посилення**.

У **області насичення** з ростом $\Delta U_{\text{вх}}$ збільшення вихідної напруги не відбувається. Межі області посилення відстоять приблизно на 3 В від відповідних позитивної і негативної напруг живлення. При роботі ОП з напругою живлення ± 15 В типовий діапазон області посилення по вихідній напрузі становить ± 12 В.

Ідеальний ОП при нульовому вхідному сигналі $\Delta U_{\text{вх}} = 0$ повинен мати нульове значення вихідної напруги. У реального підсилювача це не так. Його характеристика показана пунктирною лінією на рис. 2, **в**, і при нульовому вхідному сигналі на його виході присутній ненульове вихідна напруга. Для того щоб зробити вихідна напруга рівним нулю, необхідно на вхід ОП подати деяку напругу, зване **напругою зміщення куля** U_0 . Воно становить зазвичай кілька мілівольт.

Оскільки ОП виконується на основі напівпровідників, його характеристики залежать від температури. Так, зі зменшенням температури різко знижується коефіцієнт підсилення. Зміна температури впливає на величину напруги зсуву нуля і вхідний струм підсилювача, а це впливає на точність роботи схем на основі ОП.

Вплив температури оцінюється такими характеристиками реального підсилювача, як **температурний дрейф** напруги зсуву нуля і температурний дрейф вхідного струму. У кращих

операційних підсилювачів температурний дрейф напруги зсуву нуля складає одиниці - частки мікровольт на один градус, а дрейф вхідного струму складає долі наноампер - одиниці пікоампер (10-12 А) на один градус.

Крім температури ще одним фактором, що змінює параметри ОП, є час роботи. З часом відбувається дрейф напруги зсуву нуля і вхідного струму ОП. Однак ці параметри підсилювача дуже важко нормувати.

3 Обчислювальні схеми на основі операційних підсилювачів

Сучасні комп'ютери дозволяють з високою точністю виконувати будь-які математичні операції з числами. Однак на практиці часто доводиться оперувати з величинами, представленими у вигляді напруги або струму. Так, більшість датчиків різних фізичних величин дають інформацію про вимірюваний параметр саме в такому вигляді. У цих випадках, щоб використовувати комп'ютер, доводиться застосовувати аналого-цифрові і цифроаналогові перетворювачі. Звичайно, такі системи досить складні і дорогі, що не завжди економічно виправдано.

Аналогова схемотехніка на основі ОУ дозволяє створювати самі різні обчислювальні схеми вельми просто і ефективно. На основі ОУ можуть бути реалізовані чотири основні дії арифметики, операції диференціювання та інтегрування, трансцендентні функції. Недоліком цих обчислювальних схем є невисока точність обчислень - не більше 0,1%. Однак цієї точності в цілому ряді випадків буває цілком достатньо.

Схема підсумовування

Для підсумовування декількох напруг можна застосувати ОУ в інвертуючому включенні (рис. 3, а). Вхідні напруги через резистори $R_1, \dots, R_n$ подаються на інвертується вхід підсилювача, який в цій схемі є сумующою точкою. Оскільки ця точка є віртуальним нулем (неінвертуючий вхід заземлений, а $U_{BX} \approx 0$), то струми, створювані вхідними напругами, будуть підсумовуватися і текти через резистор R_{oc} :

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = -\frac{U_{вых}}{R_{oc}}.$$

Якщо всі резистори взяти однаковими, то

$$U_{вых} = -\sum_{i=1}^n U_i.$$

Підсумовування вхідних напруг можна також проводити з будь-яким постійним зміщенням. Для цього на один із входів подається постійна напруга зсуву.

Схема віднімання

На рис. 3, б зображена схема, що забезпечує віднімання двох напруг:

$$U_{вых} = U_2 - U_1.$$

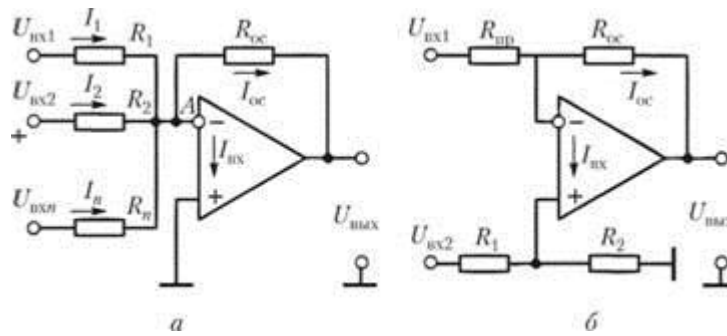


Рисунок 3 - Схеми підсумовування (а) і віднімання (б)

Якщо все опору зробити однаковими, то за відсутності другої напруги, тобто $U_2 = 0$, залишається схема з інвертуючим включенням підсилювача (див. Рис. 3, **а**), для якого

$$U_{\text{вих}} = -\frac{R_{\text{oc}}}{R_{\text{пр}}} U_1 = -\frac{R}{R} U_1 = -U_1.$$

При відсутності першого напруги, тобто $U_1 = 0$, підсилювач повинен створити на виході таку напругу $U_{\text{вих}}$, щоб потенціали на інвертуючому і неінвертуючому входах були б рівні. Потенціал на неінвертуючому вході дорівнює:

$$U_+ = \frac{U_2 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_2 R}{R + R} = \frac{U_2}{2}.$$

Потенціал на вході інвертується (див. Рис. 3, **б**) дорівнює:

$$U_- = \frac{U_{\text{вих}} R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_{\text{вих}} R}{R + R} = \frac{U_{\text{вих}}}{2}.$$

Таким чином, $U_{\text{вих}} = U_2$. Якщо ж на обох входах присутні сигнали, то $U_{\text{вих}} = U_2 - U_1$. Змінюючи співвідношення опорів в делителях таким чином, щоб $R_{\text{пр}} = R_{\text{oc}}/\alpha$, $R_1 = R_2/\alpha$, а $R_{\text{oc}} = R_2$, операцію віднімання можна виконувати з коефіцієнтом **а**:

$$U_{\text{вих}} = \alpha (U_2 - U_1).$$

Нарешті, якщо у вхідних ланцюгах інвертуючого і неінвертуючого входів включити схеми, подібні вхідний схемою підсумовує підсилювача і через резистори підключити паралельно кілька вхідних напруг, можна отримати схему додавання і віднімання великого числа сигналів:

$$U_{\text{вих}} = \alpha \sum U_i - \beta \sum U_j,$$

де U_i - сигнали в ланцюзі неінвертуючого входу; U_j - в ланцюзі інвертуючого входу.

Схеми інтегрування і диференціювання

Схема інтегратора може будуватися як на основі інвертуючого, так і на основі неінвертуючого підсилювача. На рис. 4, а показана схема інтегратора на основі інвертуючого підсилювача.

У ланцюзі зворотного зв'язку замість резистора включаться конденсатор. Як відомо, конденсатор заряджається струмом, який на підставі двох припущень (див. Рис. 3, *а*) **дорівнює**:

$$I_C \approx I = \frac{U_{\text{вх}}}{R},$$

Як відомо з основ електротехніки, струм, що заряджає конденсатор, визначається похідною від різниці напруг на його обкладках, тобто .:

$$I_C = C \frac{d(U_A - U_{\text{вх}})}{dt},$$

а враховуючи перший допущення ($U_A = 0$):

$$I_C = -C \frac{d(U_{\text{вх}})}{dt},$$

Прирівнявши обидва вирази для струму I_C , отримаємо:

$$-C \frac{d(U_{\text{вх}})}{dt} = \frac{U_{\text{вх}}}{R}, \text{ или } \frac{d(U_{\text{вх}})}{dt} = -\frac{1}{RC} U_{\text{вх}}.$$

Інтегруючи цей вираз, отримаємо:

$$U_{\text{вх}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt.$$

Таким чином, вихідна напруга схеми пропорційна інтегралу від вхідної напруги.

Значення опору і ємності визначають постійний коефіцієнт схеми інтегрування, що можна пояснити і з чисто фізичних міркувань. Чим більше R і C , тим менше струм, що заряджає конденсатор, і тим більше величина його ємності, тому заряд конденсатора, а отже і вихідна напруга, будуть наростати повільніше.

Щоб мати схему, що забезпечує обчислення інтеграла з високим ступенем точності, використовують підсилювачі з малими вхідними струмами і дрейфом напруги зсуву нуля, високоточні резистори і конденсатори з малими струмами витoku.

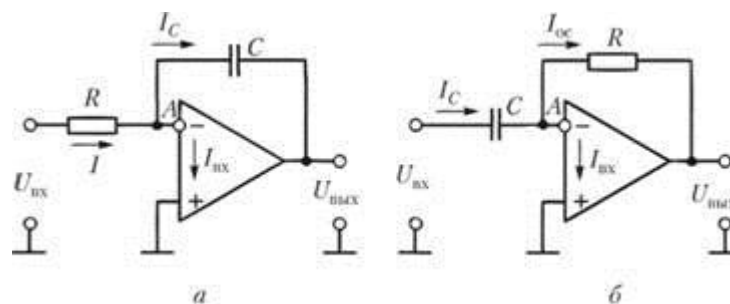


Рисунок 4 - Схеми інтегрування (а) і диференціювання (б)

Помінявши місцями опір і конденсатор в інтеграторі (див. Рис. 4, *а*), отримаємо схему диференціювання (рис. 4, *б*). Струм конденсатора (з урахуванням, що $U_A = 0$):

$$I_C = C \frac{d(U_{\text{вх}} - U_A)}{dt} \approx C \frac{d(U_{\text{вх}})}{dt},$$

а струм у ланцюзі зворотного зв'язку за законом Ома:

$$I_{oc} = \frac{U_A - U_{max}}{R} = \frac{U_{max}}{R},$$

Згідно з другим допущенню ці струми можна вважати рівними, тобто .:

$$\frac{U_{max}}{R} = C \frac{d(U_{max})}{dt},$$

звідки:

$$U_{max} = -RC \frac{d(U_{max})}{dt}.$$

Таким чином, вихідна напруга в схемі пропорційна першій похідній від вхідної напруги.

Багато задач описуються простими диференціальними рівняннями. Такі завдання можна вирішити, реалізуючи вихідне диференціальне рівняння за допомогою аналогових інтегруючих схем і вимірюючи усталене вихідна напруга. Звичайне диференціальне рівняння - це залежність функції y та її похідних від змінної x . Наприклад, лінійне диференціальне рівняння другого порядку виглядає наступним чином:

$$y'' + k_1 y' + k_0 y = f(x).$$

Для рішення рівняння проводять заміну змінної x на час t , тобто $x = t / \tau$. Тоді перша і друга похідні

$$y' = \frac{dy}{dx} \text{ и } y'' = \frac{d^2 y}{dx^2} \text{ рівні:}$$

$$y' = \frac{1}{x'(t)} \frac{dy}{dt} \text{ и } y'' = \frac{d^2 y}{dt^2}.$$

Шляхом таких перетворень диференціальне рівняння приводиться до вигляду, яке може бути реалізовано на основі схем інтегрування:

$$\tau^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + k_1 \tau \frac{dy}{dt} + k_0 y = f(t / \tau),$$

або

$$\tau \frac{d^2 y}{dt^2} + k_1 \frac{dy}{dt} = \frac{1}{\tau} [k_0 y - f(t / \tau)].$$

Інтегруючи ліву і праву частини рівняння, отримаємо:

$$\tau \frac{dy}{dt} + k_1 y = \frac{1}{\tau} \int [k_0 y - f(t / \tau)] dt.$$

Вираз, що стоїть праворуч, реалізується за допомогою інтегратора. Позначимо його вихідний сигнал змінною z , тоді:

$$z = \frac{1}{\tau} \int [k_0 y - f(t / \tau)] dt.$$

З використанням змінної z рівняння перетвориться до виду

$$\tau \frac{dy}{dt} + k_1 y = z, \quad \text{или} \quad -\frac{dy}{dt} = \left[\frac{1}{\tau} z - k_1 y \right].$$

Проінтегрувавши обидві частини рівняння, отримаємо:

$$-y = -\frac{1}{\tau} \int [z - k_1 y] dt.$$

Права частина цього рівняння, так само як і в попередньому випадку, реалізується за допомогою інтегратора. Його вихідний сигнал відповідає функції $-y$. Сигнал z надходить з виходу попереднього інтегратора, а сигнал $-k_1 y$ - через зворотній зв'язок з власного виходу.

Таким чином, для реалізації диференціального рівняння другого порядку потрібно два інтегратора і один інвертуючий підсилювач (рис. 5). Інвертуючий підсилювач потрібен для зміни знаку сигналу з другого інтегратора, що формує $-y$. Вихідний сигнал з цього підсилювача з коефіцієнтом k_0 подається на вхід першого інтегратора.

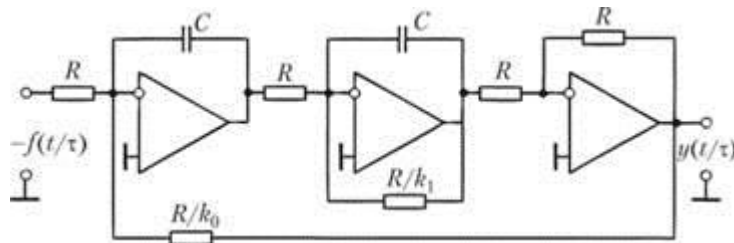


Рисунок 5 - Аналогова схема рішення диференціального рівняння

Література: [Л.1] с.152-163, [Л.2] с.111-119, [Л.5] с.379-380, <https://stud.com.ua/28264>

Рекомендована література:

1. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. За ред А.Г.Соскова. – К.: Каравела, 2003. – 368с. (в подальшому в тексті – [Л.1])
2. Руденко В.С. та ін. Промислова електроніка: Підручник /В.С.Руденко, В.Я.Ромашко, В.В.Трифонюк. – К.: Либідь, 1993. – 432с. [Л.2]
3. Калабеков Б.А., Мамзелев И.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для техникумов связи. – М.: Радио и связь, 1987. – 400 с. [Л.3]
4. Бодиловский В.Г. Полупроводниковые и электровакуумные приборы в устройствах автоматики, телемеханики и связи: Учебник для техникумов ж.-д. трансп. – 5-е изд., – М.: Транспорт, 1986. –440с. [Л.4]
5. Анисимов М.В. Элементы электронной аппаратуры та їх застосування: Навч.посібник. – К.: Вища шк., 1997. – 223с. [Л.5]