

Лекція ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

5.1. Загальні положення

Для підсилення напруги або струму, що змінюються повільно, необхідні підсилювачі, смуга пропускання яких має нульову нижню границю $f_n = 0$. Такі підсилювачі називають *підсилювачами постійного струму* (ППС) незалежно від того, яка з величин – струм чи напруга – підлягає підсиленню, а також незалежно від значення верхньої частоти робочого діапазону частот. При цьому зазвичай основна інформація міститься не у постійній напрузі, а в її змінах, не важливо яких, повільних або швидких (з частотами до f_v).

Типова АЧХ ППС наведена на рис. 5.1.

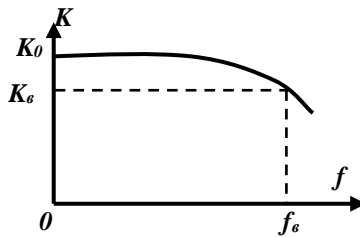


Рис. 5.1. Амплітудно-частотна характеристика ППС

Підсилення постійної напруги (струму) можна здійснити двома принципово різними методами: безпосередньо підсилювати постійний струм або спочатку перетворити постійний струм в змінний. Відповідно до цього підсилювачі постійного струму поділяються на два основних типи: підсилювачі прямого підсилення і підсилювачі з перетворенням.

5.2. ППС прямого підсилення

Приклади схем з безпосереднім зв'язком наведені на рис. 5.2 (показано тільки два каскади).

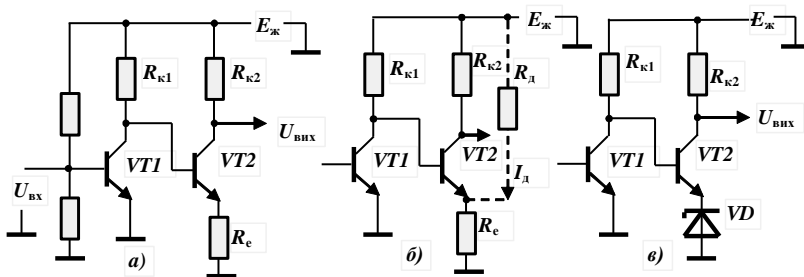


Рис. 5.2. Схема ППС з безпосереднім зв'язком і збільшенням напруги на емітері

У схемах рис. 5.2 у коло емітера введені додаткові елементи – резистор або стабілітрон, падіння напруги на яких призводять до підвищення до необхідного рівня напруги емітера U_e . Однак, крім позитивного ефекту, це викликає утворення негативного зворотного зв'язку, що зменшує коефіцієнт підсилення схеми. Наприклад, у перших двох схемах коефіцієнт підсилення другого каскаду визначається виразом:

$$K_{U2} \approx \frac{R_{к2}}{R_e}. \quad (5.1)$$

Для ослаблення зворотного зв'язку необхідно зменшити опір резистора R_e .

Опір резистора

$$R_e = \frac{U_e}{I_{e2} + I_d},$$

де – струм через резистор R_d .

На схемі рис. 5.2,в у колі емітера використано стабілітрон. У цьому випадку величина опору в колі емітера буде визначатися динамічним опором стабілітрона, якій зазвичай малий.

На рис. 5.3 надані схеми, в яких реалізовано принцип зменшення напруги на базі наступного транзистора застосуванням дільника вихідної напруги попереднього каскаду.

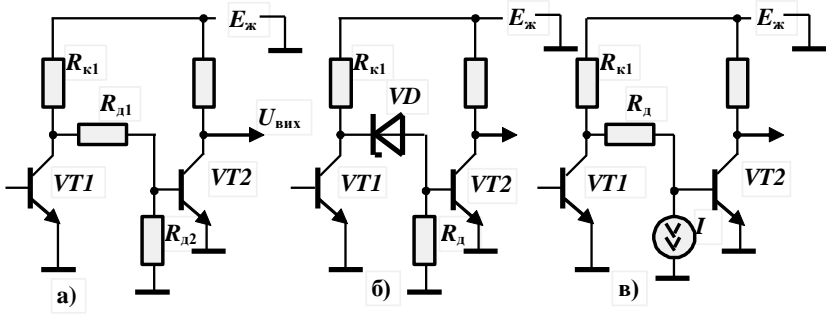


Рис. 5.3. Схема ППС з безпосереднім зв'язком і зменшенням напруги на базі

5.3. Напруга зміщення нуля та її дрейф

Кожен екземпляр підсилювача може мати індивідуальне значення початкової вихідної напруги (при $U_{\text{вх}} \text{ поч}$), що відрізняється від нормативного. Це відхилення називають *напругою зміщення нуля*.

$$U_{\text{зм вх}} = U_{\text{зм вих}} / K, \quad (5.2)$$

де $U_{\text{зм вх}}$ – приведена (до входу підсилювача) напруга зміщення (зсуву) нуля;

$U_{\text{зм вих}}$ – напруга зміщення нуля на виході підсилювача;

K – коефіцієнт підсилення.

Ця напруга прикладена до входу ППС (рис. 5.4), викликаючи появу на виході додаткової напруги, незалежно від вхідного корисного сигналу.

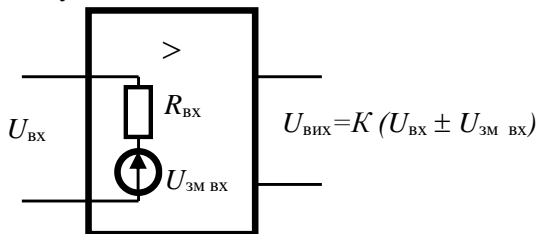


Рис. 5.4. ППС із джерелом напруги зміщення нуля, приведеної до входу

Значним недоліком ППС прямого підсилення, що звужує коло їх застосування, є залежність їхніх характеристик і параметрів від дестабілізуючих факторів – температури, напруги джерела живлення, опору навантаження тощо.

Для ППС прямого підсилення зміна напруги на вході першого каскаду підсилюється цим і наступними каскадами. А зміна напруги на вході може відбуватись з різних причин: через зміну вхідного корисного сигналу, зміну положення робочої точки, пов'язану зі зміною температури, старіння елементів або вплив будь-яких інших дестабілізуючих факторів. Це призводить до того, що навіть при відсутності вхідного сигналу та при компенсації $U_{зм\ вх}$ напруга на виході ППС змінюється. Таке явище одержало назву *дрейф нуля*.

Напруга дрейфу на виході підсилювача, навіть при компенсації $U_{зм}$, може виявитися одного порядку з напругою сигналу або навіть більшою за неї. Тому поряд з такими методами зменшення дрейфу, як стабілізація напруги джерел живлення, застосування глибокого від'ємного зворотного зв'язку й інших, використовують інші, наприклад, раціональний вибір елементів, використання більш складних схем підсилення.

Основними схемними методами підвищення стійкості ППС є:

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

5.4. Балансні схеми ППС

Балансні ППС будуються на основі схеми збалансованого (зрівноваженого) чотириплечого моста: два однакові підсилювальні елементи, наприклад, біполярні транзистори, що працюють в ідентичному режимі, утворюють два плеча моста, а іншими двома плечима є два ідентичні резистори у їхніх колекторних колах. Типова балансна схема транзисторного ППС приведена на рис. 5.5.

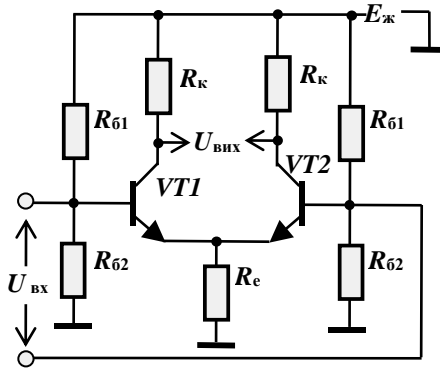


Рис. 5.5. Балансна схема ППС

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{кVT1}} - U_{\text{кVT2}}. \quad (5.3)$$

Переваги наведеної схеми базуються на її стійкості до впливу дестабілізуючих факторів. (наприклад, зміна напруги $E_{\text{ж}}$, зміна температури тощо)

Диференціальна (диференційна, різницева) напруга являє собою різницю входних напруг:

$$U_{\text{диф}} = U_1 - U_2.$$

Синфазну напругу визначають як напівсуму напруг:

$$U_{\text{син}} = \frac{U_1 + U_2}{2}. \quad (5.4)$$

Подачу синфазної та диференціальної напруги на входи балансного підсилювача можна пояснити схемою рис. 5.6.

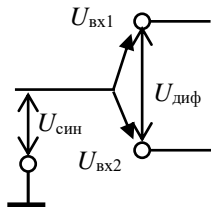


Рис. 5.6. Диференціальна і синфазна напруги

Диференціальна напруга дорівнює нулю, якщо два входи каскаду з'єднати між собою.

5.5. Диференціальний підсилювач

При побудові багатокаскадних схем ППС балансні каскади можна з'єднувати один з одним безпосереднім зв'язком. При цьому колектори попереднього каскаду з'єднуються з базами наступного.

В деяких випадках вихідний сигнал балансного каскаду знімається з одного з колекторів, а вхідні сигнали надходять на бази обох транзисторів (рис. 5.7). Така схема має симетричний вхід і несиметричний вихід (або з колектора $VT1$, або з колектора $VT2$). Елементи схеми можна підібрати так, що вихідна напруга буде пропорційна різниці вхідних напруг і в ідеальному випадку не буде змінюватися, якщо напруги $U_{вх1}$ і $U_{вх2}$ одержують рівні прирости одного знака. Такий підсилювальний каскад називають *диференціальним*.

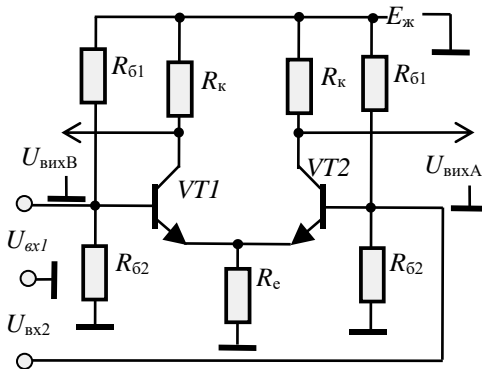


Рис. 5.7 Диференціальний каскад

Фаза вихідного сигналу збігається з фазою сигналу на одному вході і протилежна фазі на іншому. Тому один з входів називають неінвертуючим (прямим), а другий – інвертуючим (інверсним).

Диференційний підсилювач характеризується коефіцієнтом підсилення різниці вхідних напруг, тобто коефіцієнтом підсилення диференційного сигналу

$$K_{\text{диф}} = \frac{K_1 + |K_2|}{2}, \quad (5.5)$$

а також коефіцієнтом підсилення середнього рівня вхідних напруг (коефіцієнтом підсилення синфазного сигналу)

$$K_{\text{син}} = K_1 - |K_2|, \quad (5.6)$$

де K_1 та K_2 – коефіцієнти підсилення по першому і другому входах (з урахуванням можливої асиметрії каналів).

Різницевий сигнал (тобто диференціальна складова вхідної напруги) є корисним сигналом, який необхідно підсилити, синфазна ж складова є перешкодою, що не повинна проникати на вихід, тобто повинна бути усунута або суттєво послаблена.

Для того щоб підсилювач в основному реагував тільки на різницю вхідних напруг, необхідно, щоб $K_{\text{син}} \ll K_{\text{диф}}$. А для цього, як випливає з виразів (5.5) та (5.6), необхідною є однаковість значень коефіцієнтів підсилення обох каналів.

Для збільшення диференціального коефіцієнта підсилення необхідно збільшити опір в колі колектора, а для зменшення синфазного коефіцієнта підсилення – збільшити опір в колі емітера.

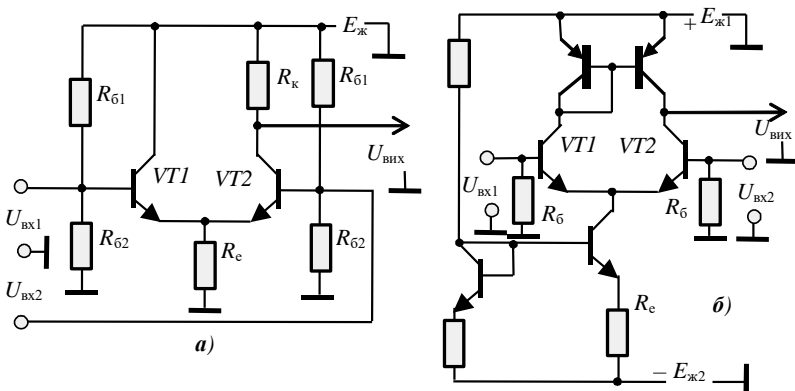


Рис. 5.8. Варіанти схем диференціальних підсилювачів

Причиною появи не рівної нулю напруги на виході ($U_{\text{вих}} \neq 0$ при $U_{\text{вх поч.}} = 0$) в схемах ППС може бути не тільки напруга зміщення нуля та її дрейф, але також вхідні струми.

Для визначення впливу цих струмів на вихідну напругу розглянемо диференціальний підсилювач, на входи якого подано два сигнали U_1 та U_2 (рис. 5.9).

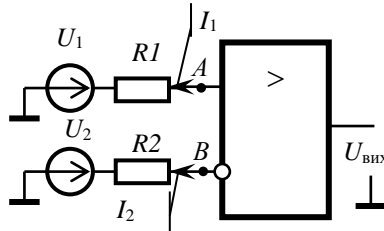


Рис. 5.9. Вплив вхідних струмів зміщення

Нехай ДП має нульову напругу зміщення нуля ($U_{\text{зм вх}} = 0$) та $K_{\text{сін}} = 0$, тому

$$U_{\text{вих}} = K_{\text{диф}} (U_A - U_B), \quad (5.7)$$

де U_A і U_B – напруги в точках A і B (на прямому та інверсному вході ДП), які визначаються:

$$U_A = U_1 - I_1 R1; \quad U_B = U_2 - I_2 R2.$$

Підставляючи їх у (5.7), одержуємо

$$U_{\text{вих}} = K_{\text{диф}} (U_1 - U_2) - K_{\text{диф}} (I_1 R1 - I_2 R2). \quad (5.8)$$

З останнього виразу випливає, що навіть у відсутності вхідної диференціальної напруги ($U_1 - U_2 = 0$) напруга на виході може відрізнятися від нульової, тобто маємо зміщення нульового рівня, обумовлене вхідними струмами:

$$U_{\text{вих}} = -K_{\text{диф}} (I_1 R1 - I_2 R2). \quad (5.9)$$

При конструюванні балансних схем прагнуть до максимальної ідентичності каналів, тому можна припустити, що в реальних підсилювачах вхідні струми повинні бути близькими за значенням. Це підказує шлях зменшення напруги зміщення нуля,

яка обумовлена вхідними струмами: необхідно зробити однаковими опори резисторів у вхідних колах ($R1 = R2 = R$). Тоді напруга зсуву нуля буде визначатися різницею вхідних струмів:

$$U_{\text{вих}} = K_{\text{диф}} R (I_2 - I_1) = K_{\text{диф}} R \Delta I_{\text{вх}} . \quad (5.10)$$

Диференціальні підсилювальні каскади є в даний час розповсюдженою конфігурацією багатьох схем в інтегральному виконанні, зокрема, вони використовуюються у вхідних каскадах інтегральних операційних підсилювачів.

5.6. ППС типу МДМ

Застосування балансних схем і стабілізація джерел живлення дозволяють знизити напругу зміщення нуля до одиниць мілівольта, а її дрейф, у кращому випадку, до 10 мкВ/год. Для одержання кращих показників застосовується ППС із перетворенням (ППС МДМ – підсилювачі постійного струму типу “модулятор-демодулятор”), структурна схема якого представлена на рис. 5.10.



Рис. 5.10. Структурна схема ППС із перетворенням

На вхід модулятора крім напруги сигналу, який повільно змінюється, надходить ще й коливання U_{Γ} від генератора. Зазвичай це синусоїдне коливання $U_{\Gamma} = U_a \sin(\omega t + \varphi)$, частота якого повинна бути значно вищою за верхню частоту вхідного сигналу. В модуляторі відбувається зміна (модуляція) одного з параметрів коливання генератора відповідно до вхідного сигналу. Якщо змінюється амплітуда (U_a), то має місце амплітудна модуляція, якщо частота (ω), – то частотна, якщо фаза (φ), – то фазова. Може використовуватись і комплексна модуляція, наприклад, амплітудно-фазова. В результаті модуляції інформація, яку несе вхідний сигнал, переходить на результуючий (модульований)

високочастотний сигнал U_m , що надходить на вхід підсилювача змінної напруги, який забезпечує збільшення амплітуди U_m сигналу у K разів. В демодуляторі відбувається зворотний процес: з високочастотного модульованого сигналу виділяється його низькочастотна складова, котра тепер виявляється підсиленою. Подача на демодулятор (у радіотехніці його часто називають детектором) коливань від генератора дозволяє підвищити ефективність процесу демодуляції.

Дрейф нуля ППС із перетворенням визначається фактично тільки дрейфом модулятора, оскільки підсилювач змінної напруги практично не має дрейфу, а дрейфом демодулятора можна зневажити, тому що на його вхід подається порівняно велика напруга, що значно перевищує напругу можливих завад.

ППС типу МДМ виконуються як інтегральні схеми, що мають в своєму складі всі необхідні блоки.