

## 6.10. Підсилювачі постійного струму

### 6.10.1. Загальні відомості

У вимірювальній техніці, автоматичі, системах автоматичного керування і т.п. широко застосовують пристрої, що мають назву давачів (датчиків). 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 давачів невеликий, із часом вони мало-змінні або взагалі незмінні. Для підсилення таких сигналів і використовуються підсилювачі постійного струму (ППС).

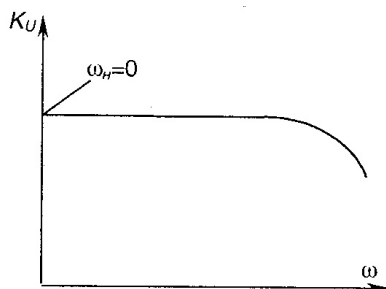


Рис. 6.41 – АЧХ ППС

Схемотехнічно це забезпечується відсутністю розділяючих конденсаторів або трансформаторів між джерелом сигналу, каскадами і навантаженням. Тобто, ППС є підсилювачем із безпосередніми зв'язками. Наявність розділяючих елементів, які забезпечують розділення за постійним струмом і зв'язок за змінним, надавала ту перевагу, що режим і-го каскаду за постійним струмом не впливає на роботу інших каскадів, джерела сигналу або навантаження.

У підсилювачах з безпосередніми зв'язками вплив дестабілізуючих факторів (наприклад, змін із часом температури або напруги

АЧХ ППС зображена на рис. 6.41. Її особливість полягає у тому, що нижня гранична частота діапазону підсилюваних сигналів дорівнює нулю, а отже, є можливість підсилення сигналів постійного струму.

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 має назву дрейфу нуля ППС.

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

$$d = \frac{U_{op\max} - U_{op\min}}{K_U}, \quad (6.43)$$

де  $U_{op\max}$ ,  $U_{op\min}$  – відповідно максимальне та мінімальне значення вихідної напруги за зазначений проміжок часу;  
 $K_U$  – коефіцієнт підсилення.

Для зменшення дрейфу в ППС застосовують елементи термо-стабілізації, запроваджується жорстка стабілізація напруги живлення та, найчастіше, використовують спеціальні балансні схеми.

### **6.10.2. Підсилювач прямого підсилення**

Найпростішим представником ППС є підсилювач прямого підсилення з безпосередніми зв'язками. Розглянемо схему двокаскадного підсилювача прямого підсилення, зображену на рис. 6.42. Він складається з двох каскадів, виконаних за схемою з СЕ. Призначення елементів таке ж саме, що і у підсилювачах змінного струму.

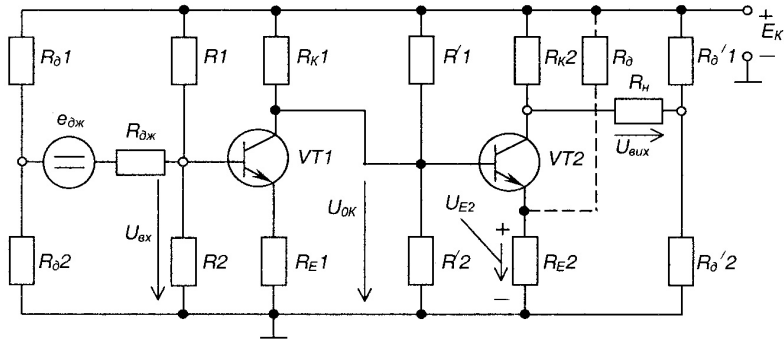


Рис. 6.42 – Двокаскадний підсилювач постійного струму  
прямого підсилення

За принципової неможливості застосування реактивних розділяючих елементів, щоб забезпечити виключення впливу напруг, які відповідають режиму спокою каскадів, на джерело сигналу і на навантаження, останнє тут підключено між колектором  $VT2$  та середньою точкою ділянки  $R'_{\delta 1}$ ,  $R'_{\delta 2}$ , а вхідний сигнал подано на базу  $VT1$  відносно середньої точки ділянки  $R_{\delta 1}$ ,  $R_{\delta 2}$ . Величини опорів резисторів  $R_{\delta 1}$ ,  $R_{\delta 2}$ ,  $R'_{\delta 1}$ ,  $R'_{\delta 2}$  підбирають якомога меншими за величиною та таким чином, щоб за  $e_{дж} = 0$  на виході було  $U_{вих} = 0$ .

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  $R_н$ .

На відміну від підсилювача змінного струму, де режим спокою вибирається за умов найкращого 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 вжити спеціальних заходів, під її дією

транзистор  $VT2$  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  $U_{0K}$  оскільки спрямована зустрічно. Тобто виконується умова  $U_{0K} - U_{E2} = U_{0B}$ ;  $U_{E2} = R_E \cdot I_{0E2}$ , де  $I_{0E2}$  – струм емітера у 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 емітерного опору, можна використати дільник напруги  $R_{E2}$ ,  $R_d$  (зображений на рис. 6.42 пунктиром). У цьому випадку навіть на малому опорі  $R_{E2}$  можна одержати потрібний рівень напруги. Але це призводить до підвищення втрат потужності, а отже, до зниження к.к.д.

Коефіцієнт підсилення схеми в цілому:

$$K_U = K_{U1} K_{U2}, \quad (6.44)$$

де

$$K_{U1} = \beta_1 \frac{R'_{K1}}{R_{ex1}}, \quad (6.45)$$

коефіцієнт підсилення першого каскаду;

$$R'_{K1} = R_{K1} \parallel R'_1 \parallel R'_2 \parallel R'_{ex2}, \quad (6.46)$$

$$K_{U2} = \beta_2 \frac{R'_{K2}}{R_{ex2}}, \quad (6.47)$$

коефіцієнт підсилення другого каскаду;

$$R'_{K2} = R_{K2} \parallel (R'_H + R'_{o1} \parallel R'_{o2}). \quad (6.48)$$

Такий підсилювач має велике значення дрейфу нуля і використовується у випадках, коли немає високих вимог до якості

підсилення. Для підвищення стабільності схеми у якості  $R_{E1}$  і  $R_{E2}$  застосовують терморезистори.

### 6.10.3. Балансні ППС

Балансні ППС будуються на основі чотириплечого моста з паралельним балансом, схему якого наведено на рис. 6.43.

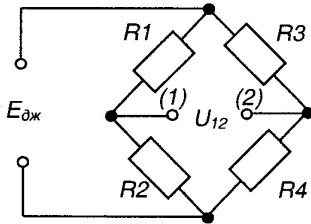


Рис. 6.43 – Чотириплечий міст

Тут  $U_{12} = 0$  за  $E_{дж} - var$ , якщо

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

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

На рис. 6.44 зображено найпростішу схему балансного підсилювача. Він складається з двох каскадів на транзисторах  $VT1$  і  $VT2$ . Причому параметри елементів обох каскадів повинні бути майже однаковими (у тому числі і транзисторів, які дуже важко підібрати):  $R_1 = R'_1$ ;  $R_2 = R'_2$ ;  $R_{K1} = R'_{K1} = R_K$ . Навантаження  $R_H$  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  $VT2$ .

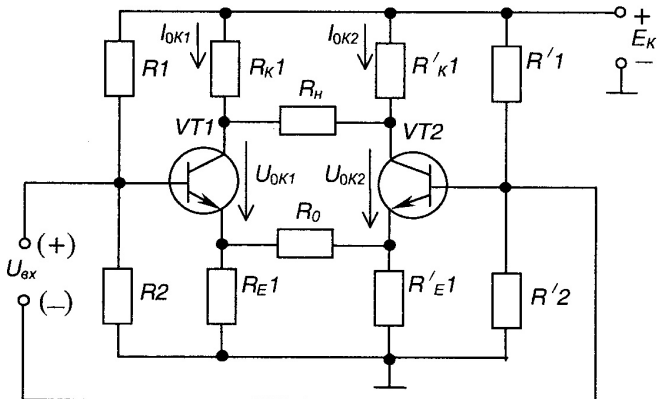


Рис. 6.44 – Балансний підсилювач

За відсутності вхідного сигналу напруга на навантаженні дорівнює нулю (якщо схема абсолютно симетрична). Дрейф нуля практично у  $20 \div 30$  разів менший, ніж у підсилювача з безпосередніми зв'язками, оскільки визначається різницею  $I_{OK1}$  та  $I_{OK2}$ .

За наявності вхідного сигналу з полярністю, що вказана на рис. 6.44, транзистор  $VT1$  трохи відкривається, його колекторний струм зростає, а транзистор  $VT2$  пропорційно закривається і його колекторний струм зменшується. Внаслідок цього на навантаженні  $R_H$  з'являється напруга розбалансу. Коефіцієнт підсилення такого підсилювача становить:

$$K = \beta \frac{R'_K}{R_{ex}}, \text{ де } R'_K = \frac{R_K}{2} \parallel R_H. \quad (6.49)$$

Недоліком такого ППС є наявність значного НЗЗ, зумовленого великими значеннями  $R_{E1}$  і  $R_{E2}$ . Виключити цей недолік дозволяє схемотехнічне рішення, наведене на рис. 6.45.

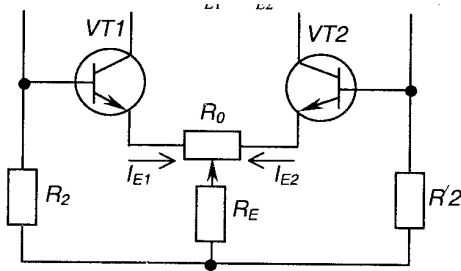


Рис. 6.45 – Схема виключення впливу НЗЗ у балансному підсилювачі

Для наведеної схеми справедливі такі співвідношення:

$$\Delta U_E = R_E (\Delta I_{E1} + \Delta I_{E2});$$

$$\Delta I_{E1} = -\Delta I_{E2};$$

$$\Delta U_E = 0.$$

Таким чином, відносні зміни у балансному підсилювачі струмів емітерів під дією вхідного сигналу взаємно компенсуються, виключаючи НЗЗ за підсилюваним сигналом. НЗЗ за постійним струмом залишається.

Опір  $R_0$ , крім того, що вирівнює потенціали емітерів, як і в попередній схемі, у даному разі ще й забезпечує балансування схеми за незначних відхилень параметрів елементів.

#### 6.10.4. Диференційний ППС

Балансний підсилювач, у емітерне коло якого замість опору  $R_E$  увімкнене джерело струму (наприклад, транзистор, якому задано фіксоване значення струму бази), має назву диференційного (різницевого – бо підсилює різницю напруг між входами) підсилювача. Його схему наведено на рис.6.46.

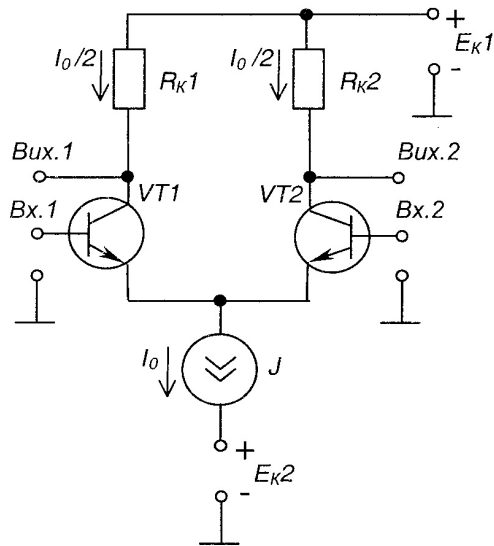


Рис 6.46 – Диференційний підсилювач

Щодо балансного підсилювача слід зазначити наступне: вхідний сигнал може бути подано не тільки як диференційний (між входами *Вх. 1* і *Вх. 2*), а його можна також подавати на будь-який з входів відносно точки з нульовим потенціалом.

Навантаження також може бути підключено не тільки між обома виходами (симетричний вихід), але й до одного виходу і нульової точки (несиметричний вихід). При цьому, якщо це, наприклад, *Вух. 2*, то *Вх. 1* для нього буде неінвертуючим: зміни сигналу на виході співпадають за знаком (фазою – для змінного струму) зі змінами вхідного сигналу; *Вх. 2* буде інвертуючим: зміни вихідного сигналу за знаком (фазою) протилежні змінам вхідного.

За несиметричного входу один з колекторних резисторів (від якого не робиться вихід) можна не встановлювати.



Якщо на обидва входи подати відносно нульової точки однакові за знаком і напругою сигнали (синфазний сигнал), то напруга на виході дорівнюватиме нулю – підсилювач підсилює тільки різницевий сигнал!

Диференційні підсилювачі знайшли широке використання при побудові ППС у інтегральному виконанні.

#### **6.10.5. Підсилювачі з подвійним перетворенням**

Для зниження дрейфу нуля поряд із балансними схемами застосовують схеми з подвійним перетворенням підсилюваного сигналу. Суть роботи таких схем полягає у наступному. Постійний вхідний сигнал за допомогою спеціального пристрою, що називається модулятором, перетворюється у змінний сигнал, амплітуда якого дорівнює напрузі постійного сигналу. Потім змінний сигнал підсилюється підсилювачем напруги змінного струму, після чого за допомогою демодулятора змінний сигнал знову перетворюється у постійний, напруга якого дорівнює амплітуді підсиленого змінного сигналу.

Наявність підсилювача змінного струму виключає дрейф нуля. Але через досить велику складність виконання такі підсилювачі використовуються рідко.