Лекція ПІДСИЛЮВАЧИ. ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ

3.1. Класифікація підсилювачів

Електронним підсилювачем називається пристрій, що дозволяє перетворювати вхідні електричні сигнали в сигнали більшої потужності на виході без істотного спотворення їх форми.

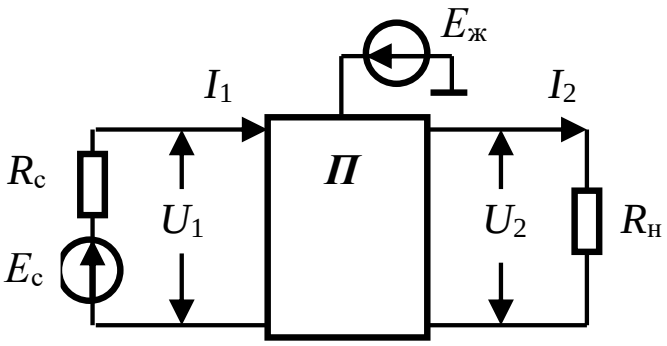


Рис. 3.1. Узагальнена структурна схема підсилювального пристрою

Класифікацію підсилювачів здійснюють

– за їх призначенням,

– характером вхідного сигналу,–

особливостями частотних характеристик,

– типу активних елементів.

За *призначенням* підсилювачі умовно поділяються на

– *підсилювачі напруги,*

– *підсилювачі струму*

–і *підсилювачі потужності.*

В залежності від характеру вхідного сигналу розрізняють *підсилювачі гармонійних* (неперервних) сигналів і *підсилювачі імпульсних* сигналів.

Одним з принципів класифікації підсилювачів є віднесення його до одного з класів. Розрізняють чотири основні класи підсилювачів гармонійних сигналів: *A*, *B*, *AB*, *C* (імпульсні підсилювачі відносять до класу *D*). Клас підсилювача визначається за проходженням сигналу в навантаження.

Смуга й абсолютні значення частот підсилювального сигналу дозволяють розділити підсилювачі на наступні типи.

Підсилювачі постійного струму ППС призначені для підсилення електричних коливань у межах від нижчої частоти $f_н = 0$ до верхньої робочої частоти $f_в$ (МГц). Вони дозволяють підсилювати як змінну так і постійну складову сигналу.

Підсилювачі змінного струму призначені для підсилення лише змінних складових сигналу. В залежності від граничних значень робочого діапазону частот підсилювачі змінного струму можуть бути підсилювачами низької чи високої частоти.

Підсилювач низької частоти (ПНЧ) $f_в - f_н > f_н$.

Підсилювач високої частоти (ПВЧ) $f_в - f_н << f_в$.

За *шириною смуги підсилювальних частот* ($\Delta F = f_в - f_н$)

Вибірні підсилювачі $f_в / f_н < 1{,}1$.

Широкосмугові підсилювачі $f_в / f_н > 1000$.

3.2. Основні технічні показники підсилювачів

Найважливішими технічними показниками підсилювача є:

– коефіцієнт передачі, коефіцієнти підсилення (напруги, струму і потужності)

– амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики,

– вхідний і вихідний опори,

– вихідна потужність,

– коефіцієнт корисної дії,

– діапазон підсилювальних частот,

– динамічний діапазон амплітуд і рівень власних завад,

– показники, що характеризують спотворення сигналу.

Коефіцієнт підсилення – відношення сталих значень параметрів вихідного і вхідного сигналів підсилювача. Розрізняють коефіцієнти підсилення

– напруги $K_u = \Delta U_2 / \Delta U_1$;

– струму $K_i = \Delta I_2 / \Delta I_1$;

– потужності $K_p = P_2 / P_1$,

де U_1, U_2, I_1, I_2 – діючі (або амплітудні) значення напруги чи струму; P_1, P_2 – потужності вхідного та вихідного сигналів.

За умов діючих значень напруг та струмів $P_1 = U_1 I_1$ і $P_2 = U_2 I_2$, тому коефіцієнт підсилення потужності $K_p = K_u K_i$.

Послідовне (каскадне) включення підсилювальних каскадів (рис. 3.2). *Підсилювальний каскад* – мінімальна частина підсилювача, яка має всі його основні якісні властивості. До каскаду також може бути застосовано поняття – підсилювач.

Для багатокаскадних підсилювачів сукупний коефіцієнт підсилення дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення окремих каскадів:

$$K_\Sigma = K_1 K_2 \ldots K_n. \qquad (3.1)$$

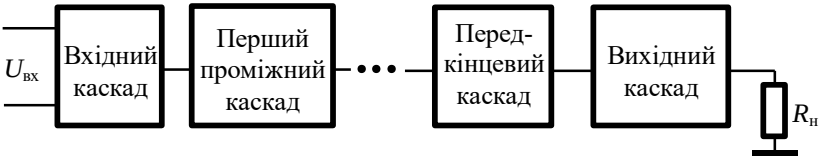


Рис. 3.2. Структурна схема багатокаскадного підсилювача

Коефіцієнт підсилення, обчислений за формулою (3.1), являє собою безрозмірну величину. Однак, в електроніці та радіотехніці поширений спосіб вираження підсилювальних властивостей в логарифмічних одиницях – децибелах (дБ). Коефіцієнт підсилення потужності, виражений в децибелах, дорівнює

$$K_{P\,[дБ]} = 10 \lg (P_2 / P_1) = 10 \lg K_P. \qquad (3.2)$$

Оскільки потужність пропорційна квадрату струму або напруги, то для коефіцієнтів підсилення струму і напруги необхідно записати:

$$K_{I\,[дБ]} = 20 \lg (I_2 / I_1) = 20 \lg K_I,$$

$K_{U\,[\text{дБ}]} = 20 \lg (U_2 / U_1) = 20 \lg K_U.$ (3.2*)

Зворотний перехід від децибелів до безрозмірного числа виконується за виразом:

$$K_k = 10^{\frac{K_{\text{дБ}}}{N}},$$

де $N = 10$ при розрахунку коефіцієнта підсилення потужності та $N = 20$ – коефіцієнта підсилення напруги і струму.

Якщо $K_{\text{дБ}} = 1$ дБ, то при визначенні коефіцієнта підсилення напруги

$$K_u = 10^{\frac{K_{\text{дБ}}}{20}} = 10^{\frac{1}{20}} \approx 1{,}12.$$

Отже, підсилення дорівнює одному децибелу, якщо напруга на виході підсилювача в 1,12 рази (на 12 %) більше, ніж напруга на вході.

Подвоєння коефіцієнта підсилення K означає збільшення цього показника в децибелах $K_{\text{дБ}}$ на 6 дБ, а збільшення K у 10 разів – збільшення $K_{\text{дБ}}$ на 20 дБ. Зміна коефіцієнта підсилення на 3 дБ відповідає його збільшенню в $\sqrt{2}$ разів, а на мінус 3 дБ – зменшенню в $\sqrt{2}$ разів.

Сукупний коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача при переході до логарифмічних одиниць виміру визначається на відміну від (3.1) сумою коефіцієнтів підсилення окремих каскадів, тобто

$K_{\text{с}\,[\text{дБ}]} = K_{1\,[\text{дБ}]} + K_{2\,[\text{дБ}]} + \ldots + K_{n\,[\text{дБ}]}.$

Для гармонійного сигналу коефіцієнти підсилення напруги і струму є величинами комплексними, що відображає наявність фазових зсувів вихідного сигналу.:

$$\overline{K} = \frac{U_{\text{вих}} \cdot e^{j\varphi_{\text{вих}}}}{U_{\text{вх}} \cdot e^{j\varphi_{\text{вх}}}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \cdot e^{j(\varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}})}, \text{ або } \overline{K} = K_{\text{м}} e^{j\varphi},$$

де $K_{\text{м}} = (U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}})$ – *модуль* коефіцієнта підсилення;

$\varphi = (\varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}})$ – *кут* зсуву фази вихідного сигналу відносно вхідного.

Амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) називається залежність модуля коефіцієнта передачі K підсилювача від частоти вхідного сигналу f (або від кругової частоти $\omega = 2\pi f$).

Один з варіантів частотної характеристики зображений на рис. 3.3,*а*.

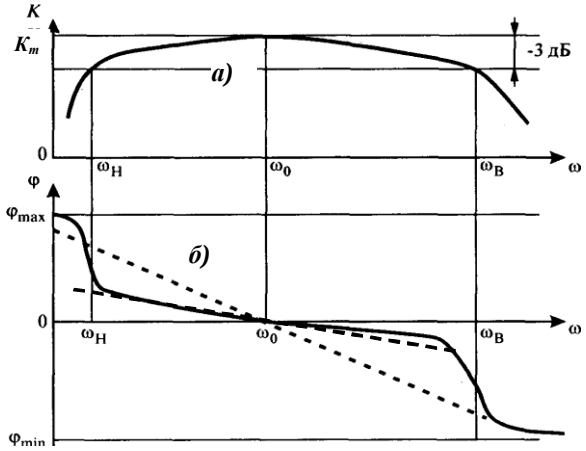


Рис. 3.3. Амплітудно- та фазочастотна характеристики підсилювача

Коефіцієнт підсилення на графіках АЧХ найчастіше нормують:

$$K(\omega) = K(\omega) / K_{max}$$

де $K(\omega)$ і K_{max} – коефіцієнт підсилення на частоті ω та максимальне значення коефіцієнта підсилення.

Фазочастотною характеристикою (ФЧХ) називають залежність фазового зсуву вихідного сигналу щодо вхідного від частоти сигналу. (рис. 3.3,*б*.)

Вхідний і вихідний опори. Підсилювач можна розглядати як активний чотириполюсник, до входу якого підключається джерело сигналу, а до виходу – навантаження (рис. 3.4)

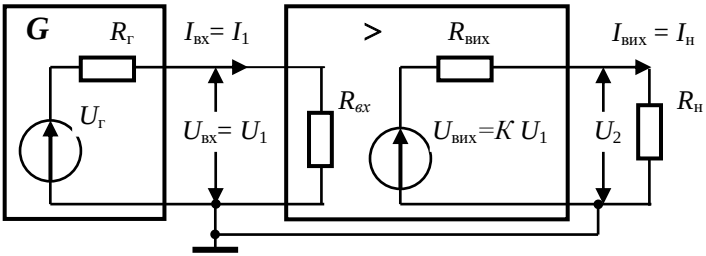


Рис. 3.4. Підсилювач як чотириполюсник

$$R_{вх} = R_1 = (U_1 / I_1) \text{ при } R_н - \text{const}; \; R_{вих} = U_{2х} / I_{2к},$$

де $U_{2х}$ – напруга холостого ходу на виході підсилювача ($R_н = \infty$);

$I_{2к}$ – вихідний струм короткого замкнення ($R_н = 0$).

При практичному використанні підсилювачів велике значення має співвідношення величин $R_г$ і $R_{вх}$. Якщо $R_г << R_{вх}$ то $U_{вх} \approx U_г$. Якщо $R_г >> R_{вх}$, то $I_{вх} = I_г \approx U_г / R_г$. Якщо ж $R_{вх}$ і $R_г$ порівнянні, то необхідно знати їх співвідношення для того, щоб визначити, який рівень сигналу буде діяти безпосередньо на вході підсилювача.

Узгодження каскадів. На на вході каскаду утвориться дільник напруги генератора з резисторів $R_г$ та $R_{вх}$. Напруга $U_{вх} = I_{вх} R_{вх}$,

$$U_{вх} = U_г \frac{R_{вх}}{R_г + R_{вх}}. \qquad (3.3)$$

тобто $U_{вх}$, завжди буде менше $U_г$. При узгодженні каскадів за напругою необхідно, щоб ($R_{вх}$ / ($R_г$ + $R_{вх}$)) не набагато відрізнялося від одиниці. Цього можна домогтися, якщо буде виконуватися умова $R_{вх} >> R_г$. На практиці вважають достатнім, щоб $R_{вх} \geq 10\, R_г$. Таке співвідношення між $R_{вх}$ та $R_г$ відповідає узгодженню каскадів за напругою.

Для того щоб забезпечити узгодження генератора сигналу та підсилювача за струмом, необхідно виконати умову $R_г >> R_{вх}$ (достатньо $R_г \geq 10\, R_{вх}$).

Якщо ж необхідно забезпечити максимум потужності $P_{вх} = U_{вх} I_{вх}$, яка передається наступному каскаду (див. рис. 3.4), то умова узгодження буде іншою. Оскільки $I_{вх} = U_г/(R_г + R_{вх})$, то враховуючи (3.3), отримаємо:

$$P_{вх} = \frac{U_г^2 R_{вх}}{(R_г + R_{вх})^2} . \qquad (3.4)$$

Для практичного використання підсилювачів велике значення має співвідношення величин $R_{вих}$ та $R_н$, яке аналогічне співвідношенню величин $R_г$ і $R_{вх}$ у вхідному колі. Якщо $R_н >> R_{вих}$, то у вихідному колі забезпечується узгодження за напругою (робота в режимі холостого ходу), а при $R_н << R_{вих}$ – узгодження за струмом (робота в режимі короткого замкнення). При рівності цих величин забезпечується максимальна передача потужності в навантаження.

Використання активних чотириполюсників на прикладі еквівалентної схеми двокаскадного підсилювача показано на рис. 3.5.

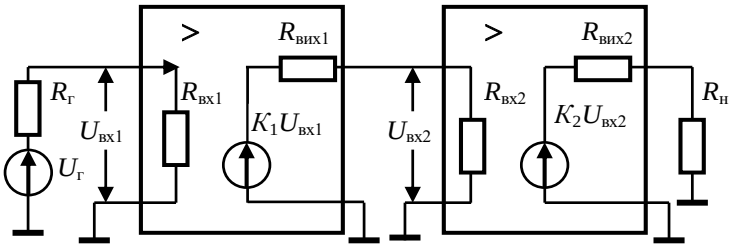


Рис. 3.5. Еквівалентна схема двокаскадного підсилювача

Спотворення в підсилювачах: частотні, фазові і нелінійні.

Частотними називаються спотворення, що обумовлені неоднаковістю величини коефіцієнта підсилення на різних частотах.

Припустимо, що вхідний сигнал містить три частотні складові:

$$U_{вх}(t) = U_1\sin(2\pi f_1 t + \gamma_1) + U_2\sin(2\pi f_2 t + \gamma_2) + U_3\sin(2\pi f_3 t + \gamma_3). \quad (3.5)$$

Після проходження підсилювача він буде мати вигляд:

$$U_{вих}(t) = K_1U_1\sin(2\pi f_1 t + \gamma_1 + \theta_1) + K_2U_2\sin(2\pi f_2 t + \gamma_2 + \theta_2) + \\ + K_3U_3\sin(2\pi f_3 t + \gamma_3 + \theta_3), \quad (3.6)$$

де K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти підсилення на частотах f_1, f_2, f_3, відповідно;

θ_1, θ_2, θ_3 – зсуви фаз на цих же частотах.

Якщо $K_1 \neq K_2 \neq K_3$, то вихідний сигнал буде мати форму, відмінну від вхідного.

Ступінь спотворень на окремих частотах виражається коефіцієнтом частотних спотворень $M(f)$, який рівняється відношенню коефіцієнта підсилення на середній частоті $K_{ср}$ до коефіцієнта підсилення $K(f)$ на частоті f:

$$M(f) = K_{ср} / K(f). \quad (3.7)$$

Коефіцієнт частотних спотворень багатокаскадного підсилювача $M(f)$ дорівнює добутку коефіцієнтів частотних спотворень окремих каскадів:

$$M(f) = M_1(f)\, M_2(f)\, M_3(f) \ldots M_n(f). \quad (3.8)$$

Коефіцієнт частотних спотворень, як і коефіцієнт підсилення, зручно виражати в децибелах:

$$M_{дБ} = 20 \lg M.$$

У випадку багатокаскадного підсилювача

$$M_{дБ} = M_{1дБ} + M_{2дБ} + \ldots + M_{nдБ}.$$

По зростанню частотних спотворень до припустимої величини, що відповідає спаданню $K(\omega)$, визначають так звані *нижню* $\omega_н$ (або $f_н$) і *верхню* $\omega_в$ (або $f_в$) *граничні частоти* підсилювача.

Смуга частот у межах від $\omega_н$ до $\omega_в$ називається *робочою смугою частот*, або *смугою пропускання* підсилювача, а різниця $\Delta\omega$ (або ΔF) – шириною цієї смуги:

$$\Delta\omega = \omega_в - \omega_н \text{ або } \Delta F = f_в - f_н.$$

Якщо при проектуванні багатокаскадного підсилювача задана ширина смуги пропускання підсилювача ($\Delta F_{\text{під}}$), то смуга пропускання окремого каскаду ($\Delta F_{\text{кас}}$) повинна бути більшою. При приблизно однакових смугах пропускання окремих каскадів між нижніми/верхніми частотами каскаду ($f_{\text{н каск}}$, $f_{\text{в каск}}$) і нижніми/верхніми частотами усього N каскадного підсилювача ($f_{\text{н підс}}$, $f_{\text{в підс}}$) повинні виконуватися наступні співвідношення:

$$f_{\text{в. каск}} = \sqrt{N}\ f_{\text{в. підс}}; \quad f_{\text{н. каск}} = \frac{f_{\text{н. підс}}}{\sqrt{N}}.$$

Фазові спотворення, внесені підсилювачем, оцінюються по його фазочастотній характеристиці, яка представляє собою графік залежності від частоти кута зсуву фази між вхідною і вихідною напругою підсилювача. Фазові спотворення в підсилювачі відсутні, коли фазовий зсув лінійно залежить від частоти:

$$\theta_i = -\tau\omega_i = -\tau 2\pi f_i. \qquad (3.9)$$

В цьому випадку вираз (3.6), при відсутності частотних спотворень, виглядатиме:

$$U_{\text{вих}}(t) = K U_1 \sin[2\pi f_1(t-\tau) + \gamma_1] + K U_2 \sin[2\pi f_2(t-\tau) + \gamma_2] + \\ + K U_3 \sin[2\pi f_3(t-\tau) + \gamma_3],$$

з якого видно, що підсилені частотні складові отримують однакові зсуви у часі. Тобто форма сигналу не зміниться і спотворення будуть відсутні. Величину $\boldsymbol{\tau}$ називають *груповим часом затримки*.

Нелінійні спотворення являють собою зміну форми кривої посилюваних коливань, яка обумовлена нелінійними властивостями кіл, через які ці коливання проходять (рис. 3.6.)

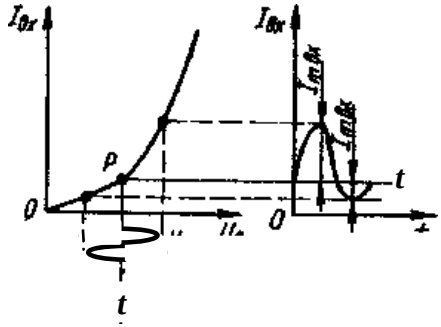


Рис. 3.6. Виникнення нелінійних спотворень

Чим більша нелінійність підсилювача, тим сильніше спотворюється синусоїдна вхідна напруга. Ступінь нелінійних спотворень підсилювача оцінюють величиною коефіцієнта нелінійних спотворень (коефіцієнта гармонік):

$$K_{\text{г}} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \ldots + P_n}{P_1}}, \qquad (3.10)$$

де P_i – потужність *i*-тої гармоніки.

У тих випадках, коли опір навантаження має однакову величину для всіх гармонійних складових підсиленого сигналу, коефіцієнт гармонік можна визначати за формулами:

$$K_{\text{г}} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \ldots + U_n^2}}{U_1}, \qquad (3.11)$$

де I_i, та U_i. – діючі (або амплітудні) значення *i*-тої гармоніки струму на виході чи вихідної напруги.

Коефіцієнт нелінійних спотворень багатокаскадного підсилювача можна знайти за такою наближеною формулою:

$$K_{\text{г}} = K_{\text{г}1} + K_{\text{г}2} + \ldots + K_{\text{г}\,n}, \qquad (3.12)$$

де $K_{\text{г}\,i}$ – коефіцієнт нелінійних спотворень *i*-того каскаду.

Вихідна потужність. Вихідна потужність – це корисна потужність, що забезпечується підсилювачем в навантаженні.

$$P_{\text{вих}} = 0{,}5\,U_{m\ \text{вих}}\,I_{m\,\text{вих}} = \frac{0{,}5\,U^2_{m\,\text{вих}}}{R_{\text{н}}} = 0{,}5\,I^2_{m\,\text{вих}}\ R_{\text{н}}, \qquad (3.13)$$

де $U_{m\ \text{вих}}$, $I_{m\ \text{вих}}$ – амплітуди напруги і струму вихідного гармонійного коливання.

Найчастіше підсилювач характеризують максимальною потужністю, яку можна одержати на виході за умови, що спотворення не перевищують заданої (припустимої) величини. Ця потужність називається *номінальною вихідною потужністю* підсилювача.

Коефіцієнт корисної дії (ККД).

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_0} = \frac{0{,}5\,U_{m\,\text{вих}}\,I_{m\,\text{вих}}}{P_0}, \qquad (3.14)$$

де P_0 – потужність, що споживається підсилювачем від усіх джерел живлення.

Амплітудна характеристика. Графічна залежність амплітуди вихідної напруги підсилювача від амплітуди його вхідної напруги на деякій незмінній частоті сигналу одержала назву *амплітудної* характеристики (рис. 3.7).

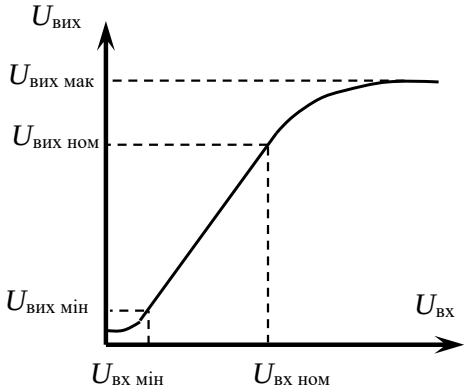


Рис. 3.7. Амплітудна характеристика підсилювача

Основними складовими шумів підсилювача є: шуми підсилювальних елементів, теплові шуми різних ланцюгів підсилювача; шуми мікрофонного ефекту, викликані впливом на вузли і деталі підсилювача механічних поштовхів і вібрацій, прояви пульсацій напруги живлення, наводки від сторонніх джерел сигналів і джерел перешкод тощо.

При температурі 20…25°С шумову напругу, що виникає в резисторі, можна знайти за формулою:

$$U_{\text{ш}} \approx 0{,}13\sqrt{(f_в - f_н)R}\,, \qquad (3.15)$$

де частота і опір дається у кілогерцах і кілоомах, а напругу маємо у мікровольтах.

Відношення амплітуд найсильнішого і найслабкішого сигналів на вході підсилювача називають *динамічним діапазоном амплітуд D*. Динамічний діапазон зазвичай виражають у децибелах:

$$D = 20 \lg \frac{U_{\text{вх мак}}}{U_{\text{вх мін}}}\,. \qquad (3.15)$$