

1. Підсилювачі, класифікація підсилювачів

Підсилювачем називають пристрій, призначений для підвищення потужності вхідного сигналу. Перевищення потужності, яка виділяється в навантаженні підсилювача, над потужністю джерела вхідного сигналу досягається за рахунок енергії джерел живлення. Малопотужний вхідний сигнал тільки керує передачею енергії джерела живлення в корисне навантаження. В електронних підсилювачах активними елементами, які керують електричною енергією, частіше за все є транзистори чи електронні лампи. Ці підсилювачі, які відрізняються за типом керуючого елемента, називаються відповідно напівпровідниковими чи ламповими підсилювачами. Електронні підсилювачі знаходять широке використання в обчислювальній техніці, зв'язку, експериментальній фізиці, автоматичі і т.п.

Структурна схема електронного підсилювача показана на рис. 10.1. Підсилювач можна розглядати як активний чотирьохполюсник. До вихідних затисків підключається джерело підсилювальних електричних сигналів, до вихідних – навантаження. Вхід і вихід підсилювача зазвичай має спільну точку, яка заземляється. Джерелом вхідних сигналів може бути або датчик, або інший електронний підсилювач, рівень вихідного сигналу якого потрібно підсилити. На структурній схемі джерело вхідного сигналу показане у вигляді генератора напруги E_2 , який має внутрішній опір R_2 . Можна побудувати інший варіант схеми, представивши джерело вхідного сигналу генератором струму I_2 . Джерело сигналу підключається до підсилювача паралельно його вхідному опору $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$.

Підсилювач зі сторони виходу можна представити або у вигляді генератора напруги E (рис. 10.1, а), або генератора струму I (рис. 10.1 б) із внутрішнім опором $R_{\text{вих}}$, підключеного до навантаження $R_{\text{н}}$.

Залежно від співвідношення внутрішнього опору джерела вхідного сигналу R_2 і вхідного опору підсилювача $R_{\text{вх}}$ джерело сигналу може працювати в режимі:

- а) холостого ходу ($R_{\text{ex}} \gg R_z$);
- б) короткого замикання ($R_{\text{ex}} \ll R_z$);
- в) узгодження ($R_{\text{ex}} \approx R_z$).

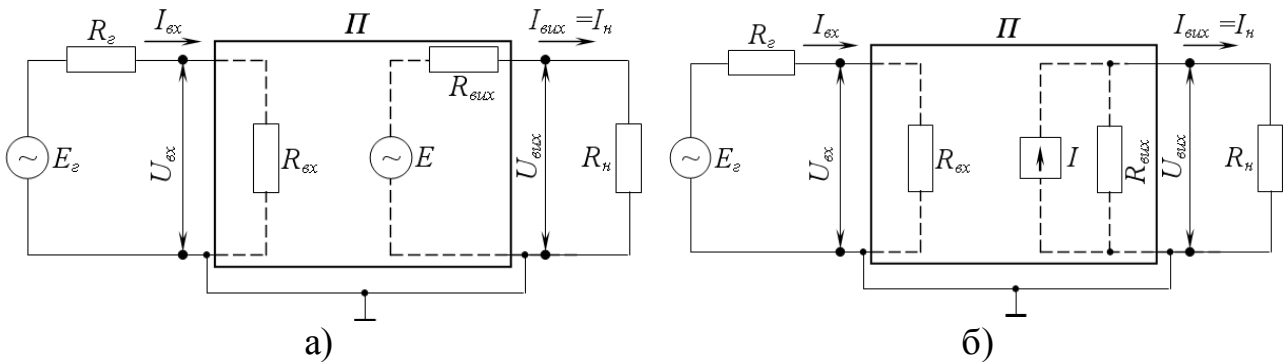


Рис. 10.1. Структурна схема електронного підсилювача із виходом вигляді генератора напруги E (а) і генератора струму I (б).

Виходячи з цього, підсилювач можна назвати відповідно підсилювачем напруги (з потенціальним виходом), підсилювачем струму (із струмовим виходом) чи підсилювачем потужності.

По відношенню між вихідним опором $R_{\text{вих}}$ і опором навантаження R_n підсилювачі можна розділити на підсилювачі з:

- а) потенціальним виходом ($R_n \gg R_{\text{вих}}$);
- б) струмовим виходом ($R_n \ll R_{\text{вих}}$);
- в) потужнісним виходом ($R_n \approx R_{\text{вих}}$).

У відповідності до цього за характером споживання електричної енергії в навантаженні на практиці розрізняють відповідно підсилювачі напруги, струму і потужності.

Іншою класифікацією підсилювачів є класифікація за діапазоном підсилювальних частот:

- 1) підсилювачі низької частоти (ПНЧ) – діапазон підсилювальних частот від 10 Гц до 100 кГц.
- 2) підсилювачі високої частоти (ПВЧ) – діапазон підсилювальних частот від 100 кГц до 100 МГц.

3) підсилювачі постійного струму (ППС). Вони можуть підсилювати постійний струм. Діапазон підсилювальних частот від 0 Гц до 100 кГц.

4) імпульсні підсилювачі (ПІ) – широкосмстові імпульсні та відео підсилювачі. Частотний діапазон підсилювальних частот від 1 кГц до 100 кГц.

5) вибіркoві чи резонансні підсилювачі – це підсилювачі, які працюють у вузькому діапазоні частот.

Навантаженням підсилювача може бути не тільки споживач електричної енергії, але й вхід іншого підсилювача. В останньому випадку підсилювачі представляють собою ланцюжок (рис. 10.2), на вході якого діє джерело підсилювальних сигналів, а до виходу підключене навантаження. При розрахунку такий складний підсилювач розбивають на каскади чи ступені. За структурою підсилювачі можна класифікувати на:

- а) однокаскадні;
- б) багатокаскадні.

Каскади нумеруються в порядку зростання від входу. Перший каскад називають вхідним, передостанній – передвихідним, останній – вихідним.

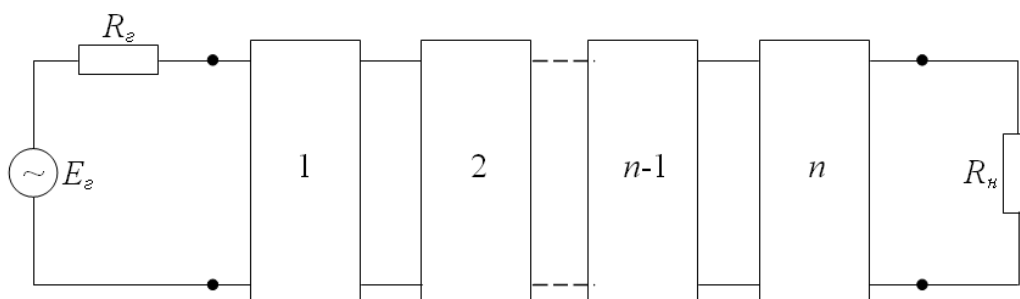


Рис. 10.2. Структурна схема багатокаскадного підсилювача.

Способи зв'язку каскадів між собою, а також способи увімкнення навантаження до виходу підсилювача визначають багато важливих властивостей підсилювача. При передачі сигналів змінного струму чи напруги широко розповсюджений спосіб з'єднання вихідного електроду попереднього каскаду з вхідним електродом наступного за допомогою конденсаторів чи трансформаторів. При необхідності підсилення досить повільних змін напруг чи струмів використовується гальванічний зв'язок каскадів. У відповідності з перерахованими способами зв'язку підсилювачі називаються:

а) підсилювачами з ємнісним (або RC) зв'язком;

б) підсилювачами з трансформаторним зв'язком (трансформаторні підсилювачі);

в) підсилювачі з гальванічним зв'язком (підсилювачі постійного струму).

Найбільш широко використовується трансформаторне увімкнення навантаження до вихідного електроду транзистора чи електронної лампи. Широке застосування знаходять підсилювачі із зворотнім зв'язком, в яких частина енергії із виходу підсилювача передається оборотно на його вхід.

2. Основні технічні показники підсилювачів

Роботу будь-якого підсилювача можна оцінити різними експлуатаційними і кількісними показниками.

Найважливішим кількісним показником підсилення є коефіцієнт підсилення за напругою (струмом чи потужністю), який показує, в скільки разів підсилювальна величина на виході перевищує відповідну величину на вході.

Для підсилювача напруги

$$K_u = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}. \quad (10.1a)$$

Для підсилювача струму

$$K_i = \frac{I_{вих}}{I_{вх}}. \quad (10.1б)$$

Для підсилювача потужності

$$K_p = \frac{P_{вих}}{P_{вх}}. \quad (10.1в)$$

З'ясуємо, чому рівний коефіцієнт підсилення за потужністю підсилювача за умови узгодження на виході ($R_n = R_{вих}$). Потужність на вході рівна $P_{вх} = U_{вх}^2 / R_{вх}$, на виході – $P_{вих} = E^2 / 4R_{вих}$ (за умови узгодженості на виході $U_{вих} = E/2$). Тоді коефіцієнт підсилення за потужністю буде рівний:

$$K_p = \left(\frac{E}{U_{вх}} \right)^2 \cdot \frac{R_{вх}}{4R_{вих}}. \quad (10.1г)$$

Для багатокаскадного підсилювача загальний коефіцієнт підсилення рівний добутку коефіцієнтів підсилення окремих каскадів:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n. \quad (10.2)$$

Коефіцієнт підсилення являє собою відношення однотипних величин і, як наслідок, є безрозмірною величиною. Проте, встановлено, що зміна гучності звуку, який сприймає людське вухо, пропорційна логарифму від відповідної зміни звукової енергії. Тому досить часто даний параметр вимірюють у логарифмічних одиницях – децибелах (дБ).

$$K_u \text{ дб} = 20 \lg K_u = 20 \lg \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (10.3a)$$

$$K_p \text{ дб} = 10 \lg K_p = 10 \lg \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (10.3б)$$

Корисно зазначити, що подвоєння K_u означає збільшення $K_u \text{ дб}$ на 6 дб, а збільшення K_u в 10 разів – збільшення $K_u \text{ дб}$ на 20 дб.

Якщо підсилення кожного каскаду у багатокаскадному підсилювачі виражено в логарифмічних одиницях, то загальне підсилення такого підсилювача буде рівним:

$$K \text{ дб} = K_1 \text{ дб} + K_2 \text{ дб} + \dots + K_n \text{ дб}. \quad (10.4)$$

Ще одним важливим параметром підсилювача є його коефіцієнт корисної дії. Розрізняють повний і електричний ККД.

Повний ККД визначається рівністю

$$\eta_n = \frac{P_k}{P_z}, \quad (10.5a)$$

де P_k – корисна потужність, яка виділяється в навантаженні; P_z – потужність, яка споживається всіма колами підсилювача від всіх джерел живлення.

Електричний ККД визначається по відношенню до колекторного кола транзистора (чи анодного кола вакуумної лампи):

$$\eta_n = \frac{P_k}{P_0}, \quad (10.5б)$$

де P_0 – потужність, яка споживається колом колектора від джерела живлення (чи колом анода від джерела анодного живлення).

Іншими важливими параметрами підсилювача є:

– діапазон підсилювальних частот (смуга пропускання підсилювача) – це смуга частот, в якій вихідна напруга зменшується не більш ніж до 0,7 своєї максимальної величини;

– чутливість;

– максимальна вихідна напруга і потужність;

– вхідний і вихідний опори;

– нерівномірність АЧХ;

- рівень власних шумів, який містить наступні складові:
 - теплові шуми при нагріванні опорів, ємностей.
 - шуми підсилювальних елементів.
 - шум за рахунок пульсацій джерела живлення.
- коефіцієнт нелінійних спотворень.

3. Спотворення сигналів у підсилювачах

Як зазначалося вище, одним із основних кількісних показників підсилювача є точність відтворення форми підсилювального сигналу. В ідеальному підсилювачі крива зміни напруги на виході повинна точно повторювати криву зміни напруги на вході. При цьому допускається деякий зсув в часі Δt між вхідною $U_{вх}$ та вихідною $U_{вих}$ напругами, рівний часу проходження сигналу через підсилювач. Умову неспотвореного підсилення можна записати у вигляді

$$U_{вих}(t) = K_u U_{вх}(t - \Delta t). \quad (10.6)$$

Відхилення форми вихідного сигналу від форми вхідного сигналу називають спотвореннями.

Спотворення бувають двох видів:

- а) лінійні;
- б) нелінійні.

Обидва види спотворень змінюють форму вихідного сигналу, але причини їх появи і методи компенсації різні.

Нелінійні спотворення. Нелінійні спотворення проявляються в тому, що при підсиленні сигналу синусоїдальної форми вихідний сигнал не є чисто синусоїдальним. У вихідному сигналі крім основної гармоніки, яка має частоту вхідного сигналу, з'являється ряд вищих гармонік. У сигналу складної форми змінюється спектральний склад. *Нелінійні спотворення виникають внаслідок наявності в підсилювачі елементів з нелінійними ВАХ.* Цей тип спотворень обумовлений наявністю нелінійних ділянок характеристик (вхідних і вихідних) транзисторів.

Приклад виникнення нелінійних спотворень при роботі транзистора із загальним емітером на нелінійній ділянці вхідної характеристики показаний на рис. 10.3. Із графіка видно, що при подачі на базу напруги синусоїдальної форми вхідний струм бази відрізняється від синусоїди (крива несиметрична відносно нульового рівня).

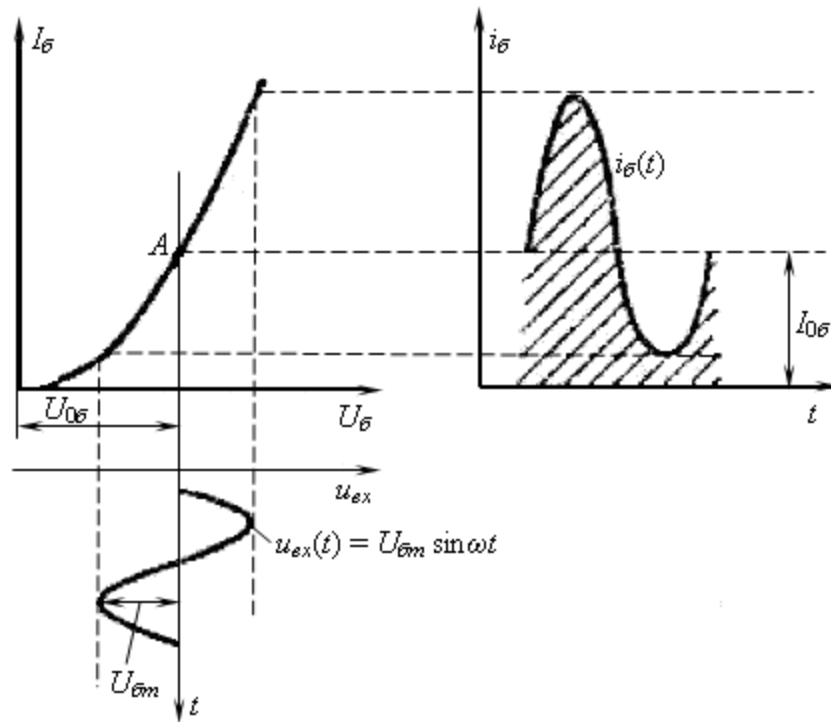


Рис. 10.3. До пояснення виникнення нелінійних спотворень.

Виникнення нелінійних спотворень можна показати аналітично, описавши для спрощення характеристику $I_б = f(U_б)$ квадратичною залежністю

$$i_б = aU_б^2 = a(U_{0б} + u_б)^2,$$

де $U_{0б}$ – напруга зміщення на базі транзистора, $u_б$ – миттєве значення напруги вхідного сигналу.

Тоді

$$i_б = a(U_{0б} + U_{бm} \sin \omega t)^2 = aU_{0б}^2 + 2aU_{0б}U_{бm} \sin \omega t + aU_{бm}^2 \sin^2 \omega t.$$

Позначимо через $aU_{0б}^2 = I_{0б}$ – струм спокою бази, через $2aU_{0б}U_{бm} \sin \omega t = I_{б1m} \sin \omega t$ – першу гармоніку струму бази. Розклавши третій доданок $aU_{бm}^2 \sin^2 \omega t = \frac{aU_{бm}^2}{2} - \frac{aU_{бm}^2}{2} \cos 2\omega t$ та ввівши позначення $\frac{aU_{бm}^2}{2} = \Delta I_{0б}$ і $\frac{aU_{бm}^2}{2} \cos 2\omega t = I_{б2m} \cos 2\omega t$ – друга гармоніка струму бази, можна записати:

$$i_б = I_{0б} + \Delta I_{0б} + I_{б1m} \sin \omega t - I_{б2m} \cos 2\omega t. \quad (10.7)$$

З виразу (10.7) видно, що при апроксимації вхідної характеристики квадратичною залежністю на виході підсилювача з'являється додаткова складова сигналу з подвоєною частотою вихідного сигналу.

При наявності нелінійних спотворень напруга чи струм першої гармоніки є корисним підсиленням сигналом. Всі вищі гармоніки, починаючи з другої, є наслідком нелінійних спотворень. Рівень нелінійних спотворень пропорційний потужності вищих гармонік і при підсиленні синусоїдального сигналу оцінюється коефіцієнтом нелінійних спотворень – клірфактором:

$$\nu = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} P_n}{P_1}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}}, \quad (10.8)$$

де n – номер гармоніки.

При оцінці нелінійних спотворень в більшості випадків враховують тільки другу і третю гармоніки, так як більш високі гармоніки вихідного сигналу зазвичай мають малу потужність. В багатокаскадних підсилювачах (коли каскади вносять приблизно однакові нелінійні спотворення) загальний коефіцієнт нелінійних спотворень приймається рівним сумі коефіцієнтів спотворень кожного каскаду:

$$\nu \approx \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n. \quad (10.9)$$

У загальному випадку нелінійні спотворення окремих каскадів можуть частково компенсувати один одного внаслідок зсуву коливань за фазою. Реальні підсилювальні сигнали в більшості випадків відрізняються від синусоїдальних. При їх підсиленні виникають нові гармоніки і гармоніки комбінаційних частот, тому величина ν не дає повної оцінки рівня нелінійних спотворень сигналу з складним спектральним складом.

Нелінійні спотворення пов'язані тільки з амплітудою вхідного сигналу і не пов'язані з його частотою. У багатокаскадних підсилювачах найбільші нелінійні спотворення як правило виникають в останніх каскадах, на вхід яких поступають сигнали з великою амплітудою. *Чим вища потужність, що*

віддається підсилювачем, тим вищий коефіцієнт нелінійних спотворень. Крім того, величина ν зростає при розширенні діапазону підсилювальних частот.

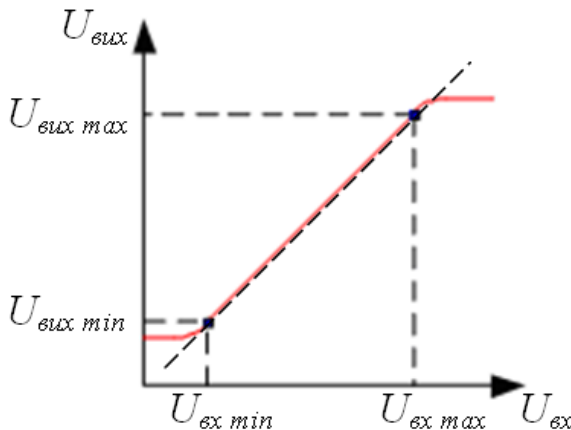


Рис. 10.4. Амплітудна характеристика підсилювача.

Про наявність нелінійних спотворень при підсиленні сигналу будь-якої форми та відомої амплітуди можна судити за ступенем відхилення амплітудної характеристики підсилювача від прямої лінії (рис. 2). Амплітудна характеристика – це залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного сигналу: $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$. Амплітудна

характеристика непридатна для кількісної оцінки і дозволяє тільки приблизно визначити границі лінійності підсилення.

Лінійні спотворення обумовлені в основному залежністю від частоти коефіцієнта передачі струму β (чи α), реактивних опорів ємностей та індуктивностей, які є в схемі підсилювача. Рівень лінійних спотворень не залежить від амплітуди підсилювального сигналу, а залежить тільки від його частоти. Якщо на вхід підсилювача, коефіцієнт підсилення якого без врахування реактивностей рівний K_{u0} , подати сигнал $U_{\text{вх}m} \cos \omega t$, то амплітуда вихідного сигналу не буде рівна очікуваній величині $K_{u0} U_{\text{вх}m}$. Крім того, вихідний сигнал зсувається за фазою відносно вхідного. У реальному підсилювачі вихідна напруга рівна:

$$U_{\text{вих}m} = K_u U_{\text{вх}m} \cos(\omega t + \varphi),$$

де K_u – коефіцієнт підсилення із врахуванням реактивних елементів, φ – кут зсуву фаз між вихідним і вхідним сигналами.

Більше того, сигнали зі складним спектральним складом і складові різних частот будуть підсилюватися неоднаково. Різними будуть і кути зсуву фаз. Неоднакове підсилення складових різних частот і відмінність їх фазових зсувів на виході підсилювача називають частотним і фазовим спотвореннями.

Розглядаючи підсилювач як чотириполіусник, який має комплексний коефіцієнт підсилення

$$\tilde{K}_u = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{U}_{вх}},$$

можна записати в символічній формі:

$$K_u(j\omega) = \frac{U_{вих}(j\omega)}{U_{вх}(j\omega)} = \frac{U_{вих} e^{j\omega t} e^{j\varphi_2(\omega)}}{U_{вх} e^{j\omega t} e^{j\varphi_1(\omega)}} = K_u(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (10.10)$$

де $\varphi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega)$ – фаза коефіцієнта підсилення.

У відповідності з виразом (10.10) можна побудувати амплітудно-фазову характеристику підсилювача. На практиці прийнято окремо розглядати залежності від частоти модуля і аргумента коефіцієнта підсилювача.

При підсиленні гармонічних коливань основними характеристиками є:

- а) амплітудно-частотна характеристика (АЧХ);
- б) фазо-частотна характеристика (ФЧХ).

АЧХ представляє собою графік залежності модуля коефіцієнта підсилення K від частоти: $K = f_1(\omega)$. За нею оцінюються *частотні спотворення* підсилювача. ФЧХ – графік функції $\varphi = f_2(\omega)$; за нею оцінюються *фазові спотворення* підсилювача.

Для неспотвореного підсилення в діапазоні частот ідеальна АЧХ повинна бути горизонтальною прямою $K(\omega) = K_0 = const$ (пунктирна пряма на рис. 10.5, а). АЧХ реальних підсилювачів мають завали в області вищих і нижчих частот.

При оцінці нерівномірності частотної характеристики підсилювача користуються коефіцієнтом частотних спотворень M , який дає кількісну оцінку цих спотворень:

$$M = \frac{K}{K_0}, \quad (10.11)$$

де K – коефіцієнт підсилення на розглядуваній частоті, K_0 – коефіцієнт підсилення на деякій середній частоті f_0 розглядуваного діапазону.

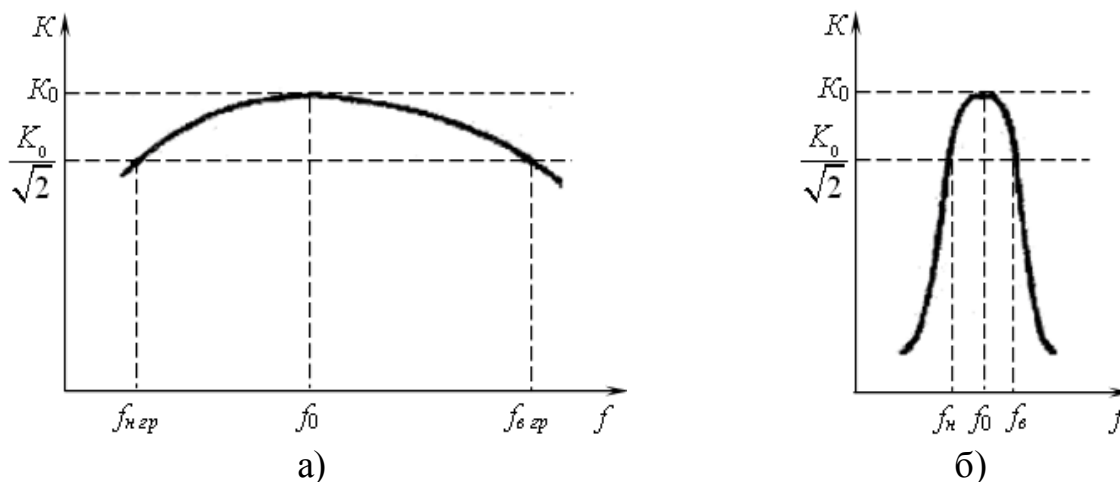


Рис. 10.5. Амплітудно-частотна характеристика широкопasmового (а) і вибіркового (б) підсилювачів.

Зазвичай визначаються коефіцієнти частотних спотворень на нижній і вищій частотах заданого діапазону:

$$M_n = \frac{K_n}{K_0}, \quad (10.12a)$$

$$M_v = \frac{K_v}{K_0}, \quad (10.12б)$$

де K_n і K_v – коефіцієнти підсилення на нижній і вищій частотах відповідно.

У різних типів підсилювачів величини M_n і M_v можуть бути як менші, так і більші за 1, так як коефіцієнт підсилення на деяких частотах може бути або вищим, або нижчим коефіцієнта підсилення на середніх частотах. Відповідно і АЧХ буде мати ділянки підйому і завалу.

Загальний коефіцієнт частотних спотворень багатокаскадних підсилювачів рівний добутку коефіцієнтів частотних спотворень окремих каскадів:

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_n, \quad (10.13)$$

для n однакових каскадів

$$M = M_1^n. \quad (10.14)$$

Величину частотних спотворень іноді оцінюють за відхиленням підсилення від величини K_0 , вираженим в децибелах:

$$\Delta K[\text{дб}] = K[\text{дб}] - K_0[\text{дб}]. \quad (10.15)$$

За АЧХ можна визначити граничні частоти і смузу пропускання підсилювача.

Граничними частотами $f_{\text{гр}}$ (чи $\omega_{\text{гр}}$) називають ті частоти, на яких коефіцієнт підсилення відрізняється від коефіцієнта підсилення на середній частоті на задану величину. Граничними частотами зручно вважати ті вищі $f_{\text{в.гр}}$ і нижчі $f_{\text{н.гр}}$ частоти, на яких коефіцієнт підсилення зменшується до рівня 0,707 за напругою ($M = 1/\sqrt{2}$) і до рівня 0,5 за потужністю, тобто в обох випадках K_u зменшується на 3дб. Діапазон частот $f_{\text{в.гр}} - f_{\text{н.гр}}$ називається умовною смугою пропускання підсилювача.

За шириною робочого діапазону частот підсилювачі поділяють на вибіркові та широкосмугові.

Для вибірових підсилювачів характерне відношення $f_{\text{в}} \approx f_{\text{н}}$ (рис. 10.5, б). У більшості випадків вибірові підсилювачі призначені для роботи на високих радіочастотах і в них використовуються коливальні контури.

Широкосмугові підсилювачі характеризуються нерівністю $f_{\text{в.гр}} \gg f_{\text{н.гр}}$. До широкосмугових підсилювачів відносяться, наприклад, імпульсні підсилювачі. На АЧХ широкосмугових підсилювачів виділяють область низьких, середніх і високих частот.

Особливу групу підсилювачів являють підсилювачі постійного струму, в яких $f_{\text{н}} = 0$.

Фазові спотворення не впливають на спектральний склад і співвідношення амплітуд гармонічних складових складного сигналу, а викликають зміну його форми в результаті різних фазових зсувів, які виникають в окремих складових сигналу після проходження через підсилювач. Вплив фазових спотворень на форму сигналу, який складається з двох гармонік,

спрощено пояснюється на рис. 10.6, а і б. Побудова проведена при умові, що коефіцієнт підсилення не залежить від частоти, але для другої гармоніки підсилювач вносить зсув фаз на кут $\varphi = \pi/4$. Із графіка видно, що форма вихідного сигналу дуже сильно відрізняється від форми вхідного, тобто, великі фазові відхилення не менш суттєво, ніж частотні, впливають на якість роботи підсилювача.

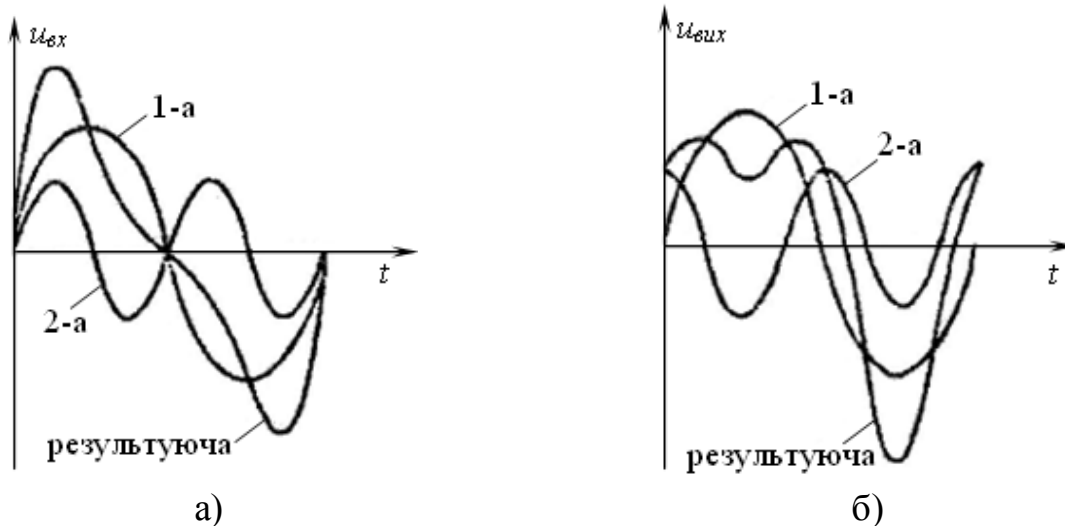


Рис. 10.6. Вплив фазових спотворень на форму сигналу, що складається з двох гармонік.

Умову відсутності фазових спотворень можна знайти з наступних міркувань. Нехай в підсилювачі існує часовий зсув Δt між вхідним і вихідним сигналами. Будь-яка гармонічна складова вхідного сигналу може бути записана у вигляді

$$U_{вх\ k} = A_k \sin(\omega_k t + \psi_k).$$

Після підсилення на виході отримуємо:

$$U_{вых\ k} = K_{u0} A_k \sin(\omega_k t + \psi_k + \varphi_k).$$

Якщо $\varphi_k = -\omega_k \Delta t$, то

$$U_{вых\ k} = K_{u0} A_k \sin[\omega_k (t - \Delta t) + \psi_k],$$

звідки знаходимо кут зсуву фаз:

$$\varphi_k = -2\pi f_k \Delta t = -C f_k. \quad (10.16)$$

Отже, фазові зсуви в підсилювачі відсутні, коли фазовий зсув лінійно залежить від частоти.

Ідеальною ФЧХ є пряма, яка починається в початку координат (пунктирна лінія на рис. 10.7). ФЧХ реального підсилювача має вигляд, показаний на рис. 10.7 суцільною лінією.

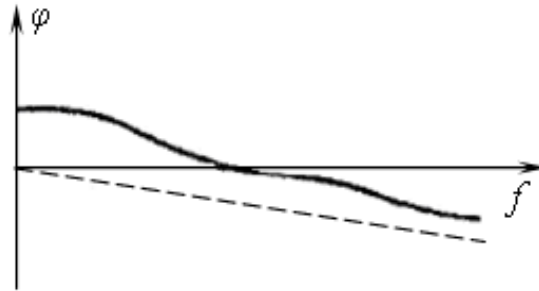


Рис. 10.7. Фазочастотна характеристика підсилювача.

Слід зауважити, що і частотні, і фазові спотворення обумовлені одними і тими ж причинами одночасно: великим частотним відповідають великі фазові відхилення, і навпаки.