

Загальна теорія підсилювачів

© Коломієць Р. О.

17.03.2020

1 Загальні визначення

Підсилювач — це електронний пристрій або схема, яка використовується для збільшення величини сигналу, поданого на його вхід.

Підсилювач — це загальний термін, що використовується для опису схеми, яка збільшує амплітуду вхідного сигналу. Однак не всі схеми підсилювачів однакові, їх класифікують за конфігурацією схеми та режимами роботи.

У електроніці підсилювачі малих сигналів зазвичай використовуються іншими пристроями, оскільки вони мають можливість перетворити порівняно невеликий вхідний сигнал, наприклад від сенсора, у значно більший вихідний сигнал для реле або гучномовця.

Існує багато електронних схем, що класифікуються як підсилювачі — від операційних підсилювачів та підсилювачів малого сигналу до потужних (силових) підсилювачів. Клас підсилювача залежить від амплітуди вхідного сигналу (порівняно велика або мала), його фізичної конфігурації та того, як він обробляє вхідний сигнал, тобто взаємозв'язку між вхідним сигналом і струмом, що протікає в навантаженні.

У таблиці нижче наведено класифікацію підсилювачів.

Сигнал	Схема	Клас	Робочі частоти
Малий	Спільний емітер	A	Постійний струм
Великий	Спільна база	B	Звукові частоти
	Спільний колектор	AB	Радіочастоти
		C	KX та UKX-частоти

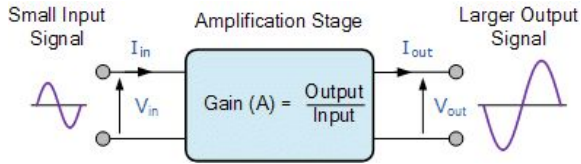


Рис. 1 – Загальна структурна схема підсилювача

Підсилювач можна розглядати як простий блок, що містить підсилюючий пристрій, такий як біполярний транзистор, польовий транзистор або операційний підсилювач, і який має дві вхідні клеми та дві вихідні клеми (земля є загальною — рис.1). Важливо, що рівень вихідного сигналу набагато більший, ніж сигнал вхідного.

Ідеальний підсилювач сигналу має три основні параметри: вхідний опір (R_{in}), вихідний опір (R_{out}) і коефіцієнт підсилення (A). Незалежно від того, наскільки складна схема підсилювача, загальна модель підсилювача все ще може бути використана для ілюстрації взаємозв'язку цих трьох параметрів.

2 Модель ідеального підсилювача

Величина різниці між вхідним і вихідним сигналами відома як підсилення підсилювача. Коефіцієнт посилення - це в основному міра того, наскільки підсилювач "підсилює" вхідний сигнал. Наприклад, якщо у нас є вхідний сигнал 1 В і вихідний 50 В, то посилення підсилювача буде 50. Іншими словами, вхідний сигнал був збільшений в 50 разів. Це збільшення називається посиленням.

Коефіцієнт підсилення підсилювача — це просто відношення рівня вихідного сигналу до рівня вхідного сигналу. Коефіцієнт посилення є безрозмірною величиною (бо співвідношення), але в електроніці часто використовується вимірювання коефіцієнту підсилення в децибелах (дБ).

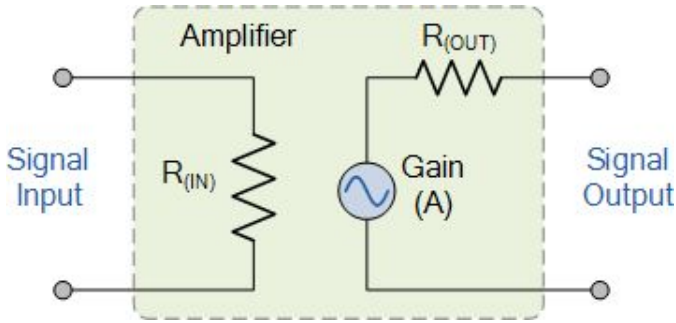


Рис. 2 – Еквівалентна схема підсилювача

3 Коефіцієнт підсилення

У першому наближенні коефіцієнт посилення підсилювача можна визначити як співвідношення між рівнем сигналу, вимірним на виході, і рівнем сигналом, вимірним на вході. Існує три різні види посилення підсилювача, які можна виміряти, і це: коефіцієнт посилення напруги (A_v), посилення струму (A_i) та посилення потужності (A_p) — в залежності від вимірних величин.

Коефіцієнт посилення напруги:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}.$$

Коефіцієнт посилення струму:

$$A_i = \frac{I_{out}}{I_{in}}.$$

Коефіцієнт посилення потужності:

$$A_p = A_v \cdot A_i$$

Зауважте, що для посилення потужності ви також можете розділити потужність, отриману на виході, на потужність, виміряну на вході. Також при обчисленні коефіцієнта посилення підсилювача, індекси v , i та p використовуються для позначення типу посилення сигналу.

Коефіцієнт підсилення по потужності (A_p), як вже згадувалося вище, також виражається в децибелах (дБ). Бел (Б) — це логарифмічна одиниця (за основою 10) вимірювання співвідношення рівнів величин однакової природи. Оскільки бел є надто великою одиницею вимірювання, то вона частіше використовується з префіксом *деци-*, тобто один децибел — одна десята ($\frac{1}{10}$) бела. Для обчислення коефіцієнта посилення підсилювача в децибелах можна використовувати наступні вирази:

- коефіцієнт підсилення по напрузі в дБ:

$$a_v = 20 \cdot \lg(A_v),$$

- коефіцієнт підсилення по струму в дБ:

$$a_i = 20 \cdot \lg(A_i),$$

- коефіцієнт підсилення по потужності в дБ:

$$a_p = 10 \cdot \lg(A_p).$$

Зауважте, що 20 дБ — це не вдвічі більше енергії, ніж 10 дБ — через те, що шкала децибел є логарифмічною.

Крім того, позитивне значення дБ вказує посилення, а негативне значення дБ — на втрати в підсилювачі. Наприклад, коефіцієнт посилення підсилювача +3 дБ вказує на те, що вихідний сигнал підсилювачів "подвоївся" ($\times 2$), тоді як коефіцієнт посилення підсилювача -3 дБ вказує на те, що сигнал "вдвічі зменшився" ($\times 0.5$) або, іншими словами, у підсилювачі виникають втрати сигналу.

Також точку «-3 дБ» підсилювача часто називають точкою половинного рівня, приймаючи 0 дБ як максимальне вихідне значення. При цьому рівень вихідного сигналу (по напрузі або струму) дорівнює половині рівня вхідного сигналу.

3.1 Приклад розрахунку коефіцієнтів посилення підсилювача

Задача. Визначте напругу, струм та посилення потужності підсилювача, що має рівень вхідного сигналу 1 мА при 10 мВ та рівень

відповідного вихідного сигналу 10 мА при 1 В. Також виразіть усі три коефіцієнти підсилення в децибелах.

Розв'язання. У відповідності з наведеними вище формулами: коефіцієнт посилення напруги:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{0,01} = 100;$$

коефіцієнт посилення струму:

$$A_i = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{10}{1} = 10;$$

коефіцієнт посилення потужності:

$$A_p = A_v A_i = 100 \cdot 10 = 1000.$$

Переводимо отримані величини в децибели:

$$a_v = 20 \cdot \lg(A_v) = 20 \cdot \lg(100) = 40(dB);$$

$$a_i = 20 \cdot \lg(A_i) = 20 \cdot \lg(10) = 20(dB);$$

$$a_p = 10 \cdot \lg(A_p) = 10 \cdot \lg(1000) = 30(dB).$$

Зверніть увагу, що не можна просто додати або перемножити коефіцієнти підсилення по напрузі та струму, щоб отримати коефіцієнт підсилення по потужності (в дБ). Він повинен обчислюватися окремо.

4 Підсилювачі потужності

Як правило, підсилювачі можна розділити на два різних типи залежно від їх потужності або посилення напруги. Один з типів називається *малосигнальним підсилювачем*, або *підсилювачем малого сигналу* (*small signal amplifier*). До цього типу відносяться попередні підсилювачі, інструментальні підсилювачі тощо. Інший тип називають *підсилювачем великих сигналів* (*large signal amplifier*).

До цього типу відносять аудіопідсилювачі потужності або підсилювачі комутації живлення. Підсилювачі великих сигналів призначені для посилення великих вхідних сигналів напруги або комутації великих струмів у навантаженні.

Підсилювач малого сигналу, як правило, називають підсилювачем напруги, оскільки вони зазвичай перетворюють невелику вхідну напругу в значно більшу вихідну напругу.

Іноді для приводу двигуна або подачі сигналу на гучномовець потрібен підсилювач. В такому випадку — коли потрібні високі струми — використовують *підсилювачі потужності*.

Як впливає з їх назви, головне завдання "підсилювача потужності" (також відомого як підсилювач великого сигналу) — це подавати потужність до навантаження. Іншими словами, підсилювач потужності підсилює потужність вхідного сигналу, і тому саме цей тип підсилювачів використовуються, наприклад, на вихідних каскадах аудіо-підсилювачів для гучномовців.

Основний принцип роботи підсилювача потужності полягає у перетворенні потужності постійного струму, відведеної від джерела живлення, в сигнал змінного струму, що подається на навантаження. Хоча посилення велике, ефективність перетворення постійного струму від входу у вихідний сигнал змінного струму зазвичай низька.

Ідеальний підсилювач дав би нам коефіцієнт корисної дії 100% або, принаймні, вихідна потужність (P_{out}) була б рівною вхідній потужності (P_{in}). Однак насправді цього ніколи не може статися, оскільки частина енергії від джерела живлення втрачається у вигляді тепла, бо сам підсилювач споживає енергію під час процесу посилення. Тоді ефективність підсилювача задається як:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}.$$

Ідеальний підсилювач потужності має наступні риси:

- має постійне значення коефіцієнту підсилення для різних рівнів (значень) вхідного сигналу;
- на частоту (вихідного) сигналу коефіцієнт підсилення не впливає (тобто всі частоти підсилюються однаково);

- підсилювач не повинен додавати шум до вихідного сигналу;
- на посилення підсилювача не повинна впливати зміна температури (ця властивість називається *температурною стабільністю*);
- рівень коефіцієнту підсилення повинен залишатися сталим протягом тривалого проміжку часу.

5 Класи підсилювачів

Класифікація підсилювача (електронного вузла) як підсилювача напруги або потужності проводиться шляхом порівняння характеристик вхідного і вихідного сигналів шляхом з урахуванням їх часових особливостей (тобто урахування того, наскільки вони синхронні, чи вихідний сигнал інвертований відносно вхідного чи ні).

З курсу компонентної бази РЕА відомо, що для роботи польового та/або біполярного транзистора в його "активній області" потрібна деяка напруга "базового зміщення" (*base biasing*). Ця невелика напруга базового зміщення, додана до вхідного сигналу, дозволила транзистору відтворити повну форму вхідної хвилі на виході без втрати форми сигналу.

Однак, змінюючи положення цієї напруги базового зміщення, можна керувати підсилювачем в режимі посилення, відмінному від режиму для повного відтворення форми хвилі. З введенням в підсилювач напруги базового зміщення можна отримати різні робочі діапазони та режими роботи. Ці різні режими роботи більш відомі як *класи підсилювачів*.

Підсилювачі потужності (зокрема звуку) класифікуються в алфавітному порядку відповідно до їх схем та режиму роботи. Підсилювачі позначаються різними класами роботи, такими як клас "А", клас "В", клас "С", клас "АВ" і т. Д. Ці різні класи підсилювачів варіюються від майже лінійного виходу, але з низькою ефективністю до нелінійного вихід, але з високим ККД.

Жоден клас роботи не є "кращим" або "гіршим", ніж будь-який інший клас, оскільки тип операції визначається використанням електричного кола посилення. Існують типові максимальні

коефіцієнти корисної дії для різних типів або класів підсилювача, причому найчастіше використовується:

- клас А: має низьку ефективність (менше 40%), але добре відтворює сигнал та має хорошу лінійність;
- клас В: є вдвічі ефективнішим від підсилювачів класу А з максимальною теоретичною ефективністю близько 70%, оскільки підсилювальний пристрій проводить (і використовує потужність) для половини вхідного сигналу;
- клас АВ: має ступінь ефективності між класом А і класом В, але слабше відтворення сигналу, ніж підсилювачі класу А;
- клас С: є найбільш ефективним класом підсилювачів, але має дуже велике спотворення, оскільки підсилюється лише невелика частина вхідного сигналу, тому вихідний сигнал дуже мало схожий на вхідний сигнал. Підсилювачі класу С мають найгірше відтворення сигналу.

5.1 Підсилювач класу А

Підсилювач класу А — це коли вся форма хвилі вхідного сигналу вірно відтворюється на виході підсилювачів, оскільки транзистор ідеально зміщений у своїй активній області. Це означає, що транзистор, що перемикається, ніколи не "заганяється" в його області відсічення або насичення. Результат полягає в тому, що вхідний сигнал змінного струму ідеально "центрується" між верхніми та нижніми межами підсилювачів, як показано на рис. 3.

У схемі підсилювача класу А використовується один і той же перемикаючий транзистор для обох половин форми вихідної хвилі, і завдяки центральному розташуванню зміщення вихідний транзистор завжди має постійний струм зміщення постійного струму (I_{CQ}), що протікає через нього, навіть якщо на вході сигнал відсутній. Іншими словами, вихідні транзистори в такому підсилювачі ніколи не вимикаються.

Це призводить до того, що підсилювач класу А є дещо неефективним, оскільки його перетворення потужності постійного струму живлення в потужність вихідного сигналу змінного струму, що подається на навантаження, зазвичай дуже низька.

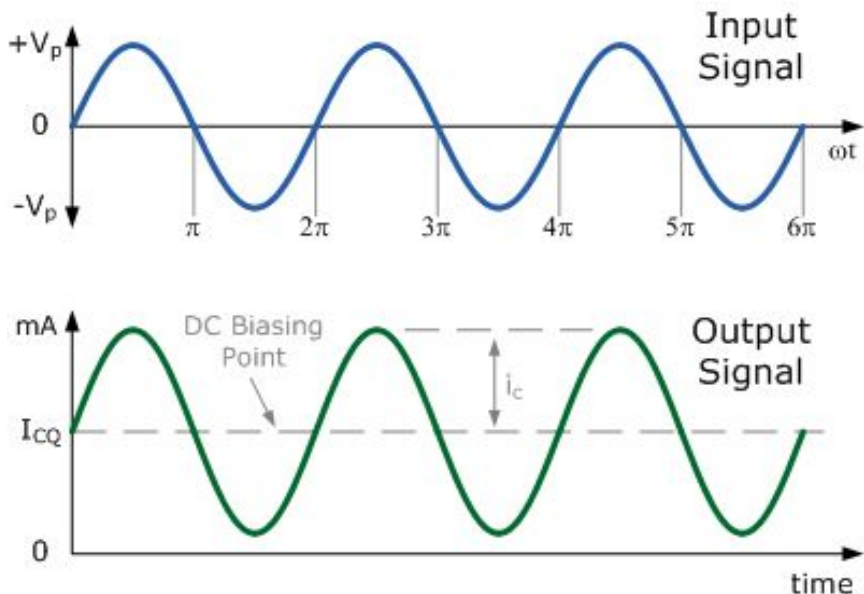


Рис. 3 – Часові діаграми роботи підсилювача класу А

Завдяки цій централізованій точці зміщення вихідний транзистор підсилювача класу А може сильно нагрітися, навіть коли немає вхідного сигналу, тому потрібно вдаватися до певних конструктивних заходів з розсіювання тепла. Постійний струм зміщення, що проходить через колектор транзистора (I_{CQ}), дорівнює струму, що проходить через навантаження колектора. Таким чином, підсилювач класу А дуже неефективний, оскільки велика частина цієї потужності постійного струму перетворюється на тепло.

5.2 Підсилювач класу В

На відміну від режиму роботи підсилювача класу А, який використовує один транзистор для своєї вихідної потужності, підсилювач класу В використовує два комплементарних транзистора (або NPN і PNP, або NMOS і PMOS) для посилення кожної половини форми вихідної хвилі.

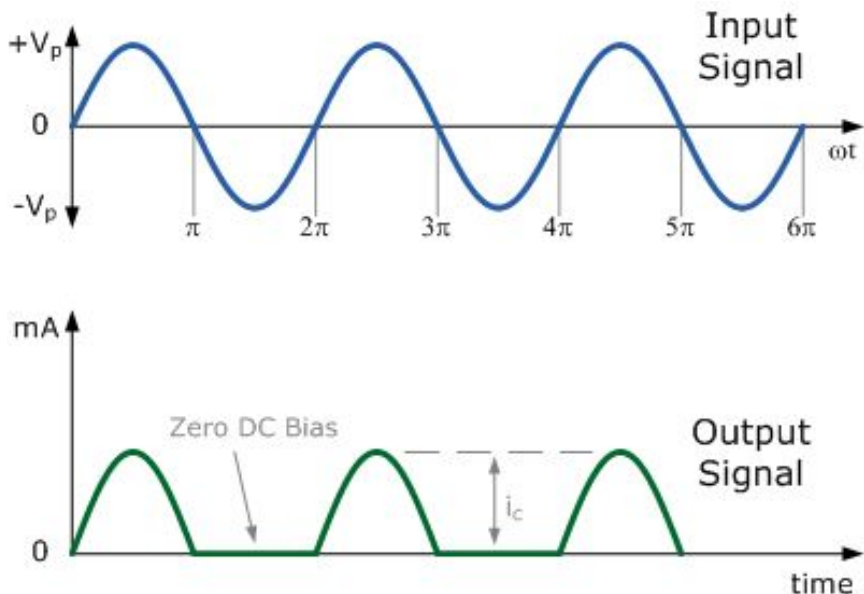


Рис. 4 – Часові діаграми роботи підсилювача класу В

У такій схемі кожен транзистор проводить лише половину форми сигналу: один — позитивну хвилю напруги, а інший — негативну хвилю напруги вхідного сигналу. Це означає, що кожен транзистор проводить половину свого часу в активній області і половину свого часу в області відсікання, тим самим підсилюючи лише 50% вхідного сигналу.

Підсилювач класу В не потребує прямої напруги зміщення постійного струму (на відміну від підсилювача класу А), але натомість транзистор проводить тільки тоді, коли вхідний сигнал перевищує напругу відкриття бази (V_{BE}), а для кремнієвих транзисторів - це приблизно 0,7 В. Тому при нульовому вхідному сигналі є нульовий вихід. Оскільки на виході підсилювачів подається лише половина вхідного сигналу, це покращує ефективність підсилювача порівняно з попередньою конфігурацією класу А, як показано на рис. 4.

Таким чином, область вихідної форми хвилі, що знаходиться нижче цього вікна 0,7 В, не буде відтворена точно. Це відбуває-

ться внаслідок того, що, оскільки один транзистор вимикається, чекаючи, коли інший увімкнеться (коли V_{BE} стане більше 0,7 В). В результаті виходить невелика частина форми вихідної хвилі в нульовій напрузі, що проходить через точку, яка буде спотворена. Цей тип спотворень називається *перехресним викривленням* (*crossover distortion*) і буде розглянутий пізніше.

5.3 Підсилювач класу АВ

Підсилювач класу АВ — це компроміс між вищевказаними класами А та В. Хоча для підсилювача класу АВ все ще використовуються два взаємодоповнюючих (комплементарних) транзистори на його виході, на базу кожного транзистора подається дуже невелика напруга зміщення для зміщення їх близько до області відсічення, коли немає вхідного сигналу.

Наявність такої напруги зміщення призведе до того, що транзистор спрацьовує нормально в межах своєї активної області, усуваючи будь-які перехресні спотворення, які завжди присутні в схемі класу В. Невеликий зміщувачий струм колектора (I_{CQ}) буде протікати через транзистор, коли немає вхідного сигналу, але він, як правило, набагато менше, ніж для схеми підсилювача класу А.

Таким чином, кожен транзистор проводить у включеному протягом трохи більше половини циклу вхідної хвилі. Невелике зміщення у схемі підсилювача класу АВ покращує ефективність та лінійність схеми підсилювача порівняно з чистими схемами класів А або В.

При проектуванні схем підсилювача дуже важливий клас роботи підсилювача, оскільки він визначає необхідну для його роботи величину зміщення транзистора, а також максимальну амплітуду вхідного сигналу.

Класифікація підсилювача враховує частину вхідного сигналу, яка безпосередньо передається у вихідний транзистор, а також визначає ефективність та потужність, яку вихідний транзистор споживає і розсіює у вигляді витраченого тепла.

У наступній таблиці проведено порівняння параметрів найпоширеніших класів підсилювачів.

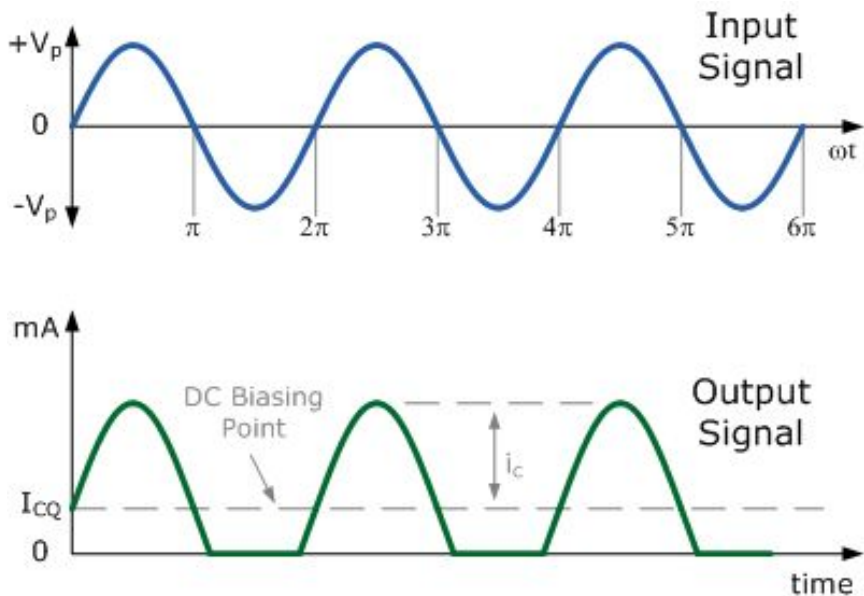


Рис. 5 – Часові діаграми роботи підсилювача класу АВ

Class	A	B	C	AB
Conduction Angle	360°	180°	Less than 90°	180 to 360°
Position of the Q-point	Centre Point of the Load Line	Exactly on the X-axis	Below the X-axis	In between the X-axis and the Centre Load Line
Overall Efficiency	Poor 25 to 30%	Better 70 to 80%	Higher than 80%	Better than A but less than B 50 to 70%
Signal Distortion	None if Correctly Biased	At the X-axis Crossover Point	Large Amounts	Small Amounts

Погано спроектовані підсилювачі, особливо типу класу А, можуть також вимагати більших потужних транзисторів, більш дорогих засобів примусового охолодження (радіаторів, вентиляторів тощо) або навіть збільшення потужності джерела живлення, необхідного для подачі додаткової витраченої потужності, необхідної підсилювачу. Потужність, що перетворюється на тепло від транзисторів, резисторів або будь-якого іншого компонента з цього живлення, робить будь-яку електронну схему неефективною і призведе до передчасного виходу з ладу пристрою.

Тож навіщо використовувати підсилювач класу А, якщо його ефективність менше 40% порівняно з підсилювачем класу В, який має більш високий показник ефективності понад 70%? В основному, підсилювач класу А дає набагато лінійніший вихід, тобто його вихідний сигнал за формою більше схожий на вхідний сигнал, навіть якщо схема підсилювача класу А споживає більший постійний струм.