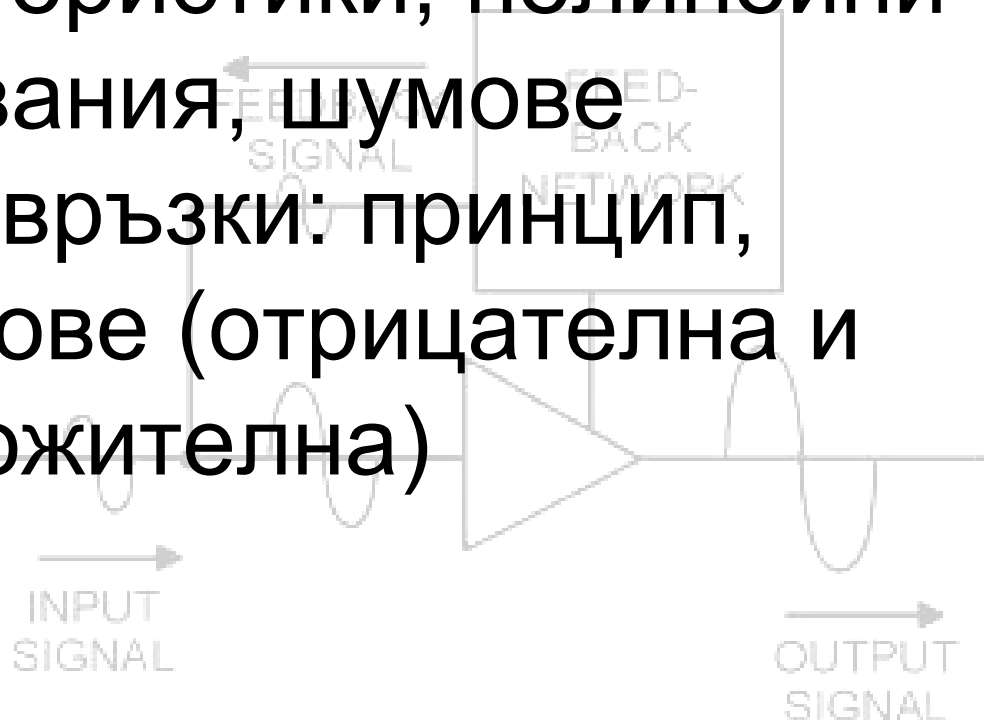


5. Усилватели – общи сведения,
предавателни параметри и
характеристика; видове усилватели,
честотни характеристики, нелинейни
изкривявания, шумове
6. Обратни връзки: принцип,
свойства, видове (отрицателна и
положителна)

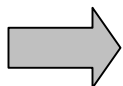


Класификация на усилвателите

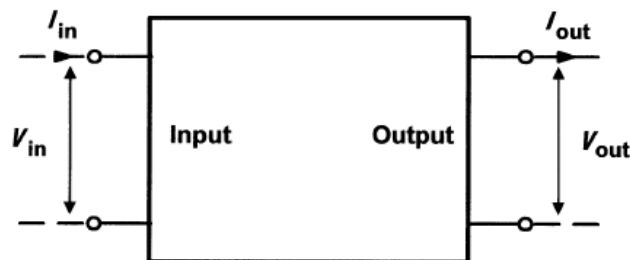
- **Променливотокови усилватели (ac coupled):** Отделните стъпала блокират постояннотоковата съставна на сигнала и се усилва само променливотоковата съставна;
- **Постояннотокови усилватели (dc coupled):** постояннотоковите потенциали не са изолирани и се предават и усилват от стъпало на стъпало;
- **Усилватели на големи сигнали:** справят се със сигнали от порядъка на 1-100V;
- **Малосигнални усилватели:** обикновено работят със сигнали около 1V и по-малки;
- **Аудио (-честотни) усилватели:** проектирани да работят в аудио обхвата: 20Hz – 20kHz;
- **Широколентови усилватели:** усилват сигнали в широк честотен обхват – от няколко Hz до няколко десетки MHz например;
- **Радио-честотни усилватели:** специално проектирани да работят в областта на радио-честотите (100kHz – над 1GHz). Обикновено тези усилватели се правят и честотно селективни, като честотната им лента се ограничава в зависимост от приложението им;
- **Ниско-шумящи усилватели:** проектирани да внасят минимално количество шум в сигнала. Работят със сигнали под 10mV.

Видове усилване

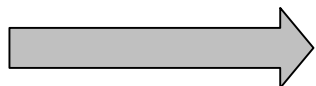
Усилване по напрежение



$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$



Усилване по ток



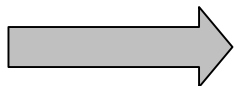
$$A_i = \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

$$\text{Gain (dB)} = 20 \log(E_{out}/E_{in})$$

$$\text{Gain (dB)} = 20 \log(I_{out}/I_{in})$$

$$\text{Gain (dB)} = 10 \log(P_{out}/P_{in})$$

Усилване по мощност



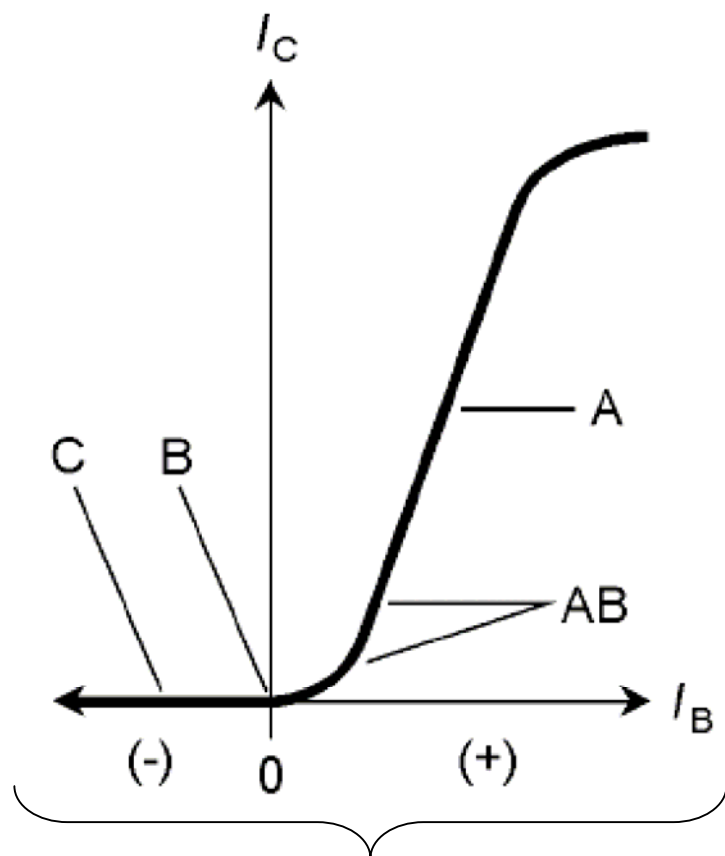
$$A_p = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

За мощност
коэффициента във
формулата е 10, а
не 20, както за
напрежение и ток

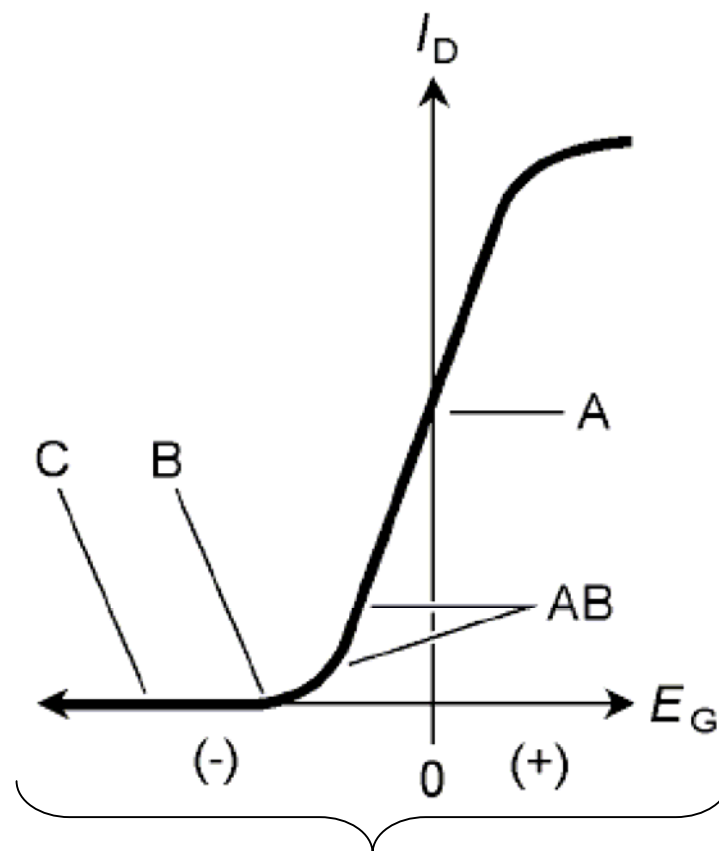
Връзка между
усилване по
мощност,
усилване по
напрежение и
усилване по ток

$$\left\{ \begin{array}{l} A_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{out} \times V_{out}}{I_{in} \times V_{in}} = \frac{I_{out}}{I_{in}} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} = A_i \times A_V \\ A_p = A_i \times A_V \end{array} \right.$$

Класове усилватели – обща класификация

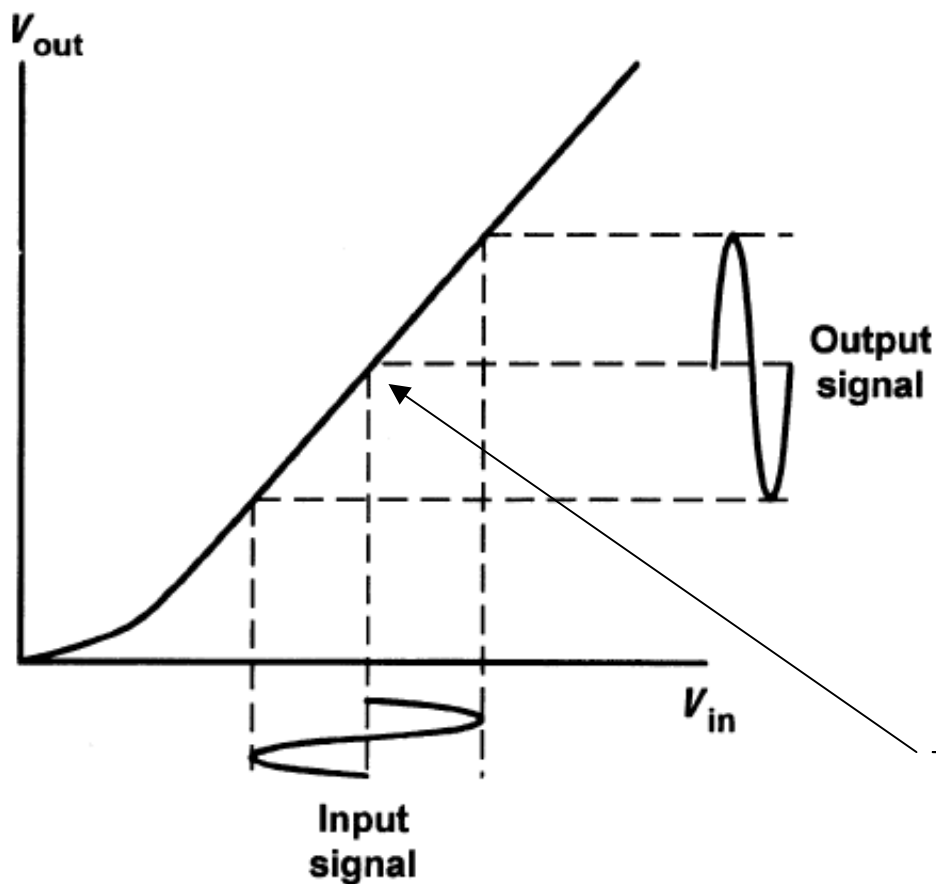


Класове на работа на усилвателя
за NPN биполярен транзистор



Класове на работа на усилвателя
за N-канален JFET

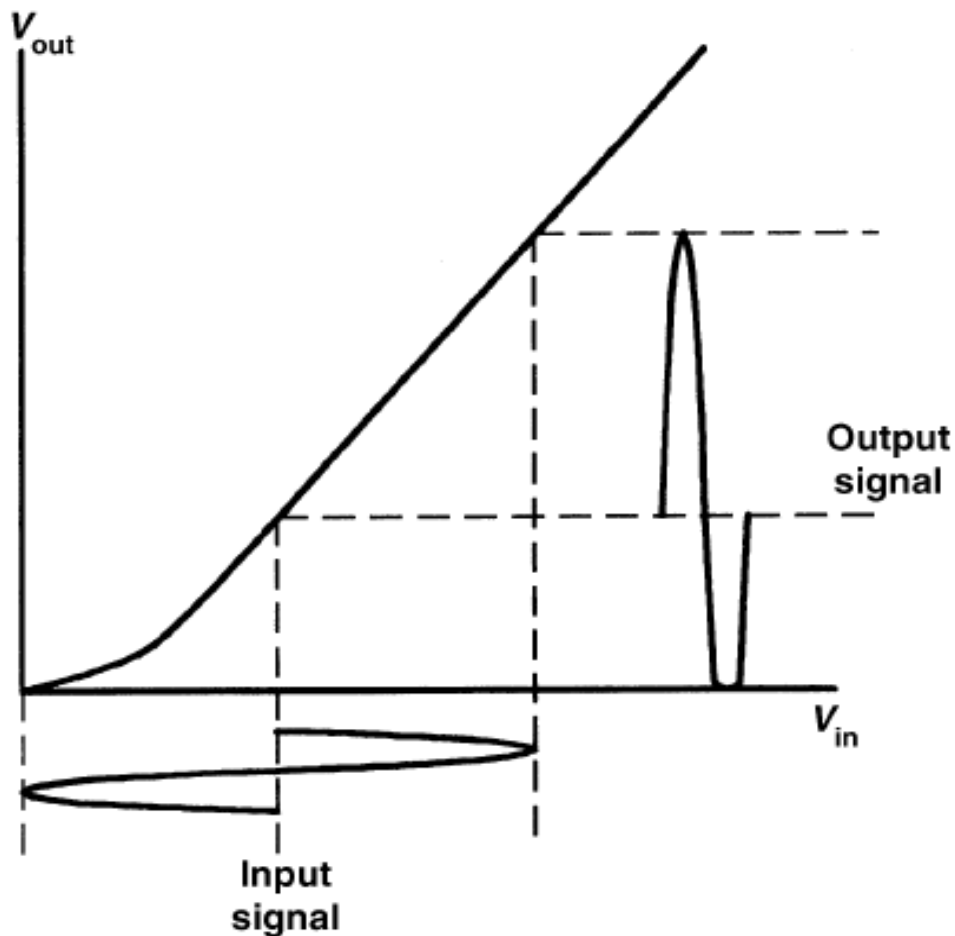
Класове усилватели – усилвател клас А (линеен усилвател)



Един усилвател може да излезе от линеен режим и да започне да въвежда нелинейни изкривявания, когато работните точки на активните му устройства са неправилно подбрани или когато амплитудата на входния сигнал стане много голяма и усилвателя се “претовари”.

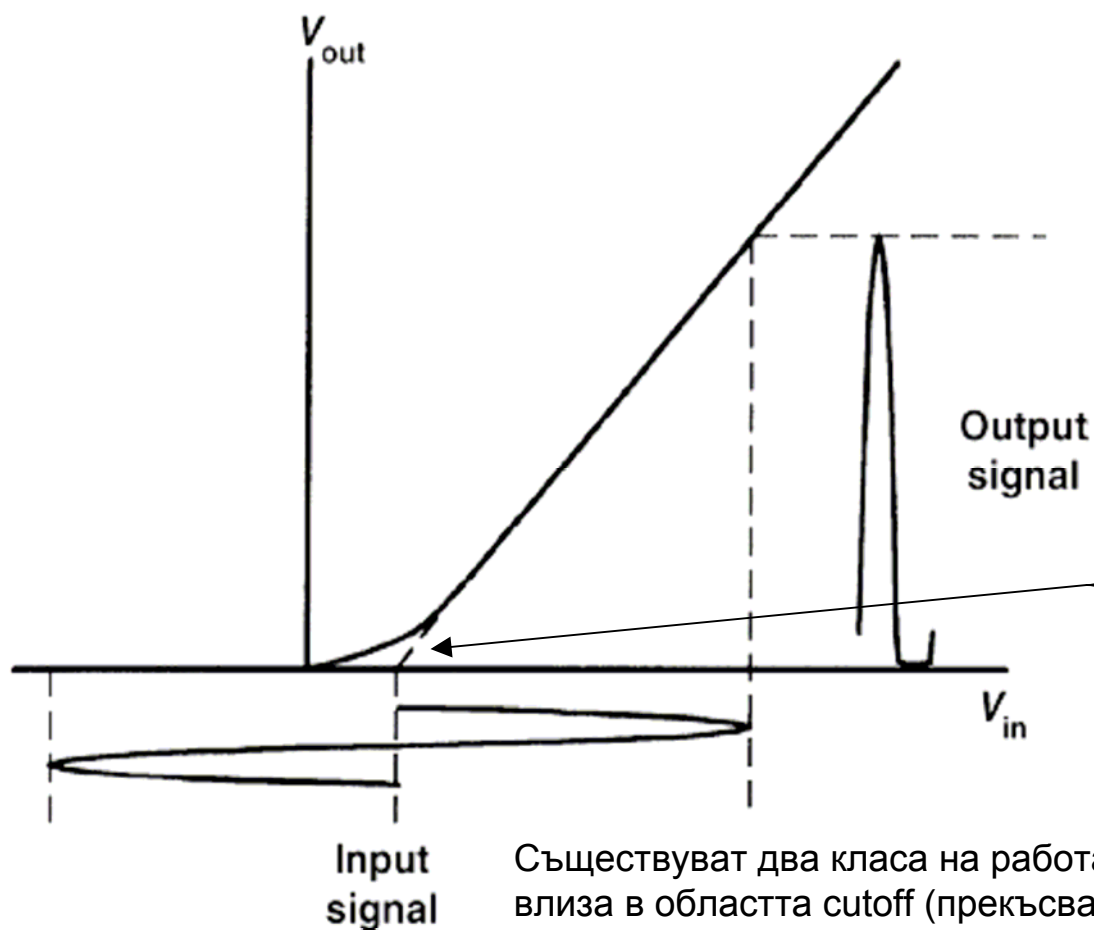
Работната точка на **клас А** усилвателите се избира по средата на **предавателната им характеристика** (връзката между изходното и входното напрежение), като токът през тях никога не пада до 0.

Класове усилватели – изкривявания на сигнала



Преместването на работната точка на усилвателя към началото на предавателната характеристика (областта на нелинейност) или твърде голямата амплитуда на входния сигнал водят до нелинейни изкривявания в изходния сигнал. И в двата случая през активните устройства в усилвателя непрекъснато протича ток.

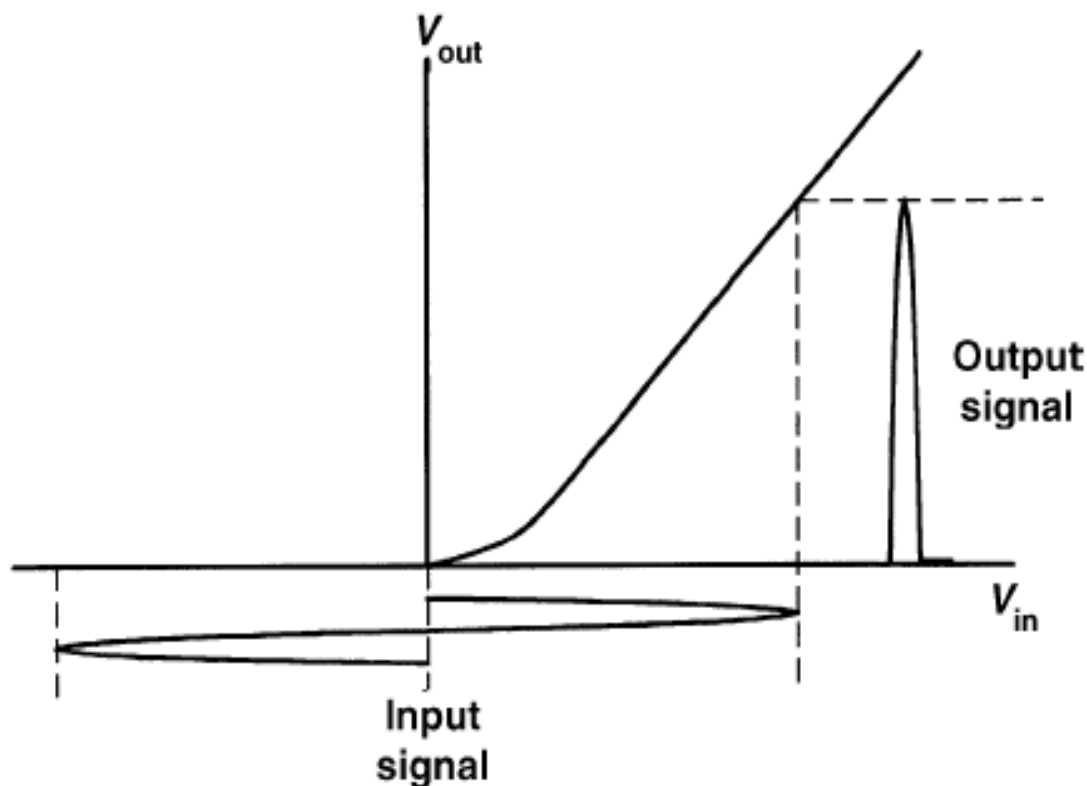
Класове усилватели – усилвател клас АВ



Работната точка на активните устройства е преместена в проекцията на предавателната характеристика по допирателната в началото ѝ. Когато входния сигнал придобива отрицателни стойности, изходния сигнал се ограничава.

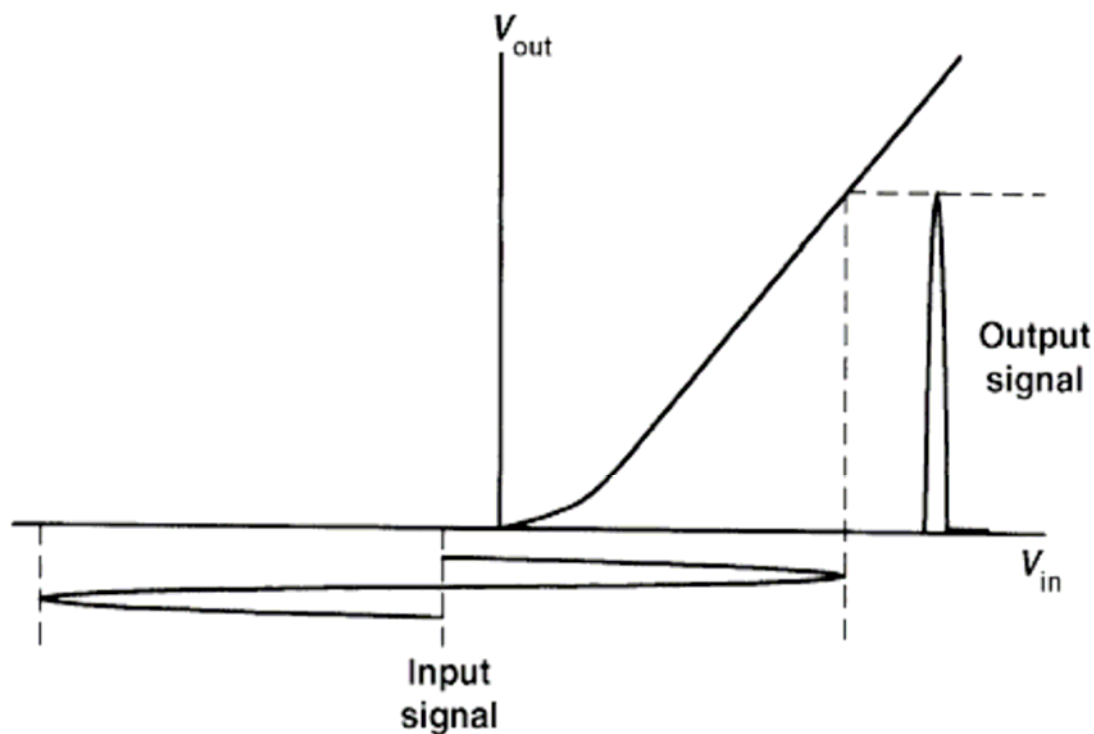
Съществуват два класа на работа АВ – АВ₁, когато транзистора не влиза в областта cutoff (прекъсване на тока), и клас АВ₂, при който има прекъсване на тока до половината на периода на сигнала. Клас АВ се използва основно в RF-системи, тъй като не изкривява формата на модулиращия сигнал (при модулация), а е по-изгоден от мощностна гледна точка.

Класове усилватели – усилвател клас В



Работната точка е установена в началото на предавателната характеристика. През половината от времето активните устройства не провеждат ток. Сигналът е изкривен заради нелинейността в началото на предавателната функция. Не е установен постоянен ток в активните устройства (no bias). Подобна конфигурация се използва в push-pull стъпалата с две активни устройства в изхода.

Класове усилватели – усилвател клас С

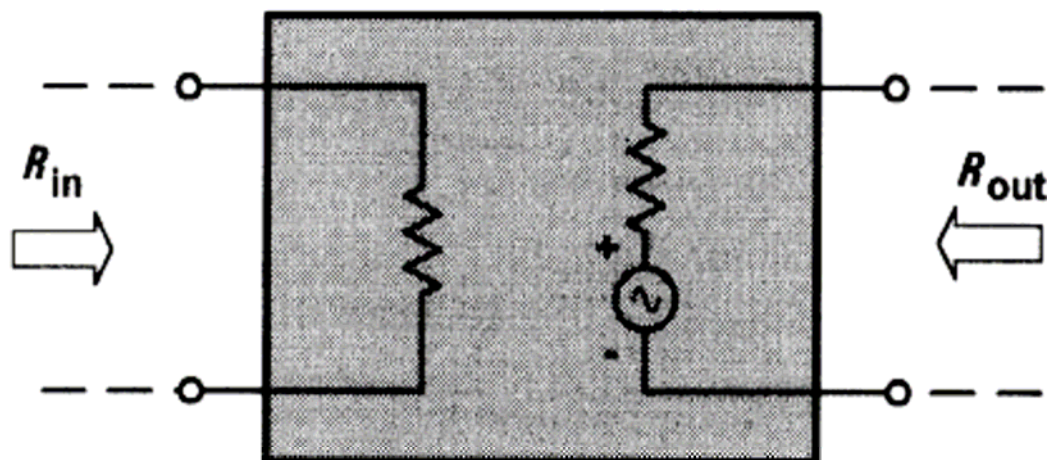


Работната точка на усилвателя е конфигурирана под началото на предавателната характеристика. Изходния сигнал представлява къси и стръмни импулси, които обикновено се използват в RF-вериги за възбуждане на резонансни вериги, пресъздаващи синусоидалния сигнал. Тези усилватели имат висока степен на ефективност.

Класове усилватели – обобщение за ефективността на различните класове усилватели

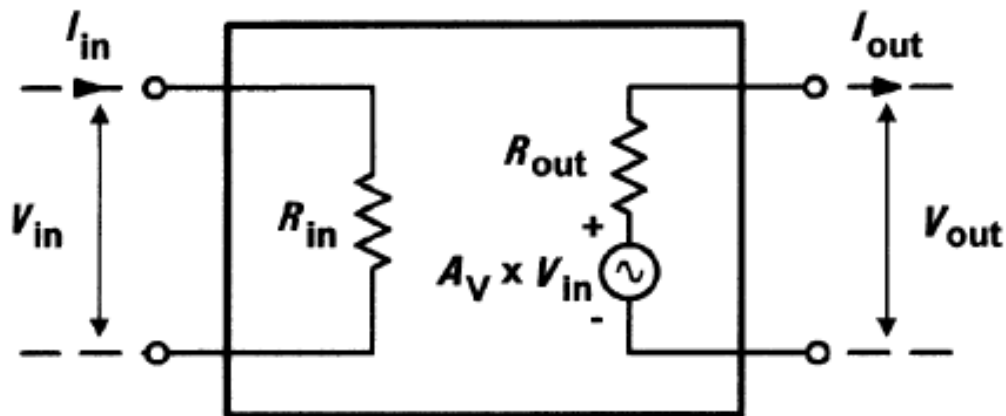
Клас на усилвателя	Работна точка	Ъгъл на провеждане	Ефективност	Приложение
A	Mid-point	360°	5% to 20%	Линейни аудио усилватели
AB	Projected cut-off	210°	20% to 40%	Push-pull аудио усилватели
B	At cut-off	180°	40% to 70%	Push-pull аудио усилватели
C	Beyond cut-off	120°	70% to 90%	RF мощни усилватели

Входно и изходно съпротивление на усилвателите



Входното съпротивление представлява отношението на входно напрежение към входен ток. **Изходното съпротивление** представлява отношението на изходно напрежение към изходен ток при късо съединение на изхода. В средата на честотната лента обикновено входните и изходните съпротивления имат чисто резистивен характер. При наличие на реактивна (индуктивна или капацитивна) компонента се говори за **входни и изходни импеданси**.

Еквивалентни схеми и параметри на усилватели



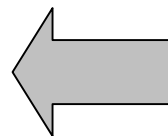
h_i Входно съпротивление $\frac{dv_i}{di_i}$

h_r Отношение на входно към изходно напрежение

h_f Коефициент на предаване по ток

h_o Изходна проводимост $\frac{di_o}{dv_o}$

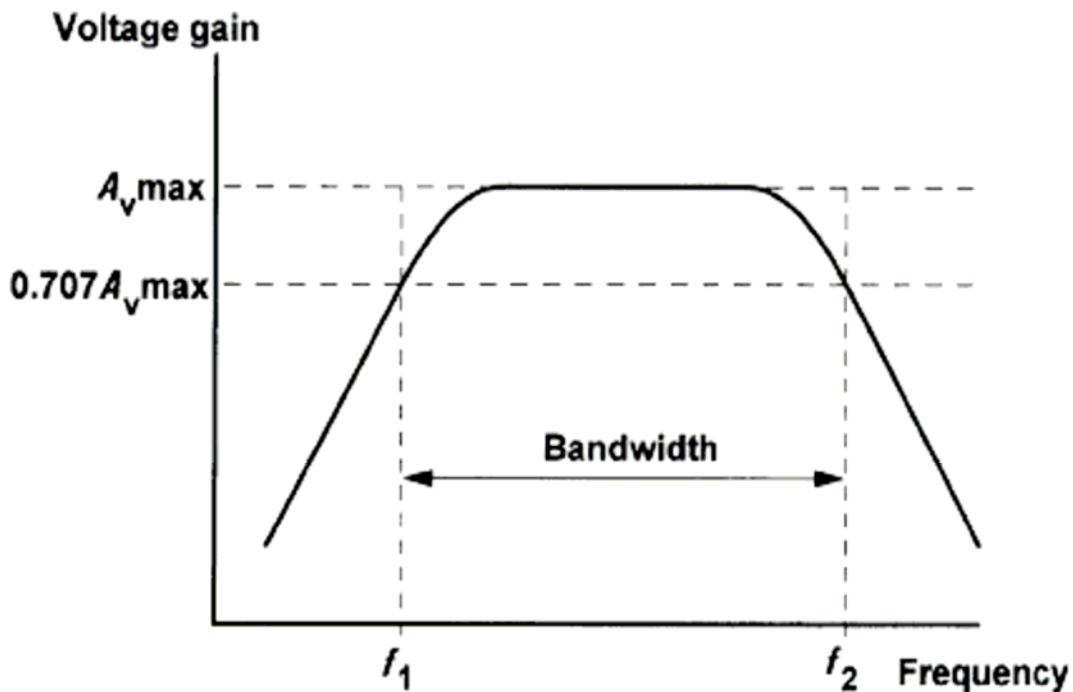
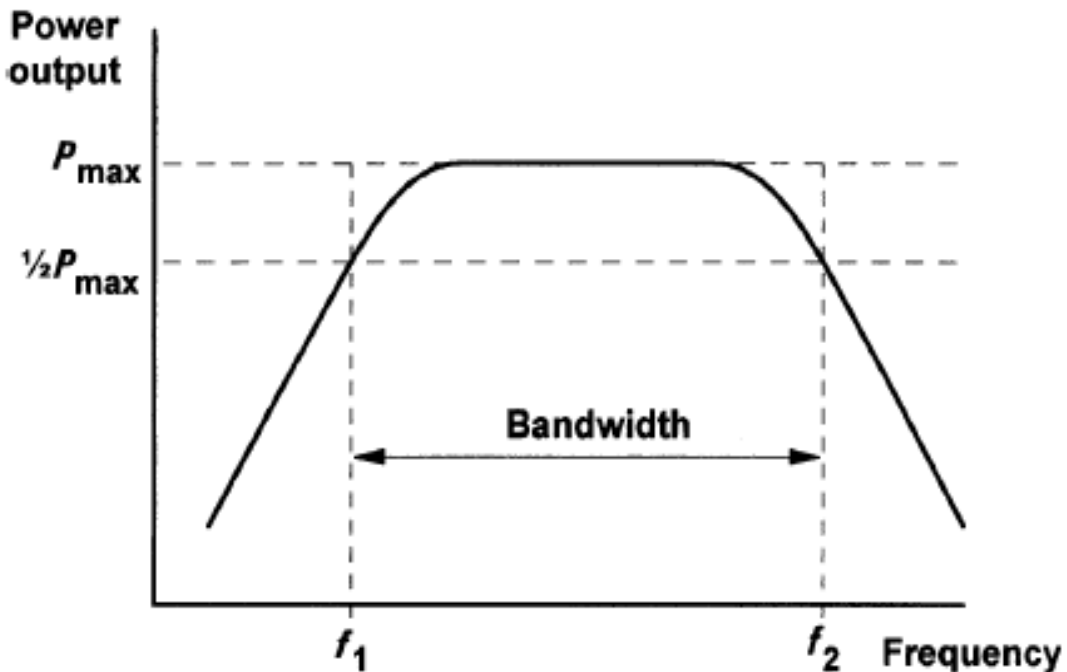
$$\frac{dv_i}{dv_o} \quad \frac{di_o}{di_i}$$



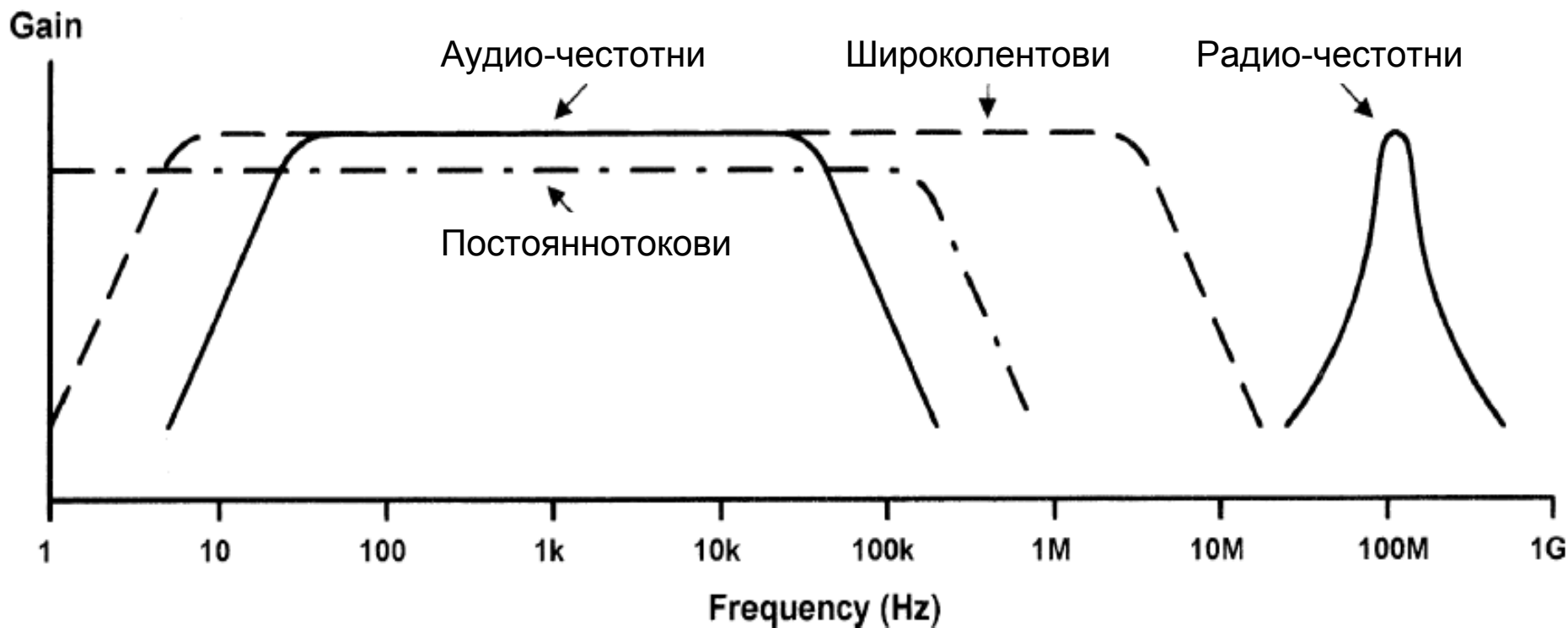
Хибридни или h-параметри,
описващи работата на
усилвателя

Честотна лента на усилвателите

Обикновено честотната характеристика за изобразяването на честотната лента се представя в логаритмичен мащаб. Честотната лента на един усилвател е заключена между долната и горната гранични честоти f_1 и f_2 , като тези честоти се дефинират на различни нива в случая на характеристика по напрежение и на характеристика по мощност. Нивата на $\frac{1}{2}$ мощност обикновено носят името -3dB точки.



Типични честотни ленти на някои типове усилватели



Шум в усилвателите

Шумът в усилвателите бива два вида: **шум на входа на усилвателя** и **шум, генериран от самия усилвател**. Шум се генерира във всички стъпала на усилвателя, но най-съществено е неговото влияние в първите стъпала, където полезния сигнал е най-слаб.

Топлинен шум: $E_T = 2\sqrt{kTB}R_S$, където k е константата на Болтцман, T е абсолютната температура, B е честотната лента, а R_S е съпротивлението на източника на сигнал.

Еквивалентно шумово напрежение: $E_n = E_{no}/A_v$, тоест това е еквивалентния шум приведен към входа, който генерира съответния шум на изхода.

Шумова честотна лента: Обикновено шума се специфицира като плътност в $nV/\sqrt{Hz}$, тъй като се счита че мощността на шума (оттам идва корена) е пропорционална на честотната лента.

Обикновено шума на входа на усилвателя се задава с еквивалентен шумов генератор на напрежение E_n и шумов генератор на ток I_n .

Важен параметър на усилвателя по отношение на шума е т.нар. **Шумово число (noise figure):** $NF = SNR_{in}/SNR_{out}$, показваща доколко усилвателя увеличава (или намалява) отношението сигнал/шум (SNR = Signal-to-Noise Ratio). Обикновено това съотношение се задава в децибели като

$$NF_{dB} = 10 \log (SNR_{in}/SNR_{out}) = SNR_{in,dB} - SNR_{out,dB}.$$

Шум в усилвателите – продължение

За многостъпални усилватели връзката между шумовото число и усилването се задава с формулата на **Friis**:

$$NF_{total} = NF_1 + (NF_2 - 1)/G_1 + (NF_3 - 1)/G_1 G_2 + (NF_4 - 1)/G_1 G_2 G_3 + \dots,$$

Където G са съответните усилвания по мощност и стойностите са зададени като отношения, а не в dB.

Обикновено шумовото число се свързва с понятието за **шумова температура**. Шумовата температура служи за моделиране на реални компоненти като идеални такива с добавен източник на шум, генериращ шумова мощност, съответстваща на температурата:

$$T_n = P_n / kB \quad (E_T = 2\sqrt{kTB R_S}).$$

Шумовата температура отразява пряката връзка между мощност и температура в израза за топлинния шум.

Шумовото число може да се изрази и чрез допълнителната шумова мощност (температура), която усилвателя добавя към сигнала:

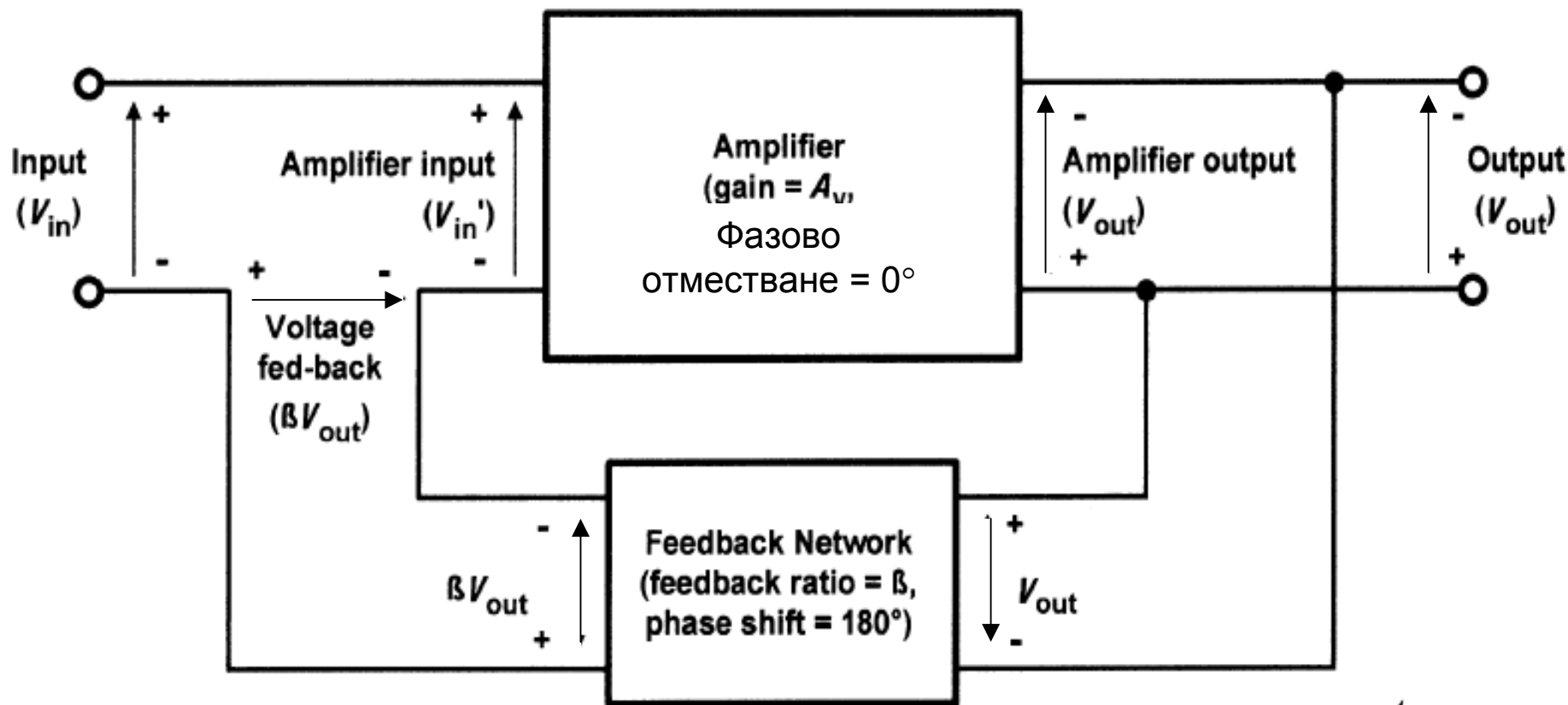
$$NF = (T_n + T_{n \text{ amp}}) / T_n = 1 + T_{n \text{ amp}} / T_n$$

Формулата на Friis може да се изрази и в термините на шумова температура:

$$T_{n \text{ total}} = T_{n1} + T_{n2}/G_1 + T_{n3}/G_1 G_2 + T_{n4}/G_1 G_2 G_3 + \dots,$$

откъдето идва и (NF-1) в оригиналната формула на Friis.

Обратни връзки – Отрицателна обратна връзка



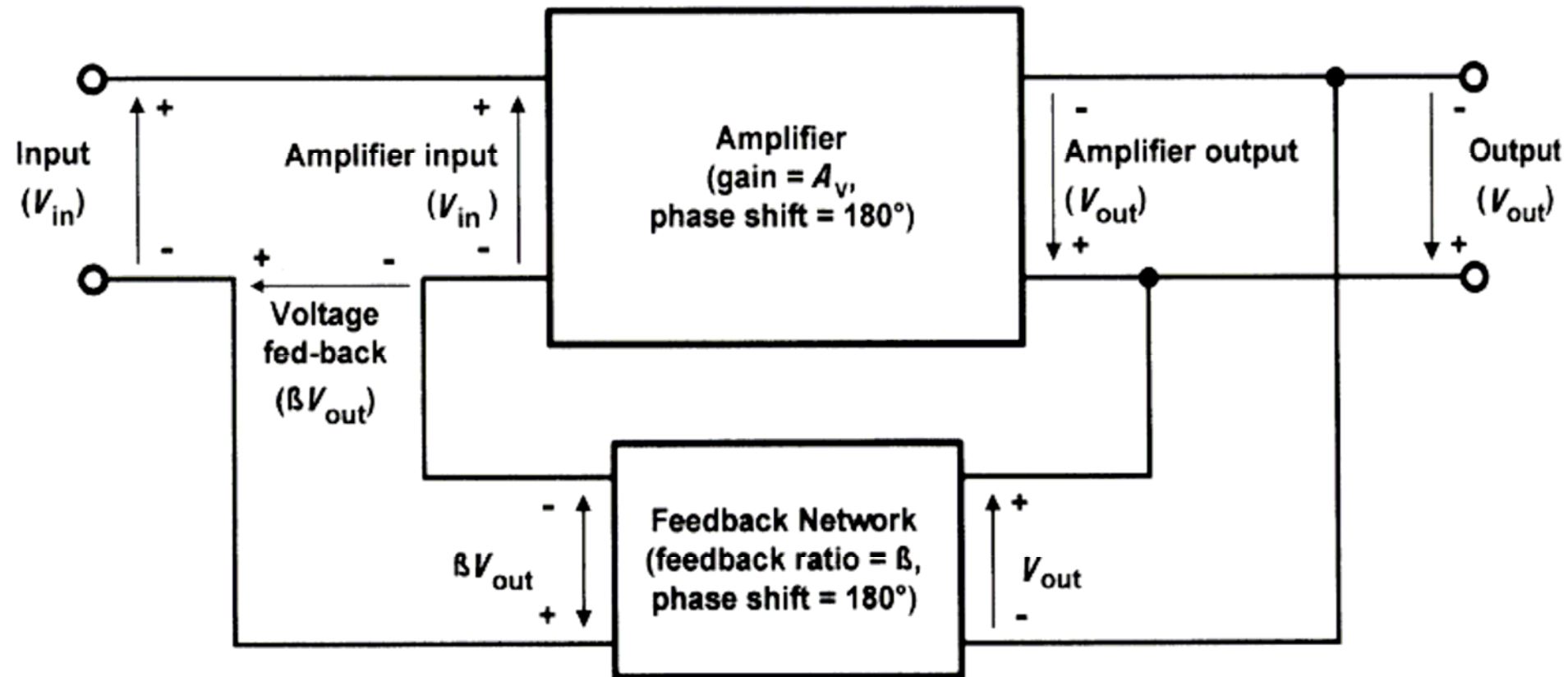
$$\left. \begin{aligned} V'_{in} &= V_{in} - \beta V_{out} \\ V_{in} &= V'_{in} + \beta V_{out} \\ V_{out} &= A_v \times V'_{in} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} \text{Общо усилване} &= \frac{V_{out}}{V_{in}} \\ \text{Общо усилване} &= \frac{A_v \times V'_{in}}{V'_{in} + \beta V_{out}} = \frac{A_v \times V'_{in}}{V'_{in} + \beta(A_v \times V'_{in})} \end{aligned}$$

Общо усилване = $\frac{A_v}{1 + \beta A_v}$

Обратни връзки – Отрицателна обратна връзка - приложения

- Отрицателната обратна връзка (ООВ) се използва за намаляване на усиляването на усилвател;
- Използва се за стабилизиране на усиляването на усилвателя. Така например, ако усилвател без ООВ промени усиляването си с 20% (A_v се изменя от 50 на 60) и коефициента на обратна връзка β е 0.1, то общото усиляване със затворена обратна връзка ще се измени само с 2.88%;
- Произведението $\beta \times A_v$ носи наименованието усиляване на обратната връзка;
- Когато стойностите на усиляването без приложена обратна връзка (open-loop gain) са много големи (както е случая с операционните усилватели), общото усиляване със затворена обратна връзка ще бъде $1/\beta$.

Обратни връзки – Положителна обратна връзка



$$\left. \begin{aligned} V'_{in} &= V_{in} + \beta V_{out} \\ V_{in} &= V'_{in} - \beta V_{out} \\ V_{out} &= A_v \times V'_{in} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \text{Общо усилване} &= \frac{V_{out}}{V_{in}} \longrightarrow \text{Общо усилване} = \frac{A_v}{1 - \beta A_v} \\ \text{Общо усилване} &= \frac{A_v \times V'_{in}}{V'_{in} - \beta V_{out}} = \frac{A_v \times V'_{in}}{V'_{in} - \beta(A_v \times V'_{in})} \end{aligned}$$

Обратни връзки – Положителна обратна връзка - приложения

- Прилагането на положителна обратна връзка увеличава усилването спрямо усилването на системата без обратна връзка;
- Когато $\beta \times A_v$ клони към 1, тогава усилването на системата с приложена положителна обратна връзка (ПОВ) клони към ∞ , което означава, че усилвателят ще стане нестабилен, тъй като всяко смущение (шум) на входа ще се усили. За усилвателите положителната обратна връзка обикновено е нежелателна;
- Усилвател с приложена положителна обратна връзка има характеристиките на **осцилатор**, тоест генерира изходен сигнал без приложен входен сигнал;
- Условията за осцилация са: 1) обратната връзка трябва да е положителна, тоест сигнала на изхода на веригата за ОВ трябва да е във фаза с входния сигнал; 2) Усилването на обратната връзка $\beta \times A_v$ трябва да е 1 (критерии на Баркхаузен).