



Pojačavači snage

Marko Dimitrijević

Uvod

- Pojačavači snage se realizuju da obezbede potrebnu snagu na izlazu, najčešće na potrošaču male otpornosti (reda veličine 1Ω ili 10Ω).
- Pojačavači snage su najčešće izlazni stepeni lanca kaskadno spregnutih pojačavača, ulazni signal je prethodno pojačan i velike amplitude.
- Iskorišćena je cela aktivna oblast (oblast zasićenja kod MOS) tranzistora.
- Kako je ulazni signal velike amplitude a prenosne karakteristike tranzistora nelinearne, izlazni signal je izobličen.

Uvod

- Struje u kolu pojačavača snage su veće u odnosu na pojačavače malih signala.
- Amplituda napona signala na izlazu pojačavača je reda veličine volta.
- Komponente, posebno tranzistori, se značajno zagrevaju tako da je u neophodno primeniti tehnike smanjena potrošnje ili hlađenje komponenti.
- Kako je ulazni signal već pojačan, za pojačavače snage se obično biraju konfiguracije koje imaju veliko strujno pojačanje – zajednički kolektor i zajednički drejn.

Klase pojačavača snage

- Pojačavači snage mogu pojačavati ceo ulazni signal ili deo signala. Prema tom kriterijumu, sele se u nekoliko klasa:
 1. Klasa A – pojačavaju ceo signal
 2. Klasa B – pojačavaju jednu poluperiodu
 3. Klasa AB – pojačavaju celu poluperiodu i deo druge poluperiode
 4. Klasa C – pojačavaju deo poluperiode
 5. Klase D, E, F, G, H, S, I, T – prekidački pojačavači
- Pojačavači različitih klasa se razlikuju po *koeficijentu iskorišćenja* i *izobličenjima signala*.

Srednja i efektivna vrednost signala

- Srednja vrednost signala se definiše kao:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt, \quad I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

- Efektivna vrednost signala je

$$V_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}, \quad I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

Aktivna snaga

- Potrebno je precizno definisati pojam snage, jer su signali složenoperiodični.
- U jednosmernim režimima, *snaga* je jednaka proizvodu struje i napona.
- U prostoperiodičnim režimima, *aktivna snaga* je proizvod efektivnih vrednosti struje i napona i kosinusa fazne razlike:

$$P = I_{\text{ef}} \cdot V_{\text{ef}} \cdot \cos \varphi$$

Aktivna snaga

- U opštem slučaju, kada su struja $i(t)$ i napon $v(t)$ proizvoljne funkcije vremena, *aktivna snaga* je srednja vrednost proizvoda trenutnih vrednosti struje i napona:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot v(t) dt$$

- Kada je signal periodičan, za vreme usrednjavanja T se uzima period signala.

Snaga i stepen iskorišćenja

- Značajan parametar je **koeficijent iskorišćenja**, η , koji je jednak odnosu korisne snage i ukupne snage pojačavača:

$$\eta = \frac{P_p}{P_b}$$

- Korisna snaga pojačavača je snaga izlaznog signala, P_p .
- Ukupna snaga pojačavača je snaga izvora jednosmernog napona koji napaja kolo, P_b . Ukupna snaga je uvek veća od korisne snage.
- Razlika između ukupne i korisne snage je snaga gubitaka, ili disipacija, P_d .

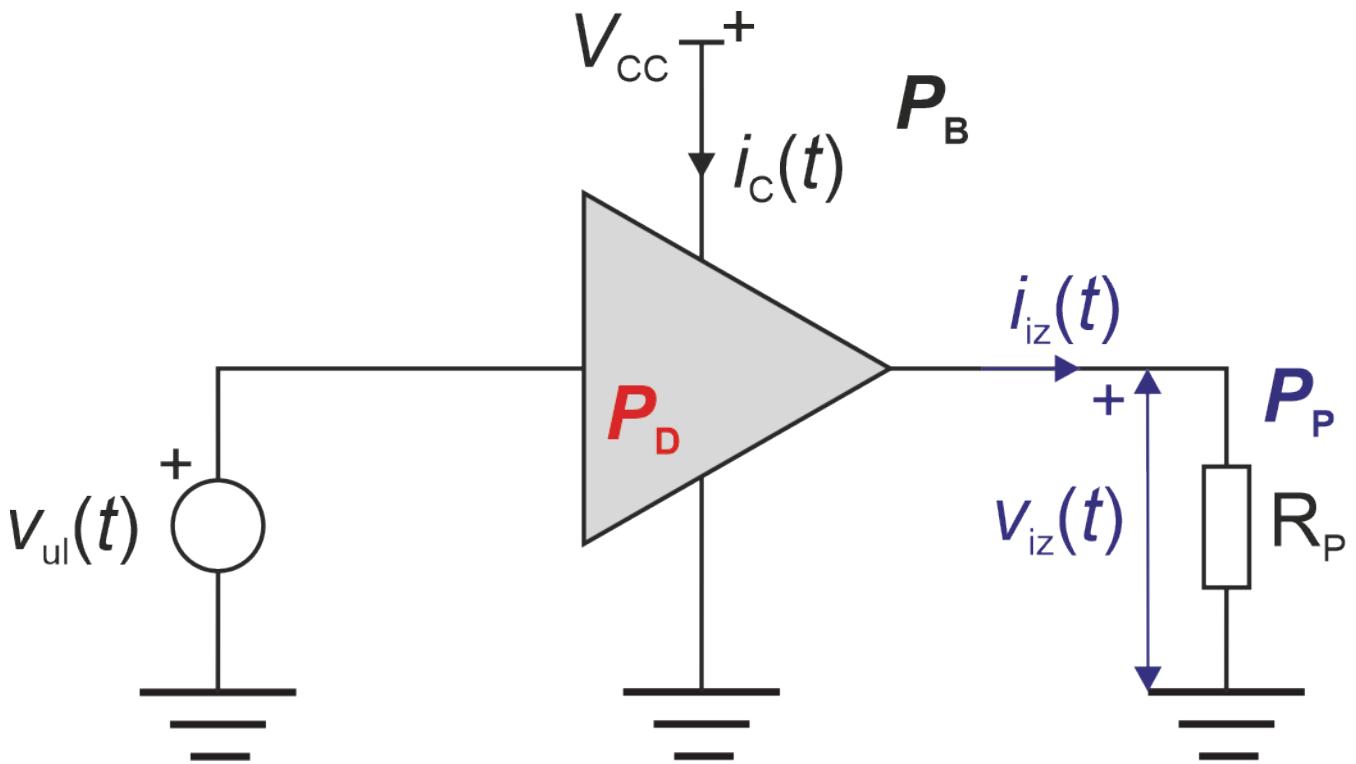
Snaga i stepen iskorišćenja

$$P_B = P_P + P_D$$

$$P_B = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_C(t) dt$$

$$P_B = V_{CC} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_C(t) dt$$

$$P_B = V_{CC} \cdot I_C$$



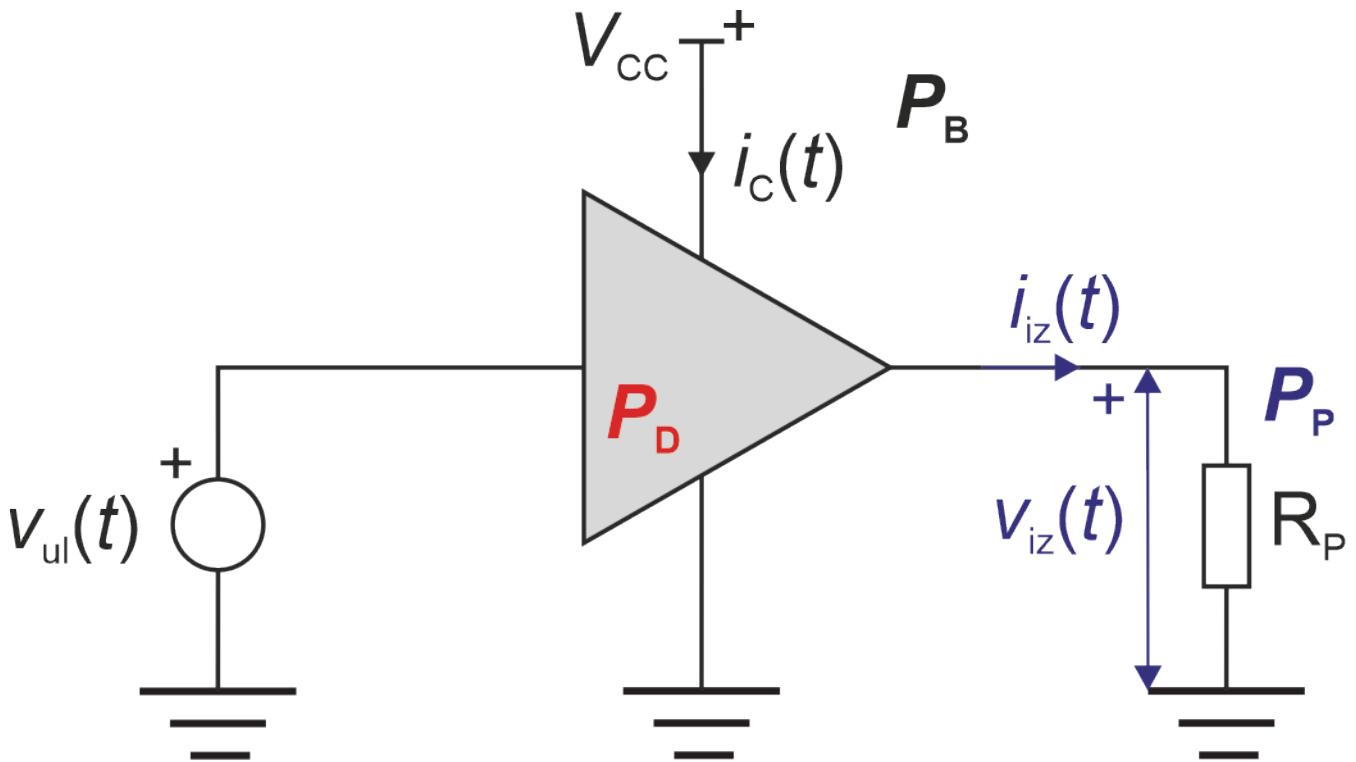
Snaga i stepen iskorišćenja

$$P_B = P_P + P_D$$

$$P_P = \frac{1}{T} \int_0^T v_{iz}(t) \cdot i_{iz}(t) dt$$

$$P_P = \frac{1}{R_P} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T v_{iz}^2(t) dt$$

$$P_P = \frac{V_{iz,ef}^2}{R_P}$$

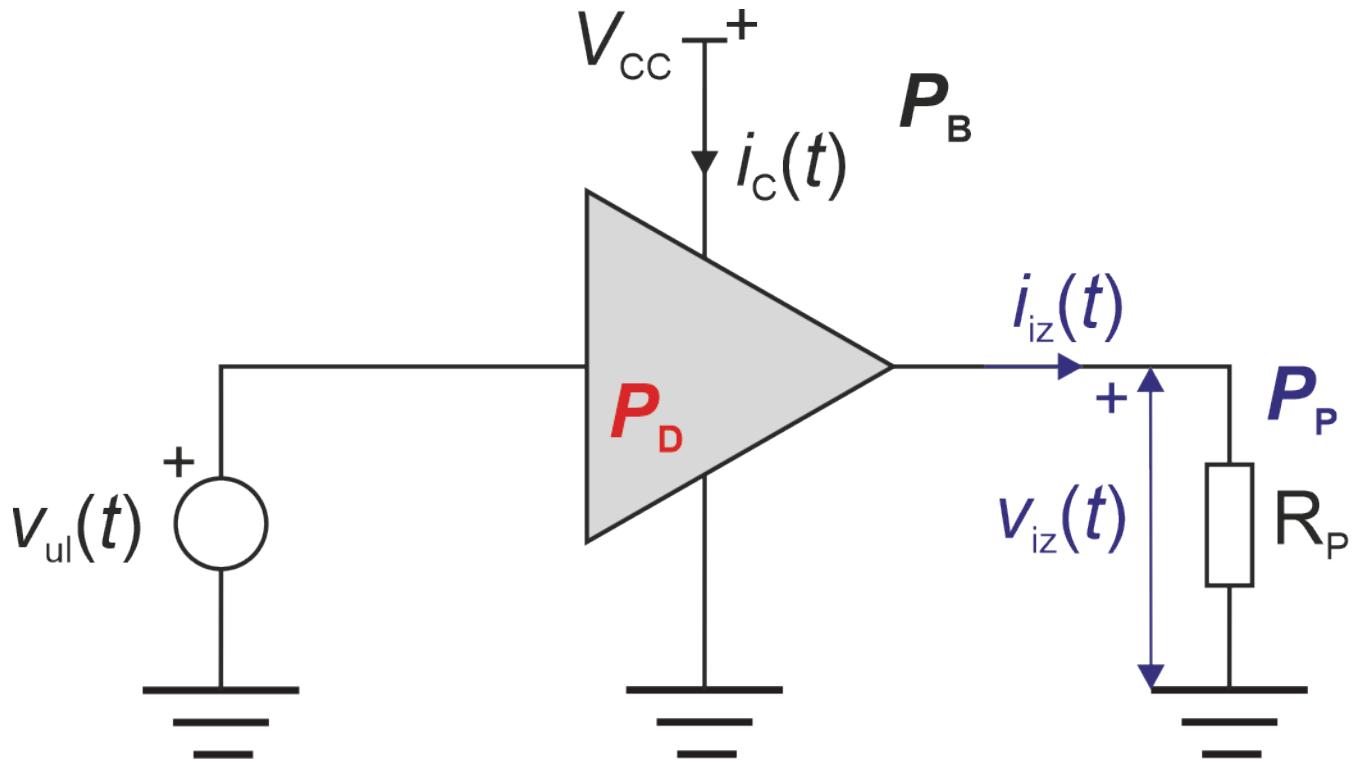


Snaga i stepen iskorišćenja

- Najveći deo snage dissipacije se razvija na aktivnom elementu, tranzistoru.

$$P_D \approx P_Q = V_{CE} \cdot I_C$$

$$P_D \approx P_M = V_{DS} \cdot I_D$$



Snaga disipacije

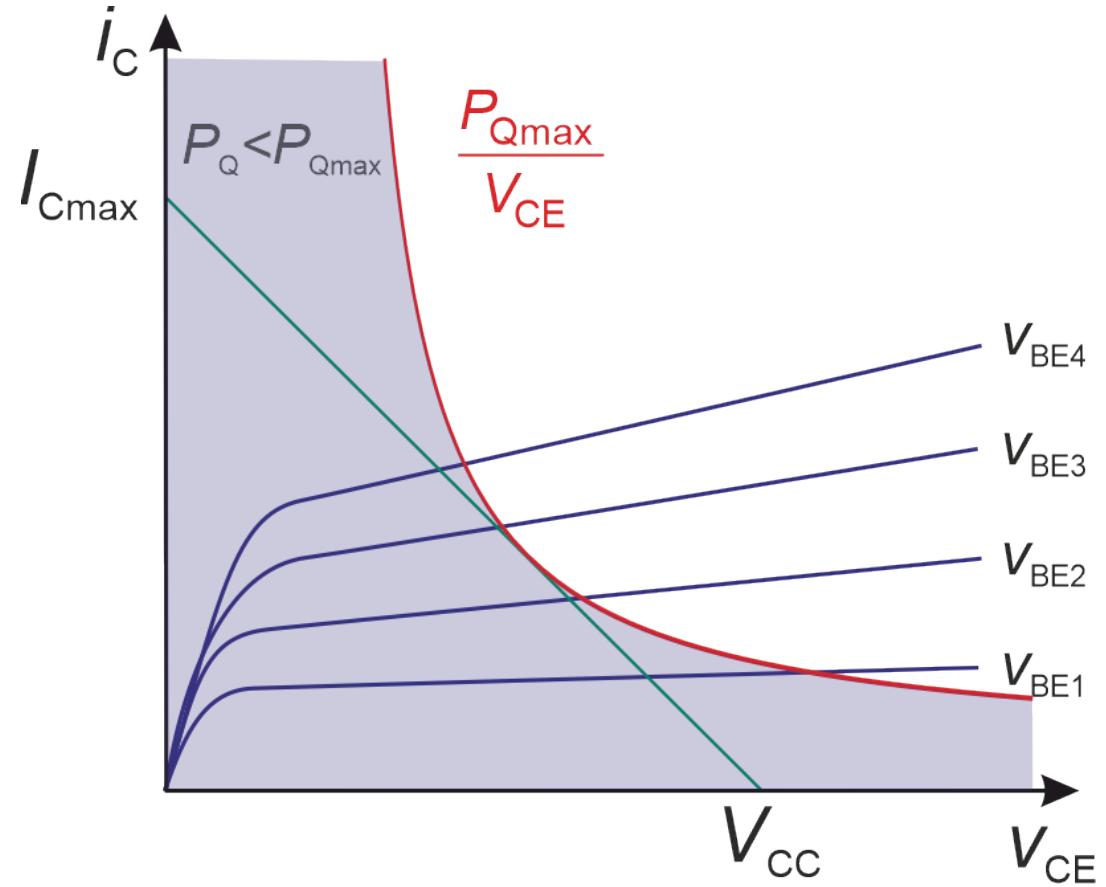
- Disipacija izaziva zagrevanje tranzistora, što može da dovede do oštećenja.
- Maksimalna dozvoljena snaga koja se razvija na tranzistoru se može odrediti prema:

$$P_{Q\max} = \frac{T_{\max} - T}{R_{TH}}$$

gde je T_{\max} maksimalna dozvoljena temperatura, T temperatura okoline i R_{TH} termička otpornost [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$].

Snaga disipacije

- Radna tačka tranzistora mora biti ispod hiperbole snage.
- Maksimalna dozvoljena snaga koja se može razviti na tranzistoru, $P_{Q\max}$, na karakteristici je predstavljena hiperbolom snage. Radna prava se mora nalaziti u dozvoljenoj oblasti, i ne sme da seče hiperbolu maksimalne snage.



Izobličenja

- Izobličenje signala je promena talasnog oblika signala i obično predstavlja neželjenu pojavu.
- Uzroci izobličenja mogu biti različiti, na primer pojačanje koje zavisi od frekvencije ili nelinearna karakteristika tranzistora
- Izobličenja signala se lakše identifikuju i analiziraju u frekvencijskom domenu.
- Reprezentacija signala (napona, struje) u frekvencijskom domenu se naziva *spektar signala* i može se dobiti primenom **Furijeove transformacije**.

Furijeova (Fourier) transformacija

- Periodičan signal može se primenom Furijeove (Fourier) transformacije predstaviti kao Furijeov red – superpozicija (zbir) jednosmernog signala V_0 i prostoperiodičnih signala – harmonika – čije su frekvencije jednake celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije ω (frekvencije periodičnog signala koji se analizira).

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} v_k \cdot \cos(k\omega t + \phi_k)$$

Furijeova (Fourier) transformacija

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_k)$$

V_0 je jednosmerna komponenta signala

k je red harmonika, $k=1$ je osnovni harmonik, $k>1$ su viši harmonici

V_k je amplituda k-tog harmonika

φ_k je faza k-tog harmonika

ω je frekvencija signala

Furijeova (Fourier) transformacija

- Jednosmerna komponenta:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

- Ortogonalne komponente:

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T \cos(k\omega t) \cdot v(t) dt, \quad B_k = \frac{2}{T} \int_0^T \sin(k\omega t) \cdot v(t) dt$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cdot \cos(k\omega t) + B_k \cdot \sin(k\omega t))$$

Furijeova (Fourier) transformacija

- Amplitud harmonika:

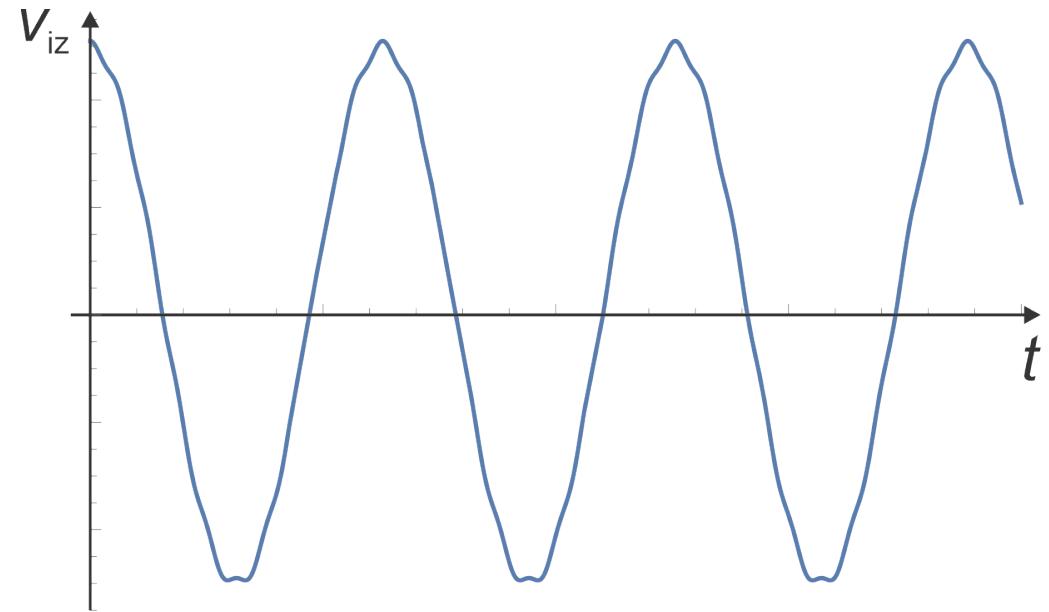
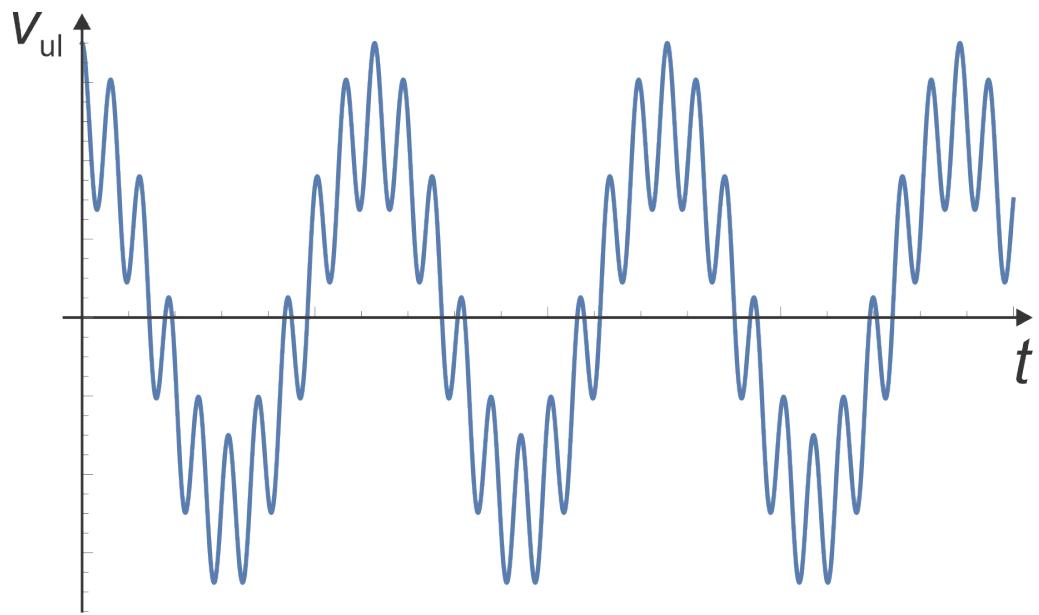
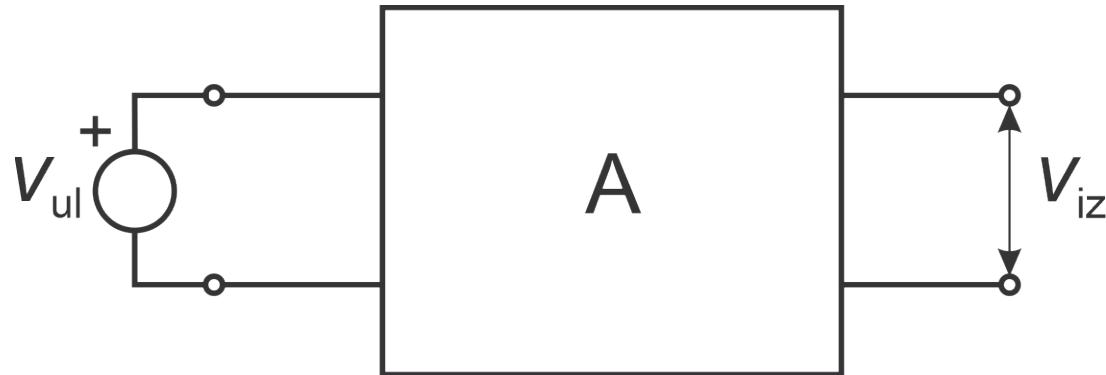
$$V_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$$

- Faze harmonika:

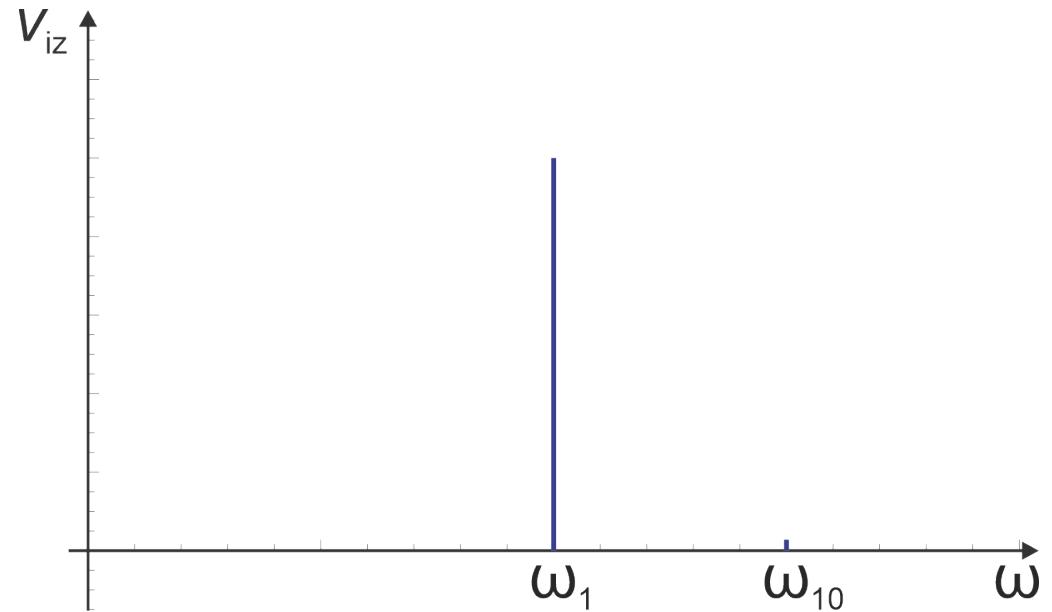
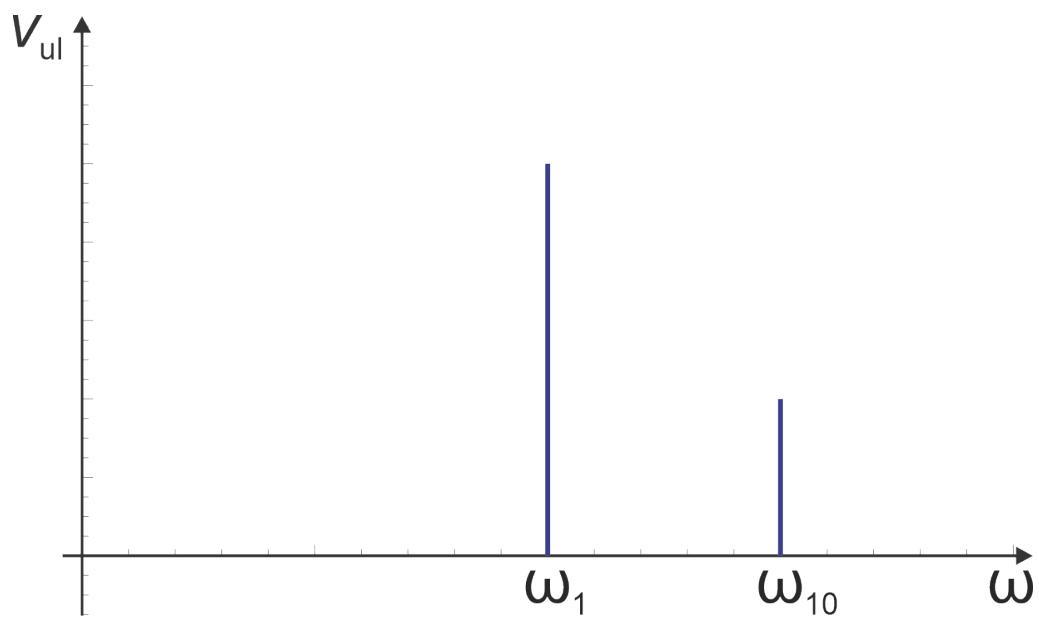
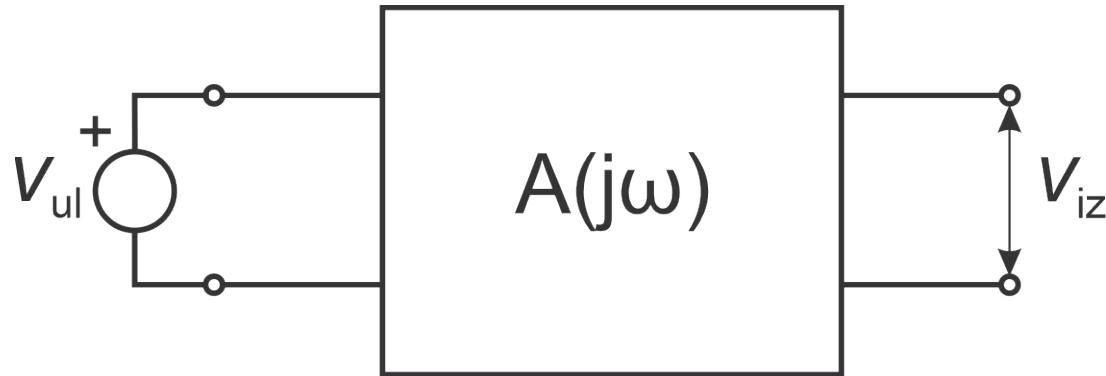
$$\varphi_k = \arctan \frac{B_k}{A_k}$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_k)$$

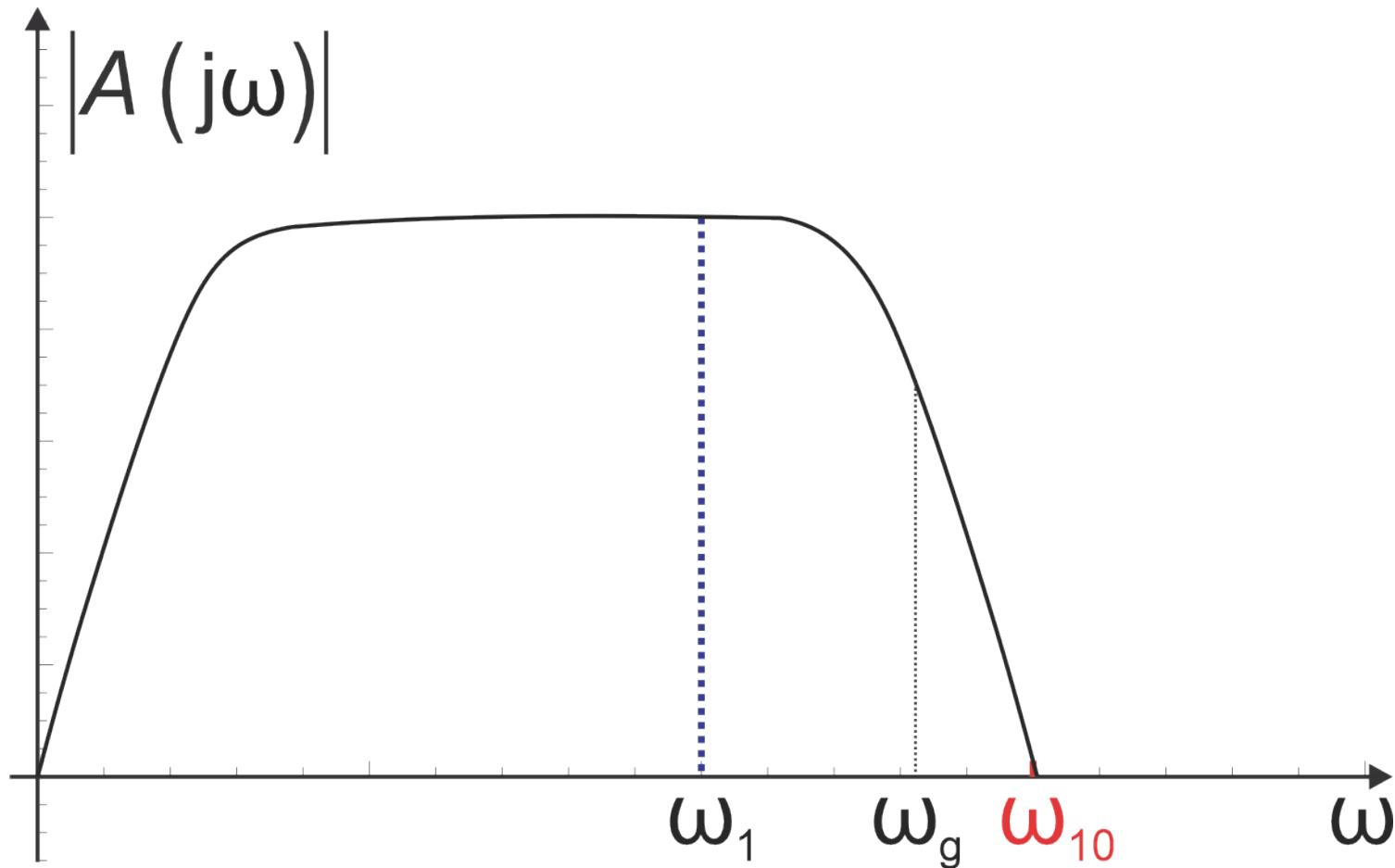
Linearna izobličenja – frekvencijski odziv



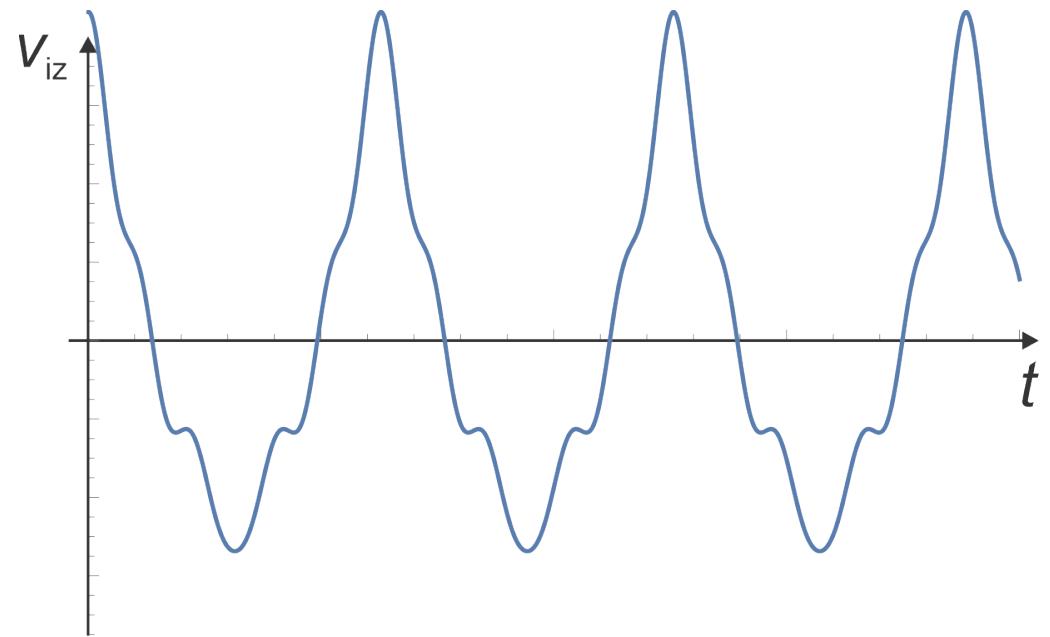
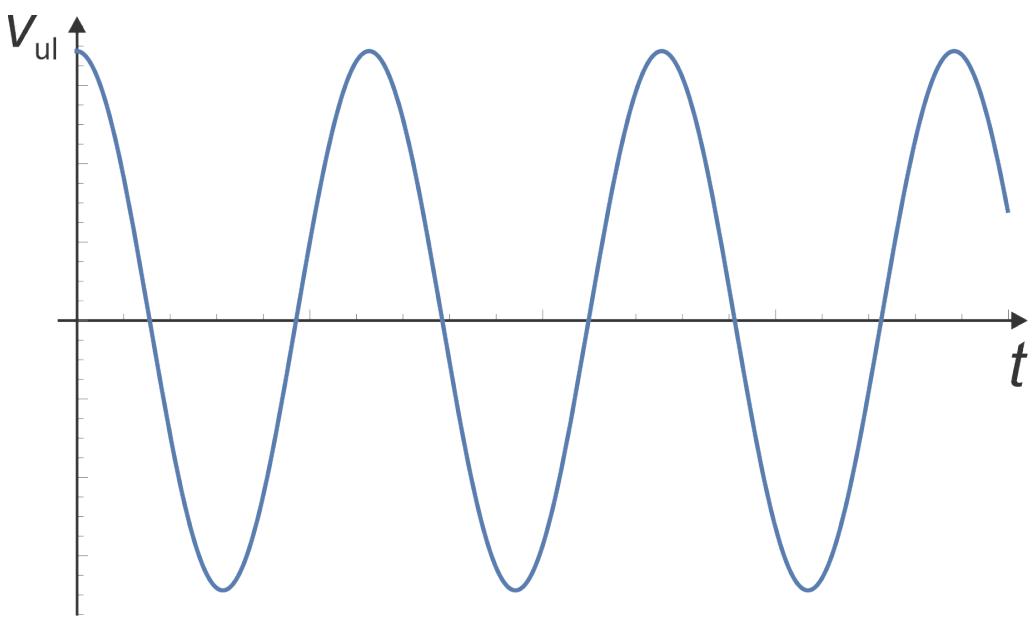
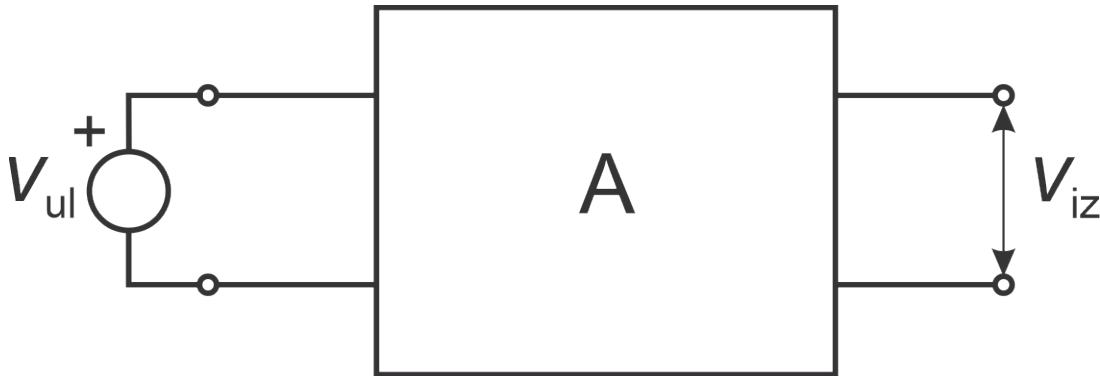
Linearna izobličenja – frekvencijski odziv



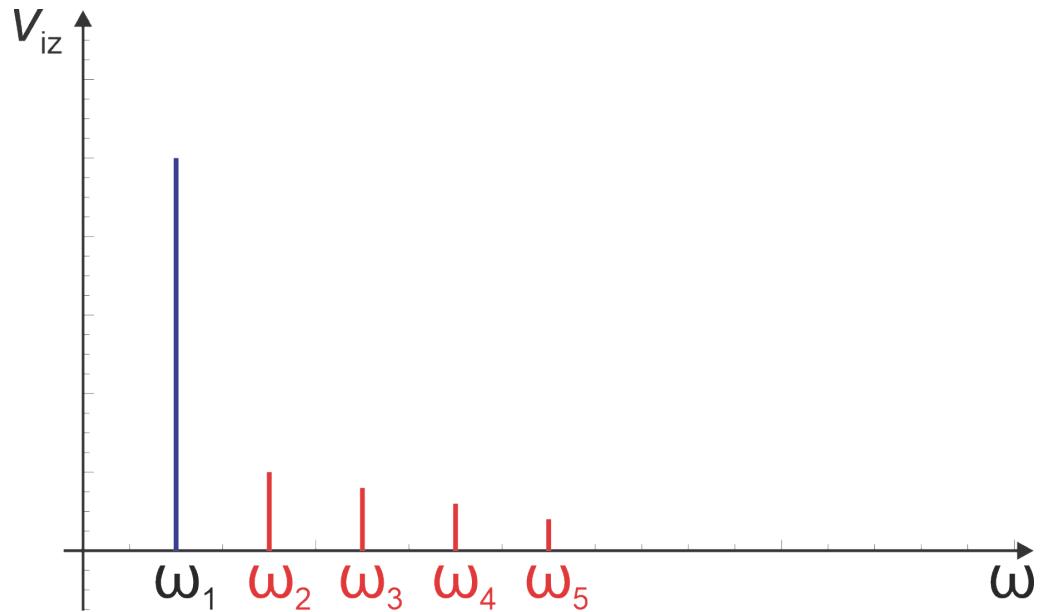
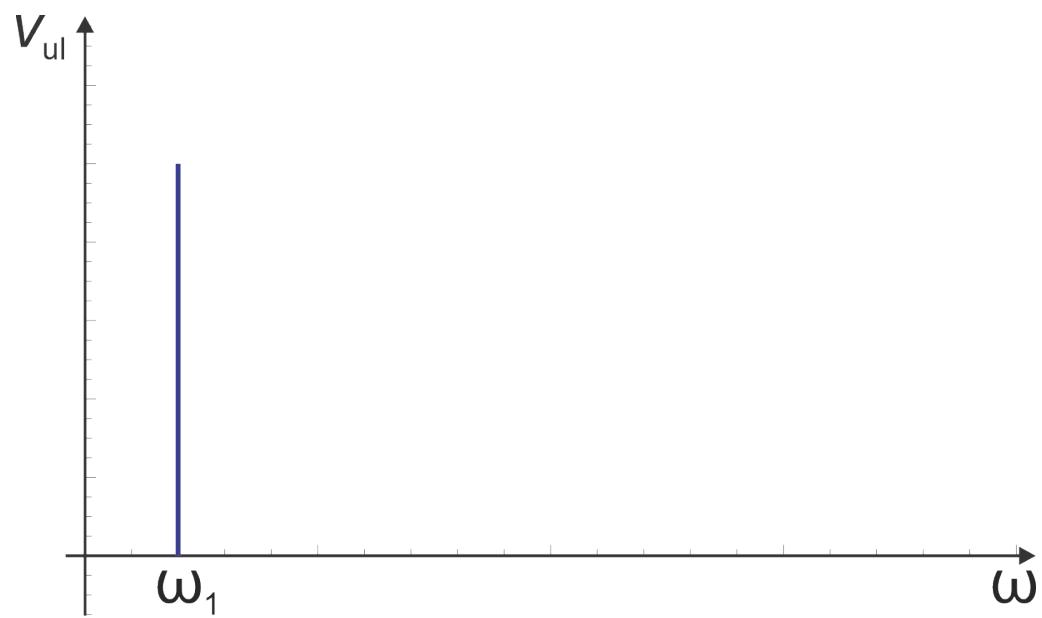
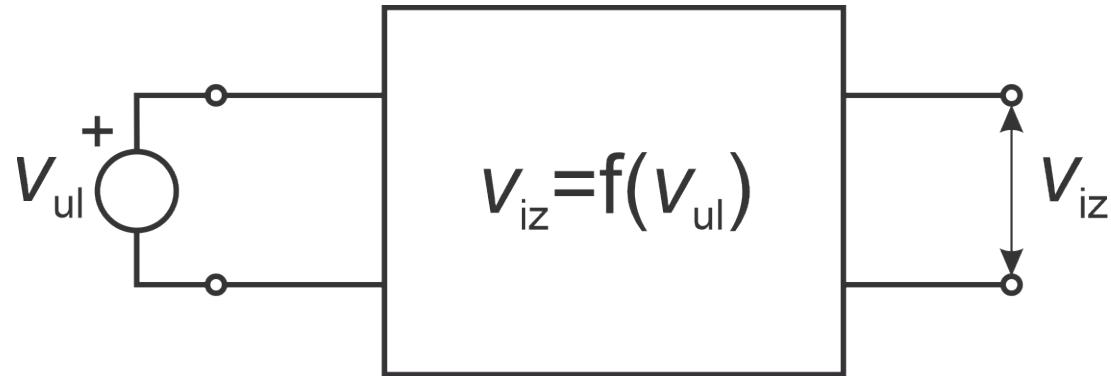
Izobličenja – frekvencijski odziv



Nelinearna izobličenja



Nelinearna izobličenja



Faktor izobličenja

- Izobličenja signala se mogu kvantitativno odrediti *totalnim faktorom izobličenja THD*:

$$\text{THD}[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} [\%]$$

- Veći THD faktor podrazumeva veća izobličenja. THD može biti veći od 100%, ukoliko je efektivna vrednost viših harmonika veća od efektivne vrednosti prvog harmonika.

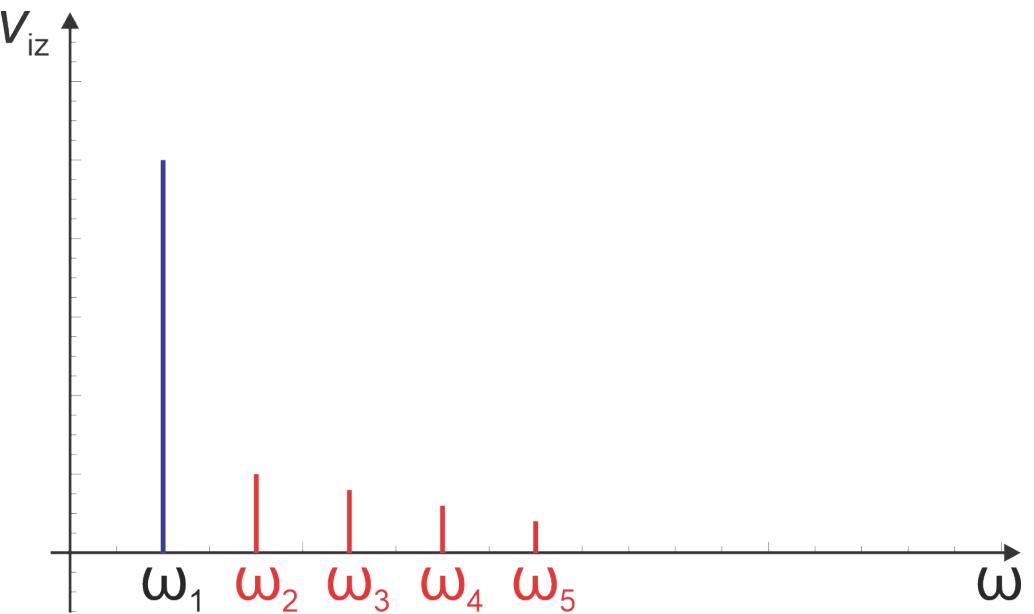
Faktor izobličenja

- Primer 1.

$$v_{iz} = 5 \cos \omega t + 1 \cos 2\omega t + 0,8 \cos 3\omega t + 0,6 \cos 4\omega t + 0,4 \cos 5\omega t [\text{V}], \quad \omega_k = k\omega$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{1^2 + 0,8^2 + 0,6^2 + 0,4^2}}{5}$$

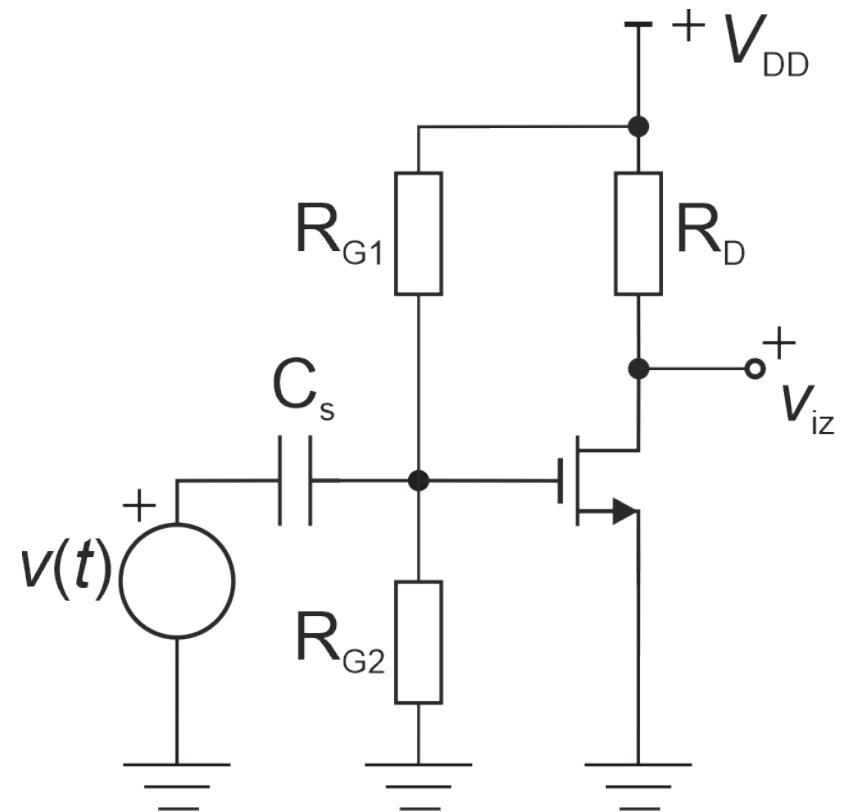
$$\text{THD} = 29,3\%$$



Faktor izobličenja

- Primer 2, THD faktor pojačavača sa zajedničkim sorsom.
- Signal $v(t)$ je velike amplitude V_m , nije moguće MOS tranzistor predstaviti modelom za signale malih amplituda.
- MOS tranzistor je u režimu zasićenja u svakom trenutku, tj:

$$\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} + v(t) > V_{TH}, \quad \forall t$$

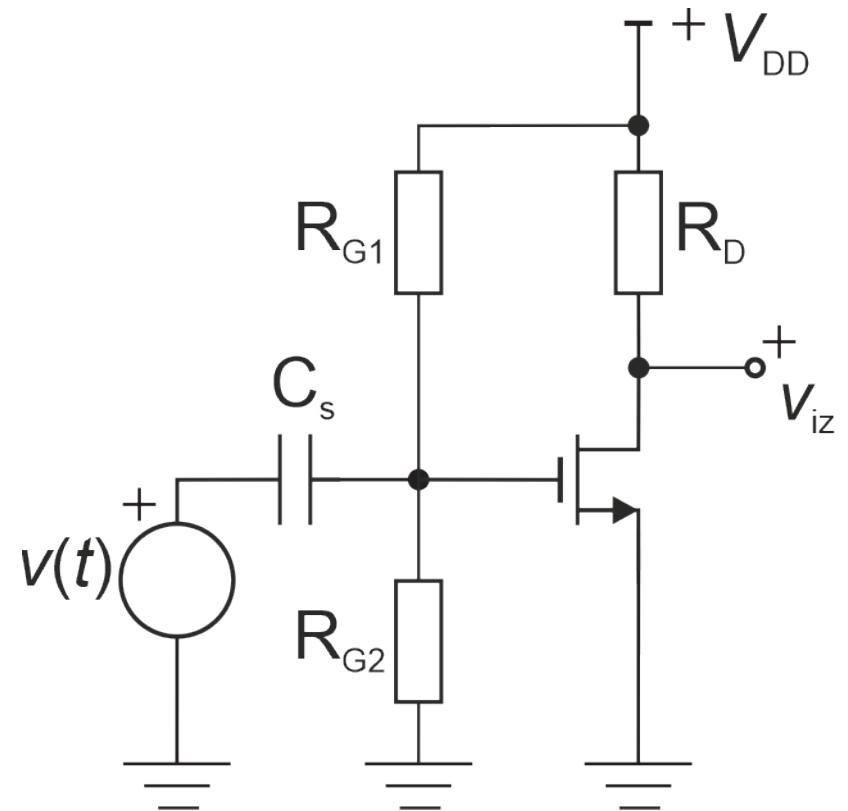


Faktor izobličenja

$$i_D = I_{DS} \left(\frac{v_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2$$

$$v_{GS} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} V_{DD} + v(t) = V_{GS} + V_m \cos \omega t$$

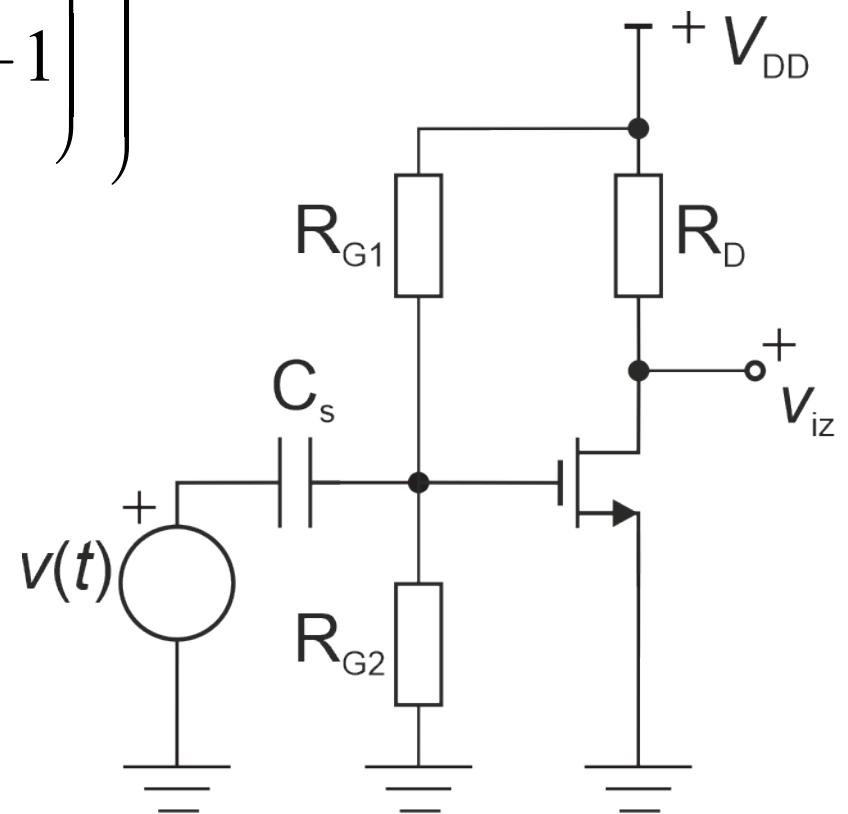
$$i_D = I_{DS} \left(\frac{V_m}{V_{TH}} \cos \omega t + \frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2$$



Faktor izobličenja

$$i_D = I_{DS} \left(\frac{V_m^2}{V_{TH}^2} \cos^2 \omega t + 2 \frac{V_m}{V_{TH}} \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right) \cos \omega t + \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 \right)$$

$$\cos^2 \omega t = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t)$$



Faktor izobličenja

$$i_D = I_{DS} \left(2 \frac{1}{V_{TH}} \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right) V_m \cos \omega t + \frac{V_m^2}{2V_{TH}^2} \cos 2\omega t + \frac{V_m^2}{2V_{TH}^2} + \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 \right)$$

- 1. harmonik:

$$i_{d1} = 2I_{DS} \frac{V_{GS} - V_{TH}}{V_{TH}} \cdot V_m \cos \omega t$$

- 2. harmonik:

$$i_{d2} = I_{DS} \frac{V_m^2}{2V_{TH}^2} \cdot \cos 2\omega t$$

- Jednosmerna komponenta:

$$I_D = \left(\frac{V_m^2}{2V_{TH}^2} + \left(\frac{V_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 \right) \cdot I_{DS}$$

Faktor izobličenja

- Napon na izlazu pojačavača:

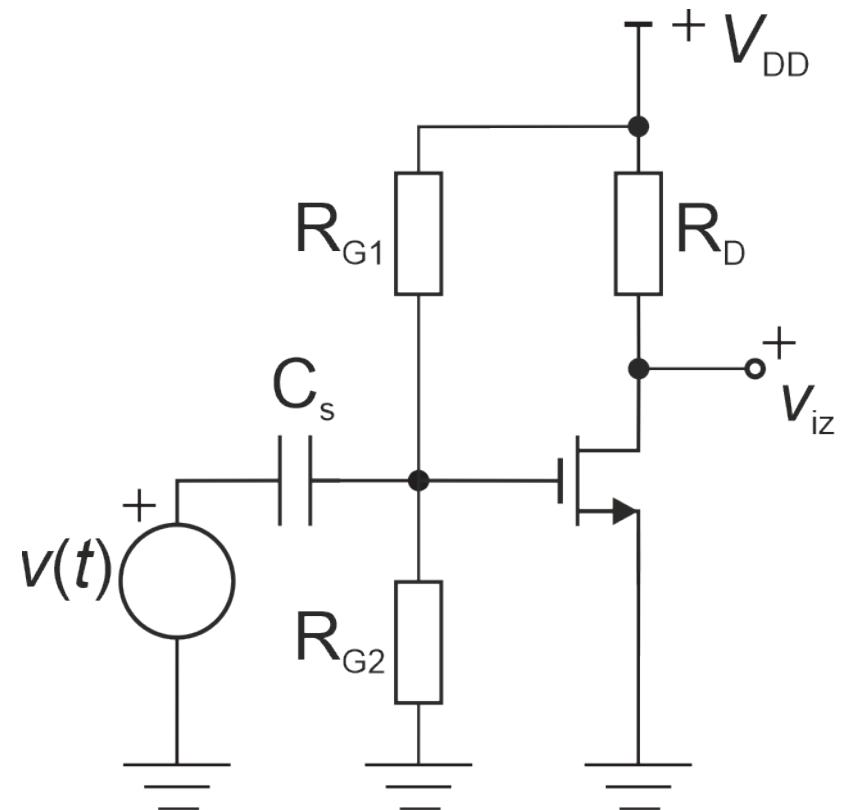
$$v_{iz} = V_{DD} - R_D i_D$$

- 1. harmonik:

$$v_{iz1} = -2I_{DS}R_D \frac{V_{GS} - V_{TH}}{V_{TH}} \cdot V_m \cos \omega t$$

- 2. harmonik:

$$v_{iz2} = -I_{DS}R_D \frac{V_m^2}{2V_{TH}^2} \cdot \cos 2\omega t$$



Faktor izobličenja

- THD faktor:

$$V_1 = 2I_{DS}R_D \frac{V_{GS} - V_{TH}}{V_{TH}} \cdot V_m \quad V_2 = I_{DS}R_D \frac{V_m^2}{2V_{TH}^2}$$

$$THD = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_{DS}R_D \frac{V_m^2}{2V_{TH}^2}}{2I_{DS}R_D \frac{V_{GS} - V_{TH}}{V_{TH}} \cdot V_m} = \frac{V_m}{4V_{TH}(V_{GS} - V_{TH})}$$

Pojačavači u klasi A

- Pojačavači u klasi A pojačavaju ceo signal, tranzistor je uvek u aktivnom režimu (režimu zasićenja, MOS).
- Izobličenja signala su najmanja kod pojačavača klase A.
- Koeficijent iskorišćenja je najmanji kod pojačavača klase A.
- Pojačavači malih signala, koji su bili predmet dosadašnjih razmatranja, spadaju u ovu klasu.
- Pojačavač sa zajedničkim kolektorom (drejnom) zbog svoje male izlazne impedanse se može upotrebiti kao pojačavač snage.

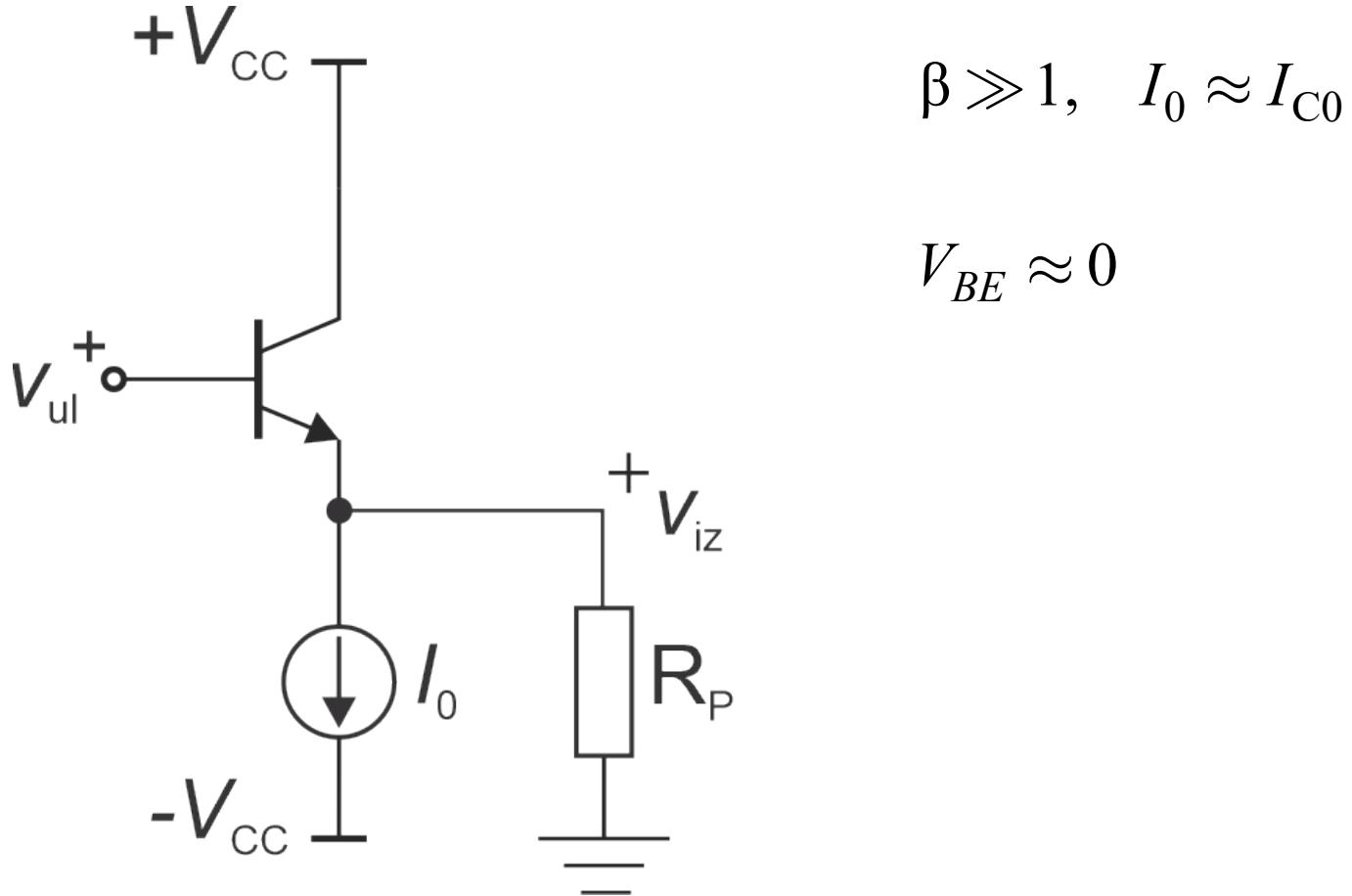
Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor

$$R_{iz} \approx 1/g_m = \frac{V_T}{I_0}$$

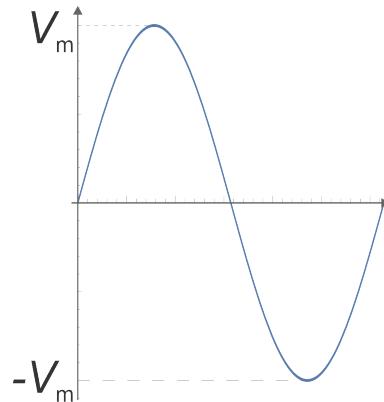
$$R_{iz} \ll R_P$$

$$I_0 \gg V_T / R_P$$

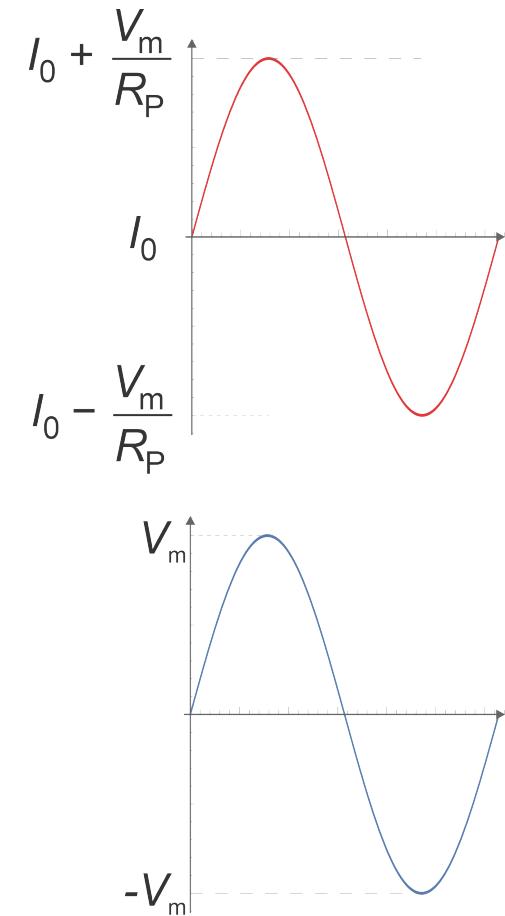
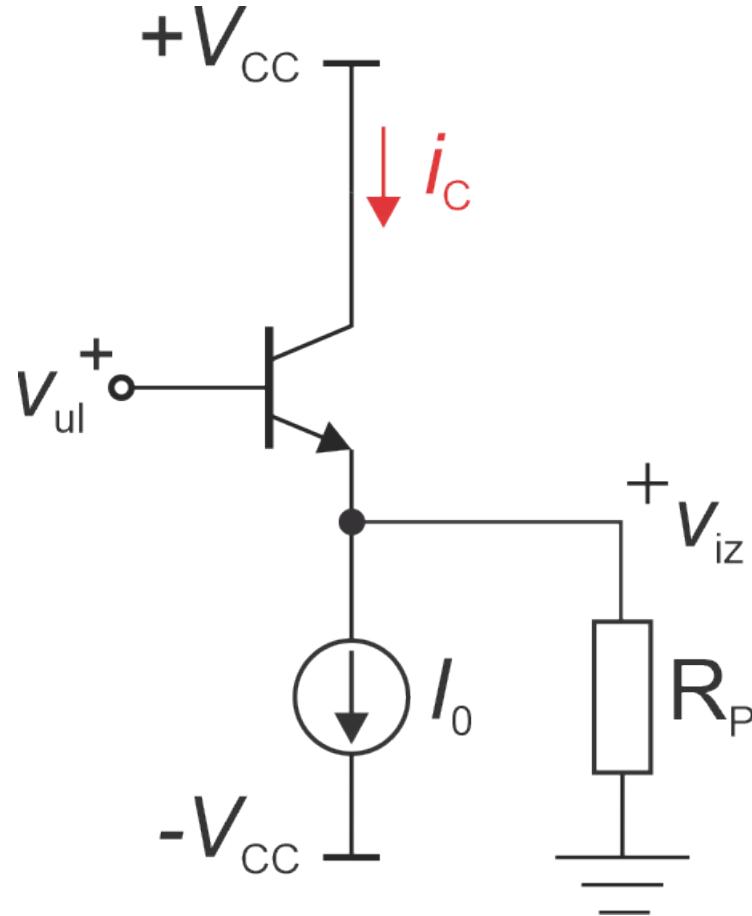
$$I_0 = V_{CC} / R_P$$



Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor



$$V_{CC} \geq V_m$$

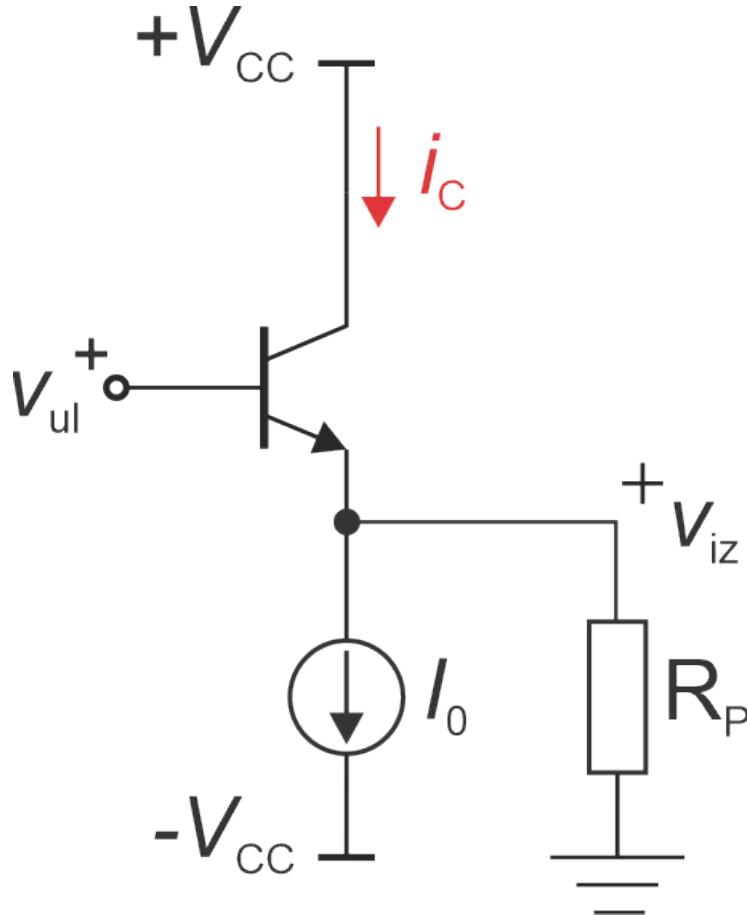


Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor

$$P_B = 2V_{CC} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_C(t) dt$$

$$P_B = 2V_{CC} \cdot I_0$$

$$P_B = \frac{2V_{CC}^2}{R_P}$$



$$P_P = \frac{1}{T} \int_0^T v_{iz}(t) \cdot i_{iz}(t) dt$$

$$P_P = \frac{1}{R_P} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T v_{iz}^2(t) dt$$

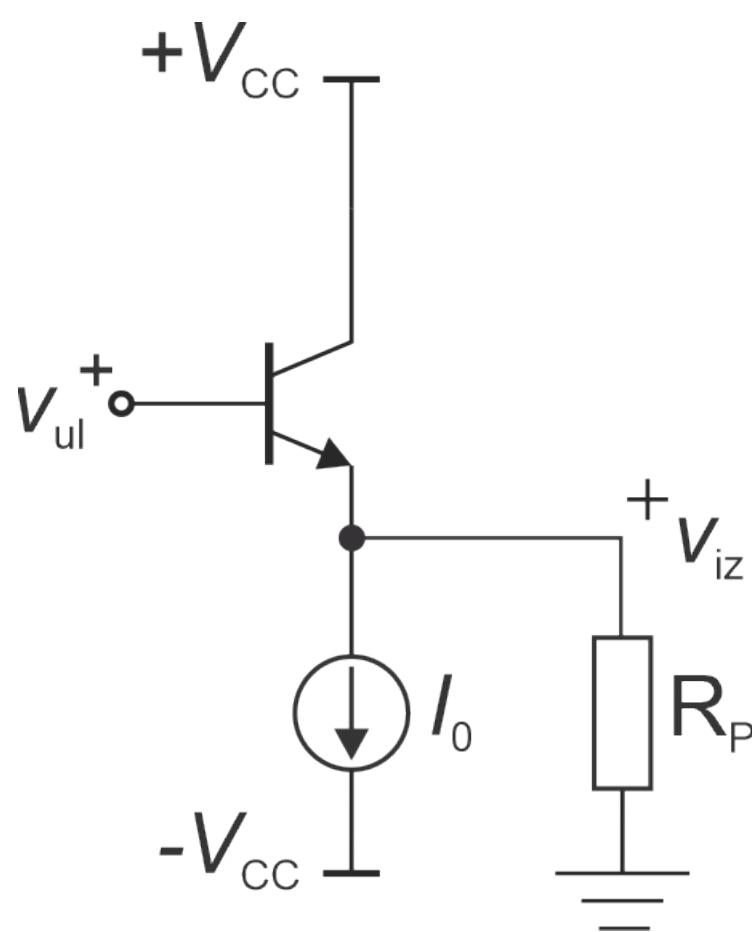
$$P_P = \frac{V_{iz,ef}^2}{R_P} = \frac{V_m^2}{2R_P}$$

Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor

$$P_B = \frac{2V_{CC}^2}{R_P}$$

$$P_P = \frac{V_m^2}{2R_P}$$

$$\eta = \frac{P_P}{P_B} = \left(\frac{V_m}{V_{CC}} \right)^2 \cdot 25\%$$



- Koeficijent iskorišćenja:

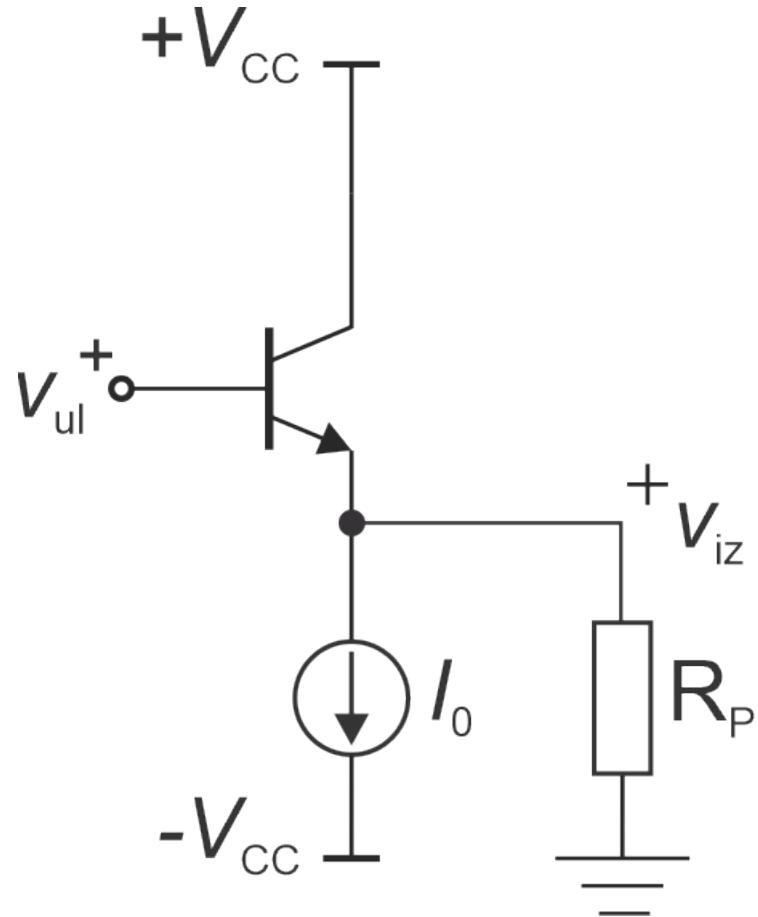
$$\eta_{max} = 25\%$$

Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor

$$P_Q = P_B - P_P$$

- Disipacija na tranzistoru:

$$P_Q = \frac{2V_{CC}^2}{R_P} - \frac{V_m^2}{2R_P}$$



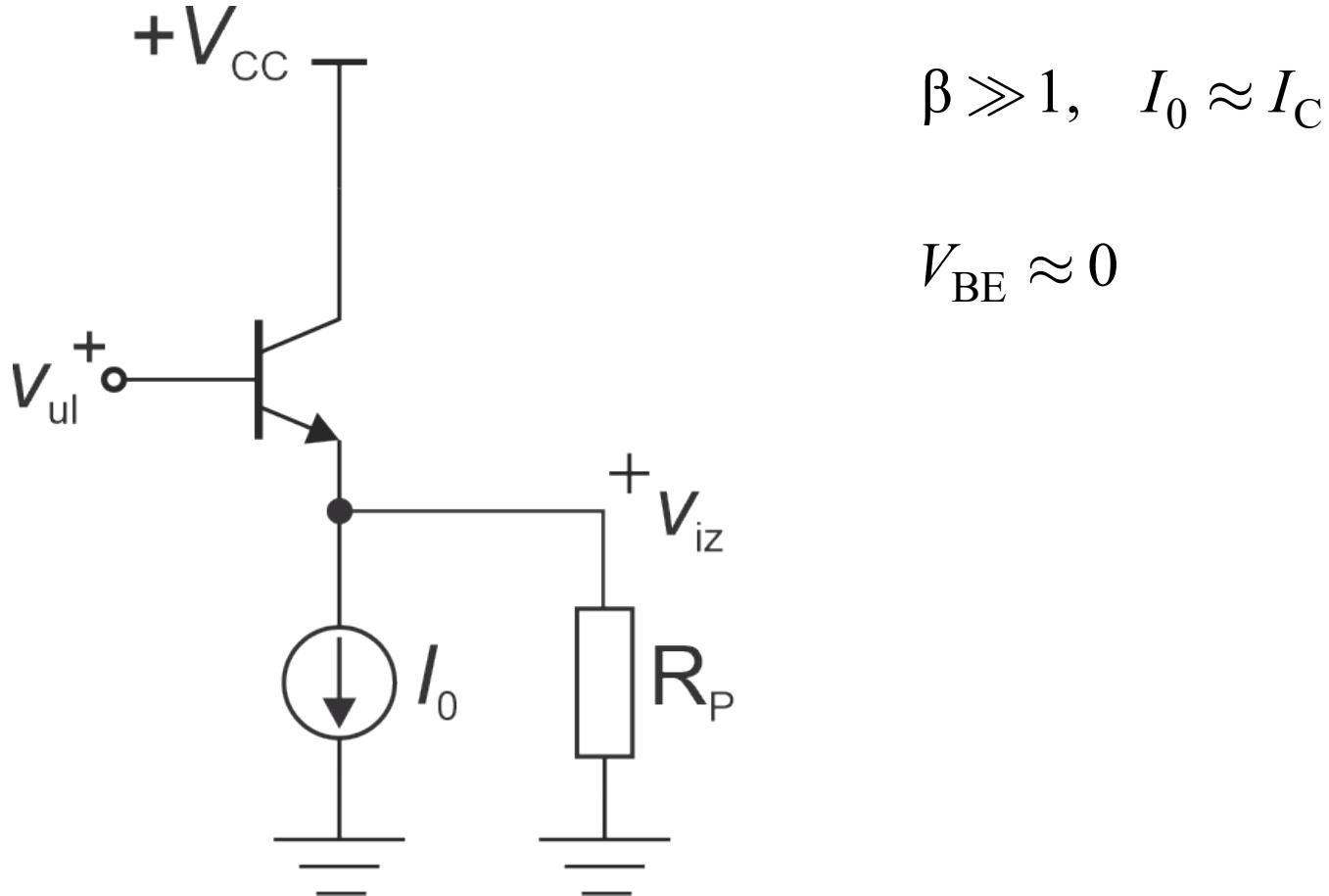
Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

$$R_{iz} \approx 1/g_m = \frac{V_T}{I_C} = \frac{V_T}{I_0}$$

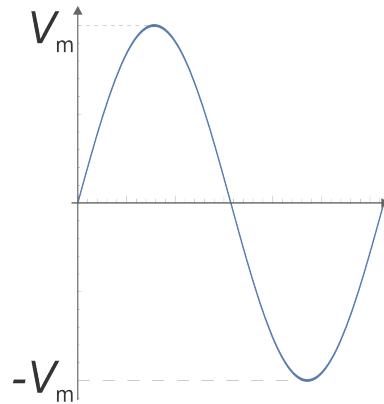
$$R_{iz} \ll R_P$$

$$I_0 \gg V_T / R_P$$

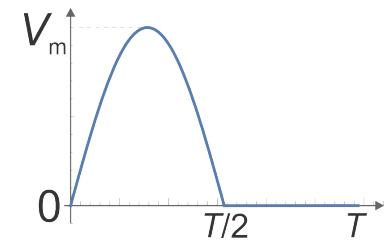
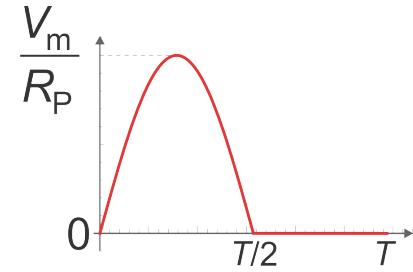
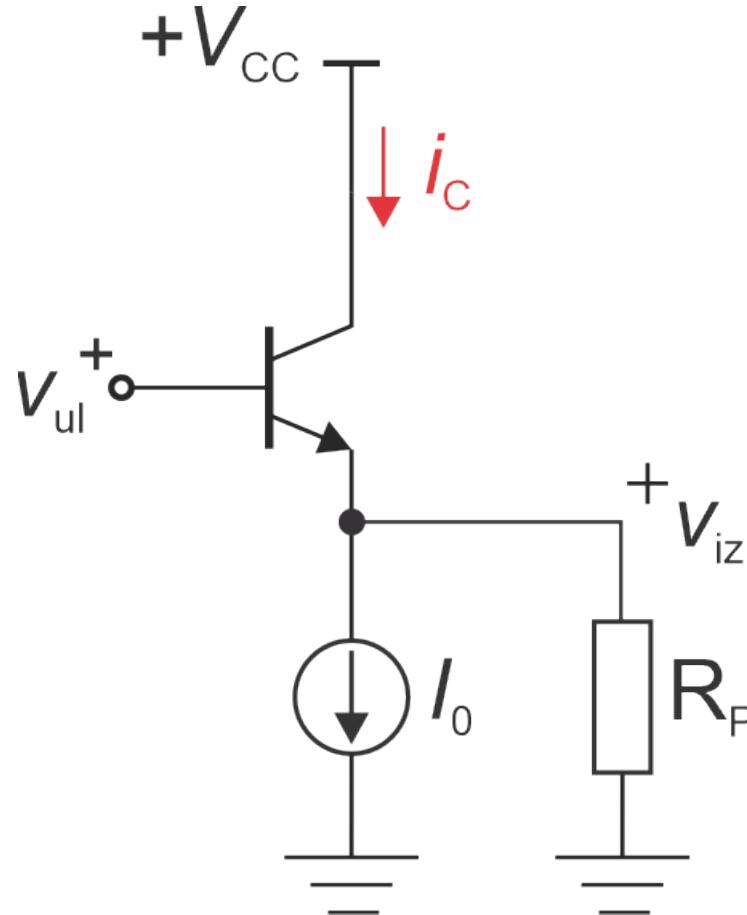
$$I_0 = V_{CC} / R_P$$



Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor



$$V_{CC} \geq V_m$$

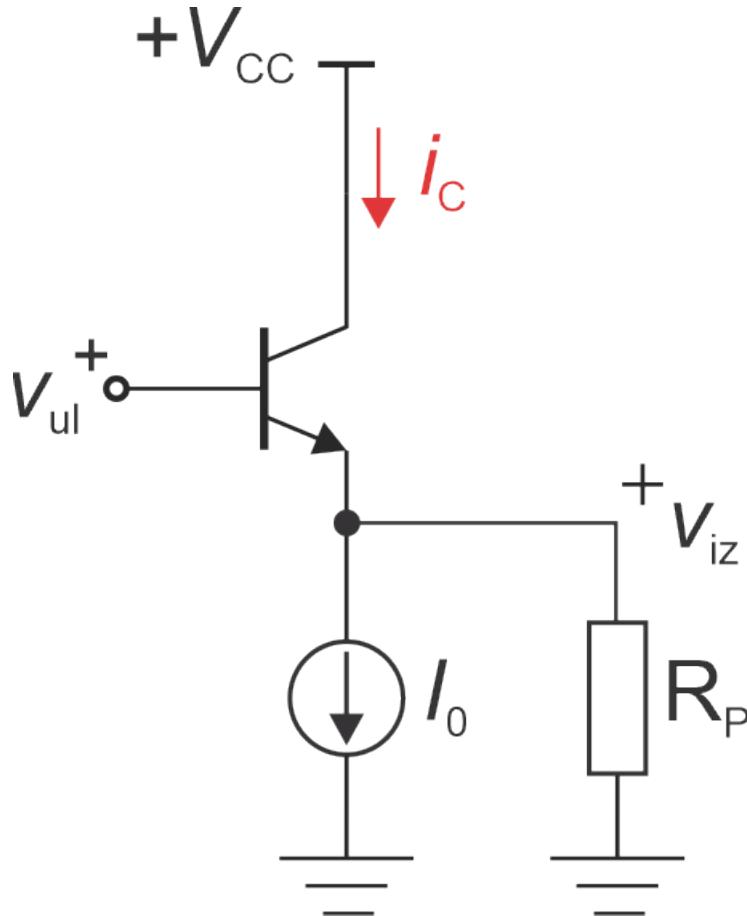


Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

$$P_B = V_{CC} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_C(t) dt$$

$$P_B = V_{CC} \cdot \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_C(t) dt$$

$$P_B = \frac{V_{CC} V_m}{\pi R_P}$$



$$P_P = \frac{1}{T} \int_0^T v_{iz}(t) \cdot i_{iz}(t) dt$$

$$P_P = \frac{1}{R_P} \cdot \frac{1}{T} \int_0^{T/2} v_{iz}^2(t) dt$$

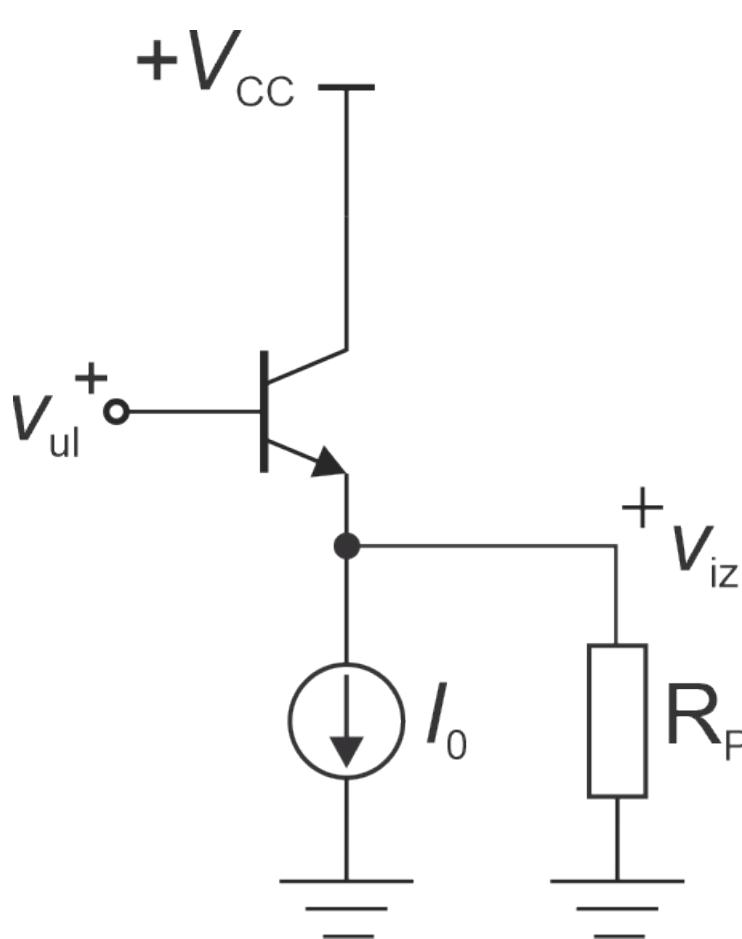
$$P_P = \frac{V_{iz,ef}^2}{2R_P} = \frac{V_m^2}{4R_P}$$

Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

$$P_B = \frac{V_{CC}V_m}{\pi R_P}$$

$$P_P = \frac{V_m^2}{4R_P}$$

$$\eta = \frac{P_P}{P_B} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_m}{V_{CC}}$$



- Koeficijent iskorišćenja:

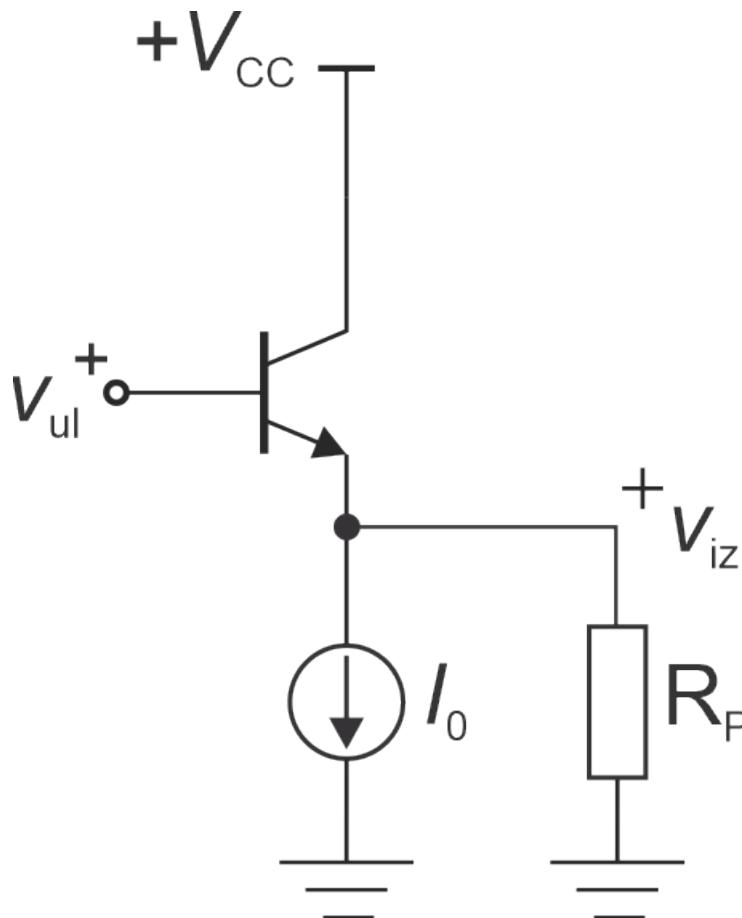
$$\eta_{max} = 78,53\%$$

Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

$$P_Q = P_B - P_P$$

$$P_Q = \frac{V_{CC}V_m}{\pi R_P} - \frac{V_m^2}{4R_P} =$$

$$= \frac{V_m}{R_P} \left(\frac{V_{CC}}{\pi} - \frac{V_m}{4} \right)$$



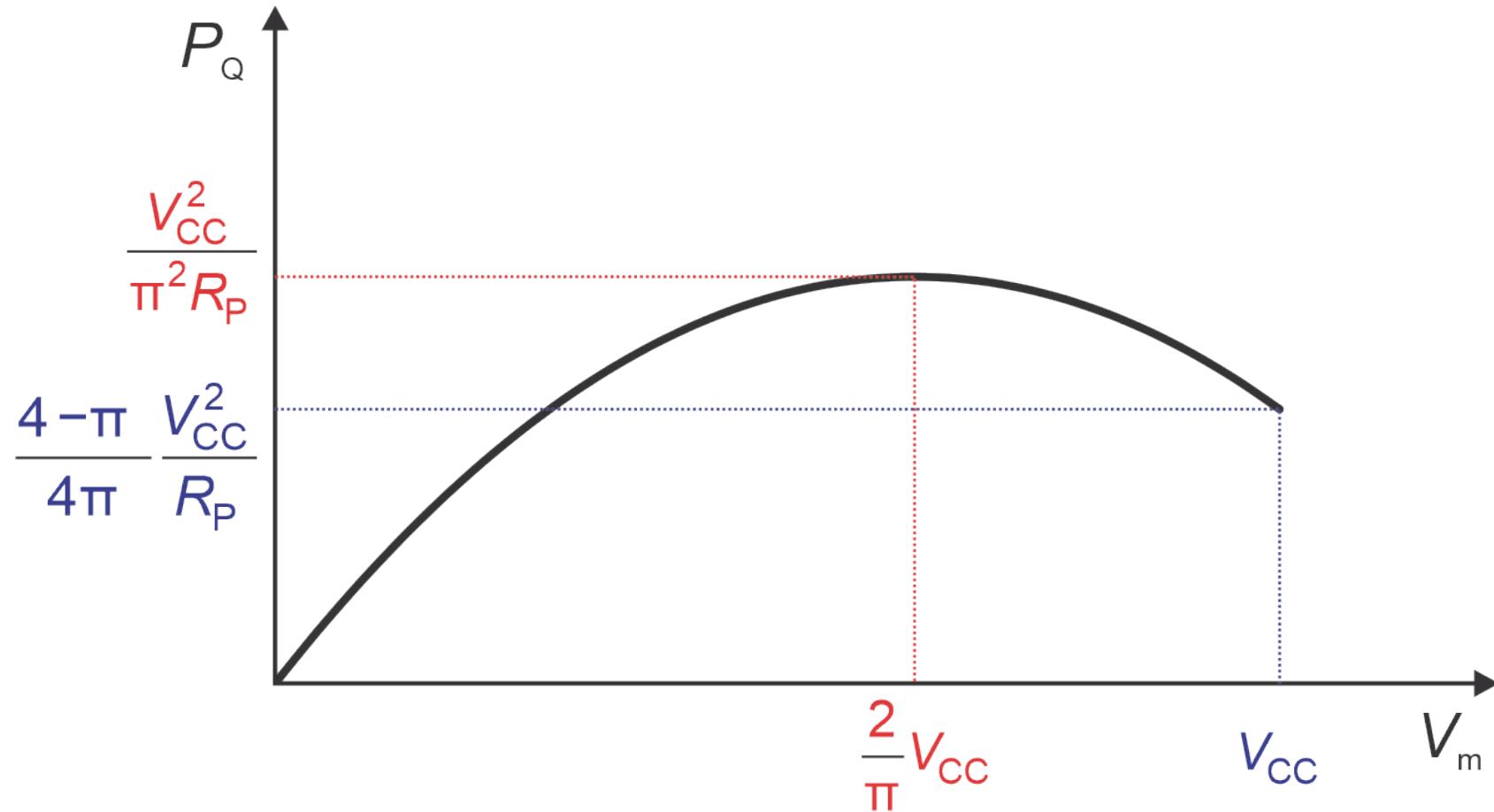
- Disipacija na tranzistoru:

$$V_m = 0, \quad P_{Qmin} = 0$$

$$\frac{\partial P_Q}{\partial V_m} = \frac{V_{CC}}{\pi R_P} - \frac{V_m}{2R_P} = 0$$

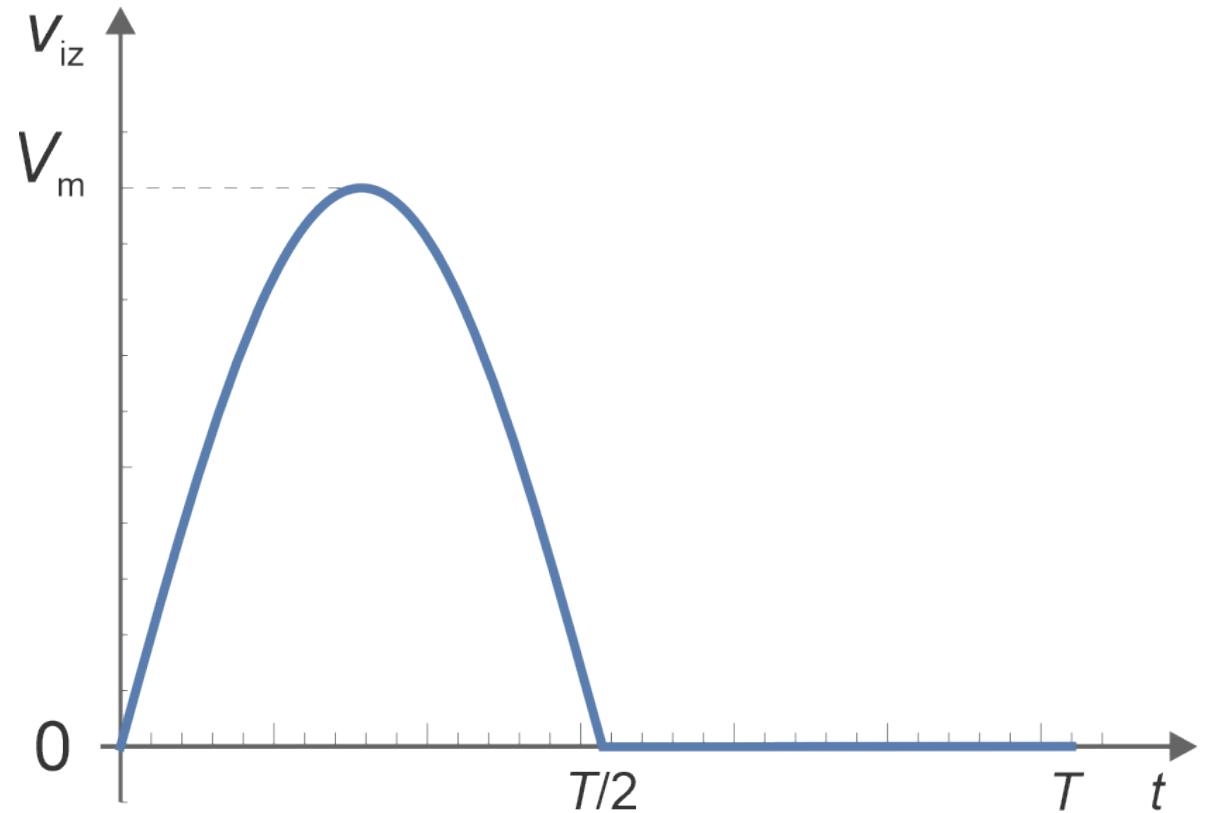
$$V_m = \frac{2}{\pi} V_{CC}, \quad P_{Qmax} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_P}$$

Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor



Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

- Izobličenje signala je veliko, nedostaje cela poluperioda
- Da bi se odredio THD, potrebno je razviti funkciju izlaznog napona u Furijeov red.



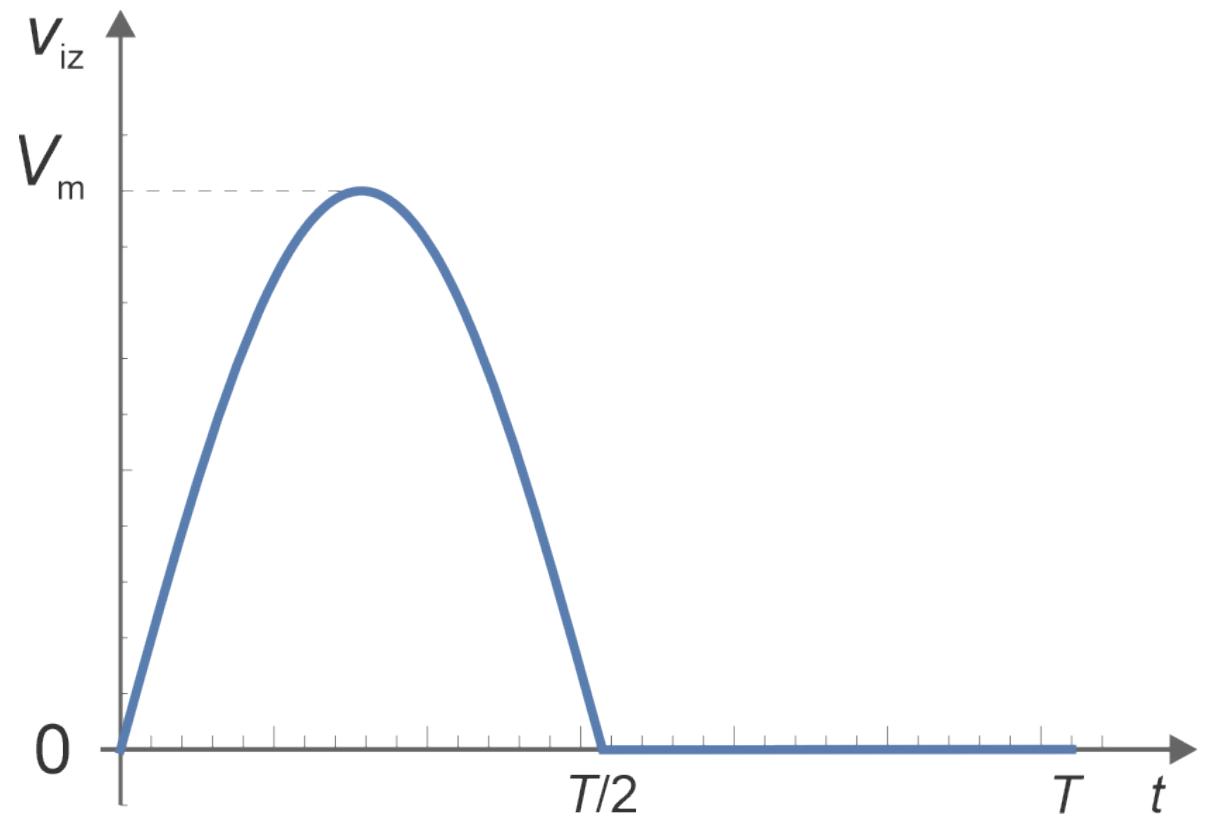
Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

$$v_{iz}(t) = \begin{cases} \sin \omega t, & 0 \leq t \leq T/2 \\ 0, & T/2 \leq t \leq T \end{cases}$$

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_{iz}(t) dt$$

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_m \sin \omega t dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T 0 \cdot dt$$

$$V_0 = \frac{V_m}{\pi}$$

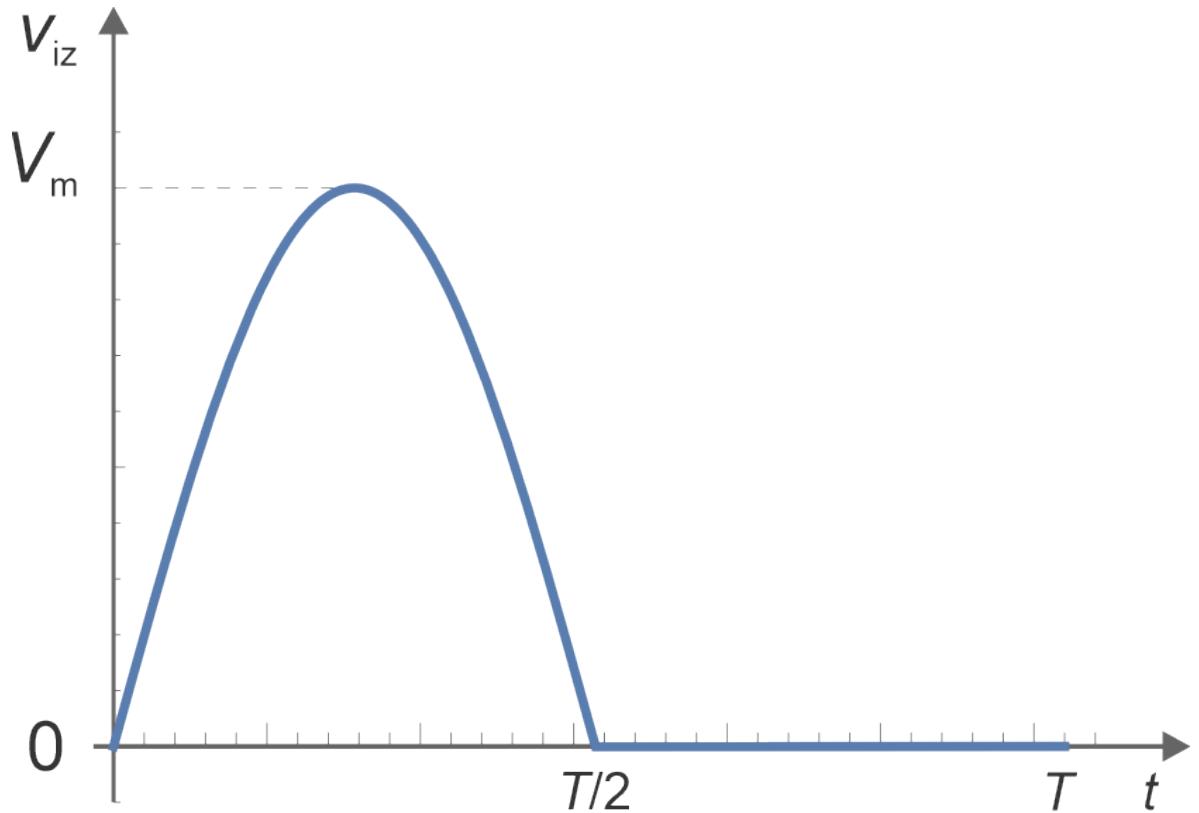


Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T \cos k\omega t \cdot v_{iz}(t) dt$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \cos k\omega t \cdot V_m \sin \omega t \cdot dt$$

$$A_k = \begin{cases} \frac{V_m}{\pi} \frac{2}{1-k^2}, & k \text{ je parno} \\ 0, & k \text{ je neparno} \end{cases}$$

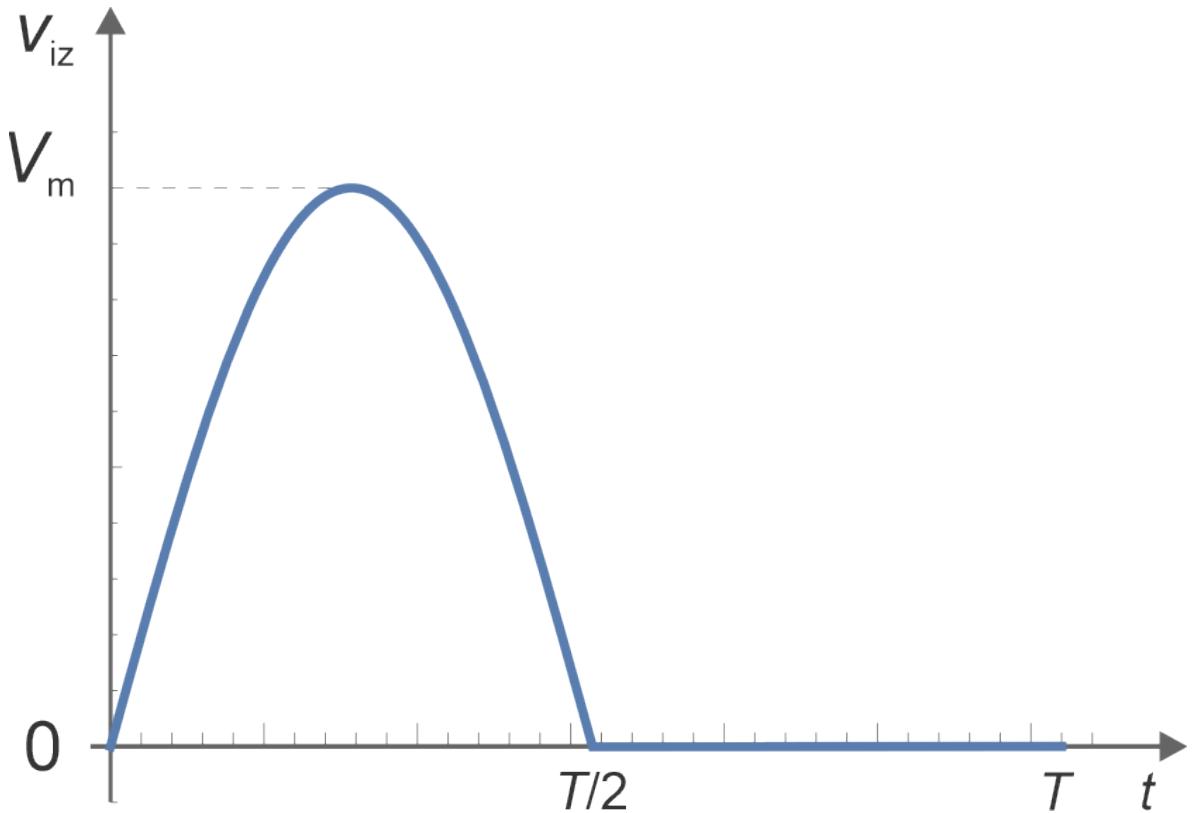


Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

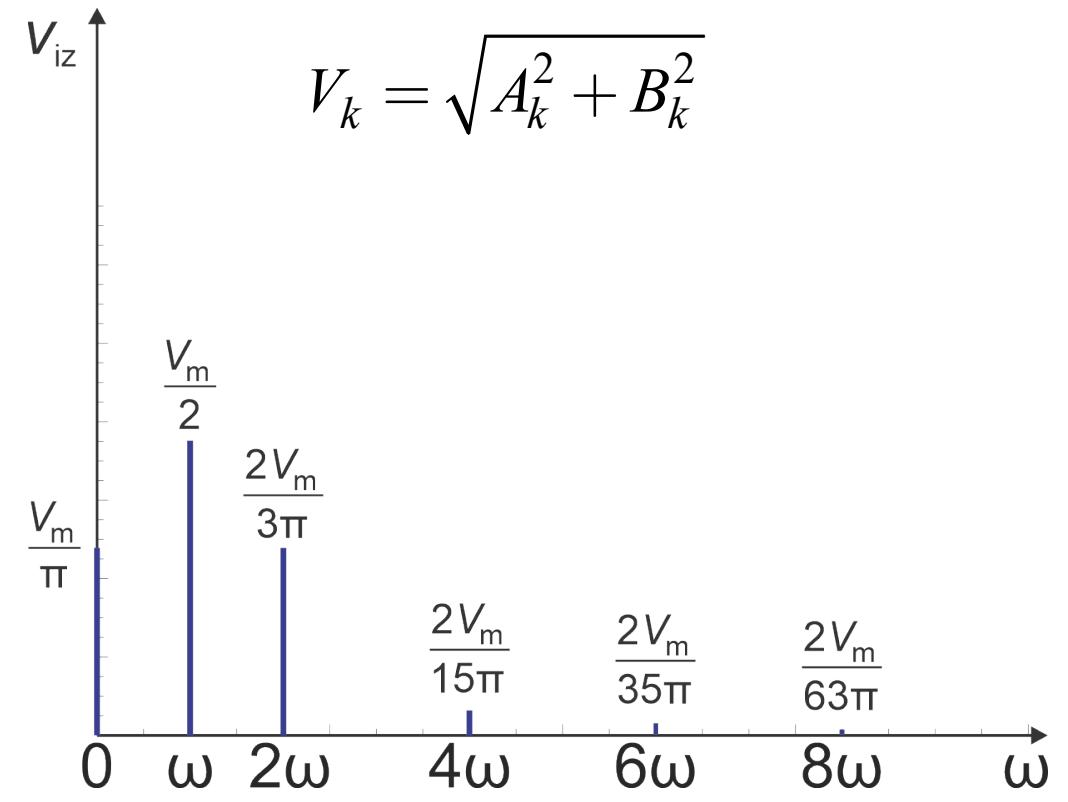
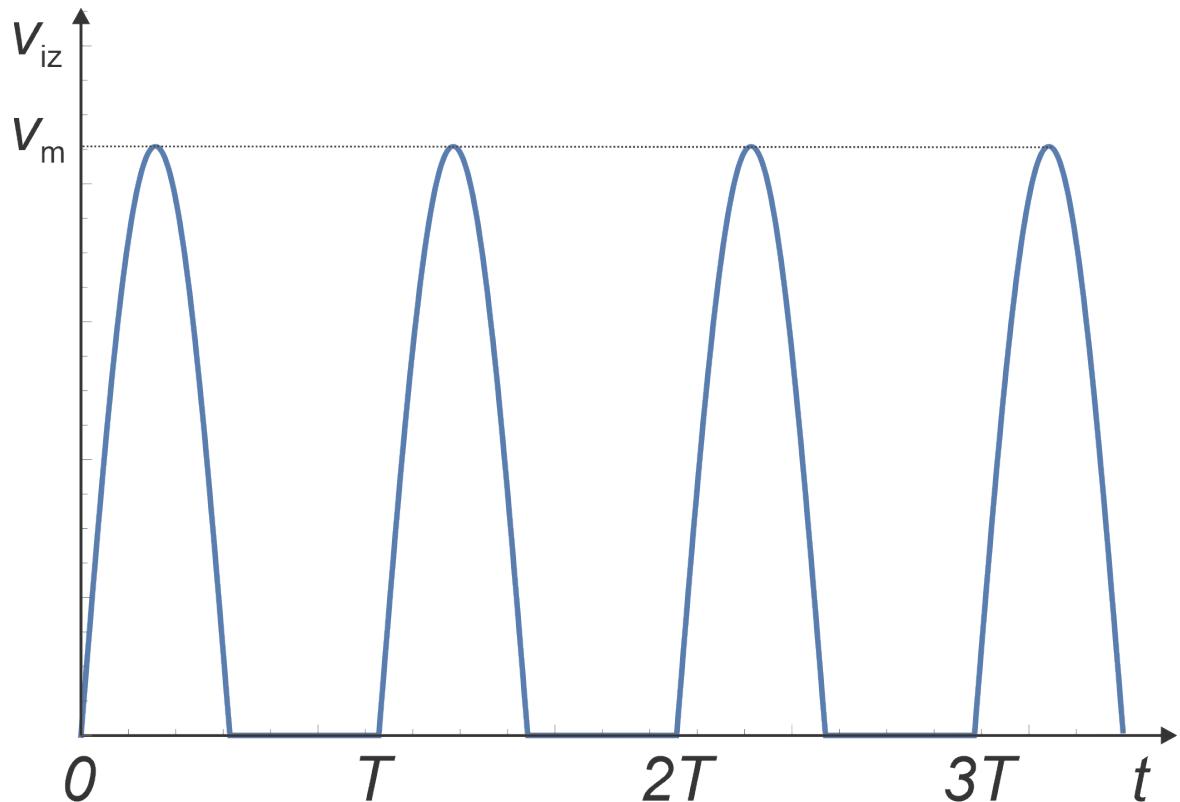
$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T \sin k\omega t \cdot v_{iz}(t) dt$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \sin k\omega t \cdot V_m \sin \omega t \cdot dt$$

$$B_k = \begin{cases} \frac{V_m}{2}, & k = 1 \\ 0, & k > 1 \end{cases}$$



Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor



Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

- Faktor izobličenja

$$\text{THD}[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} [\%]$$

$$V_1 = B_1 = \frac{V_m}{2}$$

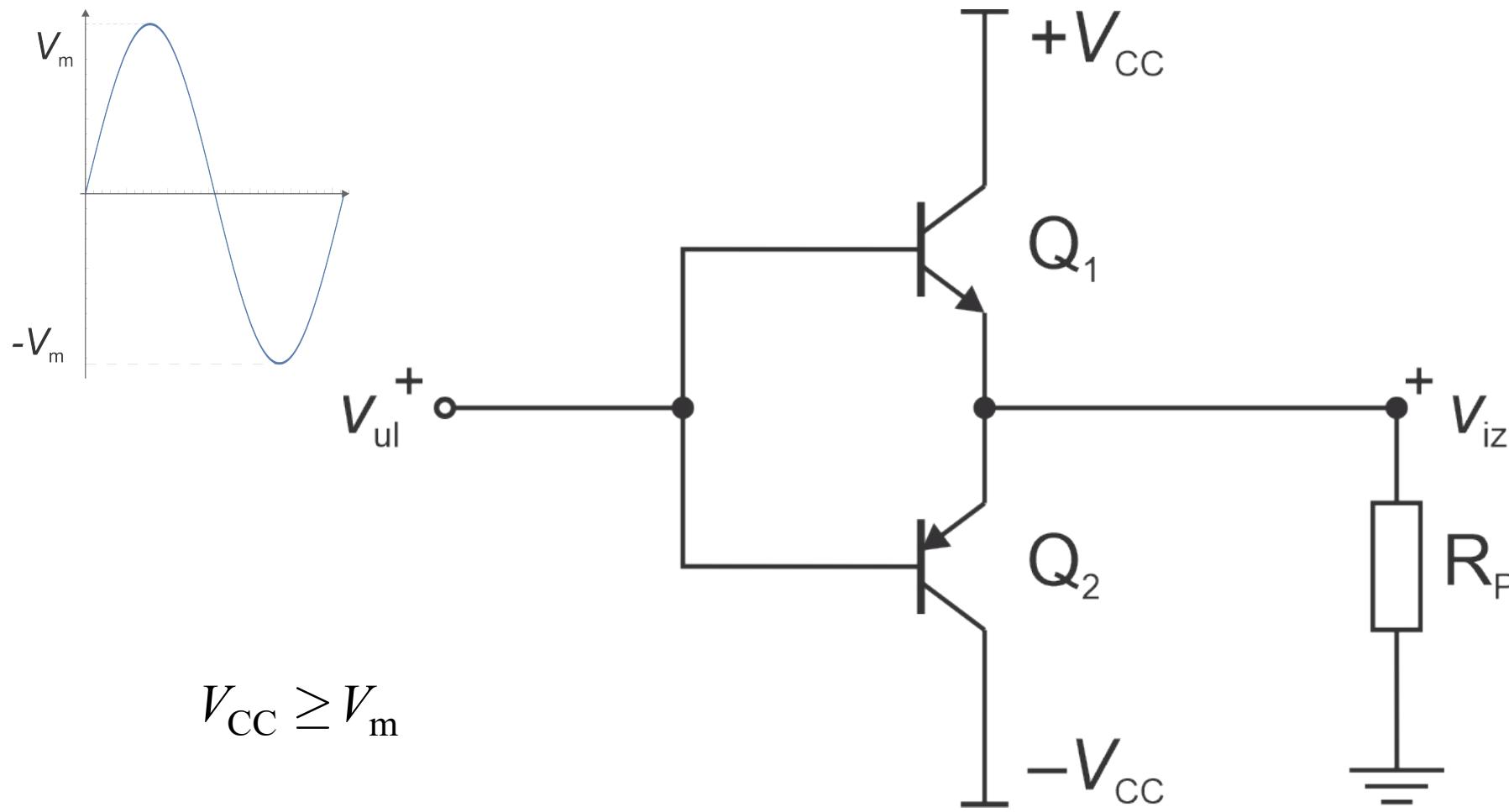
$$V_k = V_k = \frac{2V_m}{\pi} \frac{1}{k^2 - 1}, \quad k \text{ parno}$$

$$\text{THD} = \frac{\frac{2V_m}{\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(4i^2 - 1)^2}}}{\frac{V_m}{2}}, \quad k = 2i$$

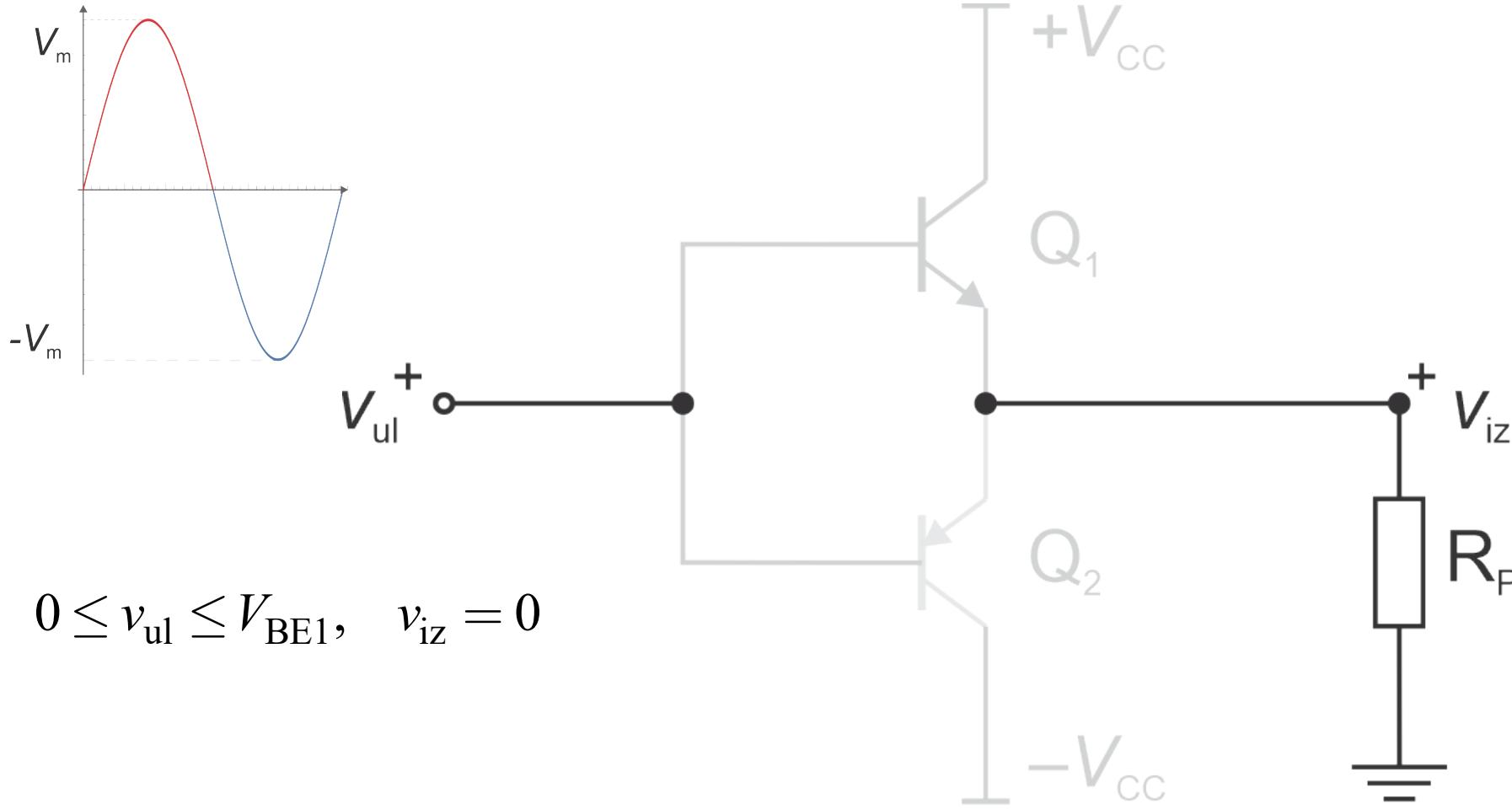
$$\text{THD} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{\pi^2 - 8}}{4} = \frac{\sqrt{\pi^2 - 8}}{\pi}$$

$$\text{THD} = 43,52\%$$

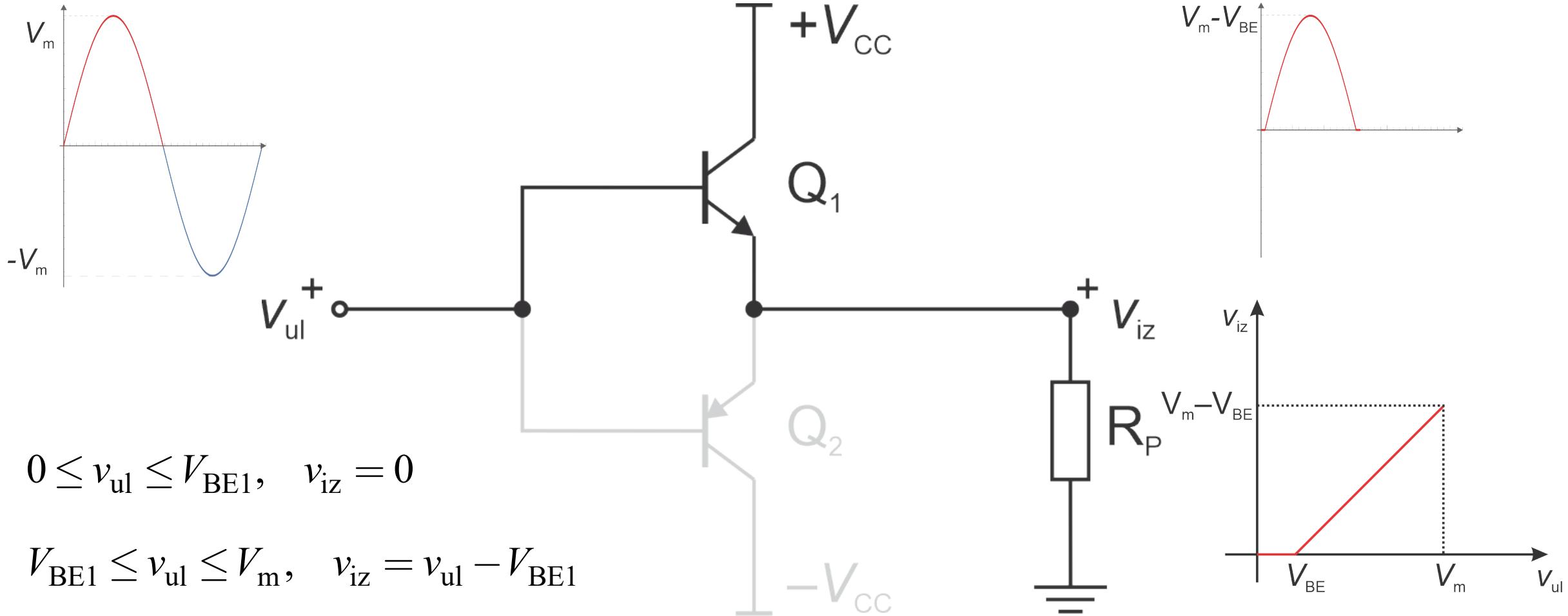
Push-pull pojačavači



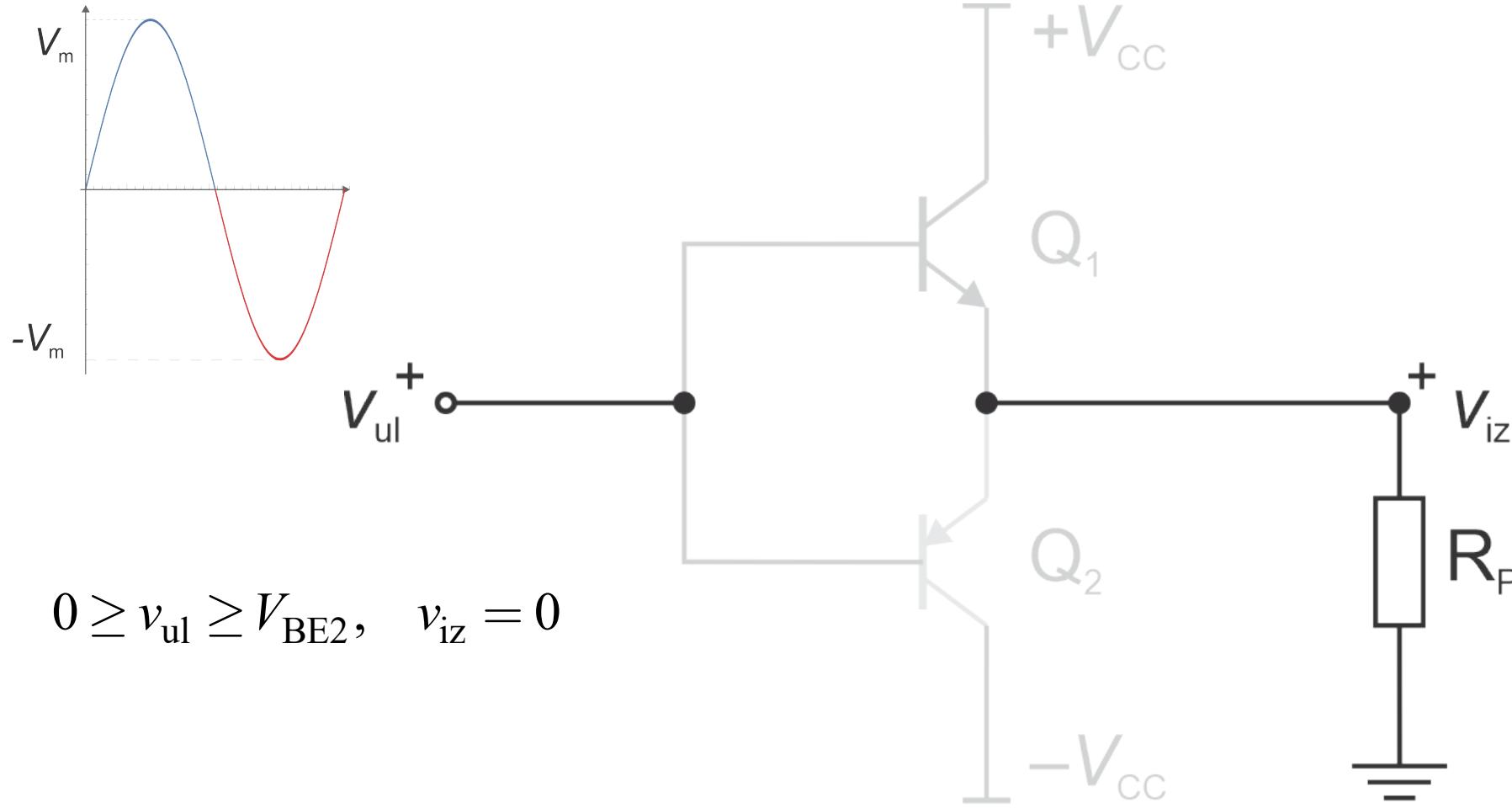
Push-pull pojačavači



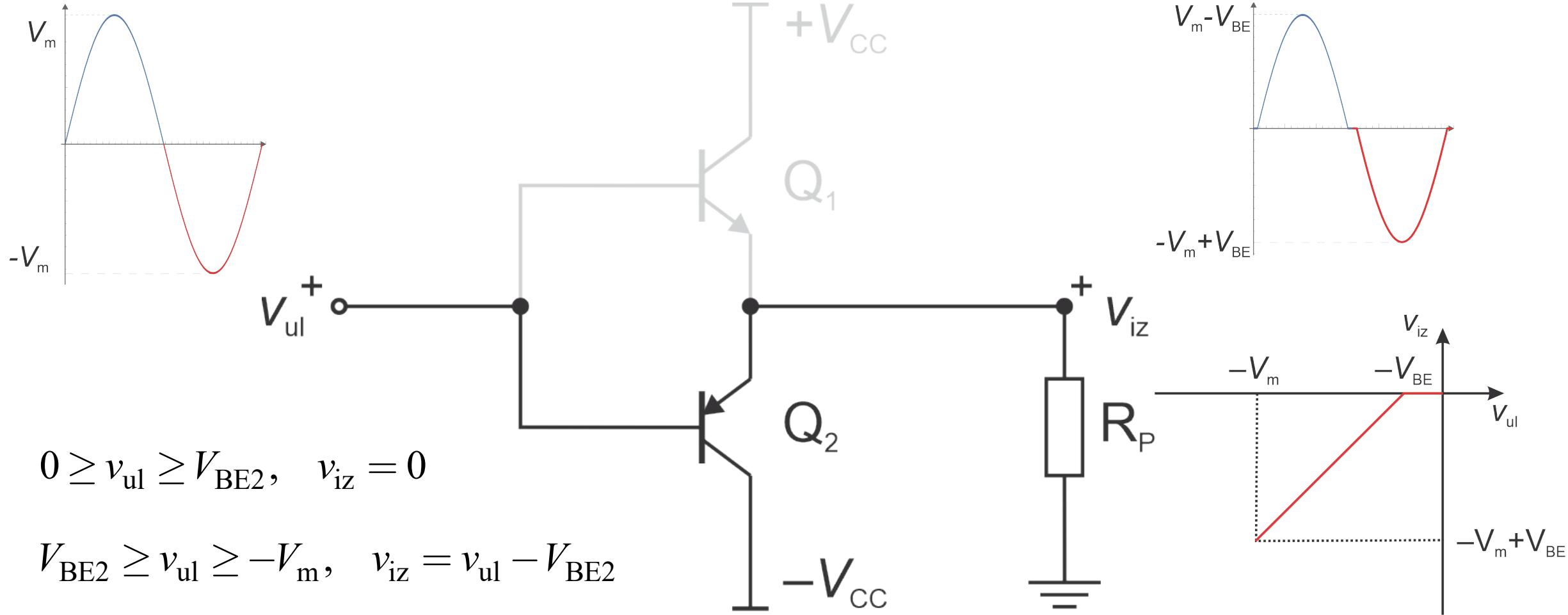
Push-pull pojačavači



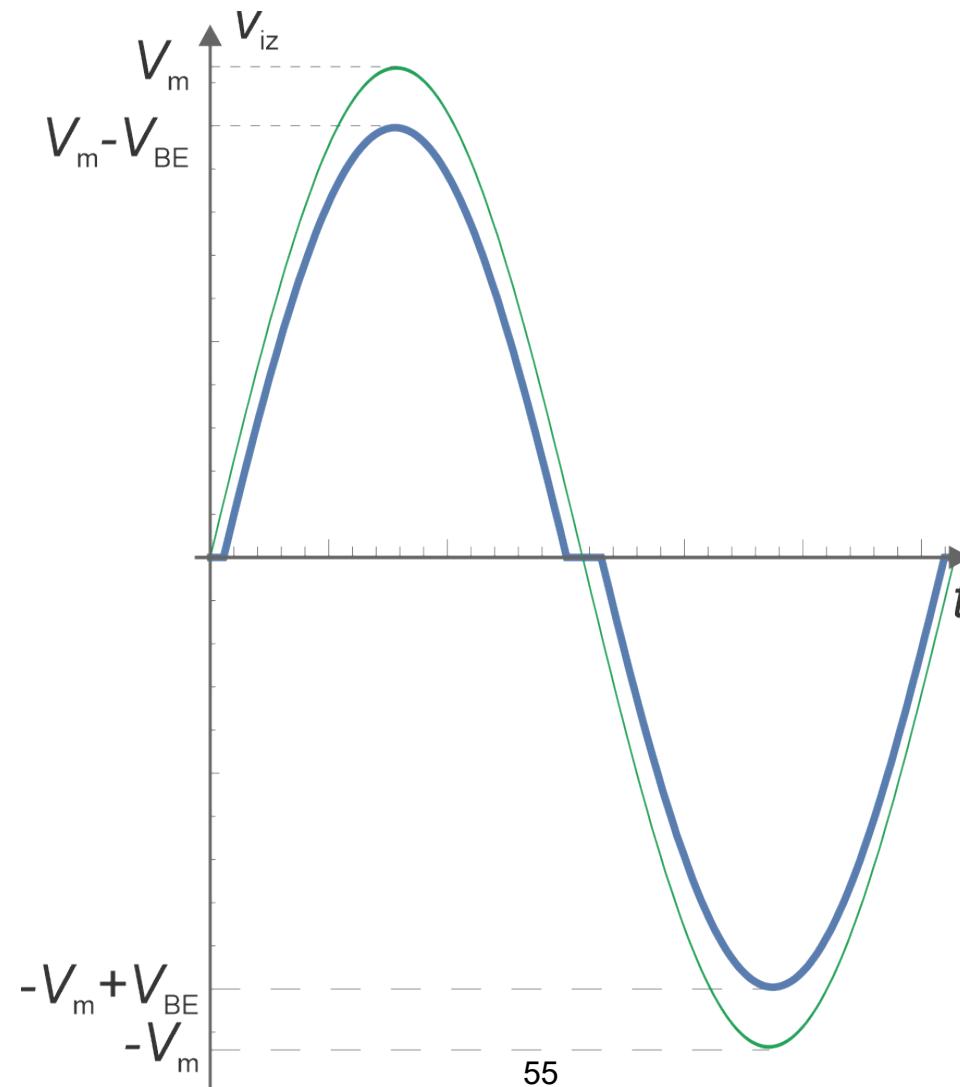
Push-pull pojačavači



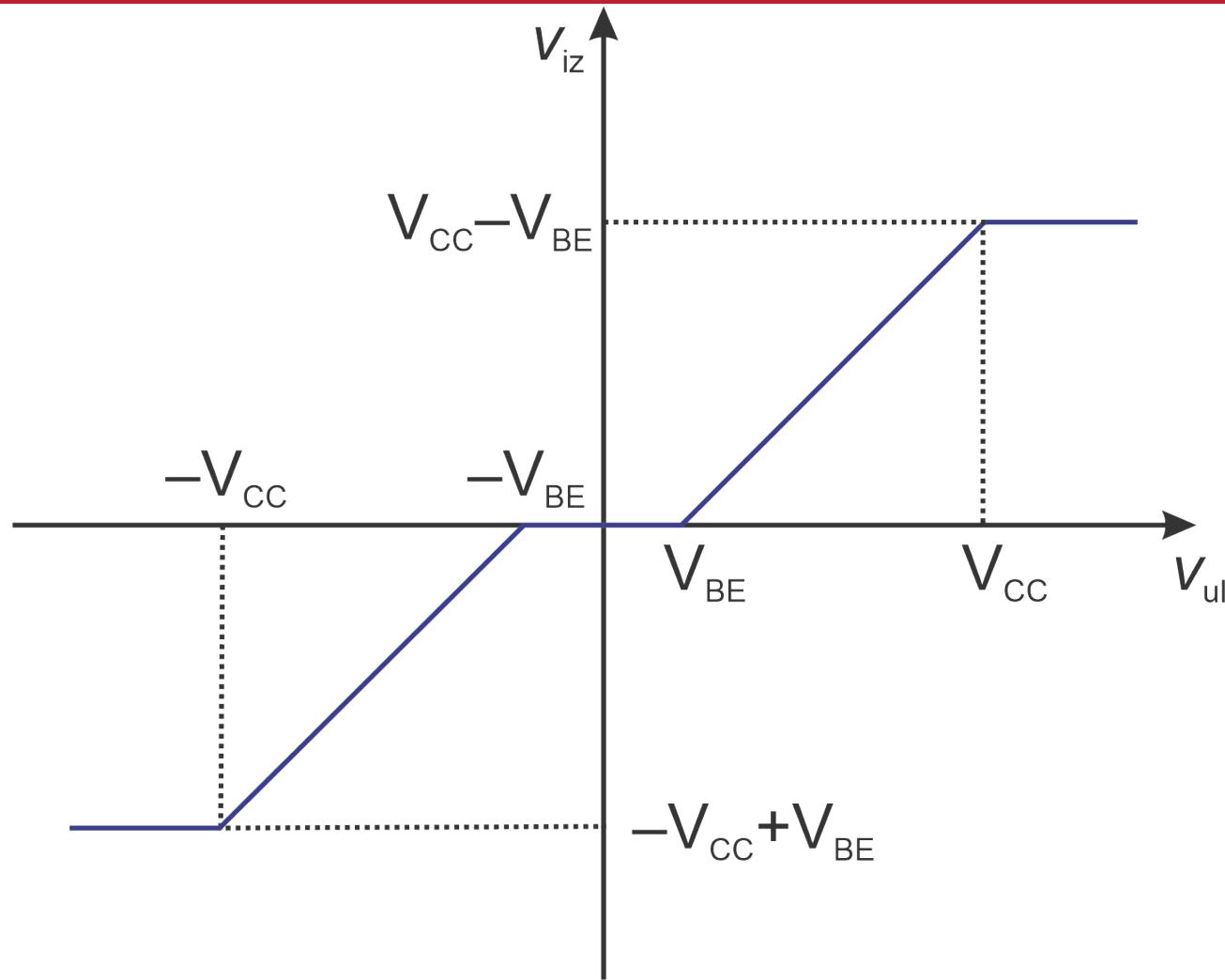
Push-pull pojačavači



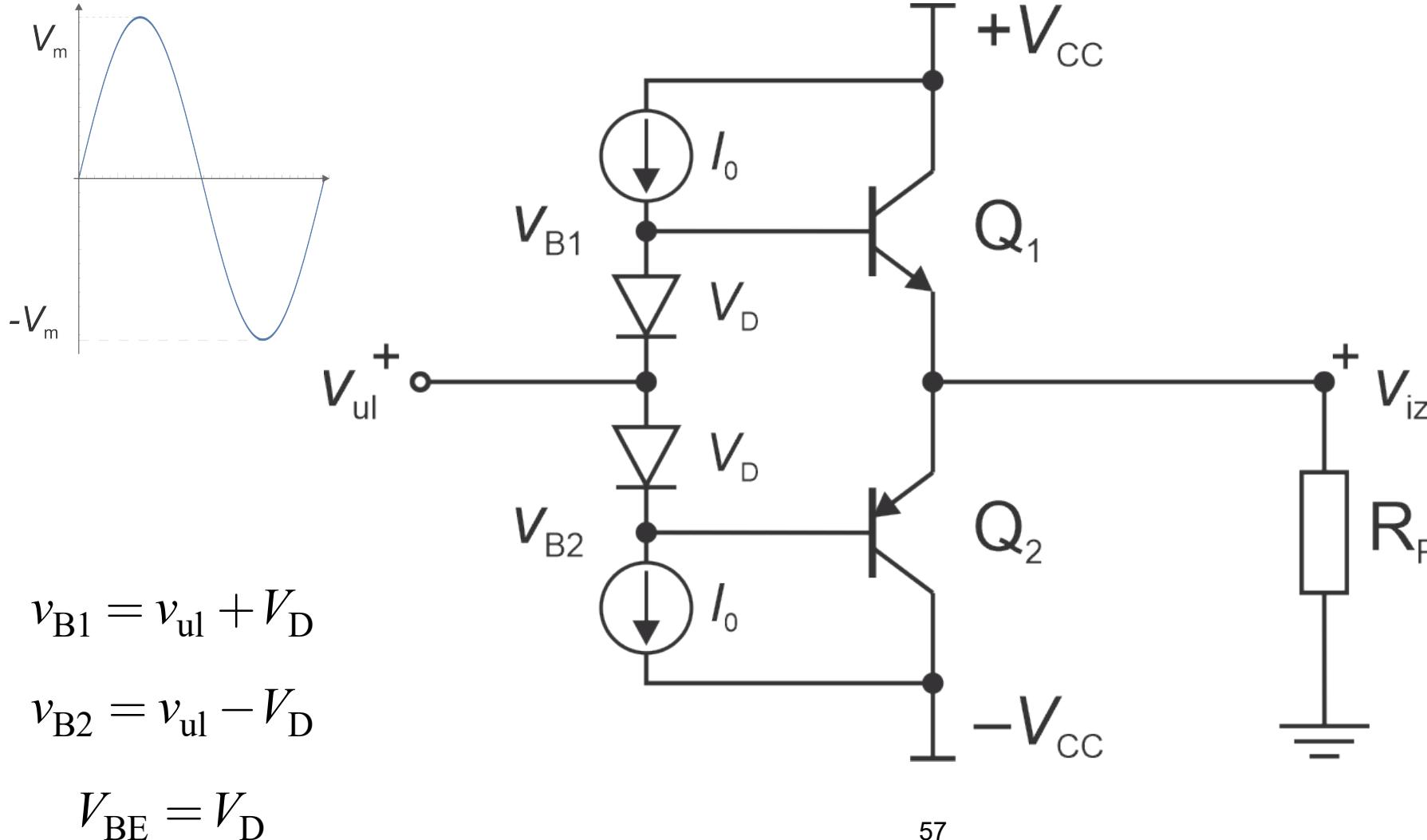
Push-pull pojačavači



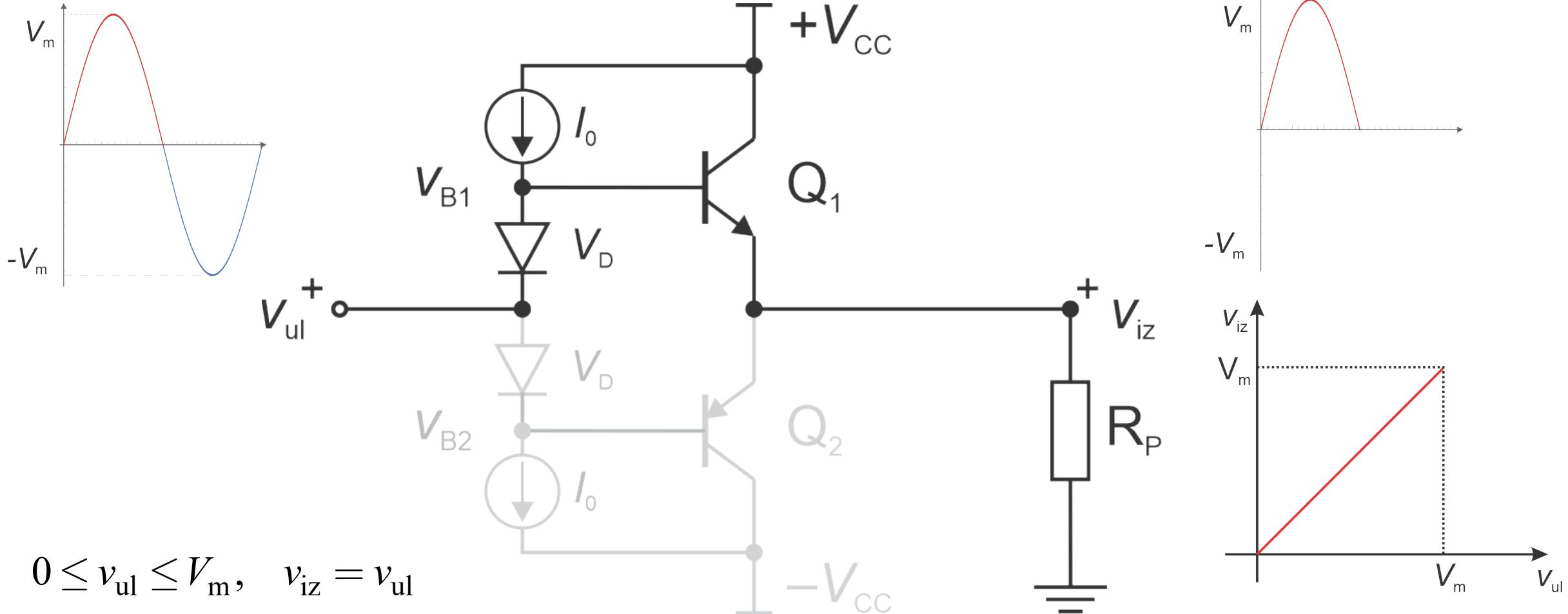
Push-pull pojačavači



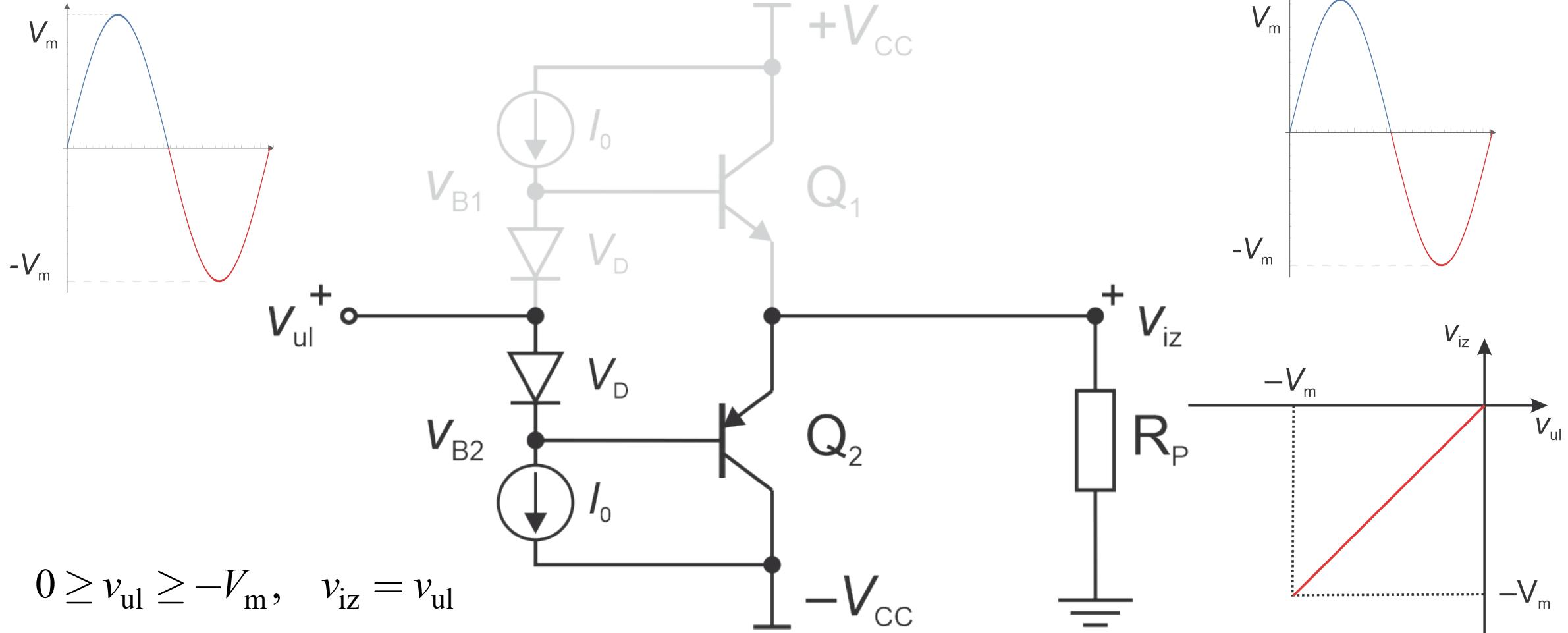
Push-pull pojačavači sa pomeračem napona



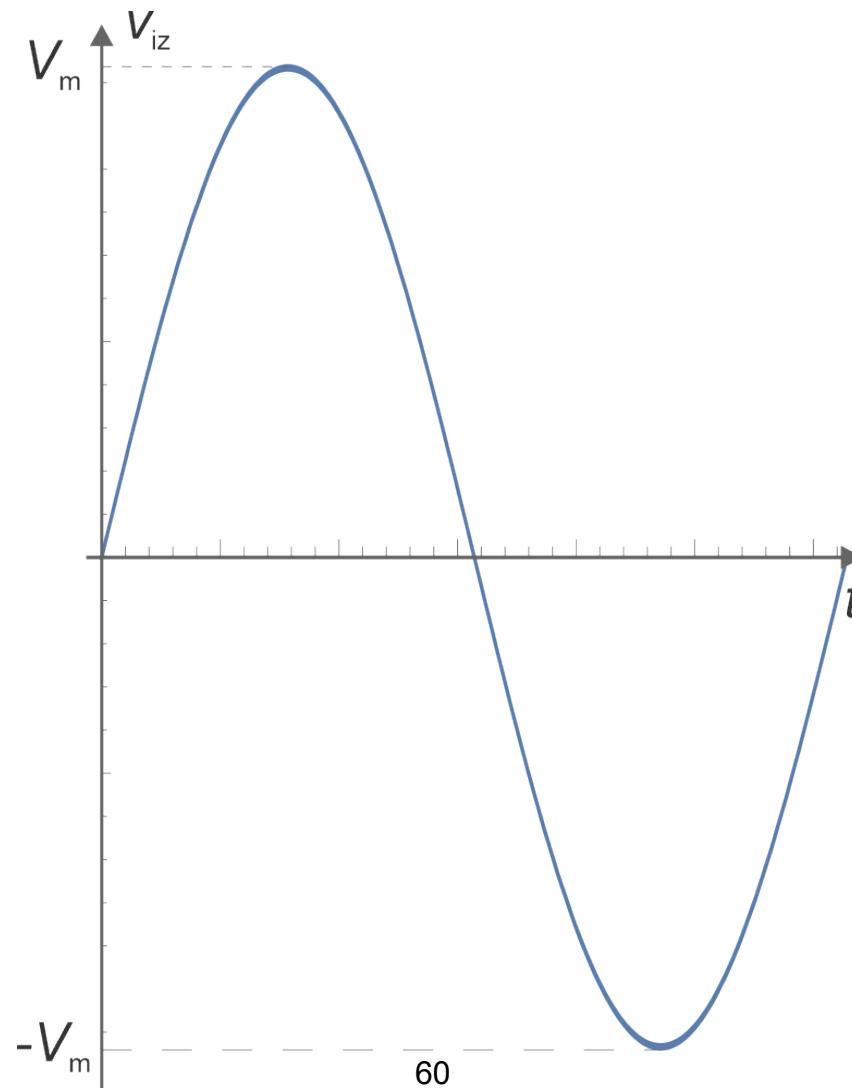
Push-pull pojačavači sa pomeračem napona



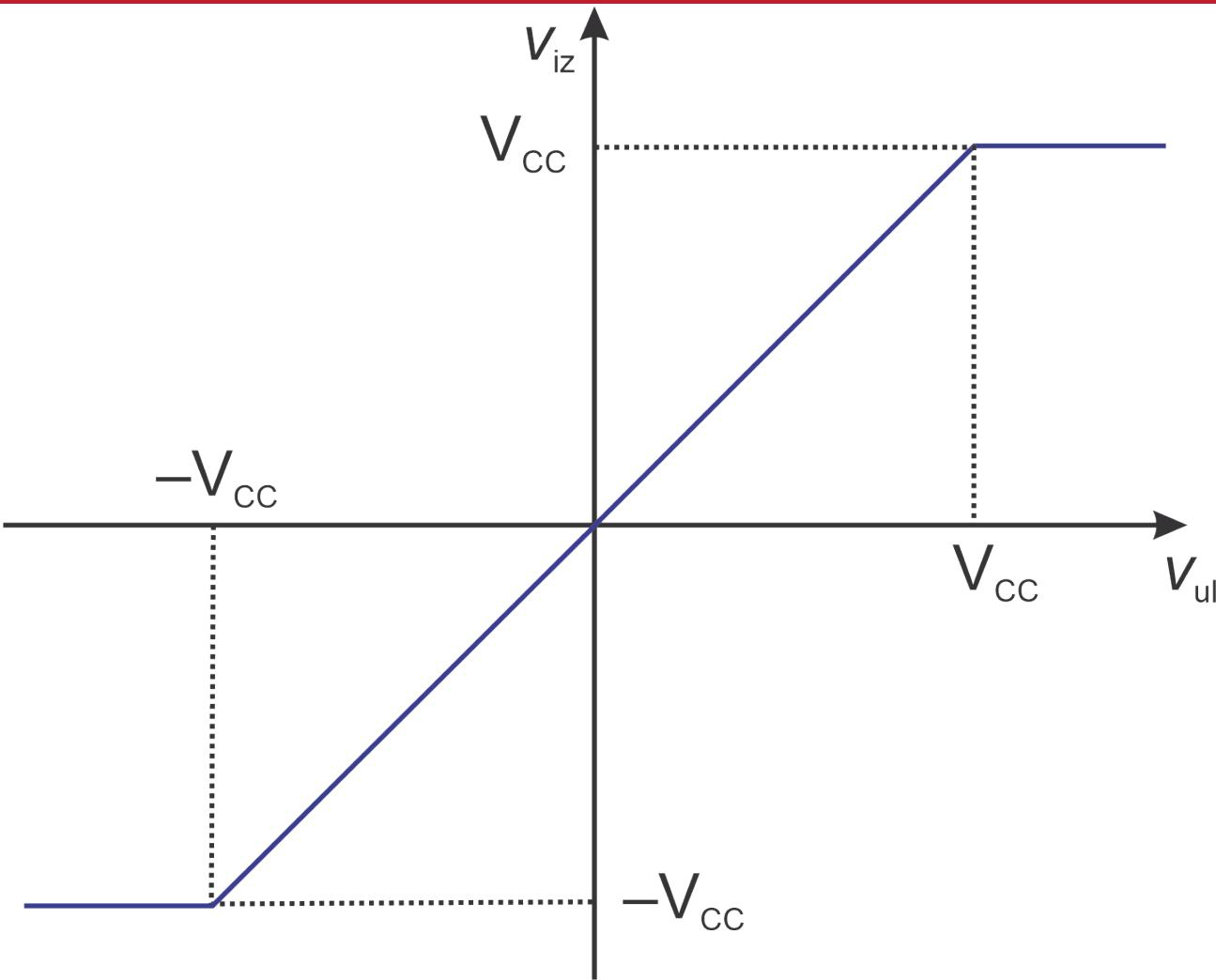
Push-pull pojačavači sa pomeračem napona



Push-pull pojačavači



Push-pull pojačavači



Push-pull pojačavači

- Kroz potrošač R_P protiču obe poluperiode, snaga je

$$P_P = \frac{V_{\text{iz,ef}}^2}{R_P} = \frac{V_m^2}{2R_P}$$

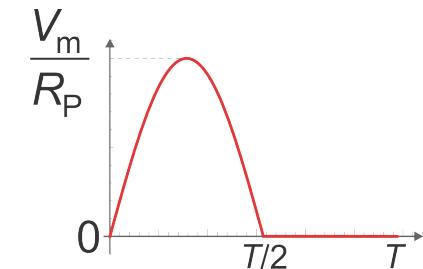
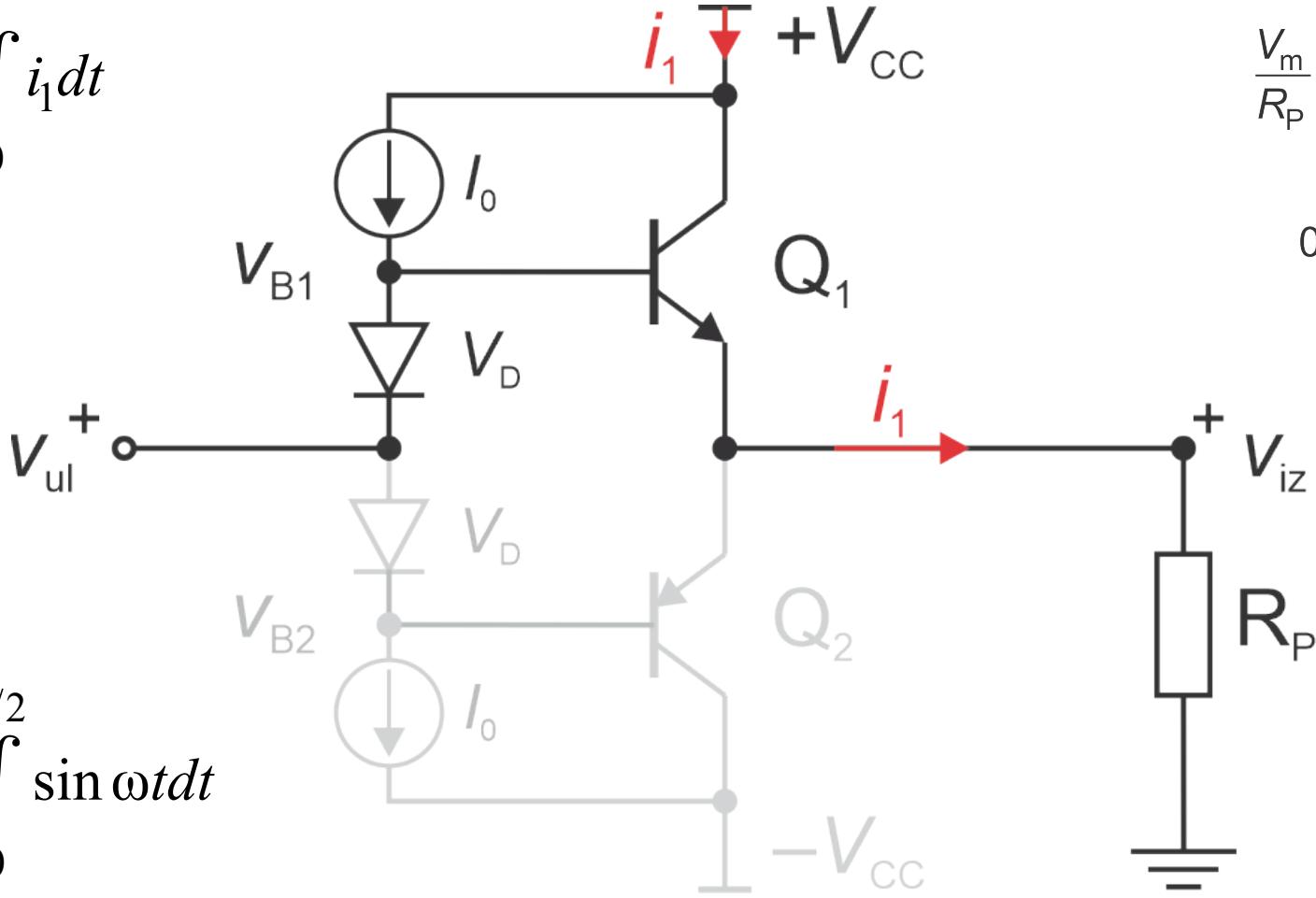
- Kroz tranzistore Q_1 i Q_2 protiče kolektorska struja u samo pozitivnoj, odnosno negativnoj poluperiodi.
- Ukupna snaga kola jednaka je zbiru snaga u obe poluperiode, P_1 i P_2 .

Push-pull pojačavači

$$P_1 = V_{CC} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_1 dt$$

$$i_1 = \frac{v_{iz}}{R_P}$$

$$P_1 = \frac{V_{CC}V_m}{TR_P} \int_0^{T/2} \sin \omega t dt$$

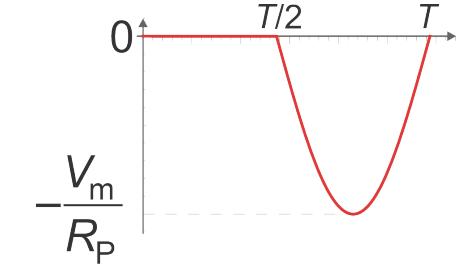
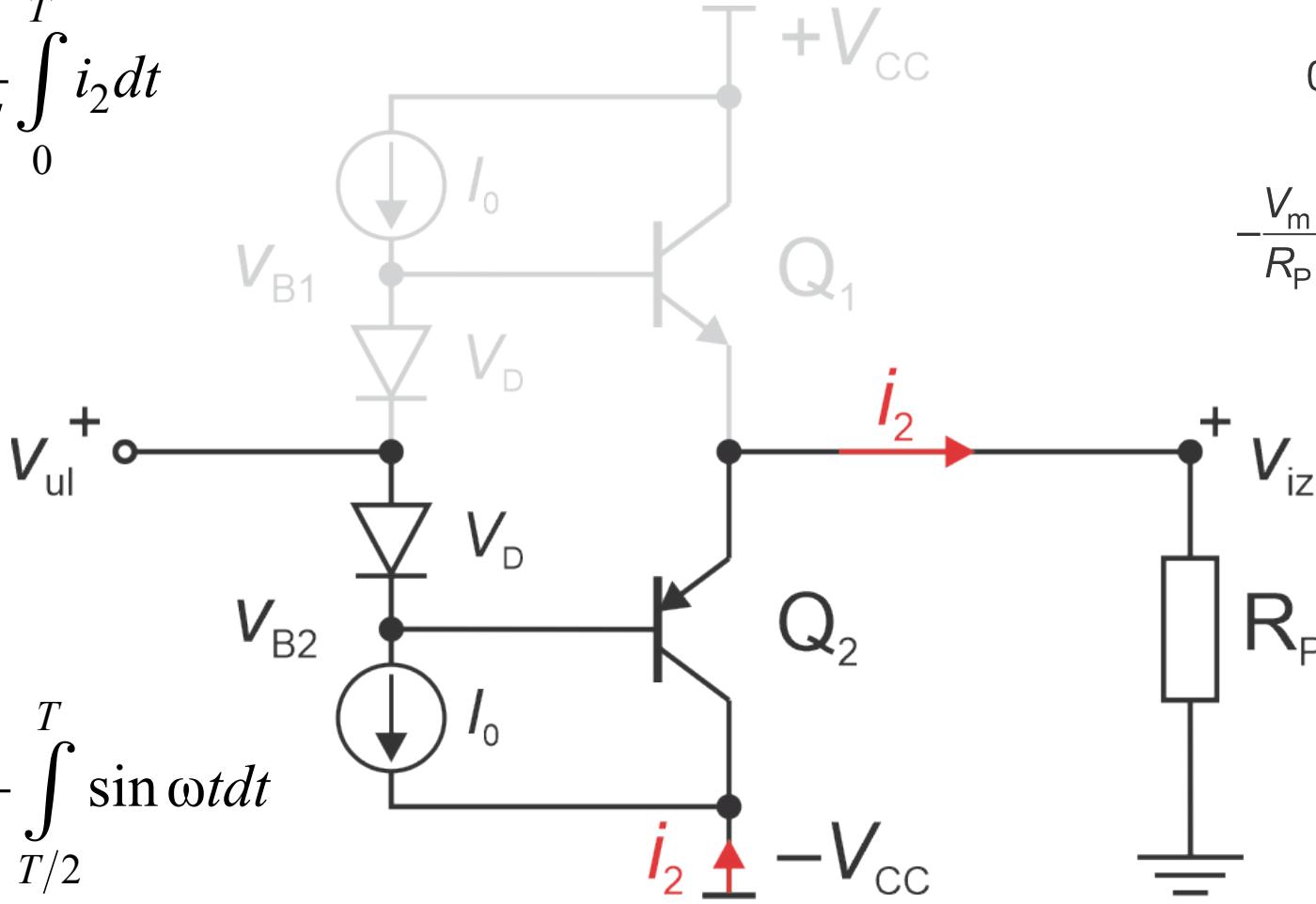


Push-pull pojačavači

$$P_2 = -V_{CC} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_2 dt$$

$$i_2 = \frac{v_{iz}}{R_P}$$

$$P_2 = -\frac{V_{CC}V_m}{TR_P} \int_{T/2}^T \sin \omega t dt$$



Push-pull pojačavači

$$P_1 = P_2 = \frac{V_{CC}V_m}{\pi R_P}$$

- Ukupna snaga je

$$P_B = P_1 + P_2 = \frac{2V_{CC}V_m}{\pi R_P}$$

- Koeficijent iskorišćenja je

$$\eta = \frac{P_P}{P_B} = \frac{\frac{V_m^2}{2R_P}}{\frac{2V_{CC}V_m}{\pi R_P}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_m}{V_{CC}}$$
$$\eta_{max} = 78,53\%$$

Push-pull pojačavači

$$P_1 = P_2 = \frac{V_{CC}V_m}{\pi R_P}$$

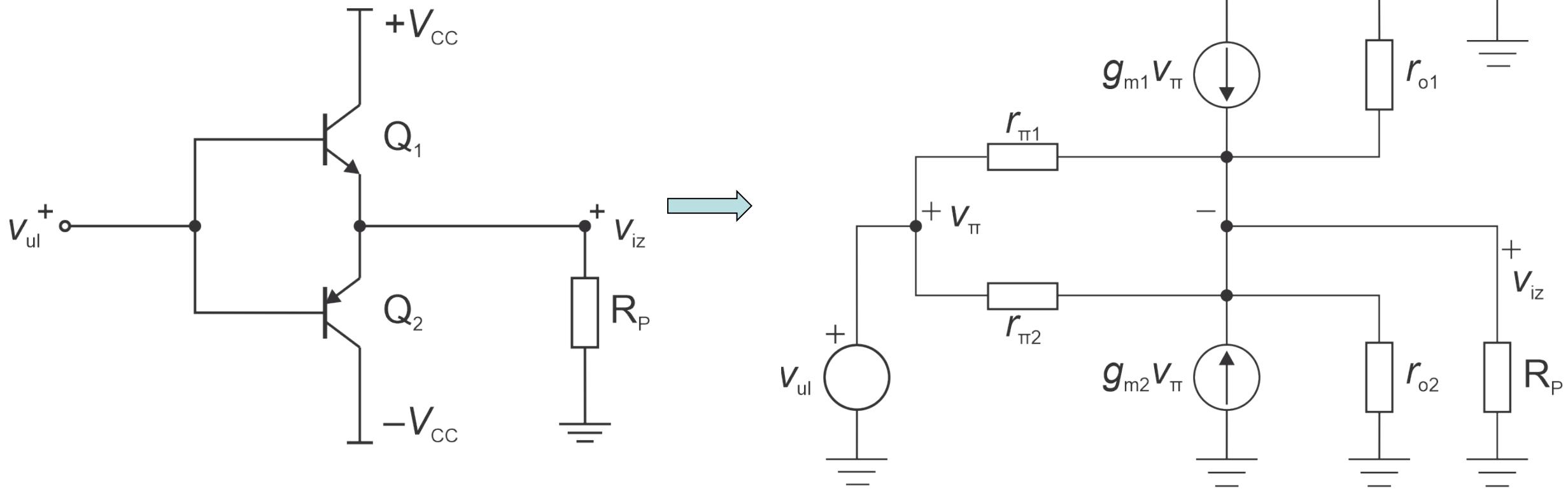
- Ukupna snaga je

$$P_B = P_1 + P_2 = \frac{2V_{CC}V_m}{\pi R_P}$$

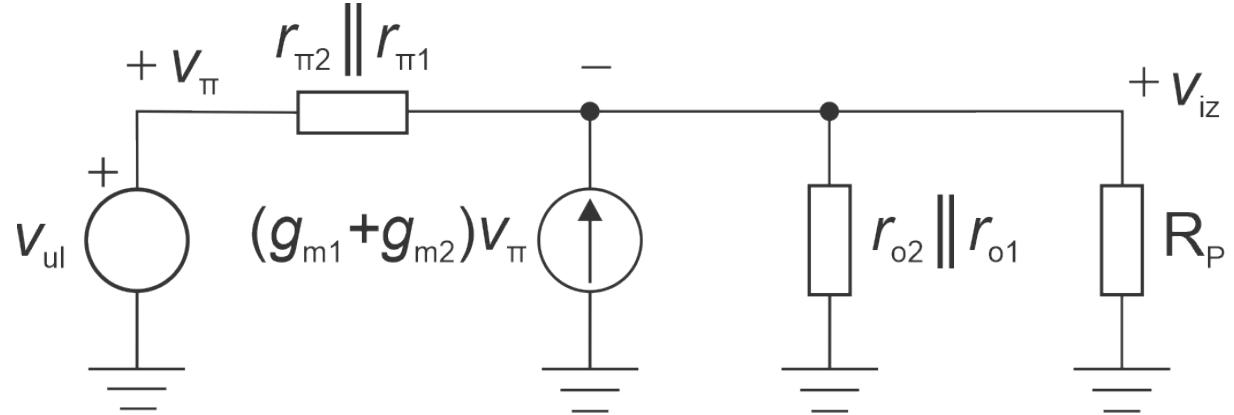
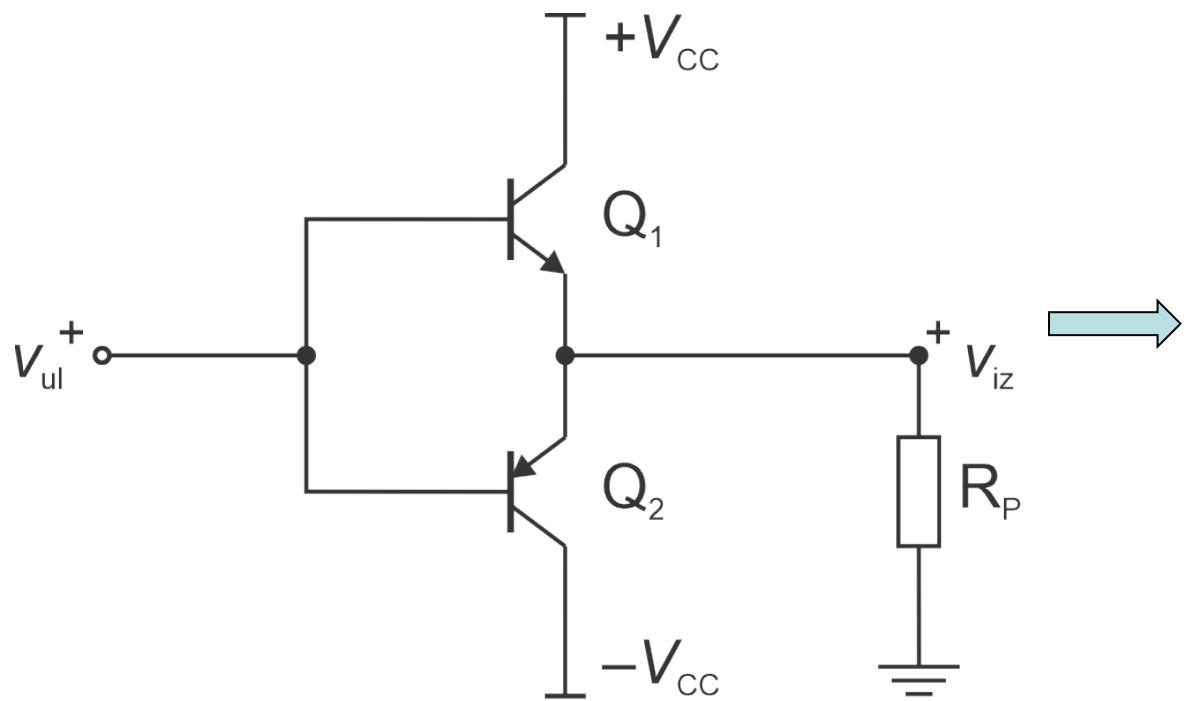
- Koeficijent iskorišćenja je

$$\eta = \frac{P_P}{P_B} = \frac{\frac{V_m^2}{2R_P}}{\frac{2V_{CC}V_m}{\pi R_P}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_m}{V_{CC}}$$
$$\eta_{max} = 78,53\%$$

Push-pull pojačavači



Push-pull pojačavači



Push-pull pojačavači

$$A = \frac{(1 + (g_{m1} + g_{m2})(r_{\pi1} \parallel r_{\pi2}))R_P}{r_{\pi1} \parallel r_{\pi2} + (1 + (g_{m1} + g_{m2})(r_{\pi1} \parallel r_{\pi2}))R_P}$$

$$R_{ul} = ((r_{\pi1} \parallel r_{\pi2})(g_{m1} + g_{m2}) + 1)R_P + r_{\pi1} \parallel r_{\pi2}$$

$$R_{iz} \approx R_P \parallel \left(\frac{1}{(g_{m1} + g_{m2})} + R_B / ((g_{m1} + g_{m2})r_{\pi1} \parallel r_{\pi2} + 1) \right)$$

