

# Pojačavači snage

# Uvod

- Pojačavači snage se realizuju da obezbede potrebnu snagu na izlazu, najčešće na potrošaču male otpornosti (reda veličine  $1\Omega$  ili  $10\Omega$ )
- 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 je odnos korisne snage i ukupne snage pojačavača, *koeficijent iskorišćenja*,  $\eta$ .

$$\eta = \frac{P_P}{P_B}$$

- 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,  $P_D$ .



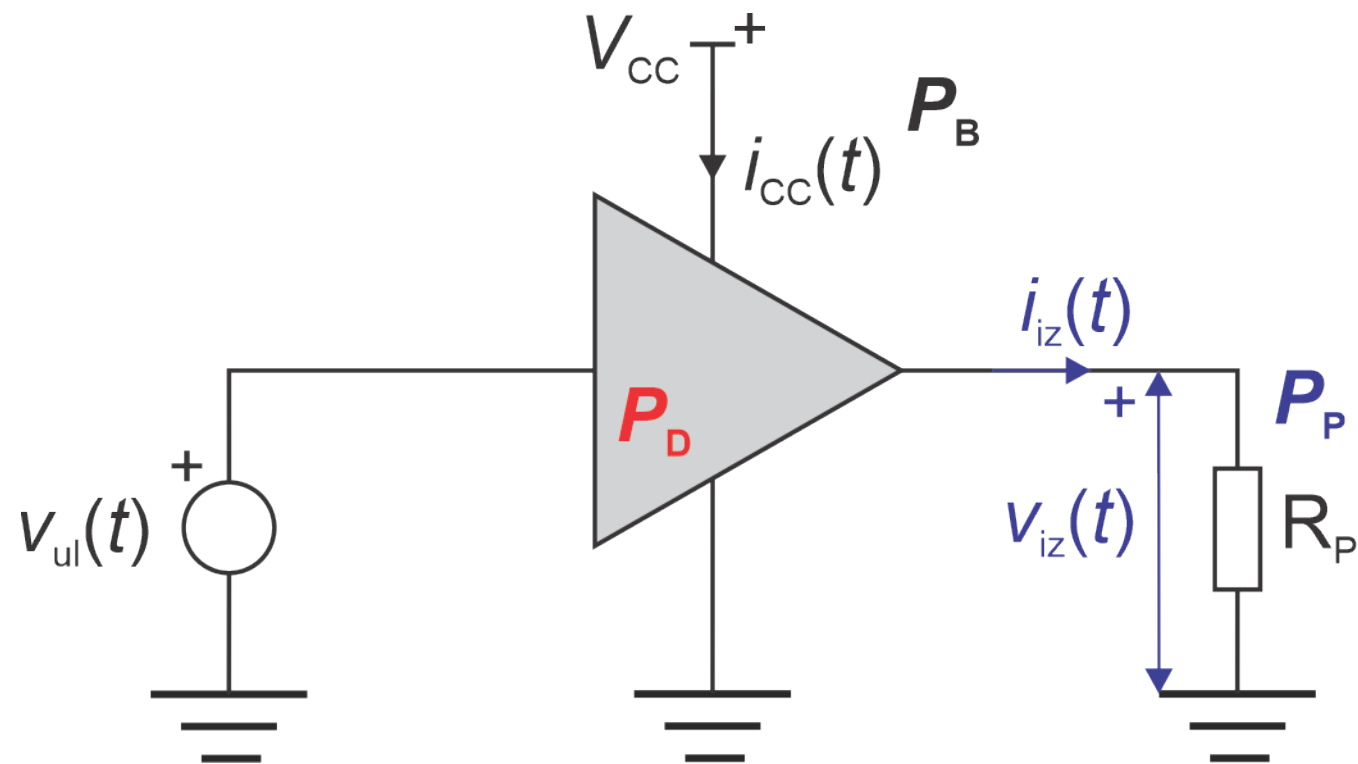
# Snaga i stepen iskorišćenja

$$P_B = P_P + P_D$$

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

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

$$P_B = V_{CC} \cdot I_{C0}$$



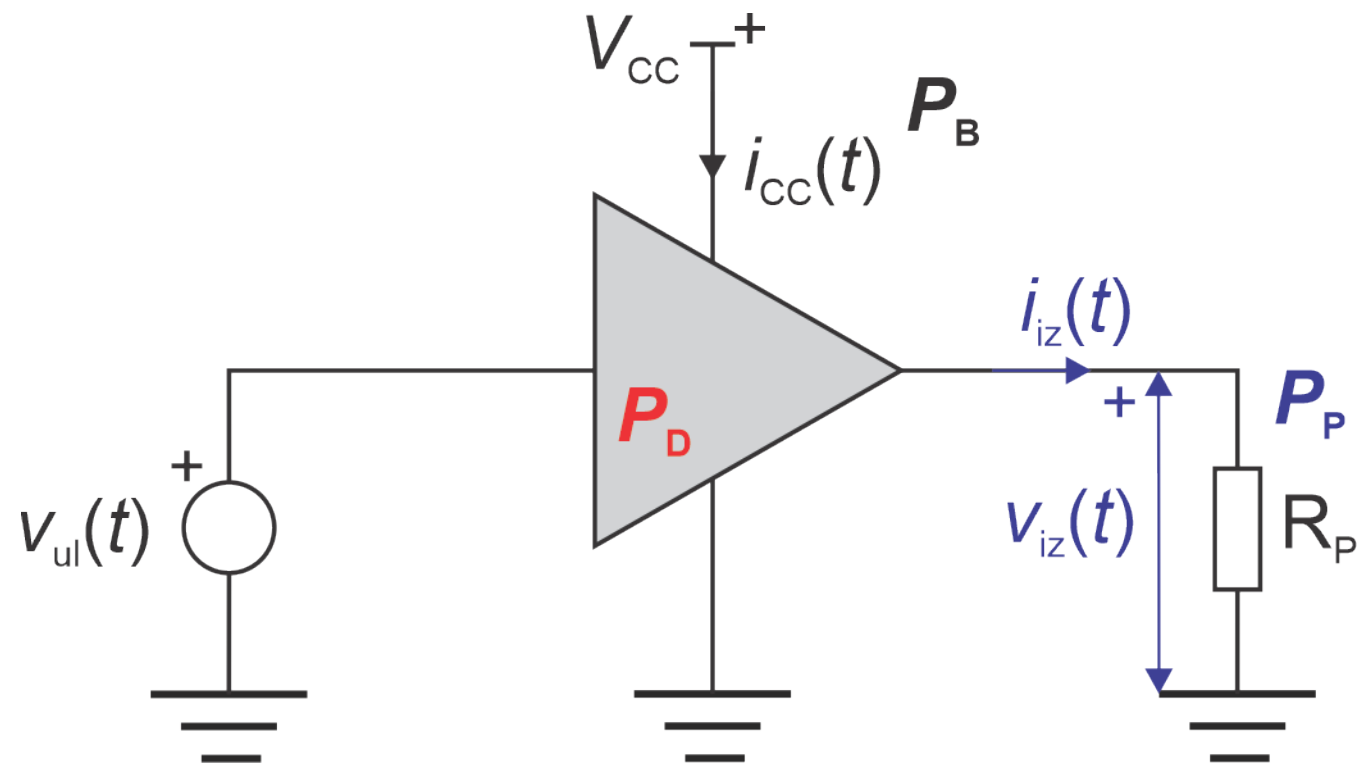
# Snaga i stepen iskorišćenja

$$P_B = P_P + P_D$$

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

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

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

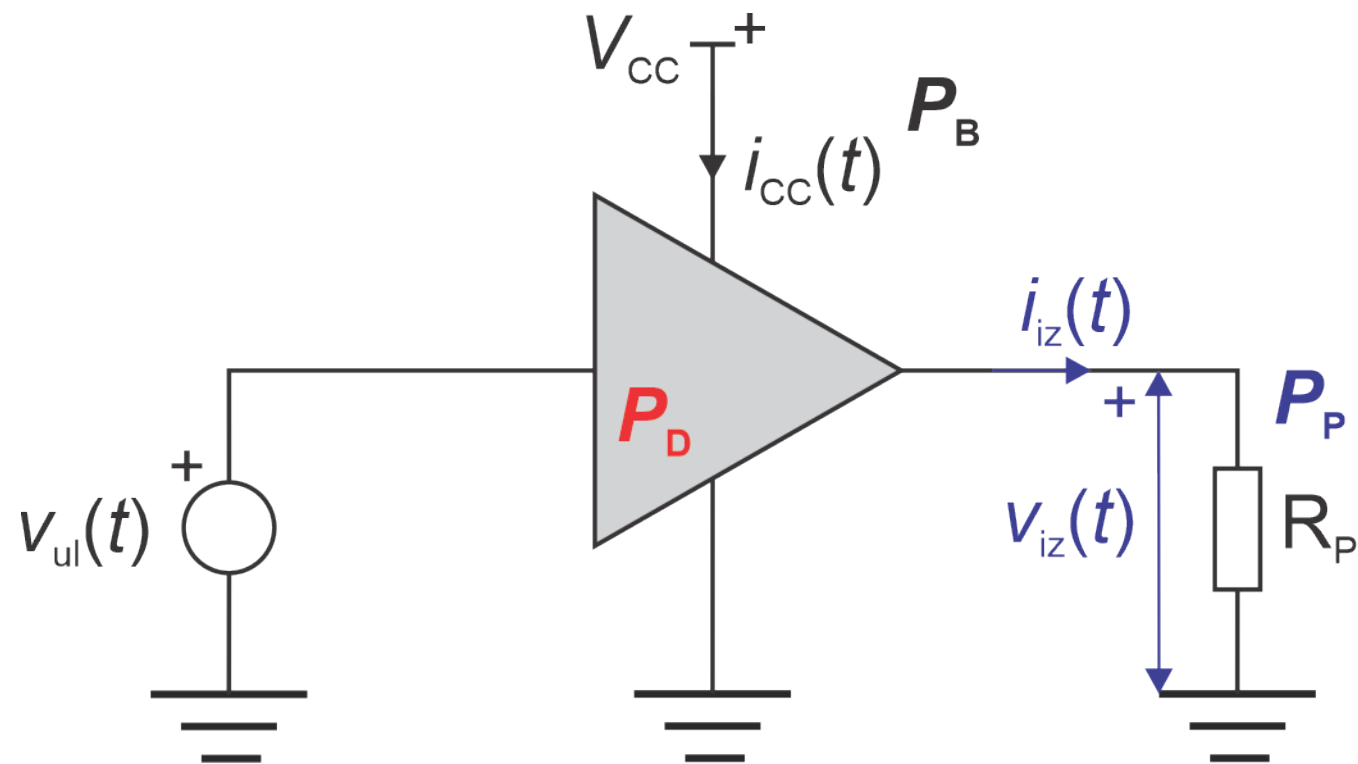


# Snaga i stepen iskorišćenja

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

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

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



# Snaga disipacije

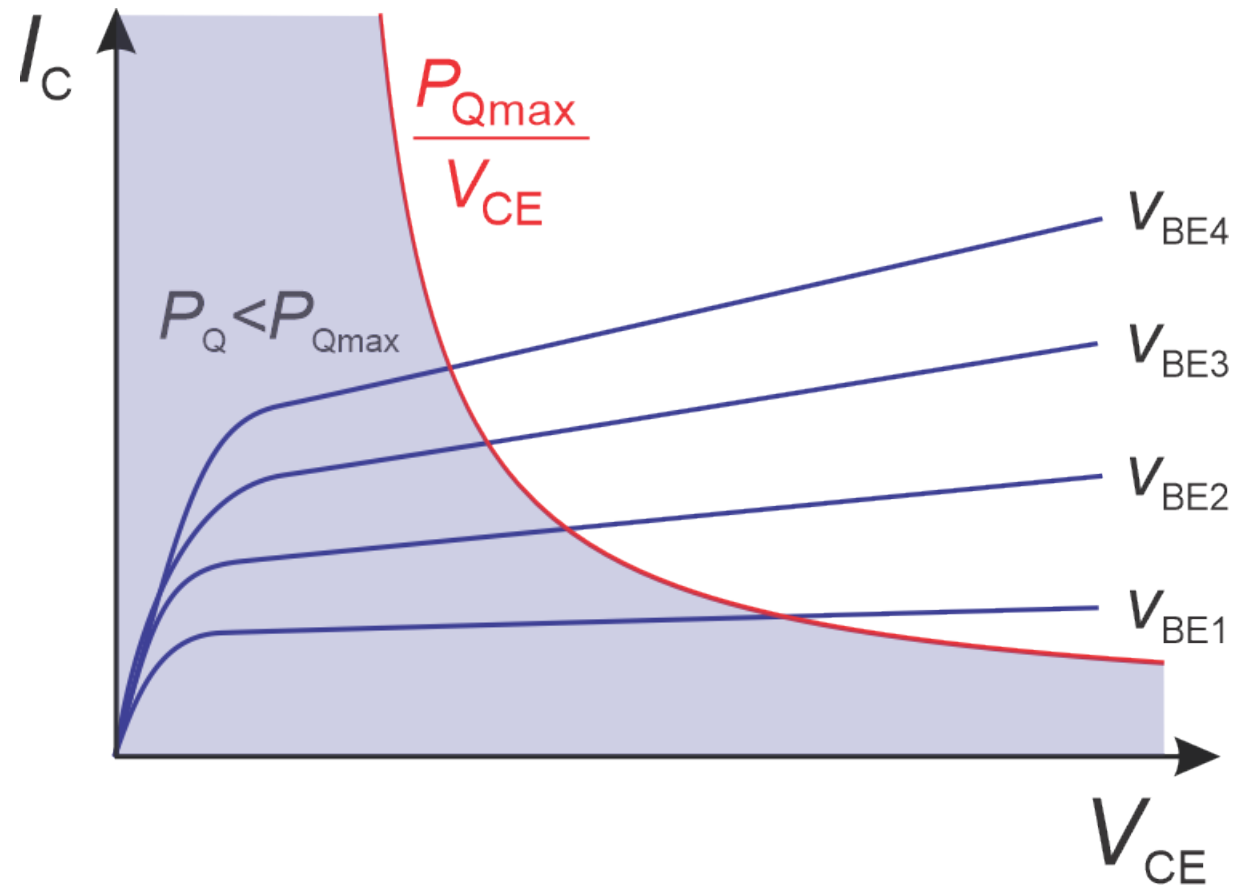
- Disipacija izaziva zagrevanje tranzistora, što može da dovede do oštećenja.
- Maksimalna dozvoljena snaga koja se razvija na tranzistoru se može odrediti prema:

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

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



# 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
- Reprzentacija 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  $\omega$  (frekvencije periodičnog signala koji se analizira).

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

# 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

$\varphi_k$  je faza  $k$ -tog harmonika

$\omega$  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

- Amplitude harmonika:

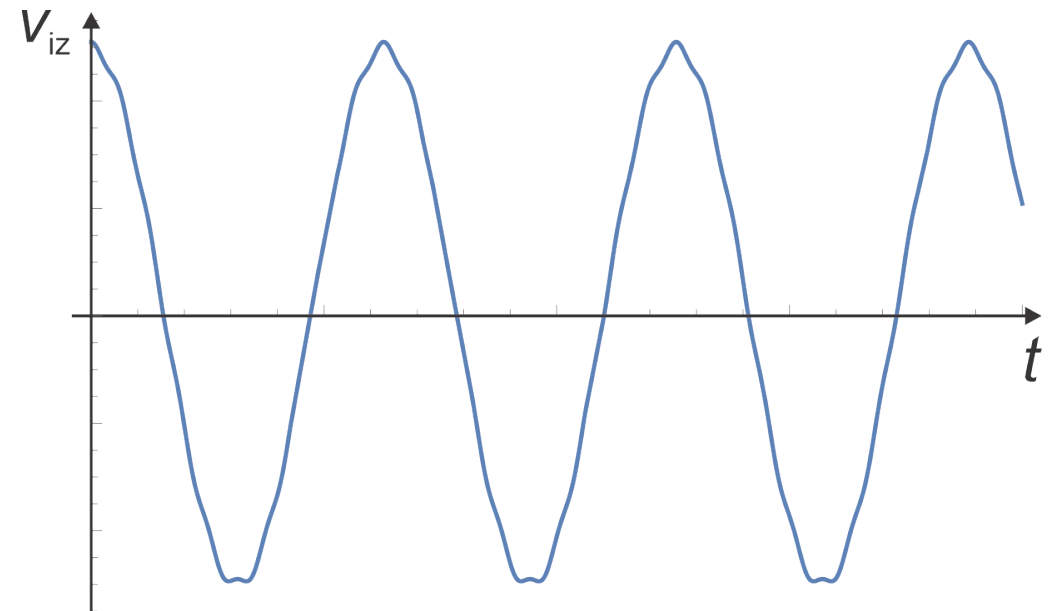
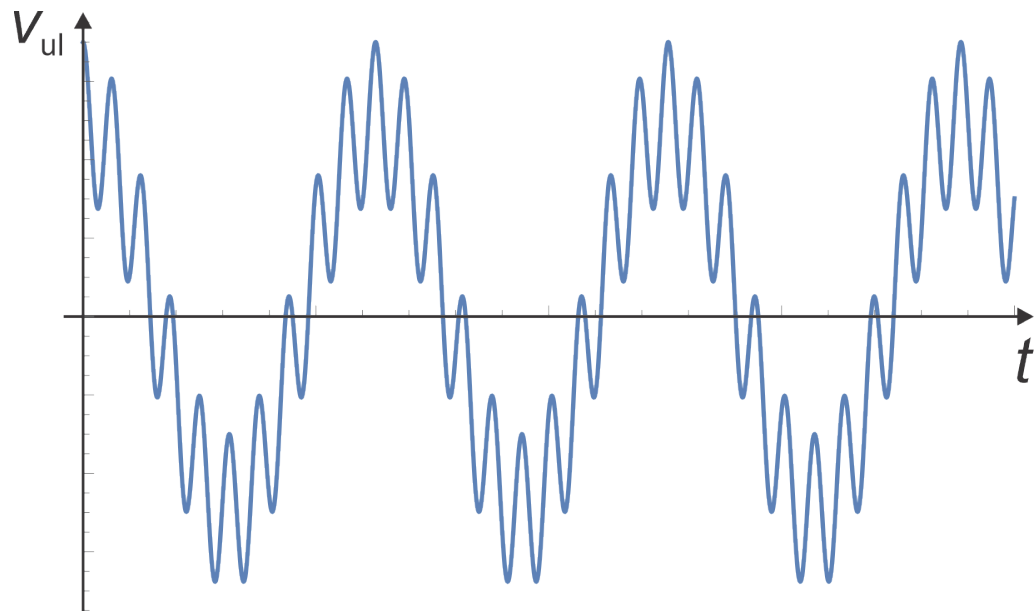
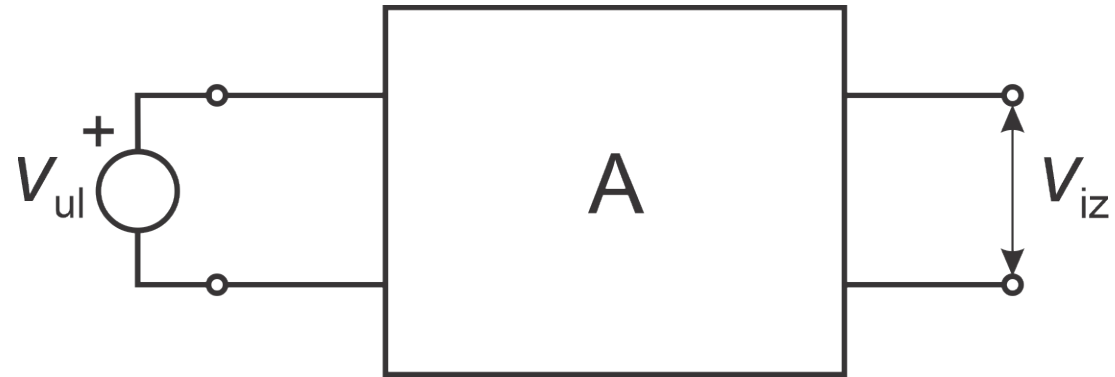
$$v_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

- Faze harmonika:

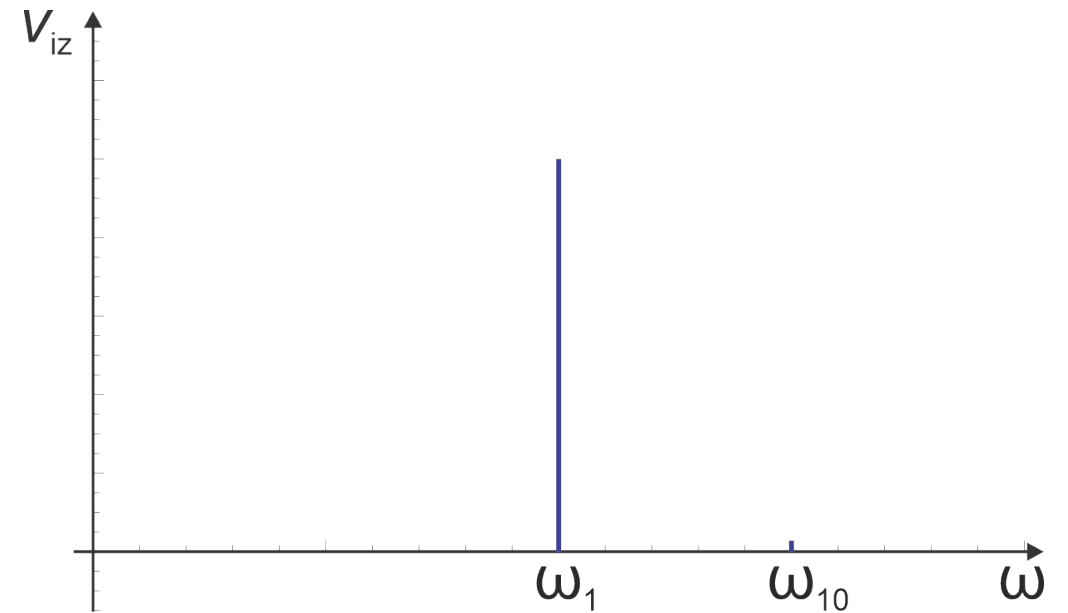
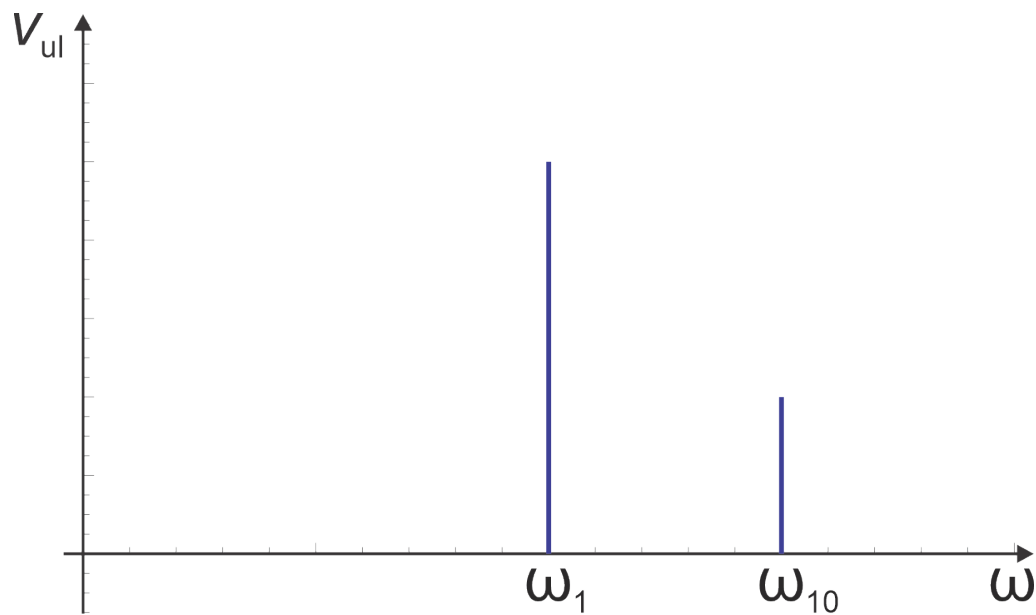
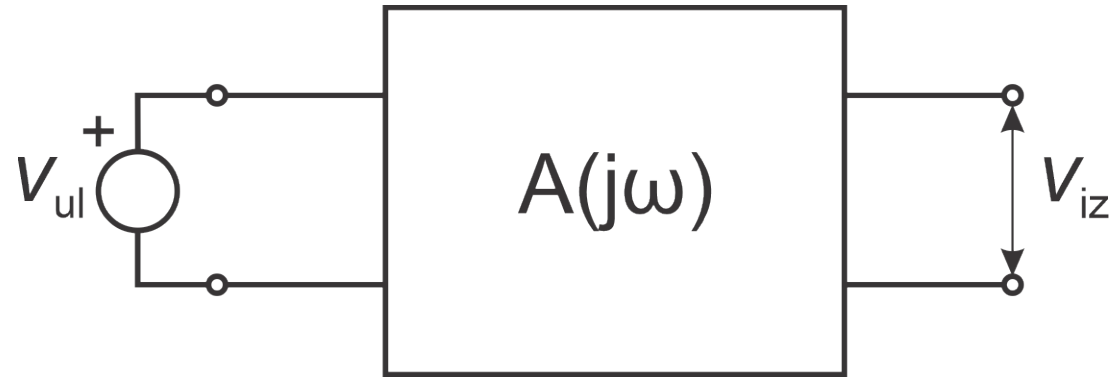
$$\varphi_k = \arctan \frac{b_k}{a_k}$$

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

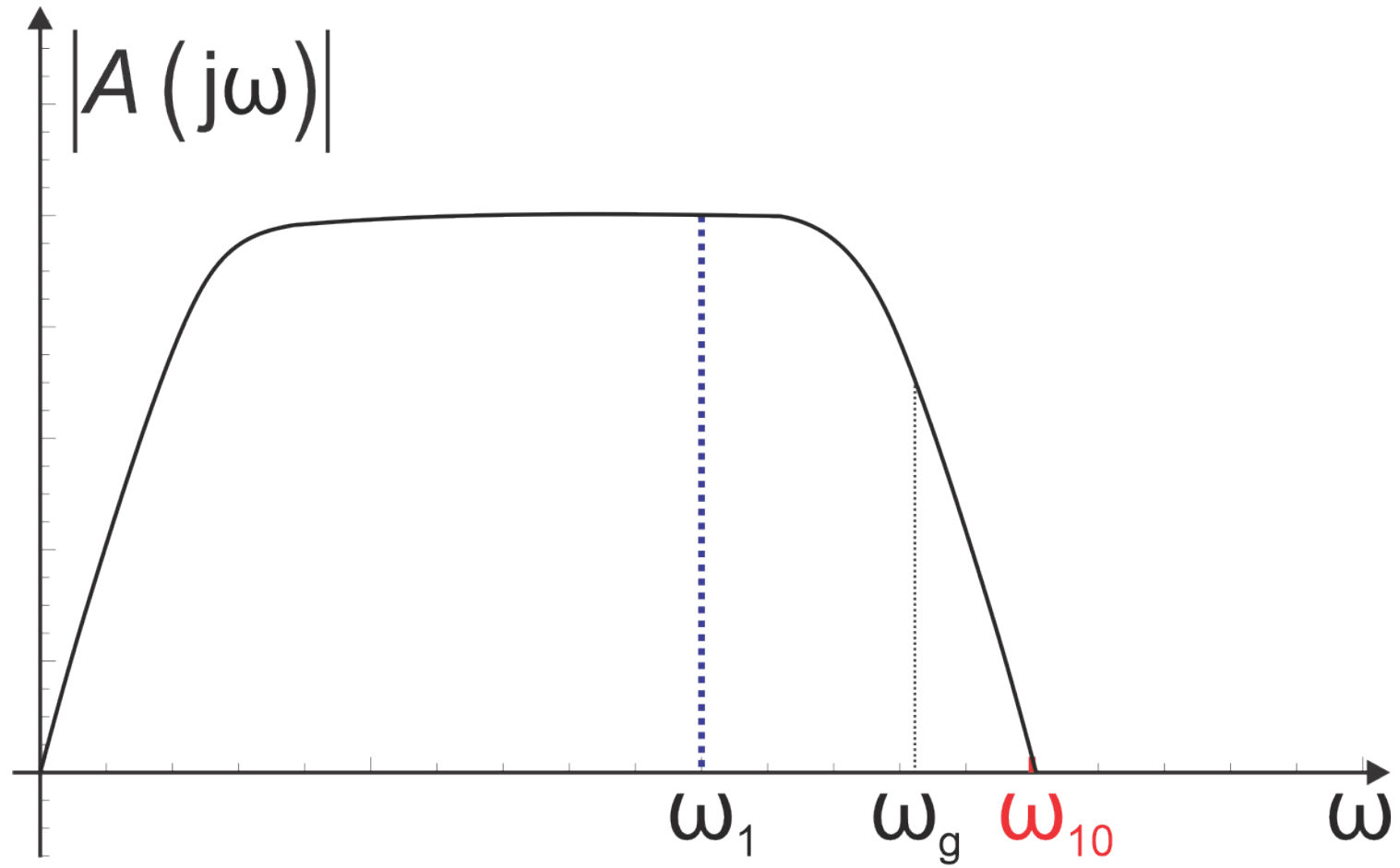
# Izobličenja – frekvenčni odziv



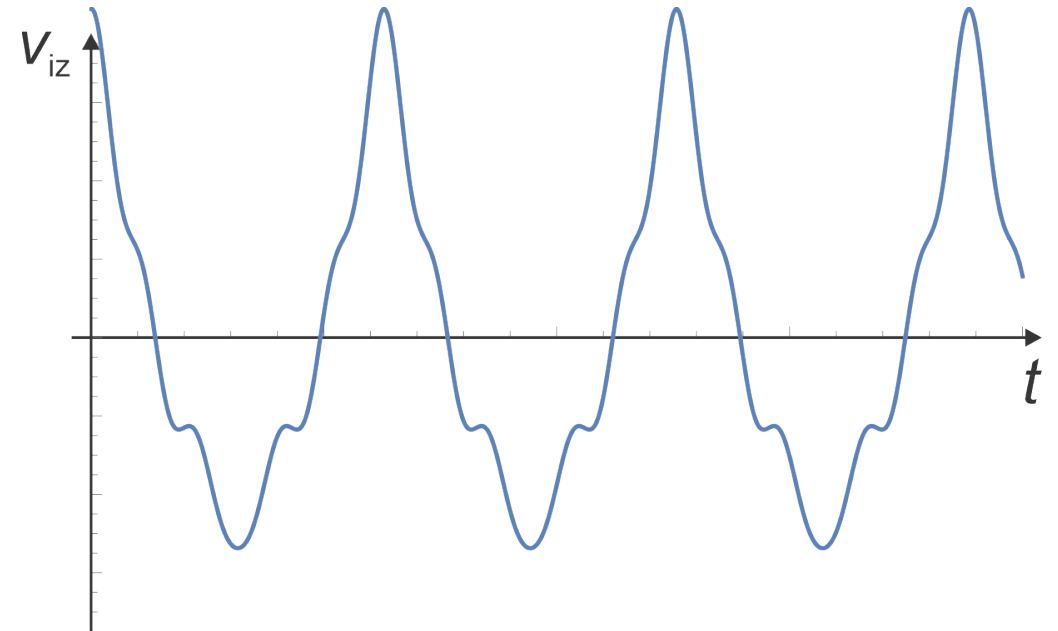
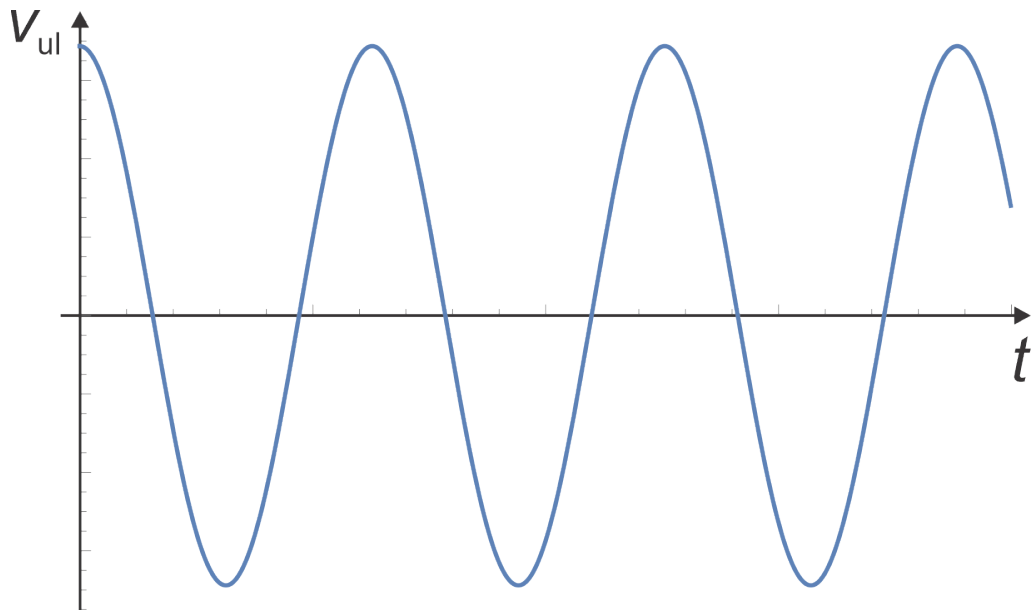
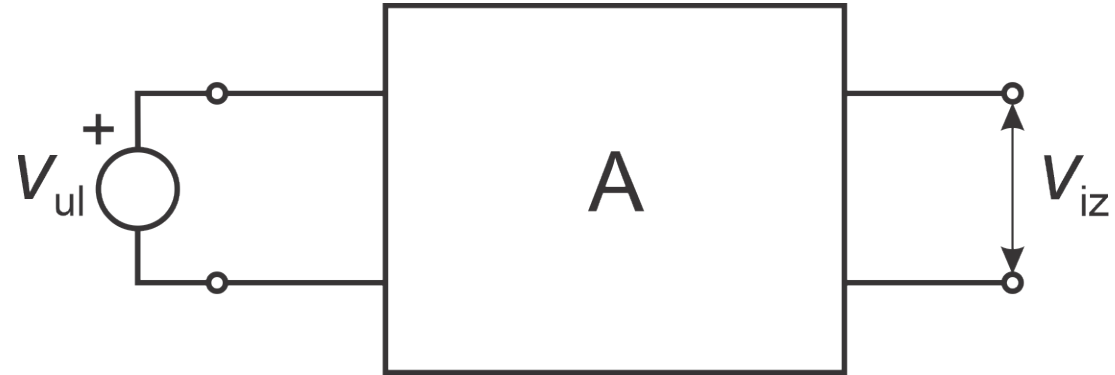
# Izobličenja – frekvenčni odziv



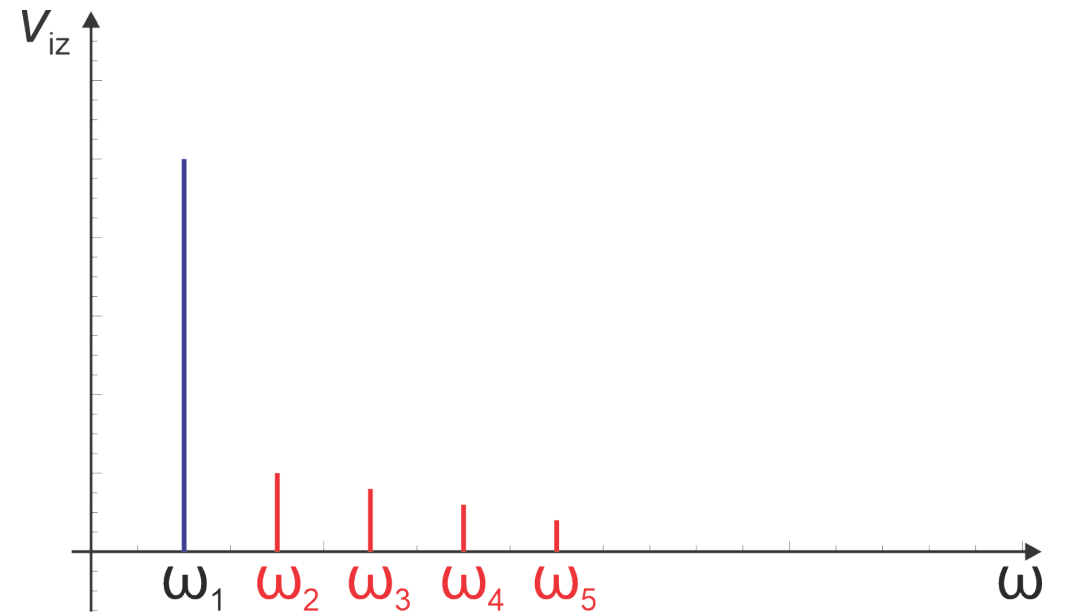
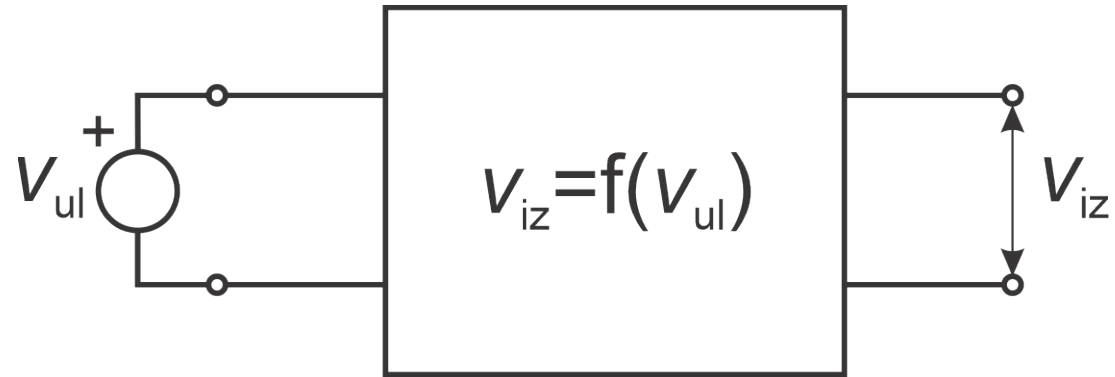
# Izobličenja – frekvenčni odziv



# 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.



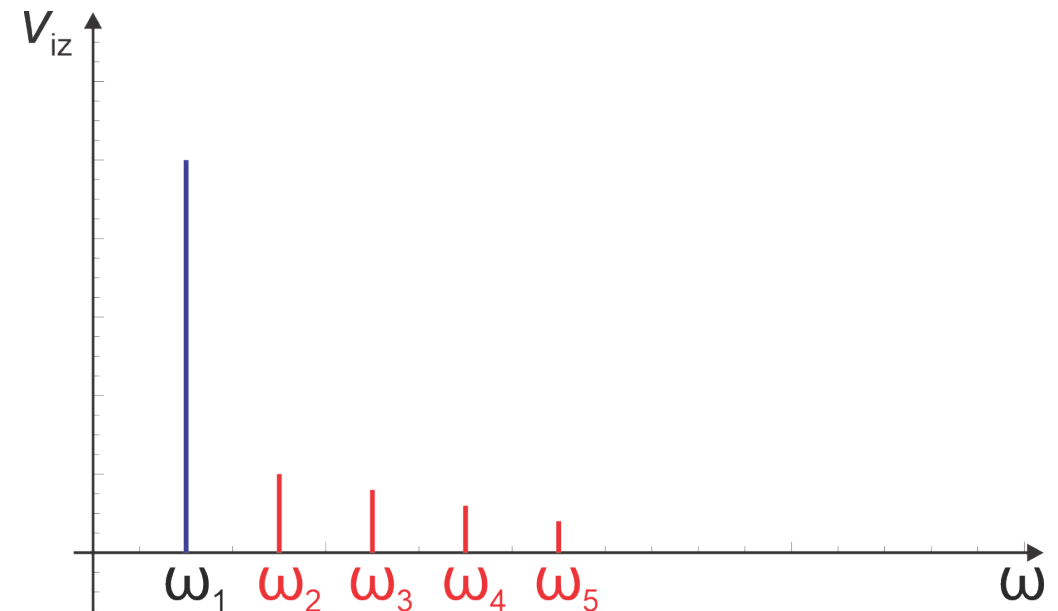
# Faktor izobličenja

- Primer

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

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

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



# 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

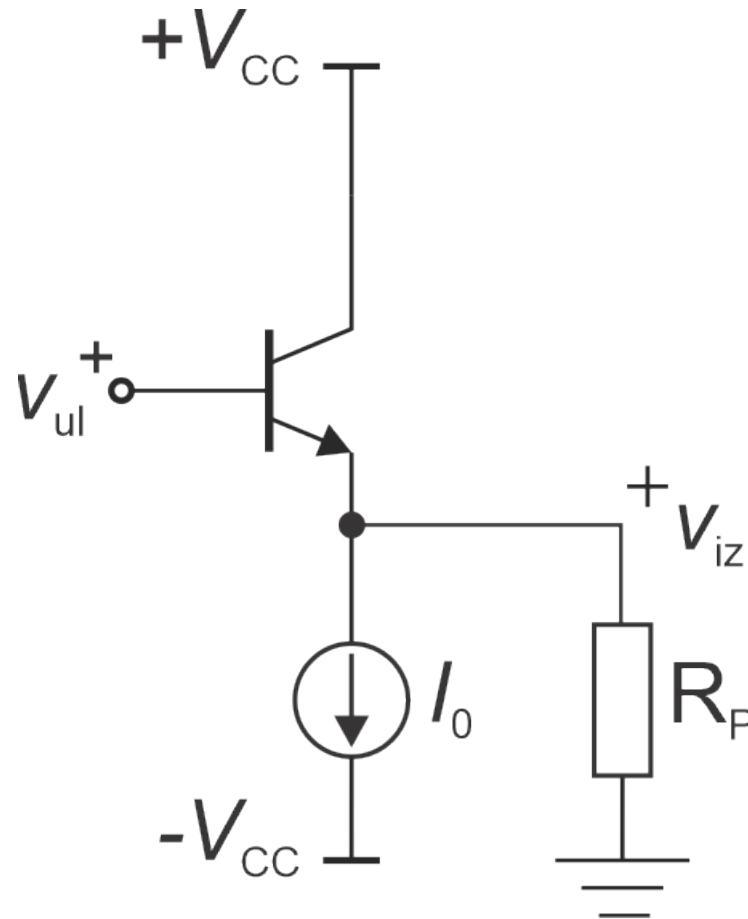
# Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor

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

$$R_{iz} \ll R_P$$

$$I_0 \gg V_T/R_P$$

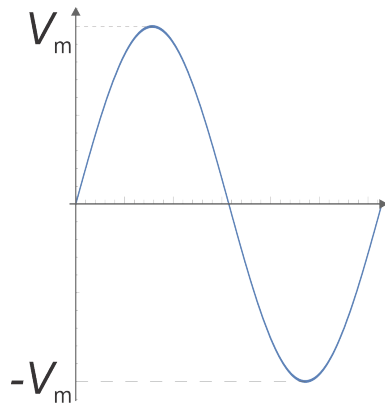
$$I_0 = V_{CC}/R_P$$



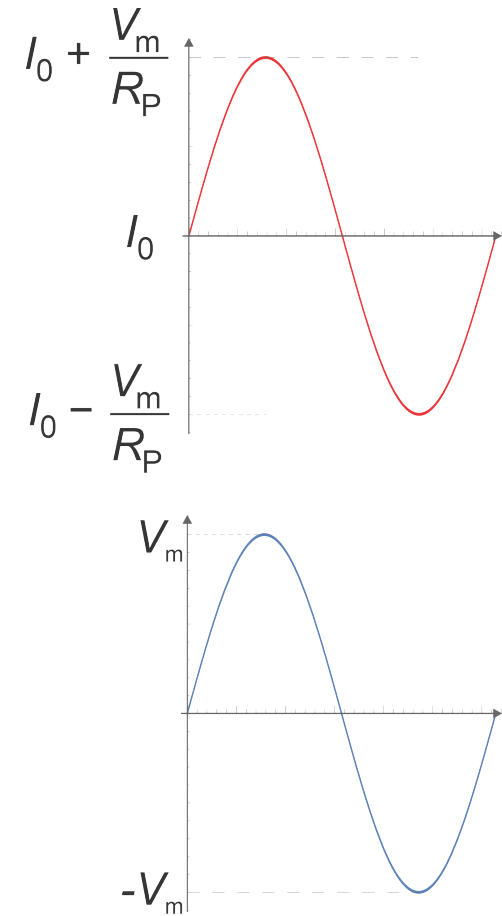
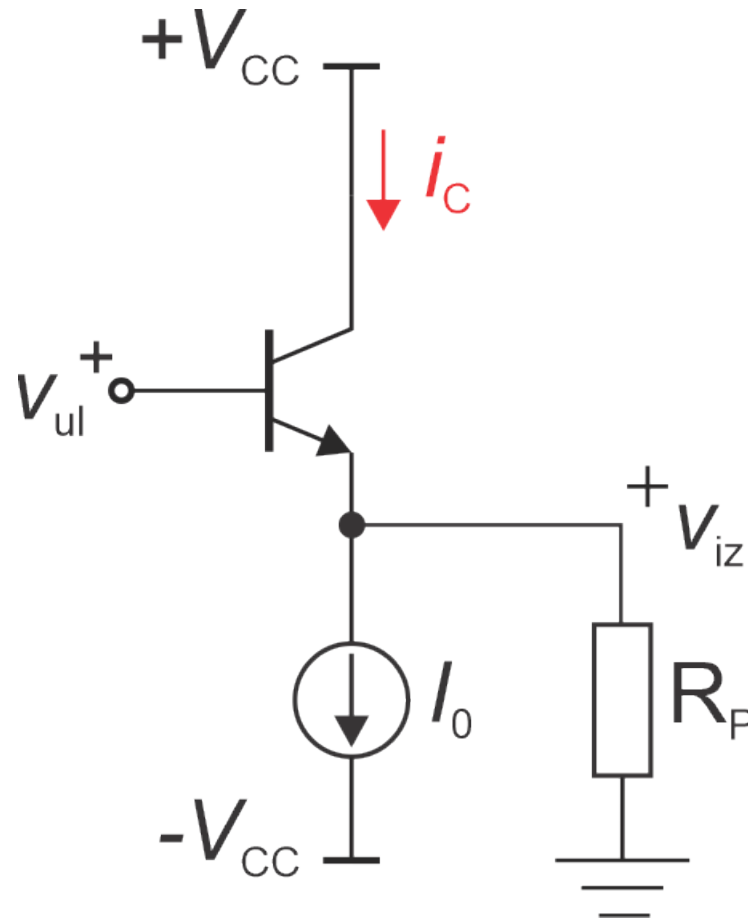
$$\beta \gg 1, \quad I_0 \approx I_{C0}$$

$$V_{BE} \approx 0$$

# Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor



$$V_{CC} \geq V_m$$

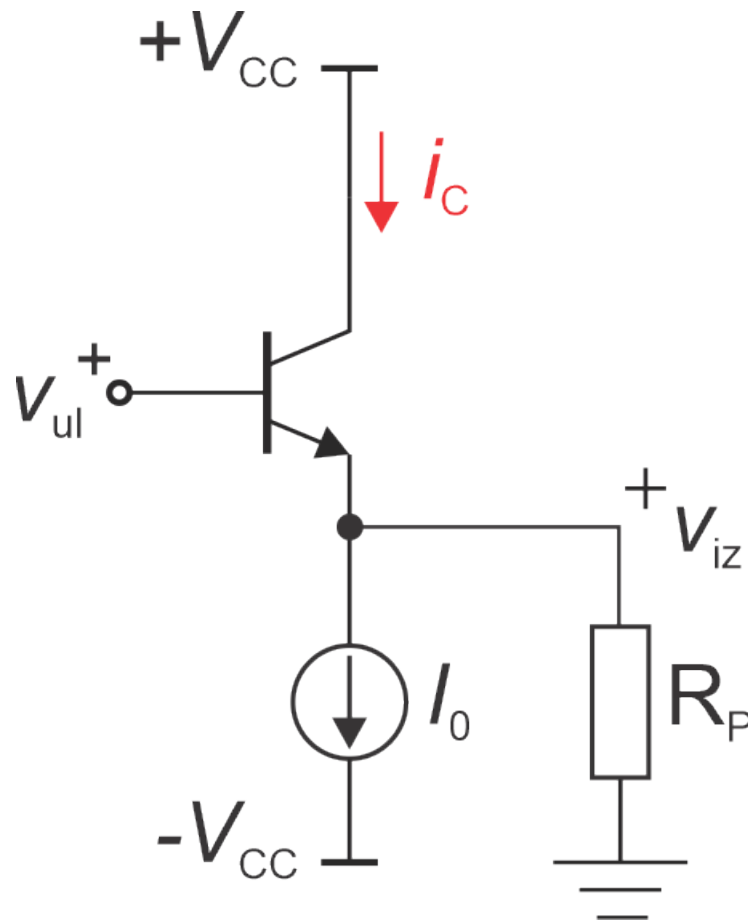


# Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor

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

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

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



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

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

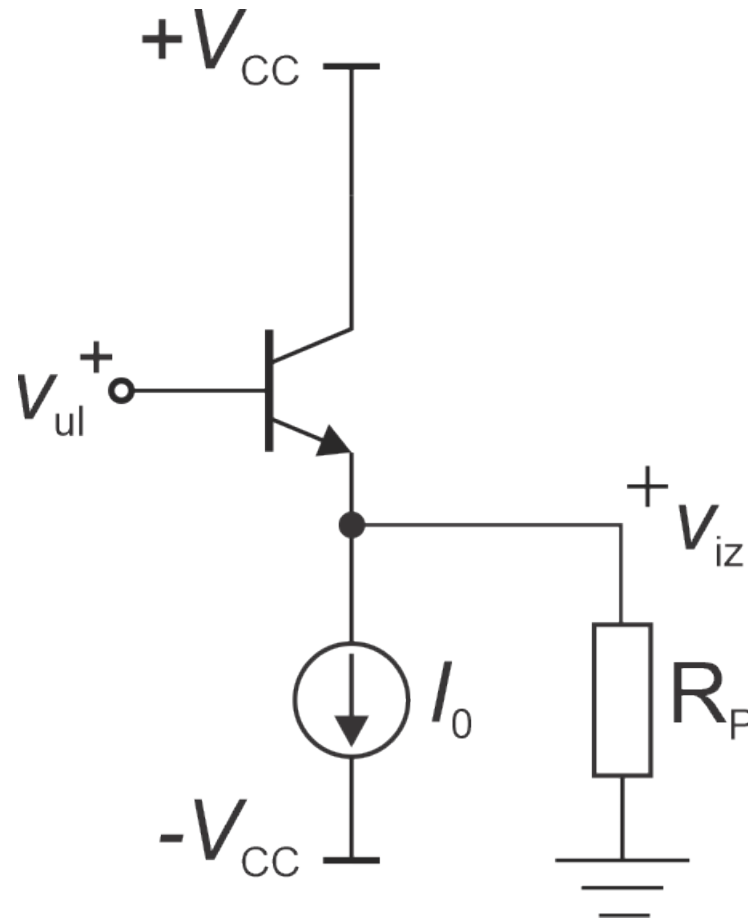
$$P_P = \frac{V_{iz,ef}^2}{R_P} = \frac{V_m^2}{2R_P}$$

# Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor

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

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

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



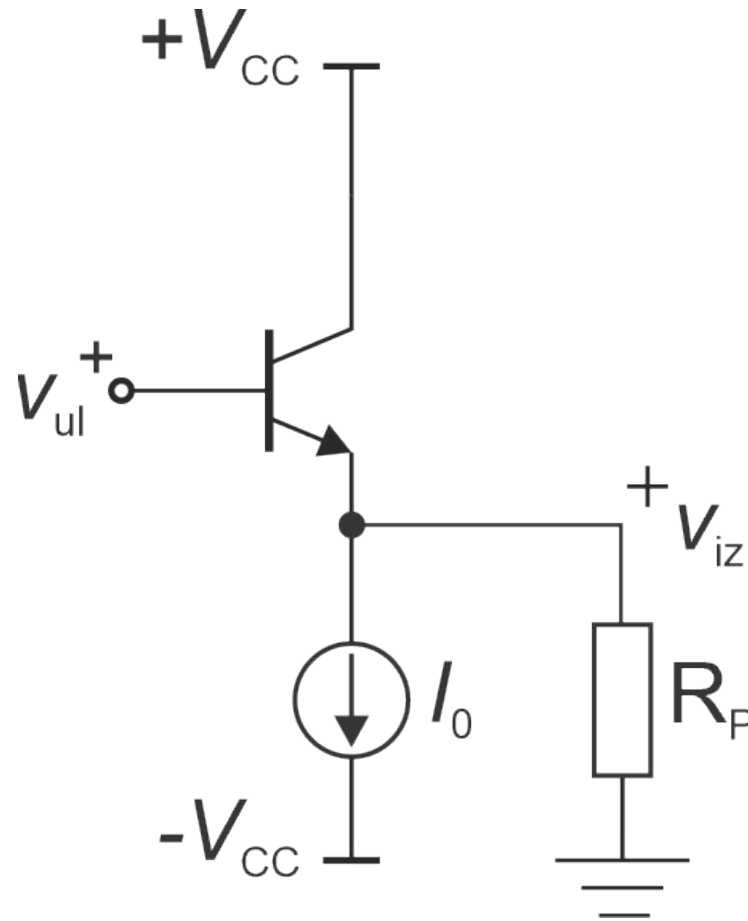
- Koeficijent iskorišćenja

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

# Pojačavači u klasi A, zajednički kolektor

$$P_Q = P_B - P_P$$

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



- Disipacija na tranzistoru

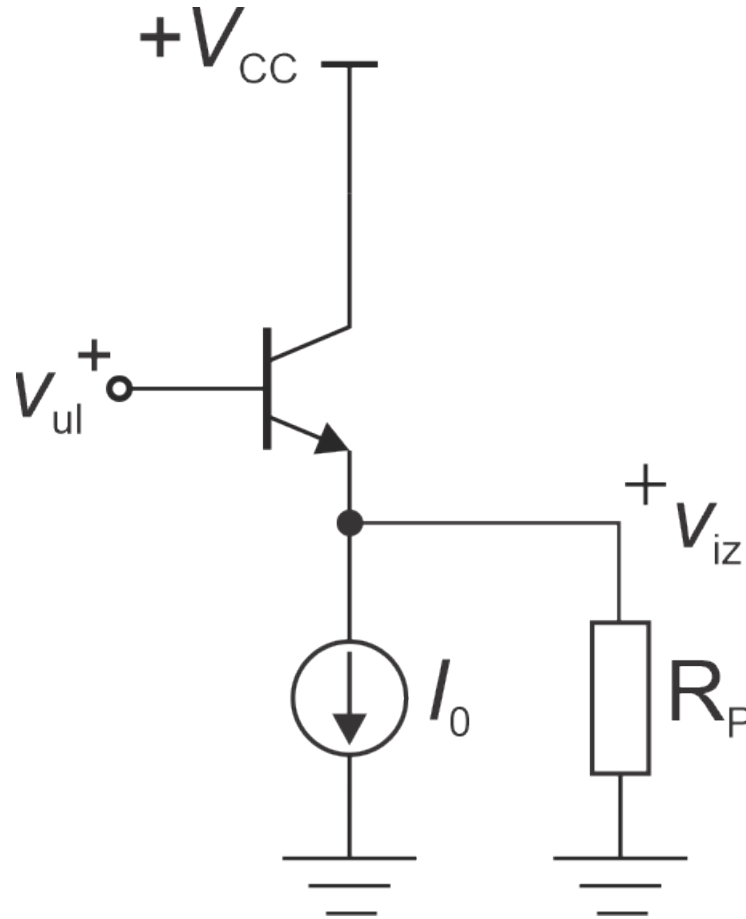
# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

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

$$R_{iz} \ll R_P$$

$$I_0 \gg V_T/R_P$$

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

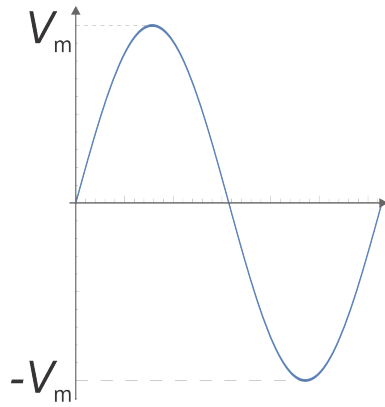


$$\beta \gg 1, \quad I_0 \approx I_{C0}$$

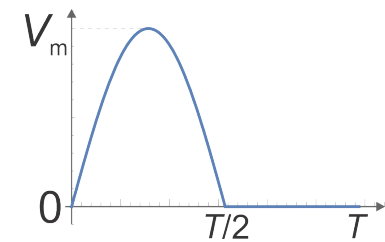
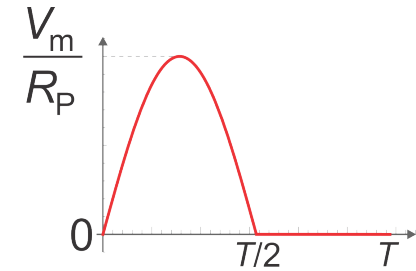
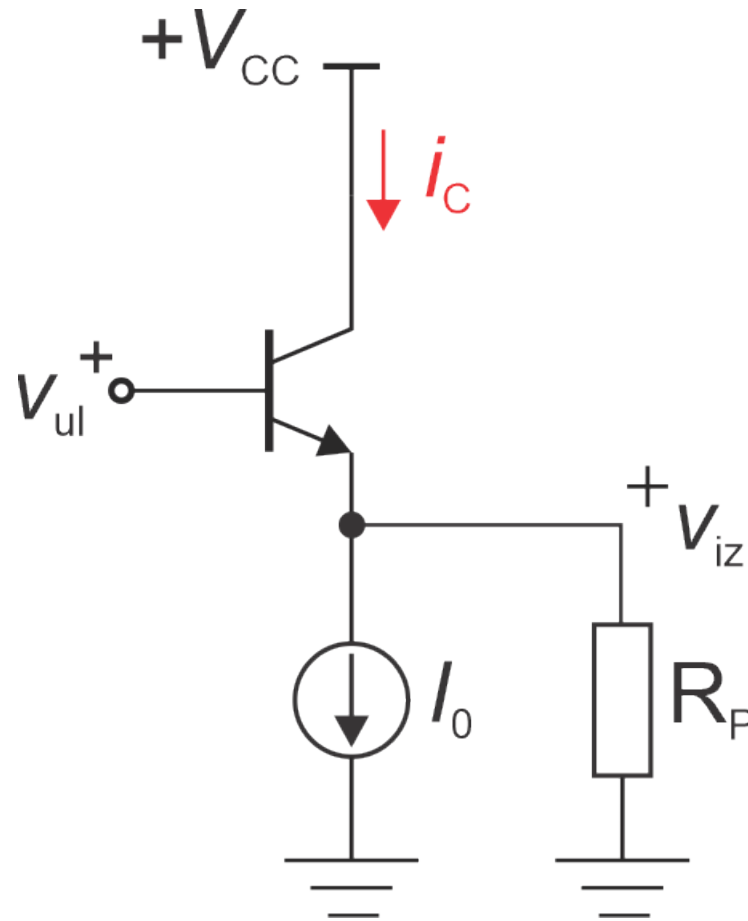
$$V_{BE} \approx 0$$



# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor



$$V_{CC} \geq V_m$$

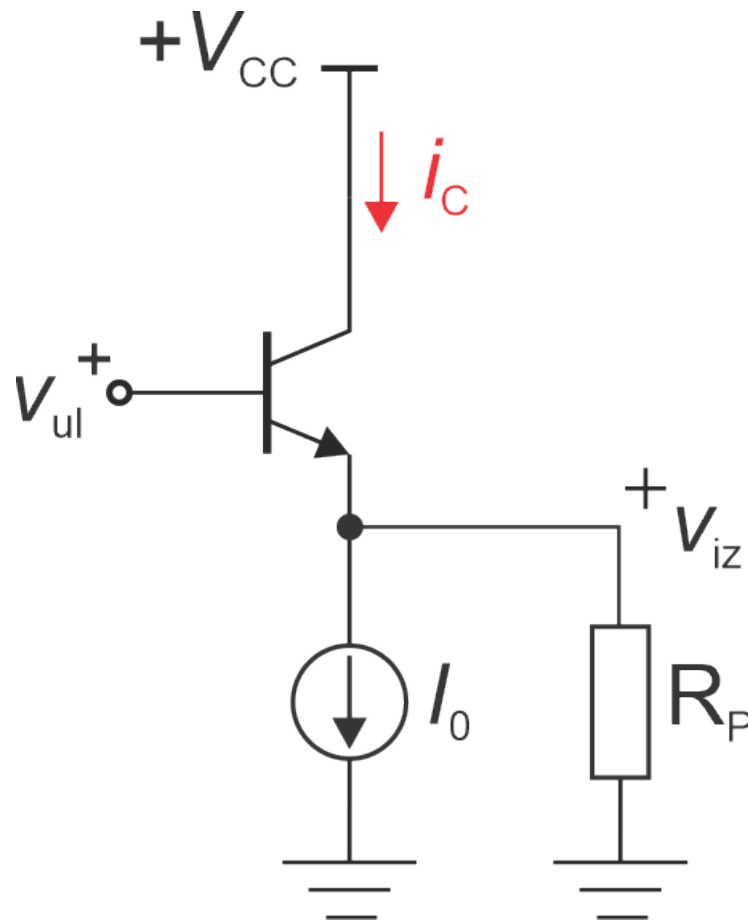


# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

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

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

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



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

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

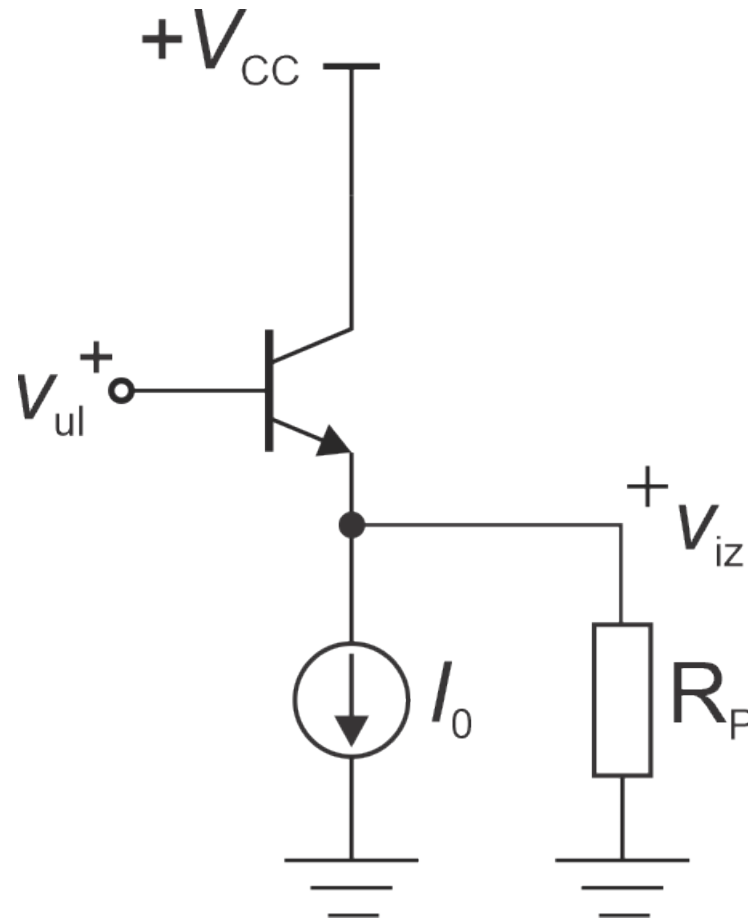
$$P_P = \frac{V_m^2}{4R_P}$$

# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

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

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

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



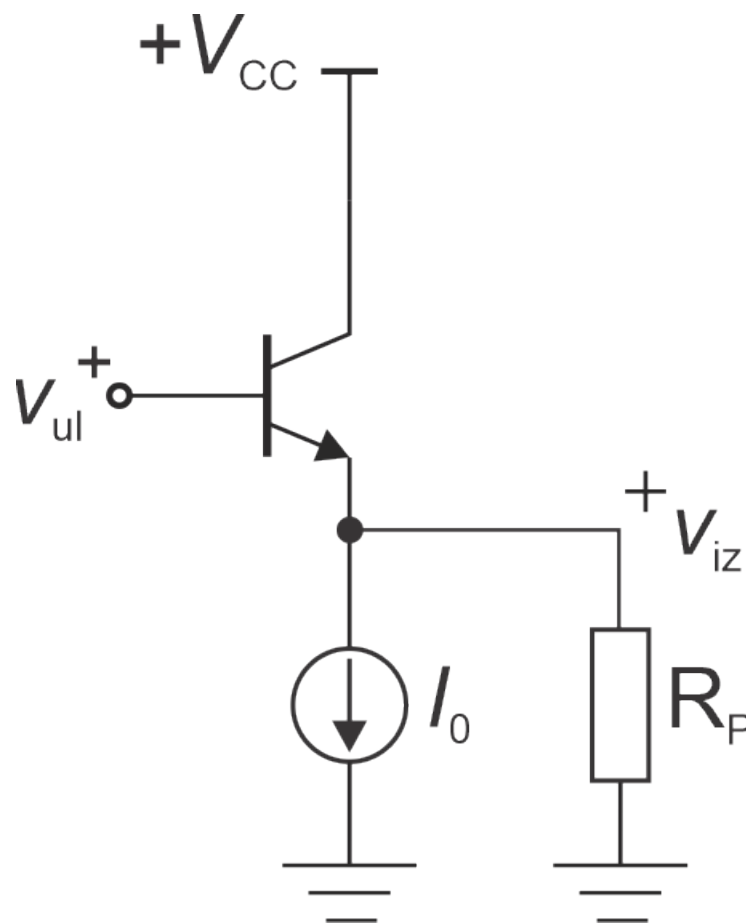
- Koeficijent iskorišćenja

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

# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

- Disipacija na tranzistoru

$$P_Q = P_B - P_P$$
$$P_Q = \frac{V_{CC}V_m}{\pi R_P} - \frac{V_m^2}{4R_P} =$$
$$= \frac{V_m}{R_P} \left( \frac{V_{CC}}{\pi} - \frac{V_m}{4} \right)$$

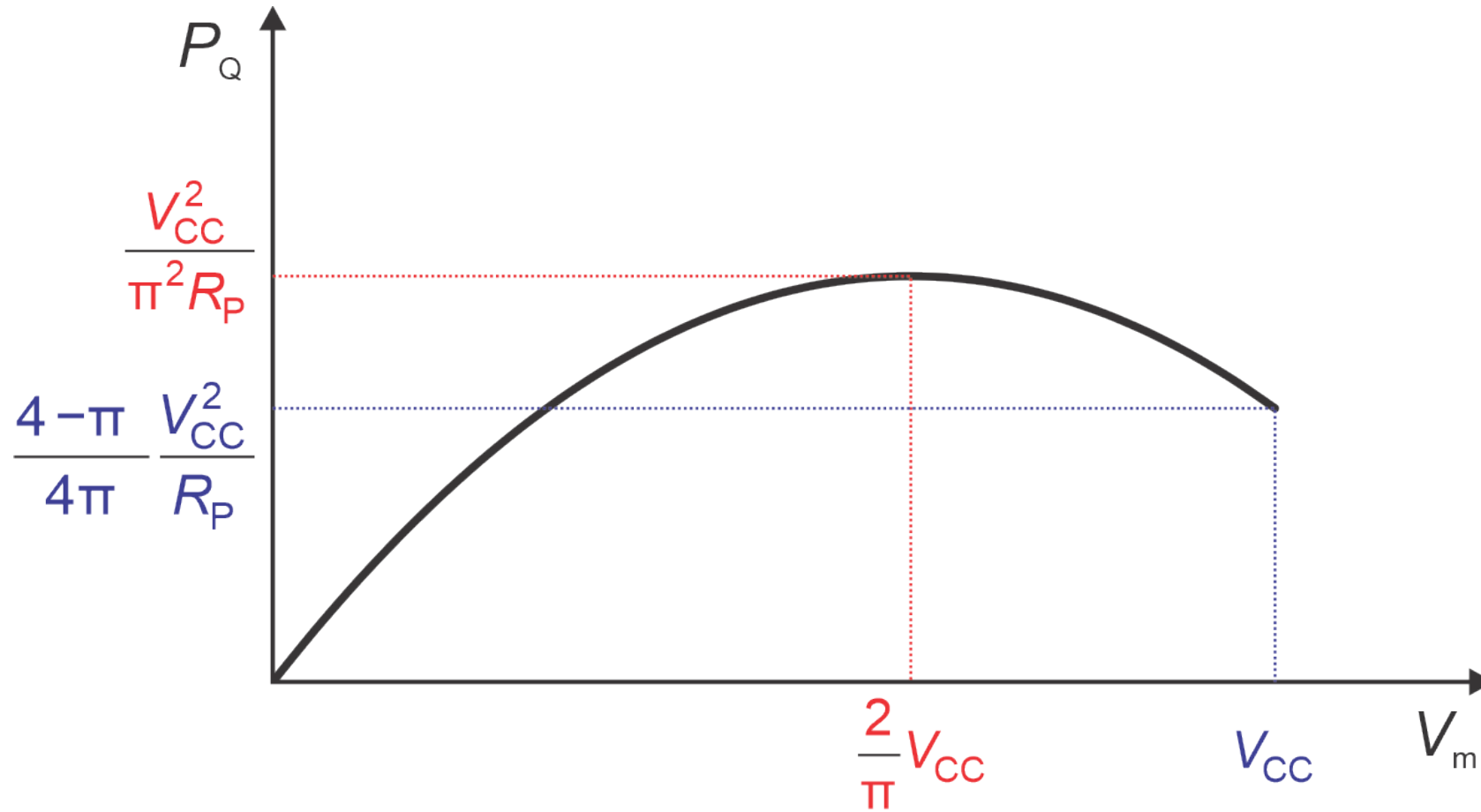


$$V_m = 0, \quad P_{Q\min} = 0$$

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

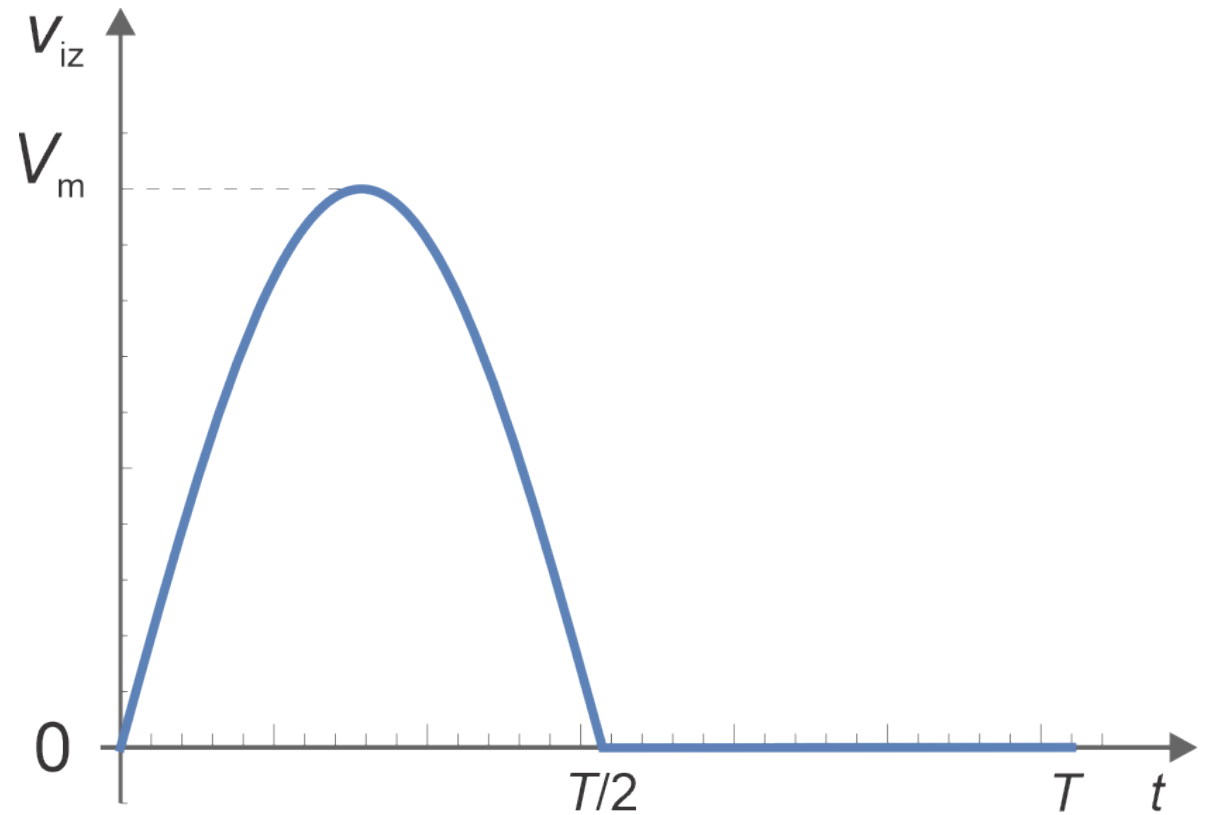
$$V_m = \frac{2}{\pi} V_{CC}, \quad P_{Q\max} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_P}$$

# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor



# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

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



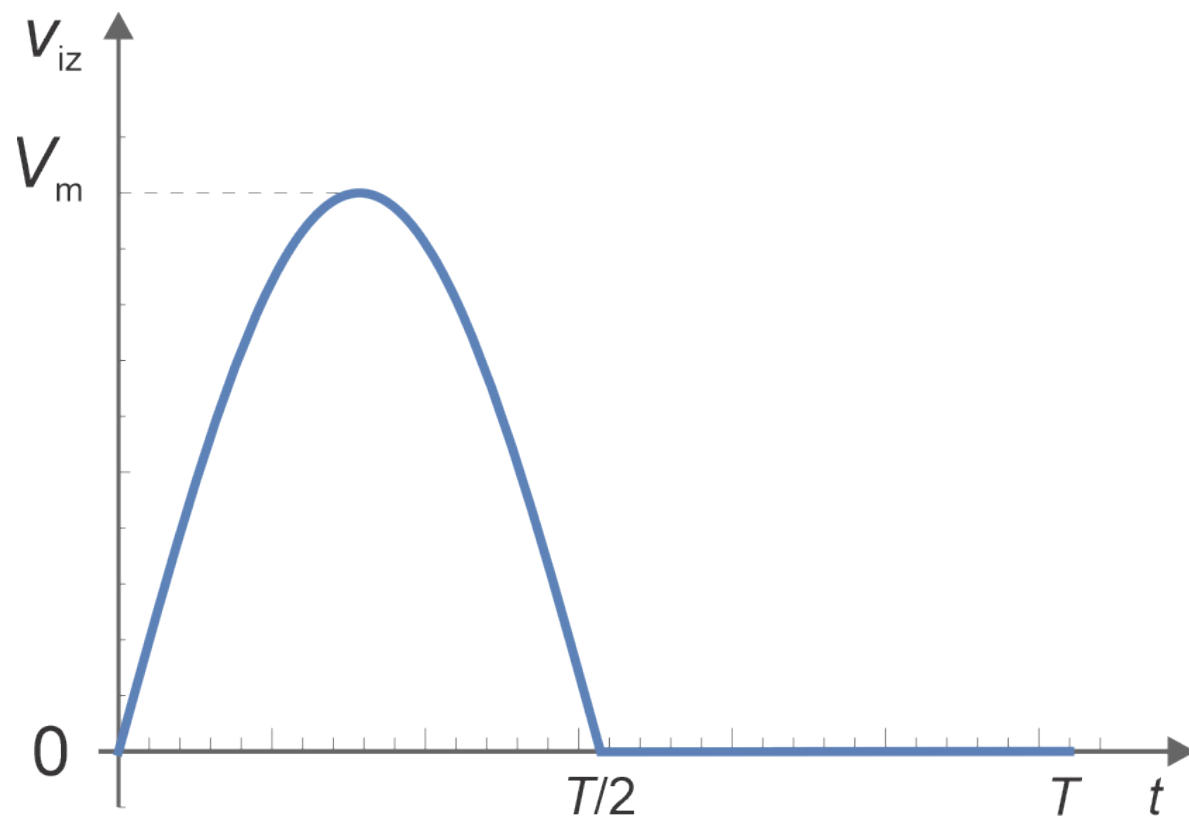
# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

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

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

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

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

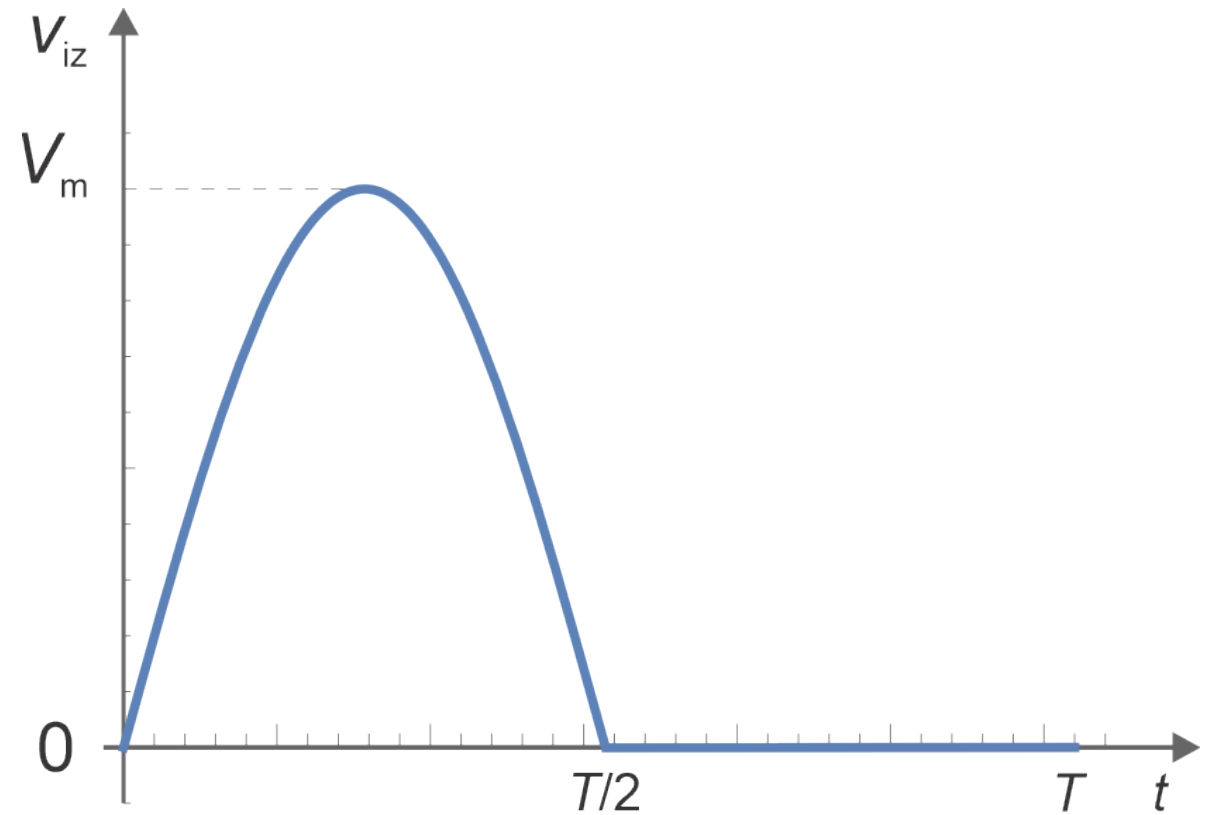


# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

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

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

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



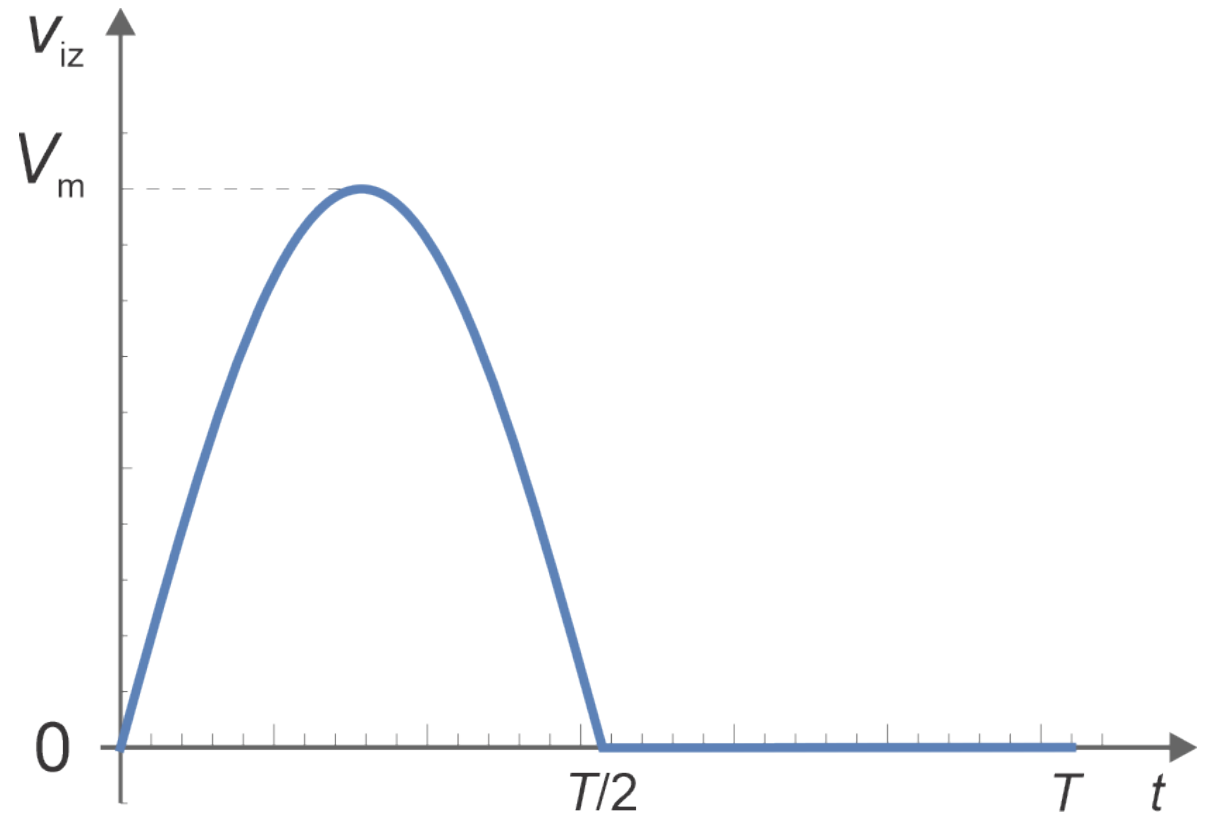


# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

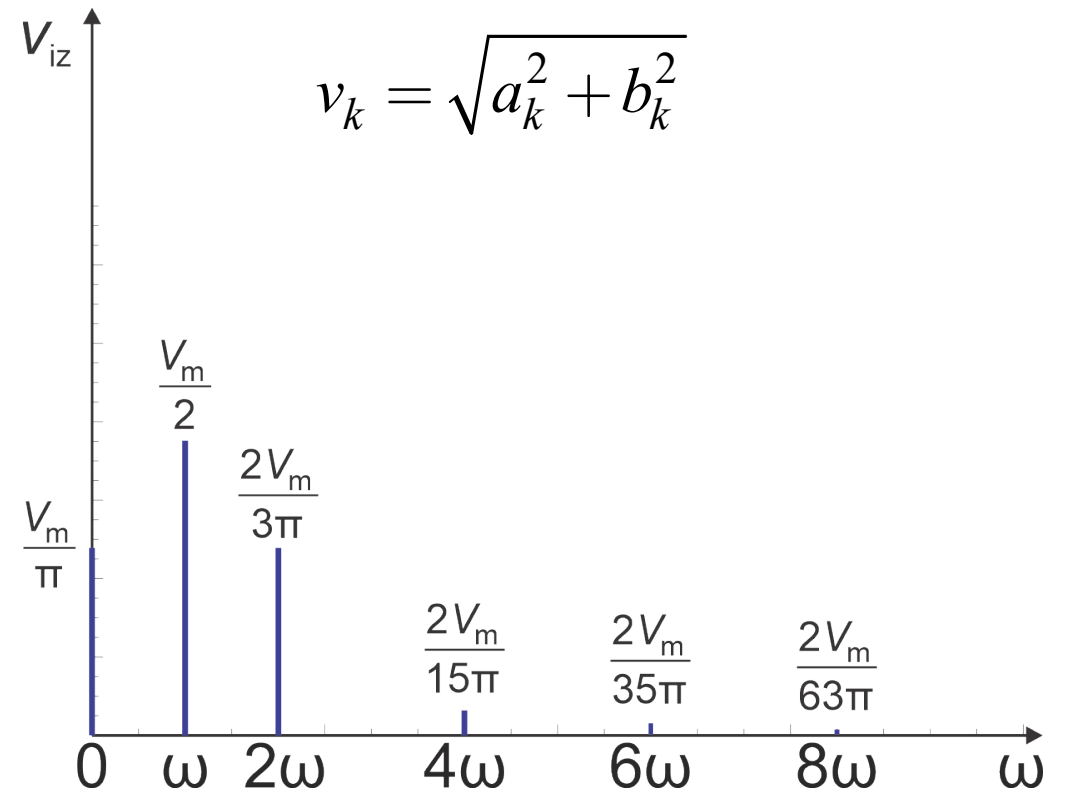
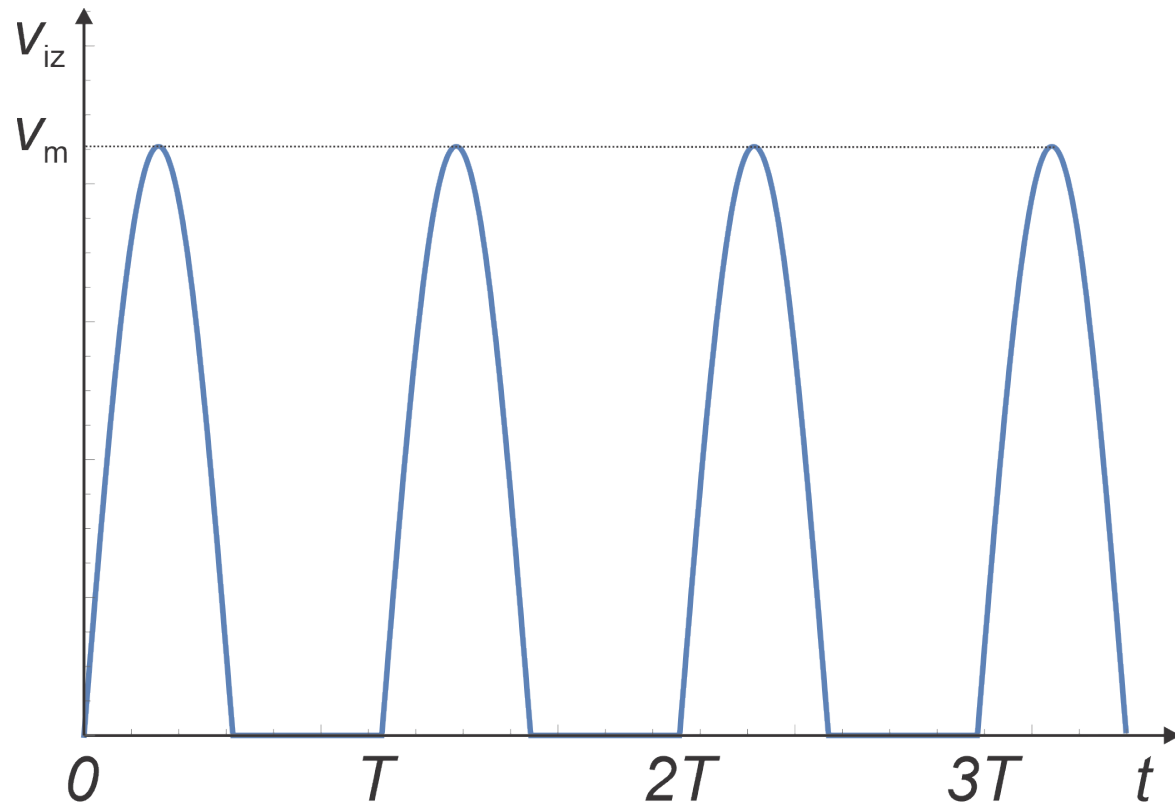
$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T \sin k\omega t \cdot v_{iz}(t) dt$$

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

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



# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor



$$v_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

# Pojačavači u klasi B, zajednički kolektor

- Faktor izobličenja

$$\text{THD} [\%] = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} v_k^2}}{v_1} [\%]$$

$$v_1 = b_1 = \frac{V_m}{2}$$

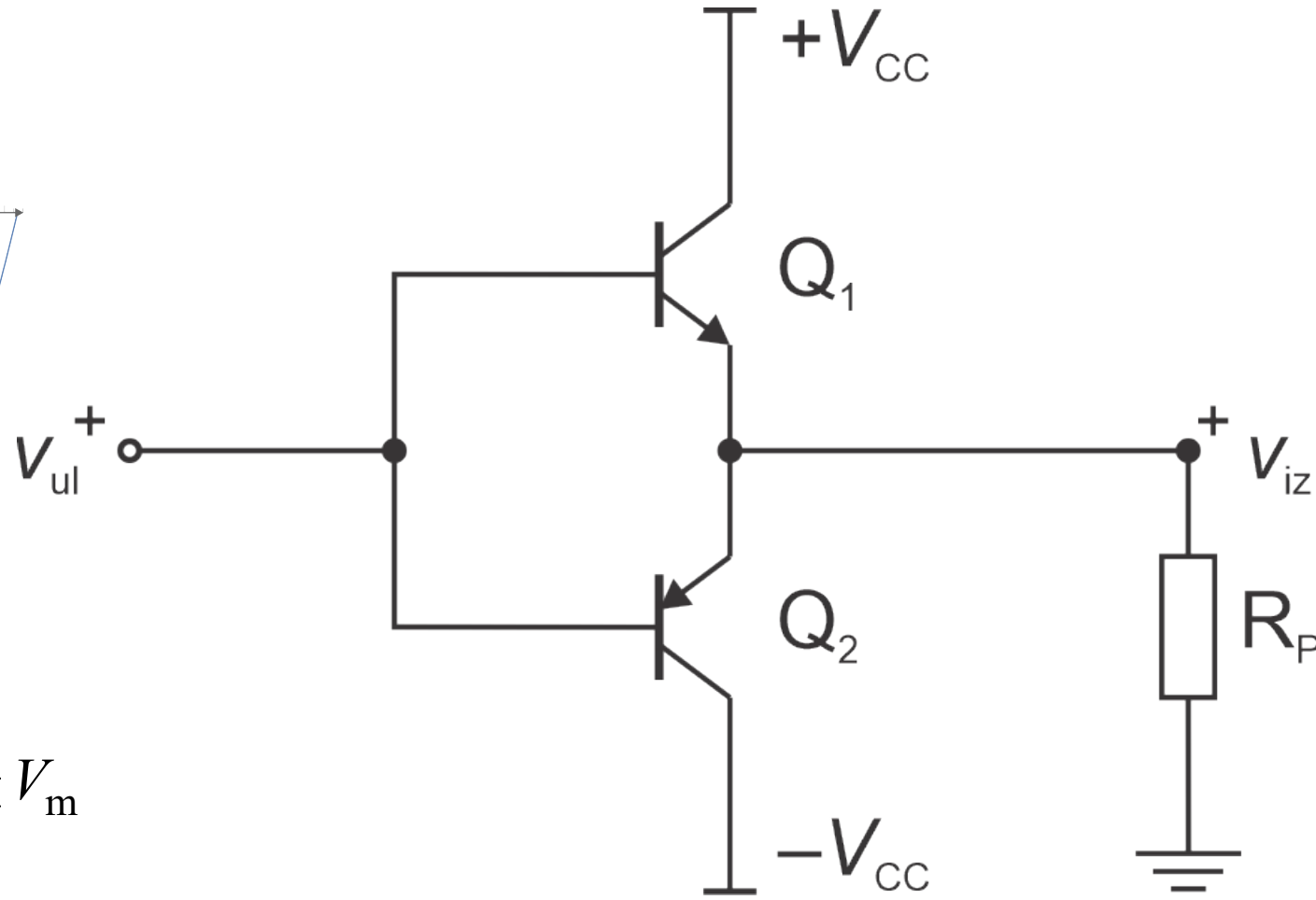
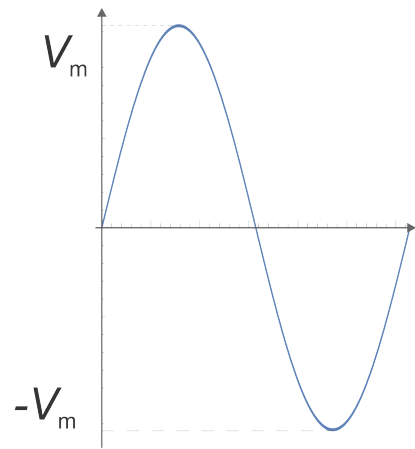
$$v_k = a_k = \frac{2V_m}{\pi} \frac{1}{k^2 - 1}, \quad k \text{ parno}$$

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

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

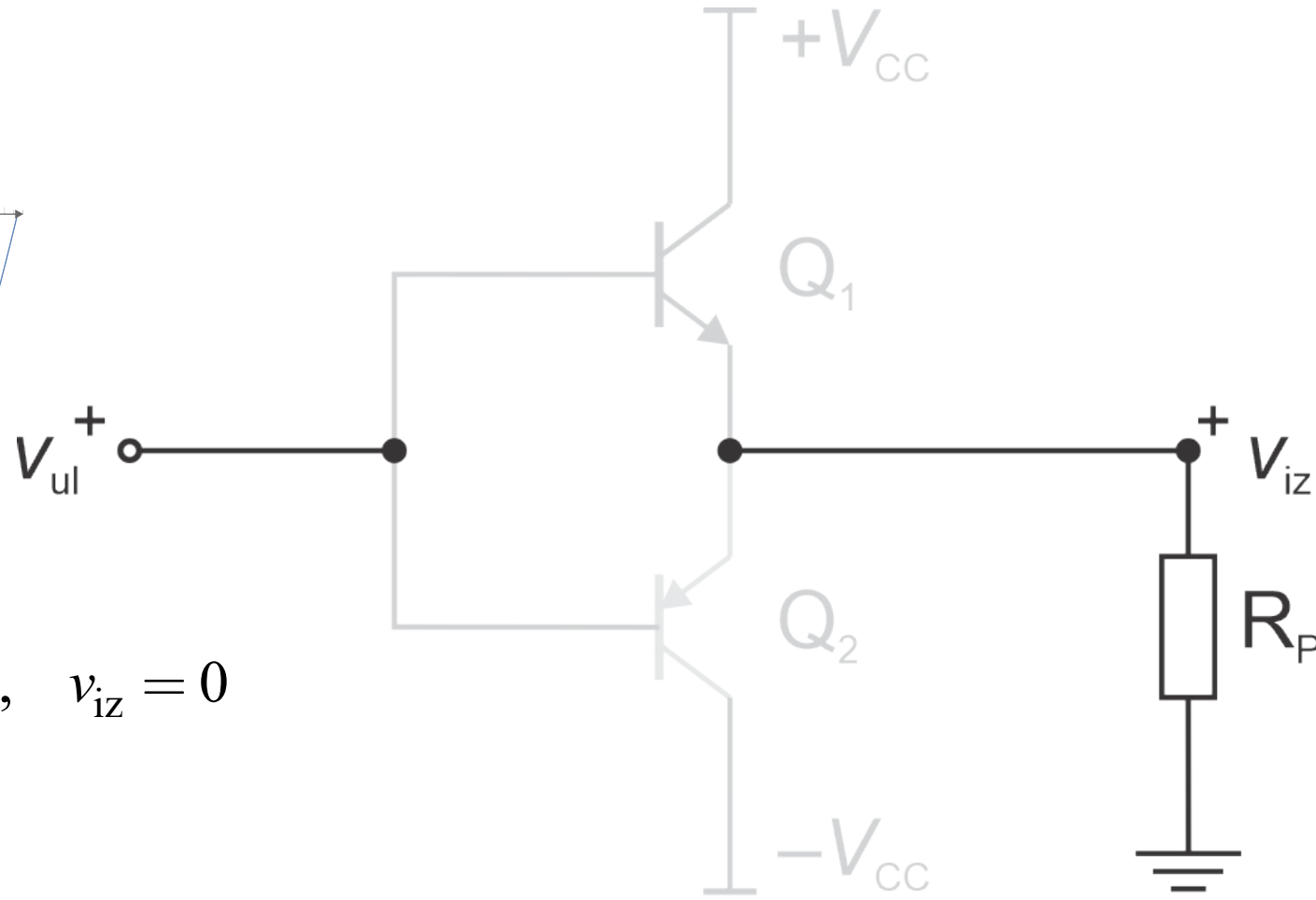
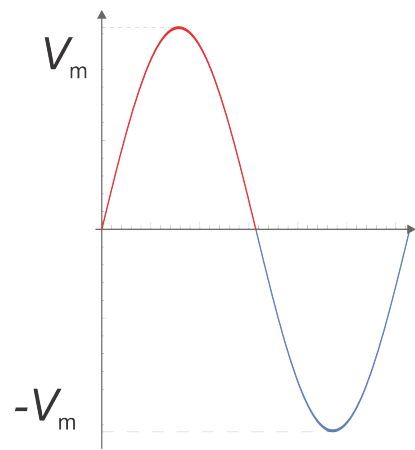
$$\text{THD} = 43,52\%$$

# Push-pull pojačavači



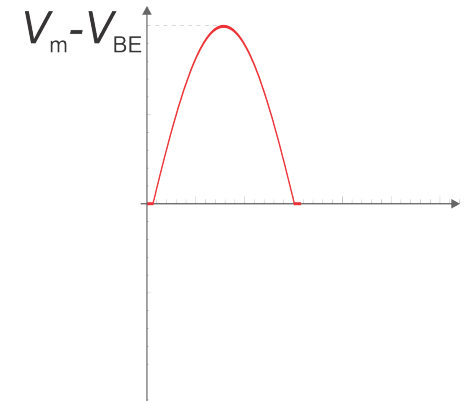
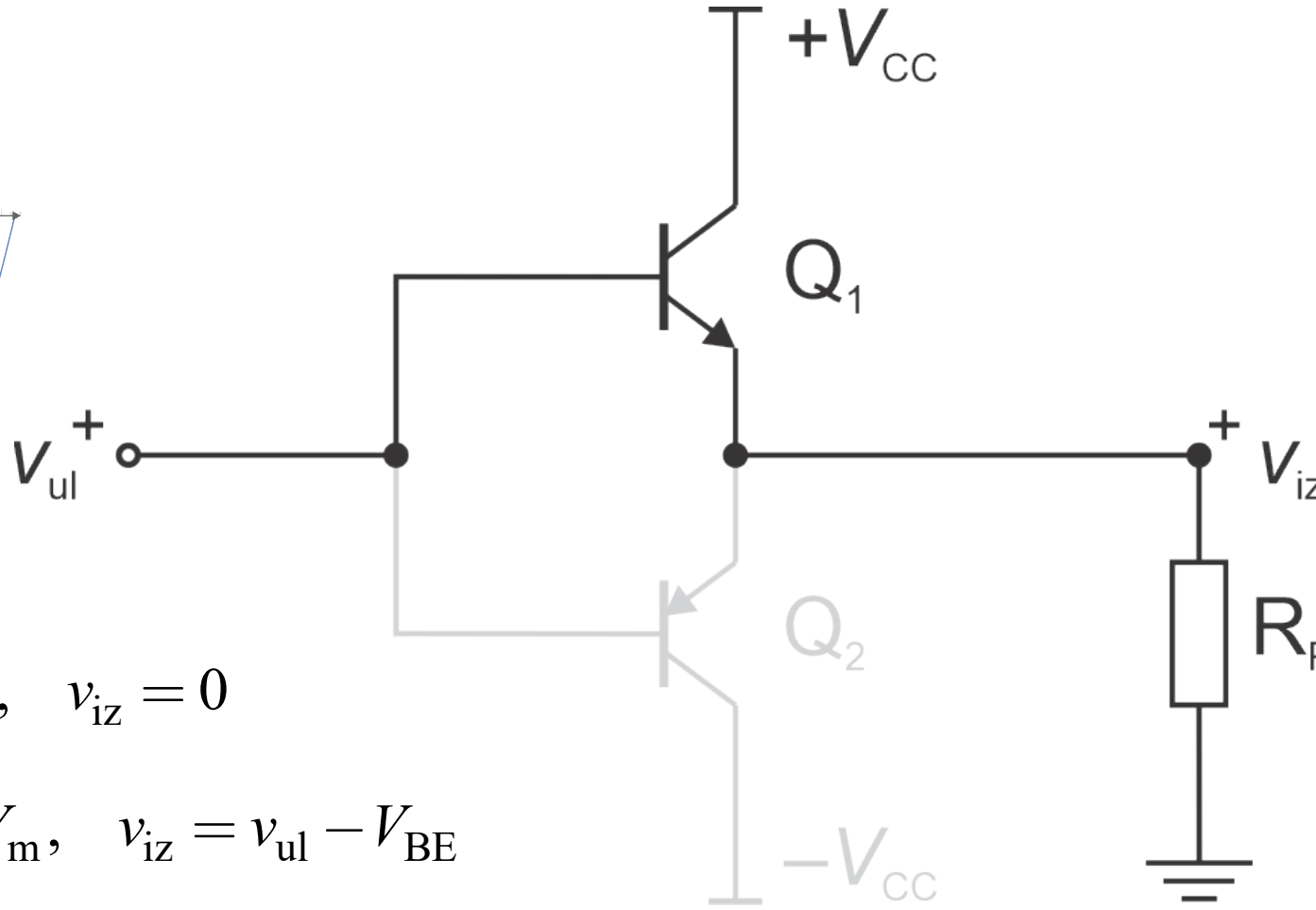
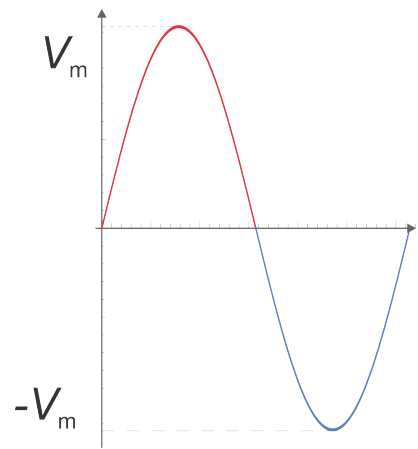
$$V_{CC} \geq V_m$$

# Push-pull pojačavači



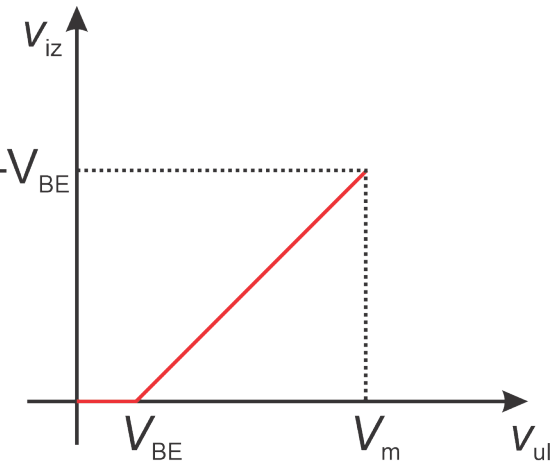
$$0 \leq v_{ul} \leq V_{BE}, \quad v_{iz} = 0$$

# Push-pull pojačavači

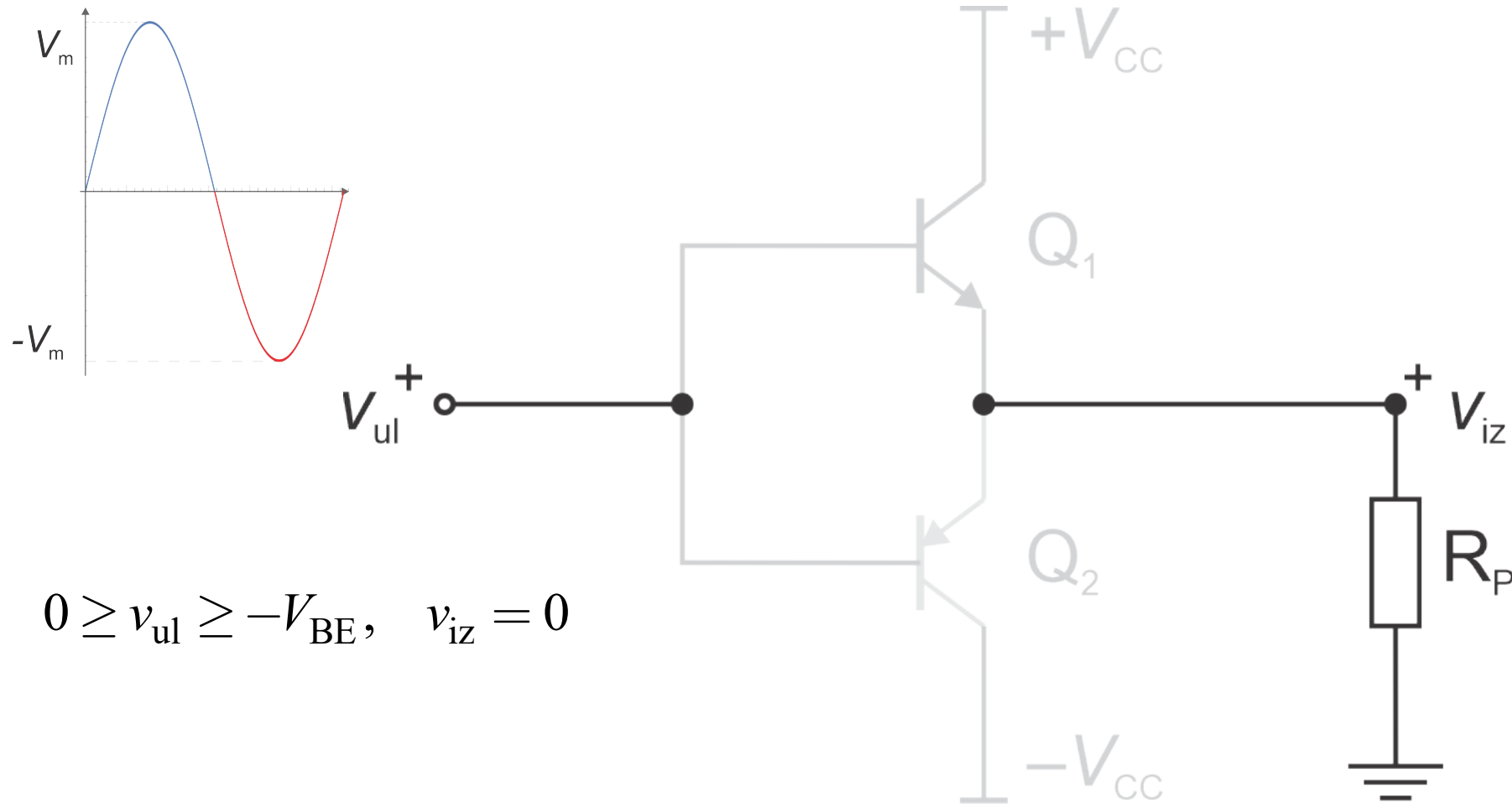


$$0 \leq v_{ul} \leq V_{BE}, \quad v_{iz} = 0$$

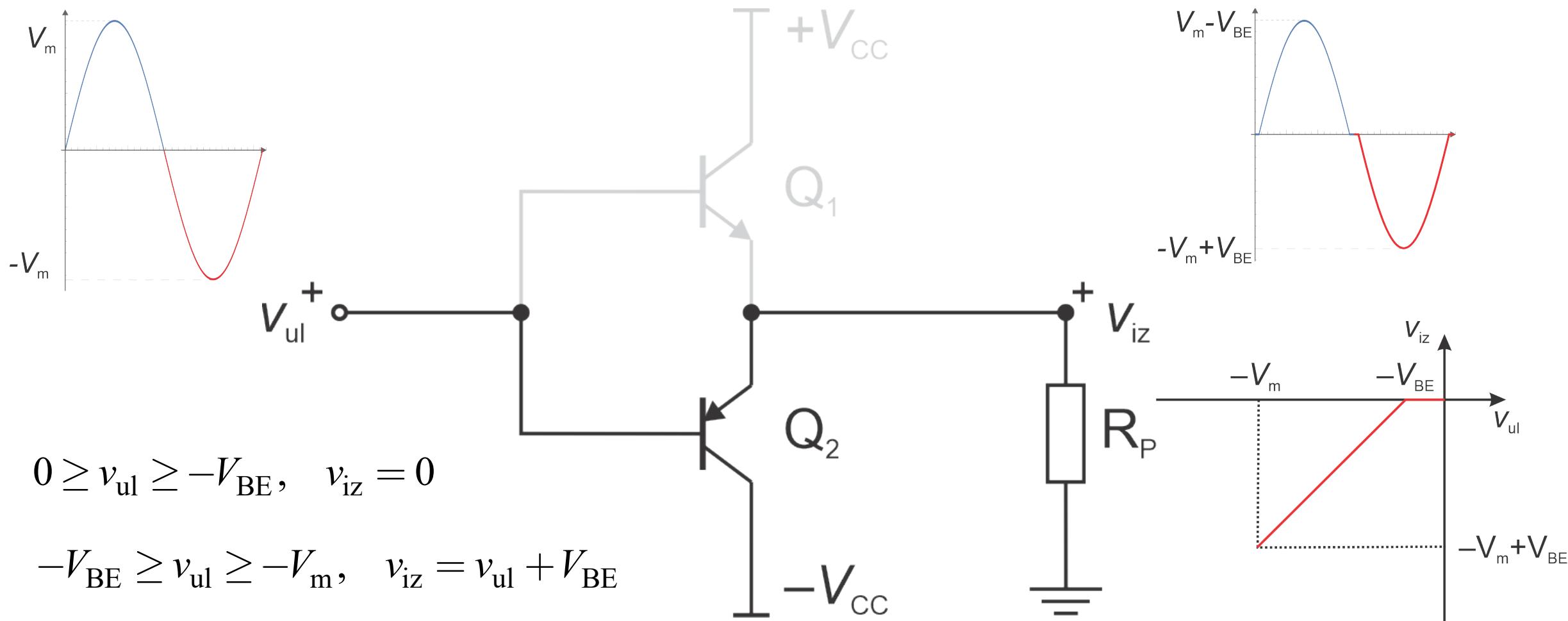
$$V_{BE} \leq v_{ul} \leq V_m, \quad v_{iz} = v_{ul} - V_{BE}$$



# Push-pull pojačavači



# Push-pull pojačavači

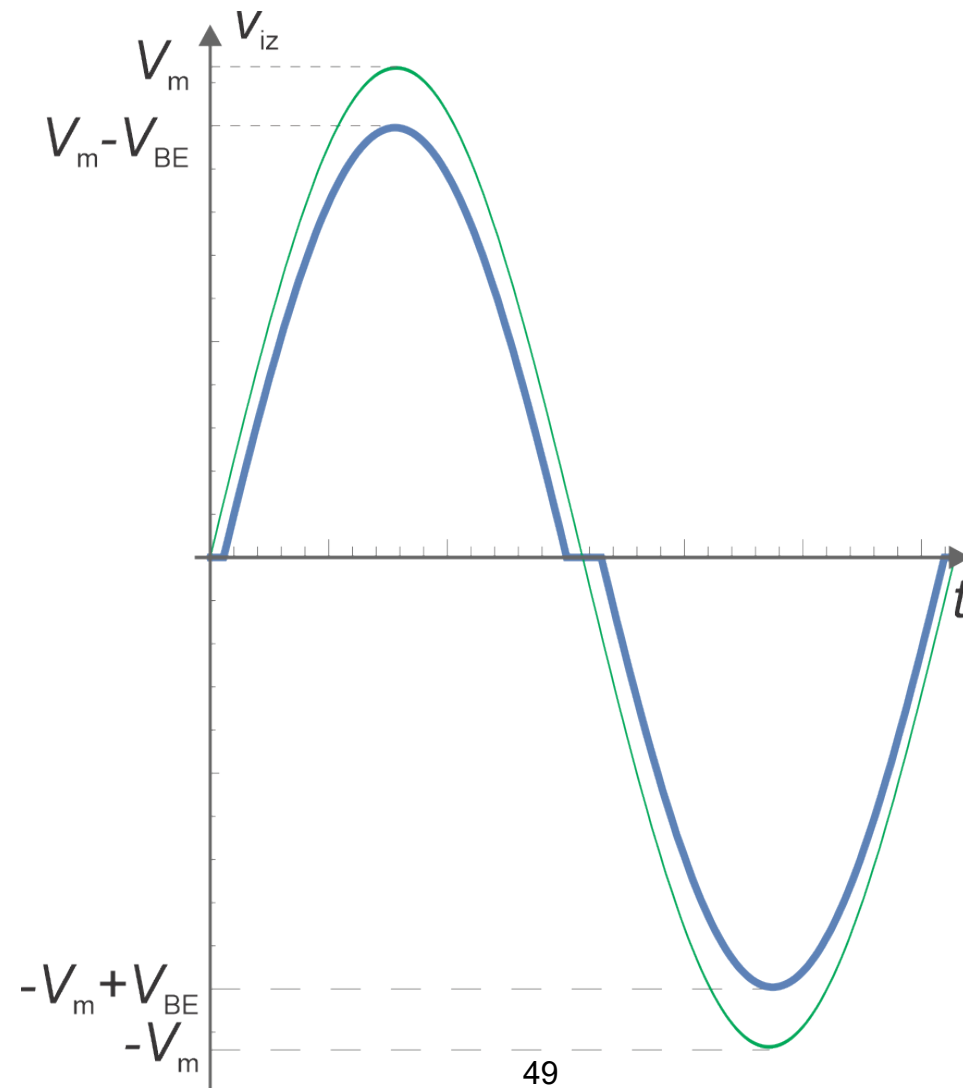


$$0 \geq v_{ul} \geq -V_{BE}, \quad v_{iz} = 0$$

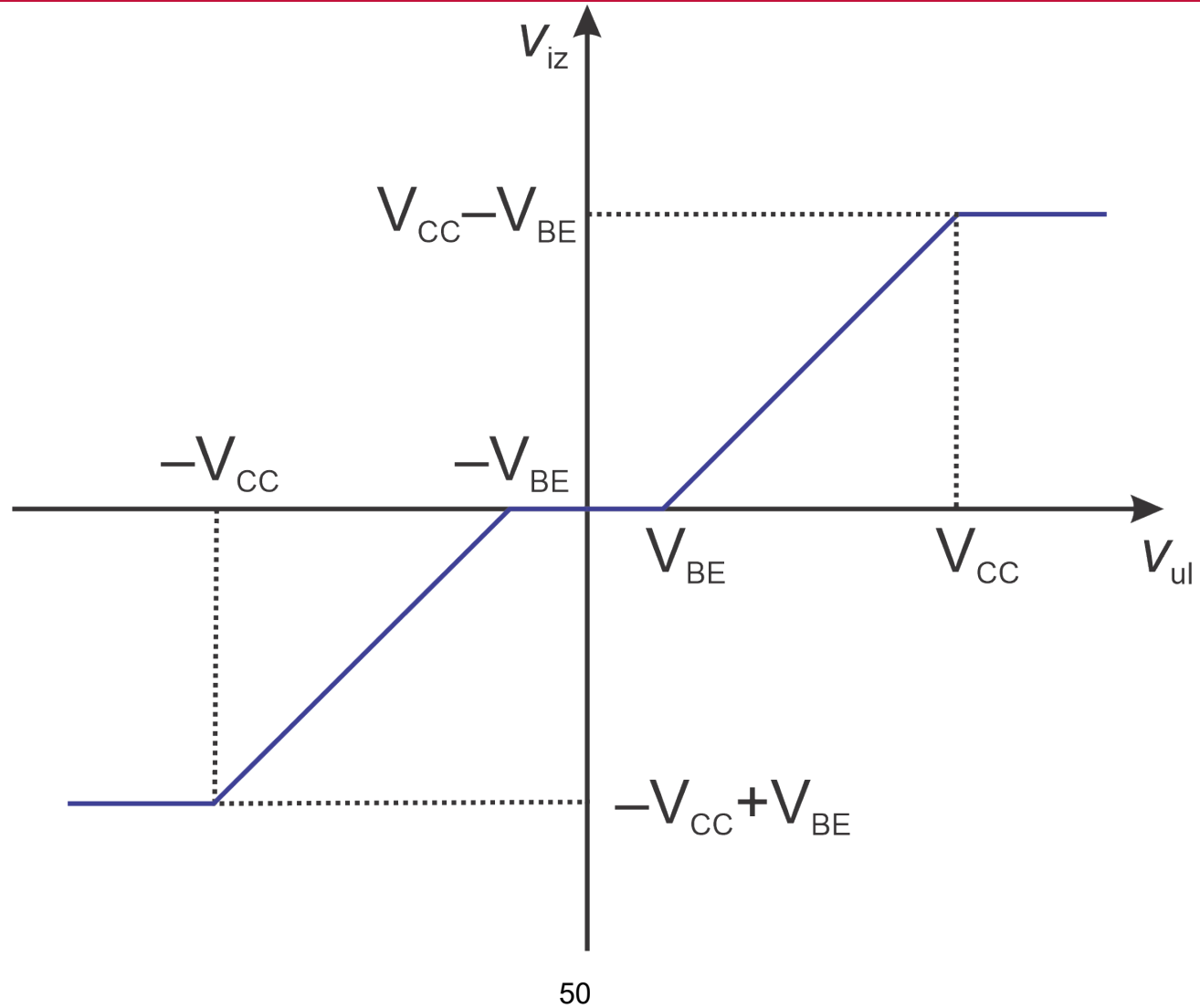
$$-V_{BE} \geq v_{ul} \geq -V_m, \quad v_{iz} = v_{ul} + V_{BE}$$



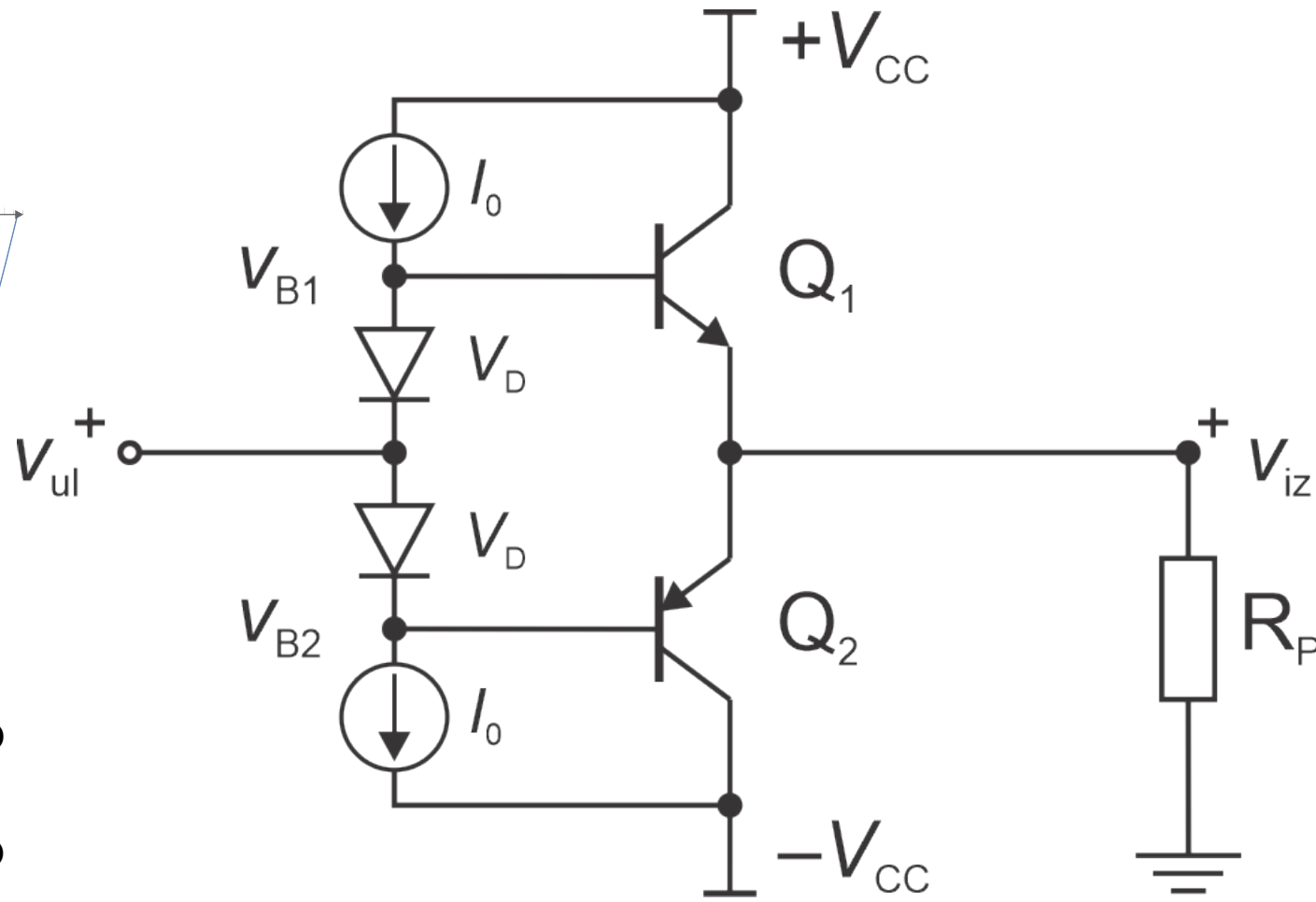
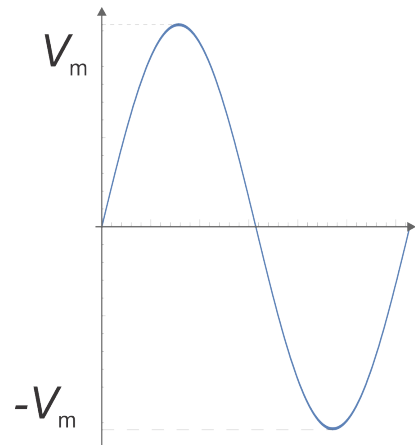
# Push-pull pojačavači



# Push-pull pojačavači



# Push-pull pojačavači

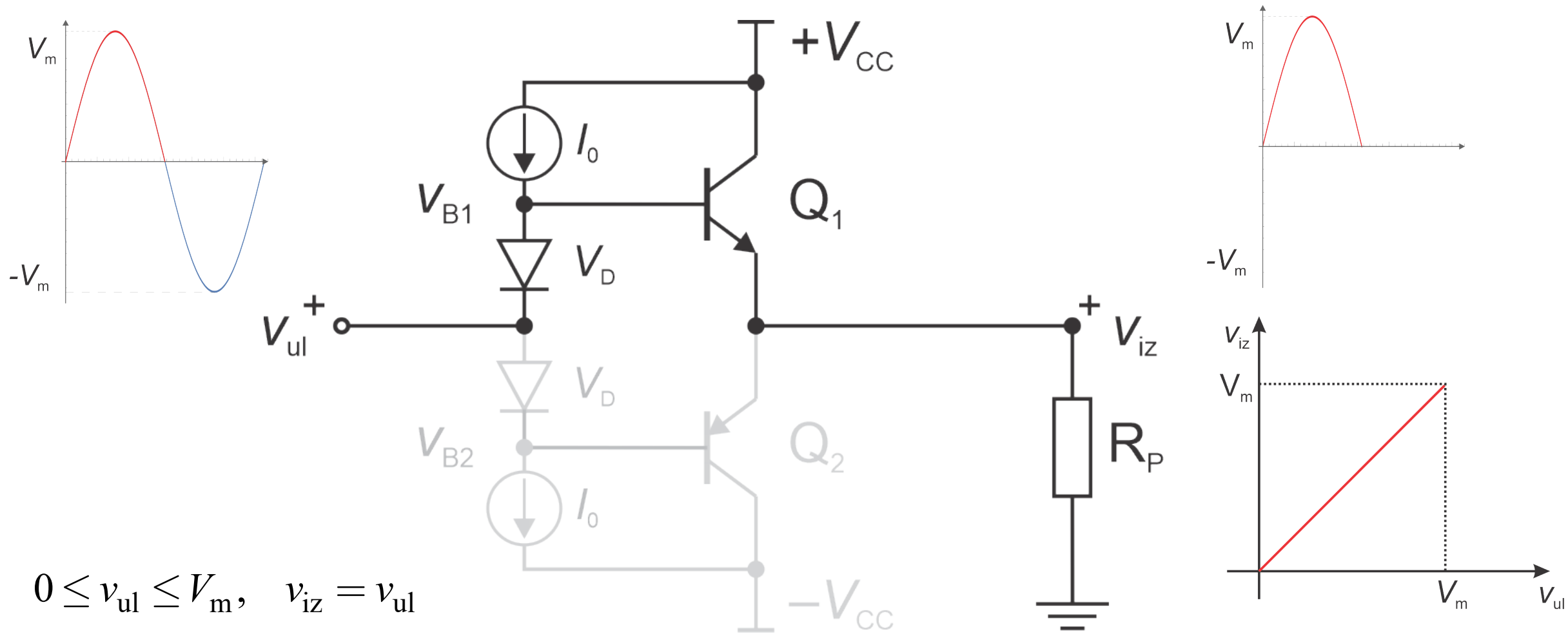


$$v_{B1} = v_{ul} + V_D$$

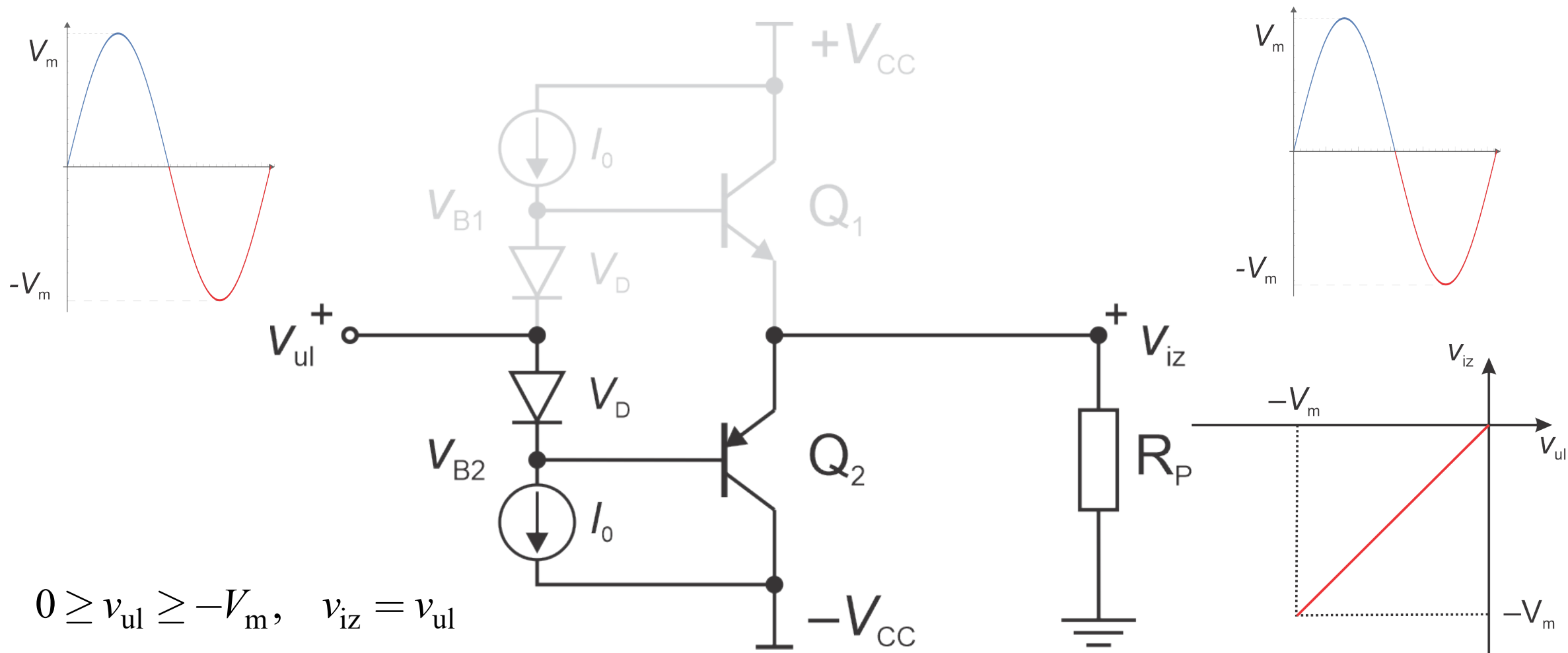
$$v_{B2} = v_{ul} - V_D$$

$$V_{BE} = V_D$$

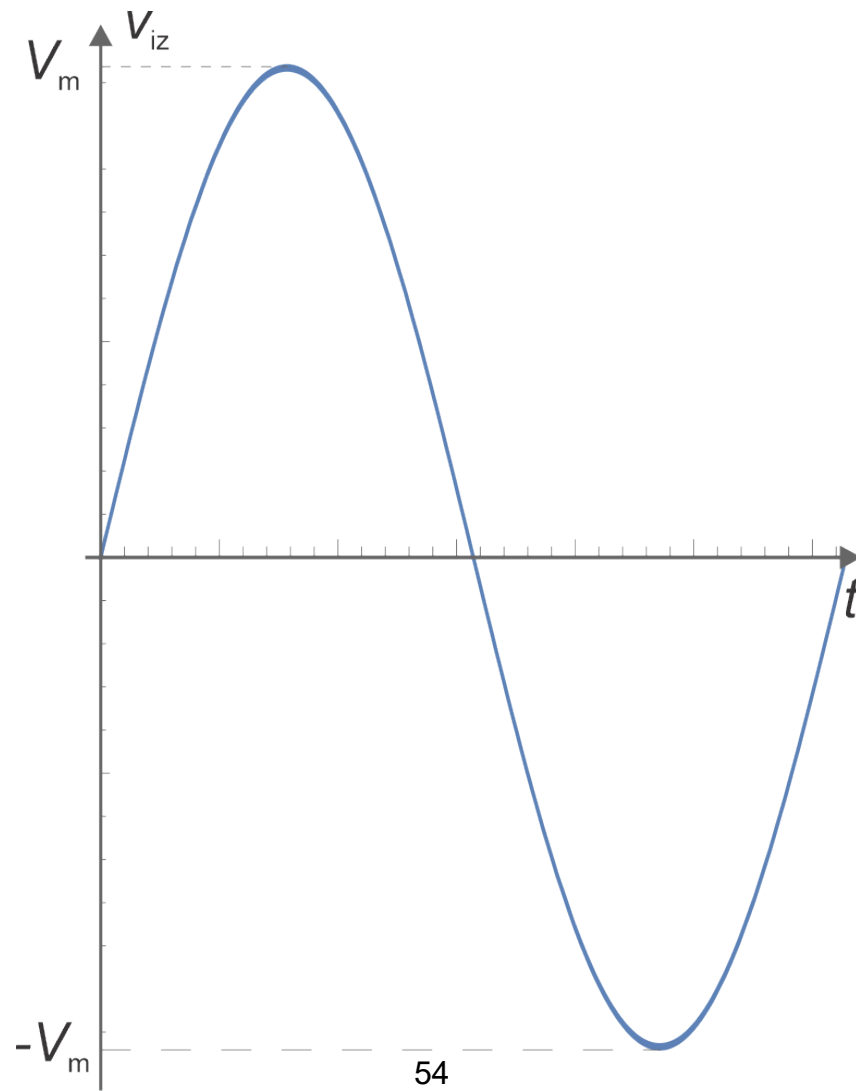
# Push-pull pojačavači



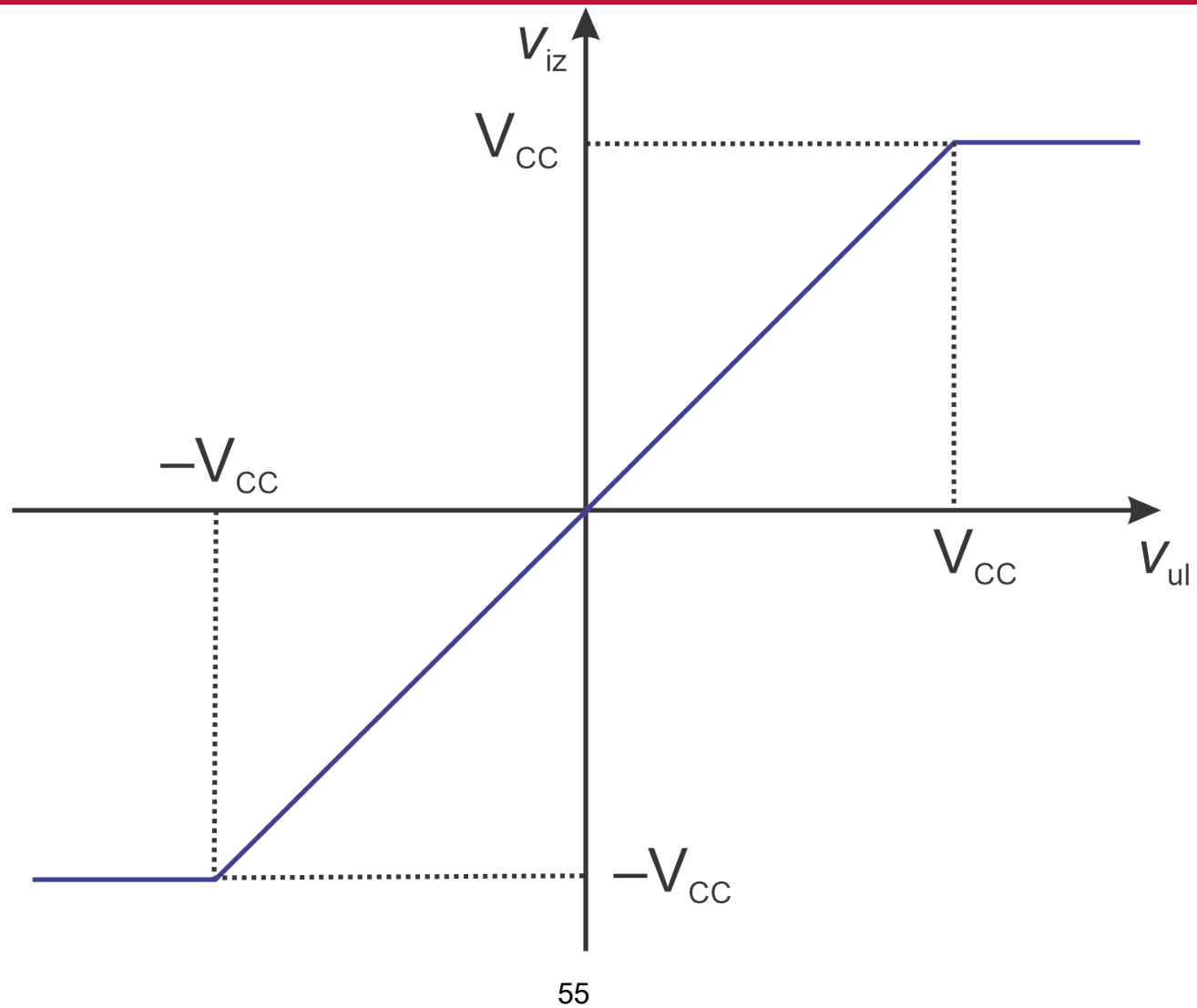
# Push-pull pojačavači



# Push-pull pojačavači



# Push-pull pojačavači



# Push-pull pojačavači

- Kroz potrošač  $R_P$  protiču obe poluperiode, snaga je

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

- 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  $P_2$

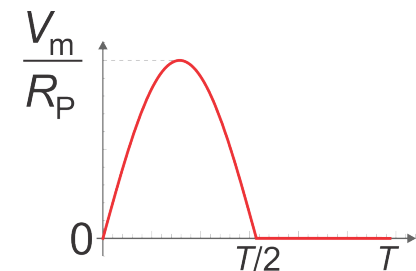
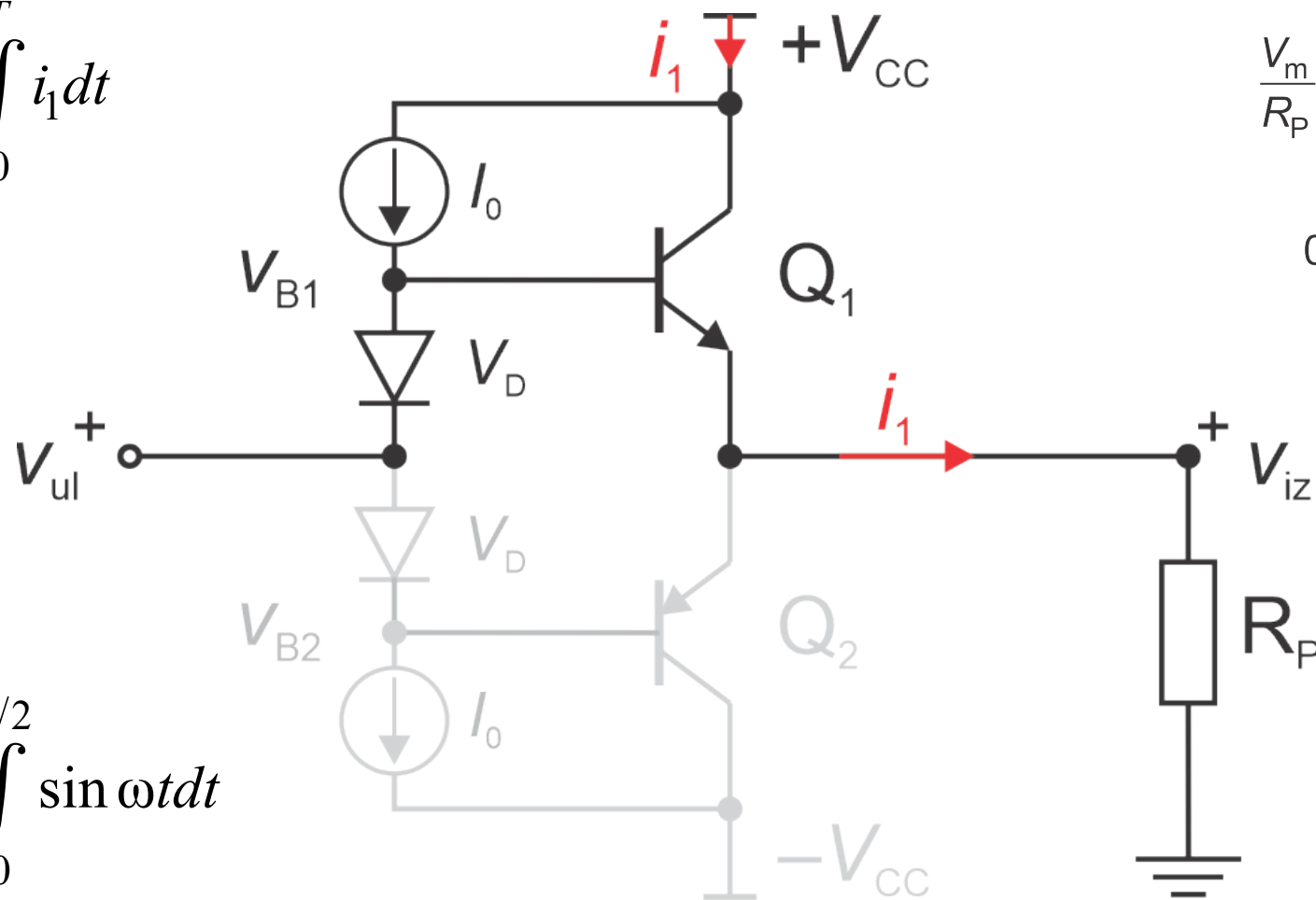


# Push-pull pojačavači

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

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

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

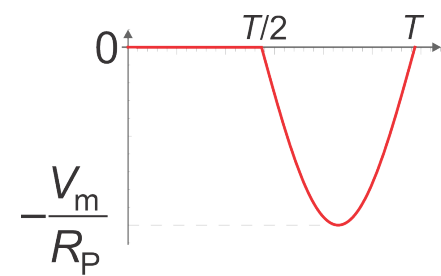
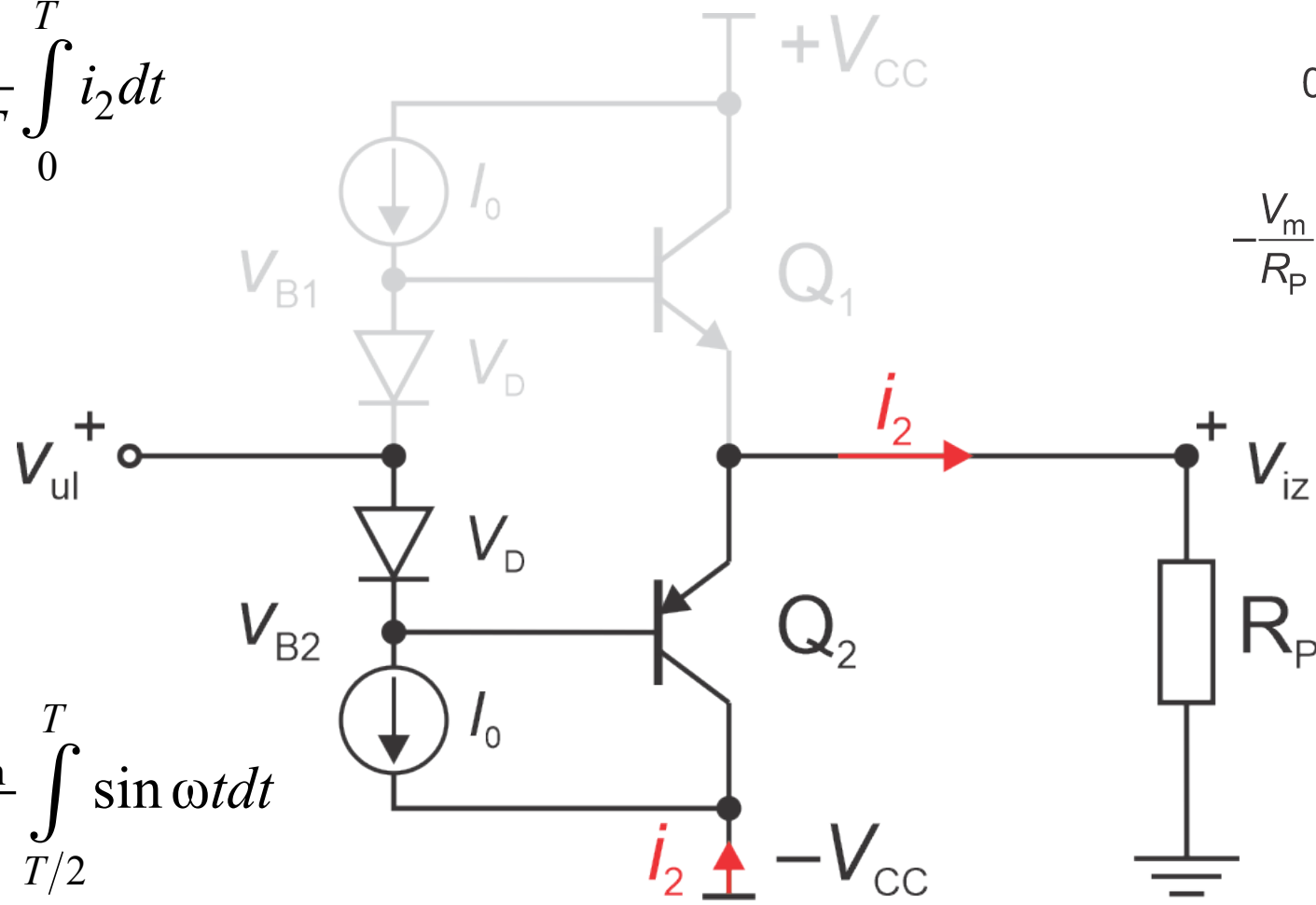


# Push-pull pojačavači

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

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

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



# 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

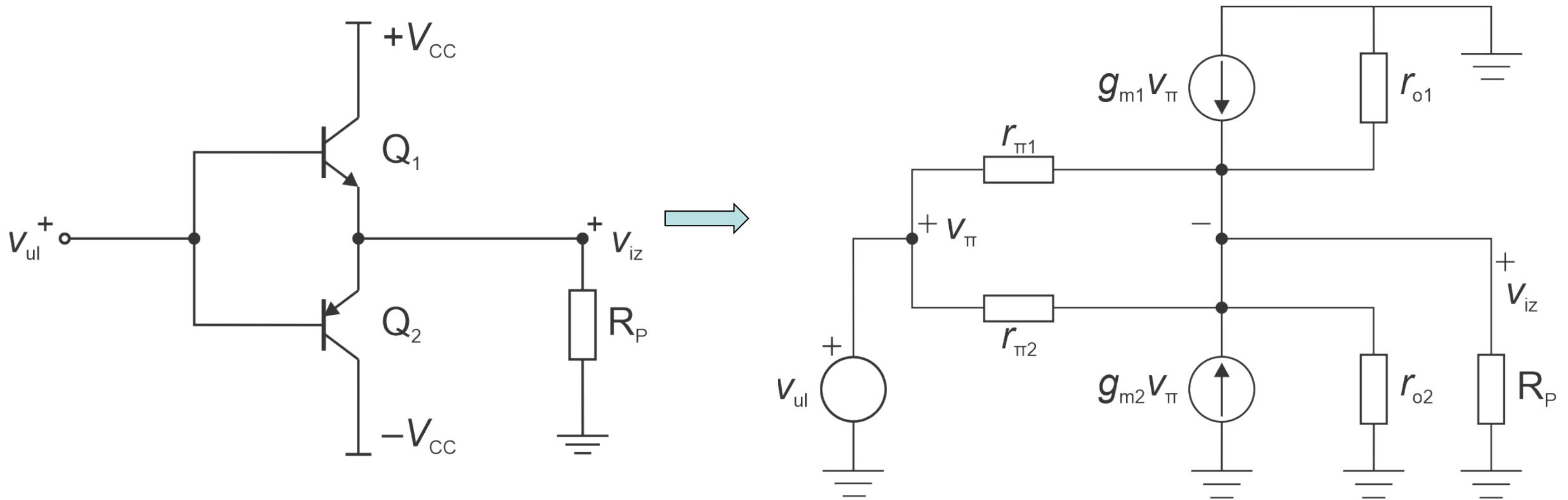
$$P_B = P_1 + P_2 = \frac{2V_{CC}V_m}{\pi R_P}$$

- Koeficijent iskorišćenja je

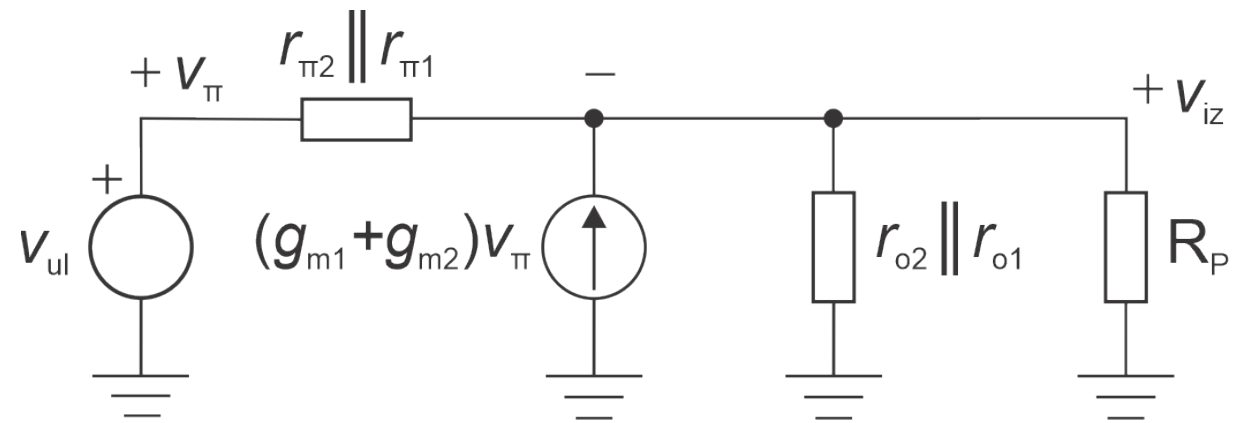
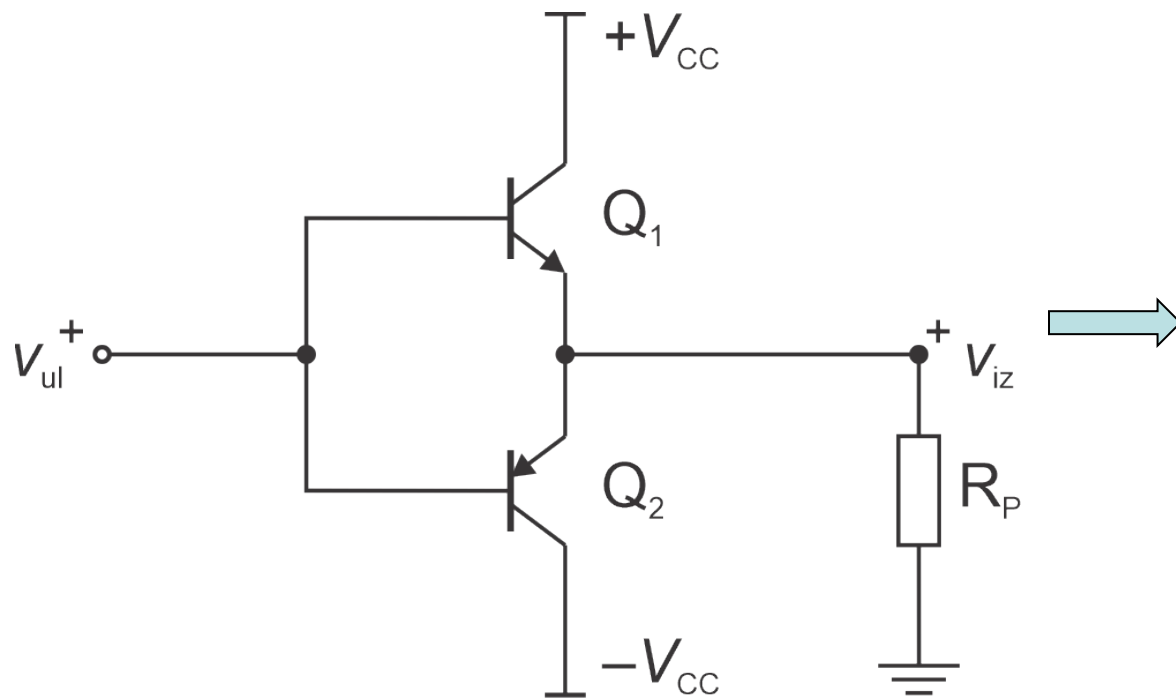
$$\eta = \frac{P_P}{P_B} = \frac{\frac{V_m^2}{2R_P}}{\frac{2V_{CC}V_m}{\pi R_P}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_m}{V_{CC}}$$

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

# Push-pull pojačavači



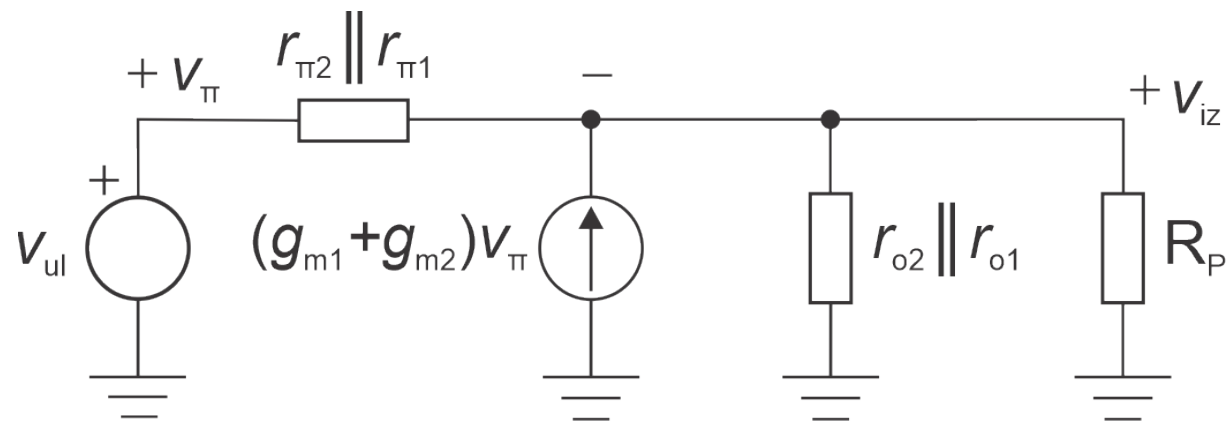
# Push-pull pojačavači



# Push-pull pojačavači

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

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



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