



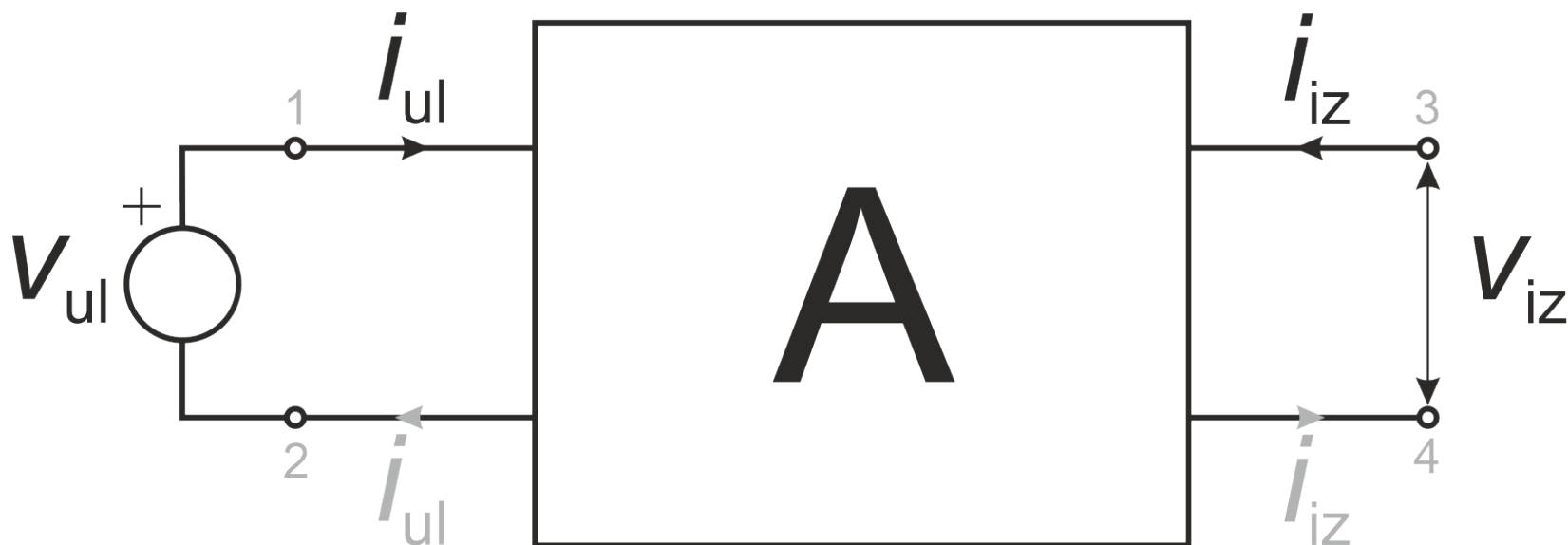
Pojam elektronskog kola, osnovni pojmovi o četvoropolima, model i karakteristike jednostavnog pojačavača

Marko Dimitrijević, Dragan Mančić

Uvod

- Električna kola koja sadrže bar jedan poluprovodnički element su **elektronska kola**. Elektronska kola mogu imati različite **efekte** na električne signale, koji određuju njihovu primenu.
- Primer jednostavnog elektronskog kola je **usmerač napona**, koji usmerava naizmenični napon (pretvara napon promenljivog polariteta u jednosmerni napon).
- Elektronska kola imaju topologiju **čtvoropola** (*two port networks*), kola kod kojih je definisan ulaz i izlaz.

Elektronska kola kao četvoropoli



- Četvoropoli imaju dva para priključaka: **ulazne** (1 i 2) i **izlazne** (3 i 4) priključke.
- Ponašanje četvoropola se može opisati pomoću četiri nezavisna parametra koji definišu zavisnosti između v_{ul} , i_{ul} , v_{iz} i i_{iz} .

Parametri četvoropola

- Kako kod četvoropola postoje četiri veličine v_{ul} , i_{ul} , v_{iz} i i_{iz} , moguće je definisati šest različitih zavisnosti:

$$\begin{bmatrix} v_{ul} \\ v_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ul} \\ i_{iz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ul} \\ i_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ul} \\ v_{iz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{ul} \\ i_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ul} \\ v_{iz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ul} \\ v_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ul} \\ i_{iz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{ul} \\ i_{ul} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{iz} \\ -i_{iz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{iz} \\ -i_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ul} \\ i_{ul} \end{bmatrix}$$

Parametri četvoropola

	[z]	[y]	[h]	[g]	[a]	[b]
[z]	$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta[\mathbf{y}]} \begin{bmatrix} y_{22} & -y_{12} \\ -y_{21} & y_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{22}} \begin{bmatrix} \Delta[\mathbf{h}] & h_{12} \\ -h_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -g_{12} \\ g_{21} & \Delta[\mathbf{g}] \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{21}} \begin{bmatrix} a_{11} & \Delta[\mathbf{a}] \\ 1 & a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{b_{21}} \begin{bmatrix} -b_{22} & -1 \\ -\Delta[\mathbf{b}] & -b_{11} \end{bmatrix}$
[y]	$\frac{1}{\Delta[\mathbf{z}]} \begin{bmatrix} z_{22} & -z_{12} \\ -z_{21} & z_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -h_{12} \\ h_{21} & \Delta[\mathbf{h}] \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{22}} \begin{bmatrix} \Delta[\mathbf{g}] & g_{12} \\ -g_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{12}} \begin{bmatrix} a_{22} & -\Delta[\mathbf{a}] \\ -1 & a_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{b_{12}} \begin{bmatrix} -b_{11} & 1 \\ \Delta[\mathbf{b}] & -b_{22} \end{bmatrix}$
[h]	$\frac{1}{z_{22}} \begin{bmatrix} \Delta[\mathbf{z}] & z_{12} \\ -z_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{y_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -y_{12} \\ y_{21} & \Delta[\mathbf{y}] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta[\mathbf{g}]} \begin{bmatrix} g_{22} & -g_{12} \\ -g_{21} & g_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{22}} \begin{bmatrix} a_{12} & \Delta[\mathbf{a}] \\ -1 & a_{21} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{b_{11}} \begin{bmatrix} -b_{12} & 1 \\ -\Delta[\mathbf{b}] & -b_{21} \end{bmatrix}$
[g]	$\frac{1}{z_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -z_{12} \\ z_{21} & \Delta[\mathbf{z}] \end{bmatrix}$	$\frac{1}{y_{22}} \begin{bmatrix} \Delta[\mathbf{y}] & y_{12} \\ -y_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta[\mathbf{h}]} \begin{bmatrix} h_{22} & -h_{12} \\ -h_{21} & h_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{11}} \begin{bmatrix} a_{21} & -\Delta[\mathbf{a}] \\ 1 & a_{12} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{b_{22}} \begin{bmatrix} -b_{21} & -1 \\ \Delta[\mathbf{b}] & -b_{12} \end{bmatrix}$
[a]	$\frac{1}{z_{21}} \begin{bmatrix} z_{11} & \Delta[\mathbf{z}] \\ 1 & z_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{y_{21}} \begin{bmatrix} -y_{22} & -1 \\ -\Delta[\mathbf{y}] & -y_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{21}} \begin{bmatrix} -\Delta[\mathbf{h}] & -h_{11} \\ -h_{22} & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{21}} \begin{bmatrix} 1 & g_{22} \\ g_{11} & \Delta[\mathbf{g}] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta[\mathbf{b}]} \begin{bmatrix} b_{22} & -b_{12} \\ -b_{21} & b_{11} \end{bmatrix}$
[b]	$\frac{1}{z_{12}} \begin{bmatrix} z_{22} & -\Delta[\mathbf{z}] \\ -1 & z_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{y_{12}} \begin{bmatrix} -y_{11} & 1 \\ \Delta[\mathbf{y}] & -y_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{12}} \begin{bmatrix} 1 & -h_{11} \\ -h_{22} & \Delta[\mathbf{h}] \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{12}} \begin{bmatrix} -\Delta[\mathbf{g}] & g_{22} \\ g_{11} & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta[\mathbf{a}]} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$

Pojačavači

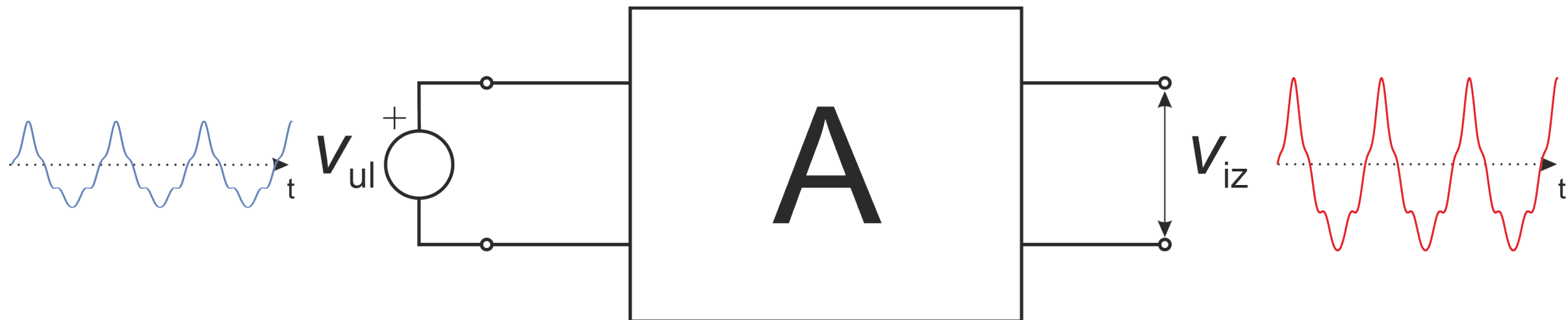
- Osnovna elektronska kola su **pojačavači**, čija je primarna funkcija **pojačanje analognog signala**. Osim funkcije pojačanja signala, pojačavači su osnova za realizaciju drugih, složenijih elektronskih kola i sistema.
- Pojačavači se mogu analizirati sa više aspekata, kao što su pojačanje, potrošnja, linearnost i izobličenje signala, impedanse, zavisnost od spoljašnjih uticaja – temperature i starenja komponenti, stabilnost, frekvencijski odziv, šumovi, itd.
- U idealizovanom slučaju, većina ovih aspekata je manje bitna i razmatra se najznačajnija osobina, **pojačanje signala** i najznačajniji kvantitativni parametar: **pojačanje pojačavača**.

Pojačanje pojačavača



- **Pojačanje signala znači da je snaga signala na izlazu pojačavača veća od snage signala na ulazu pojačavača.** Pojačanje signala može biti ostvareno kao **naponsko** ili **strujno**.
- Pojačanje (povećanje snage) signala se ostvaruje na račun energije generatora kojim se pojačavač napaja.

Pojačanje pojačavača (vremenski domen)



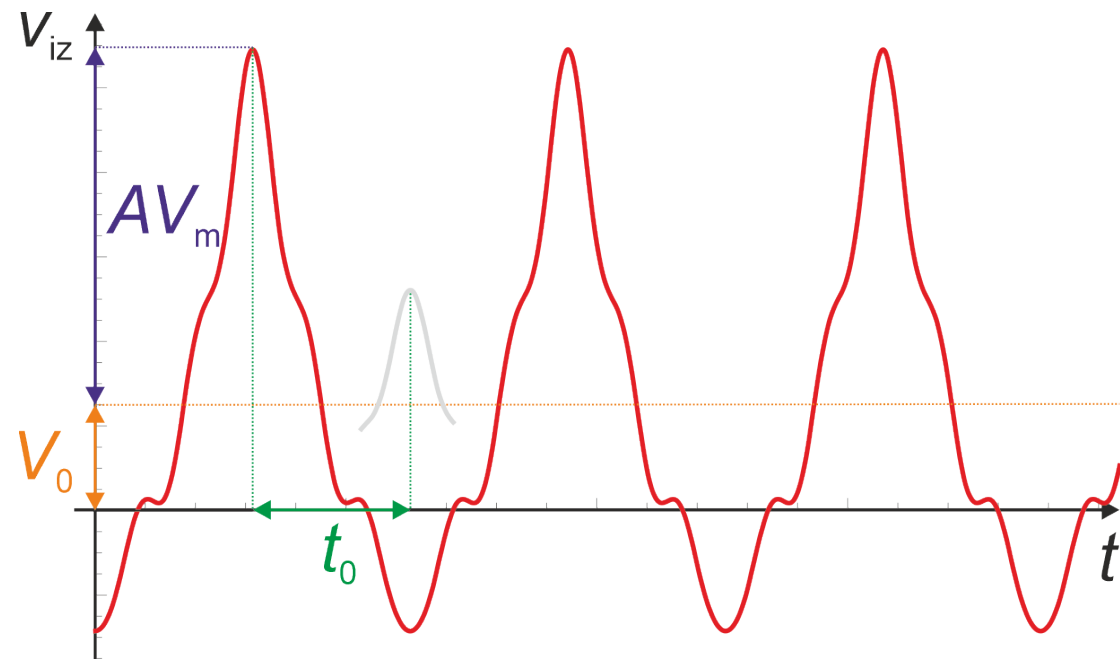
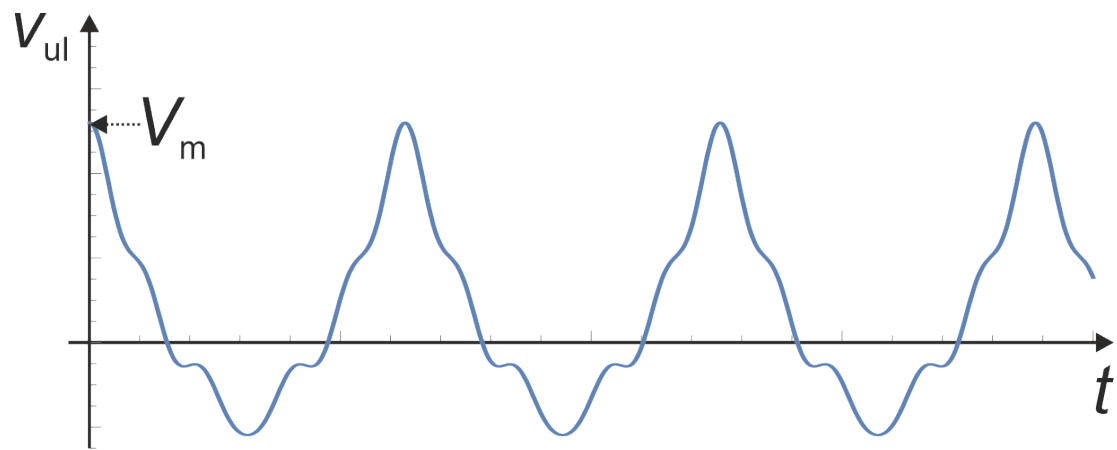
A – naponsko pojačanje pojačavača

t_0 – vremensko kašnjenje signala

V_0 – jednosmerna komponenta izlaznog napona (naponski ofset)

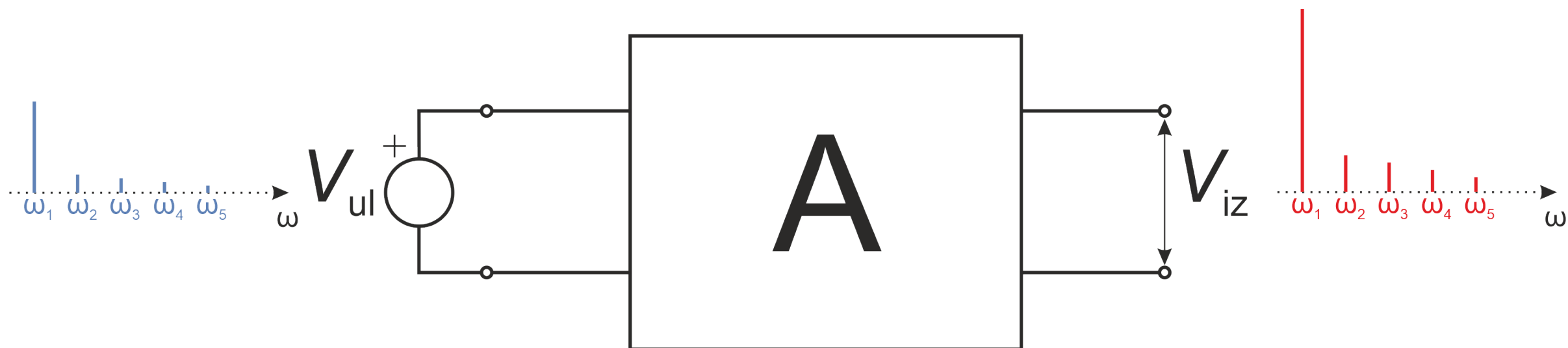
$$v_{iz}(t) = A \cdot v_{ul}(t - t_0) + V_0$$

Pojačanje pojačavača (vremenski domen)



$$v_{iz}(t) = A \cdot v_{ul}(t - t_0) + V_0$$

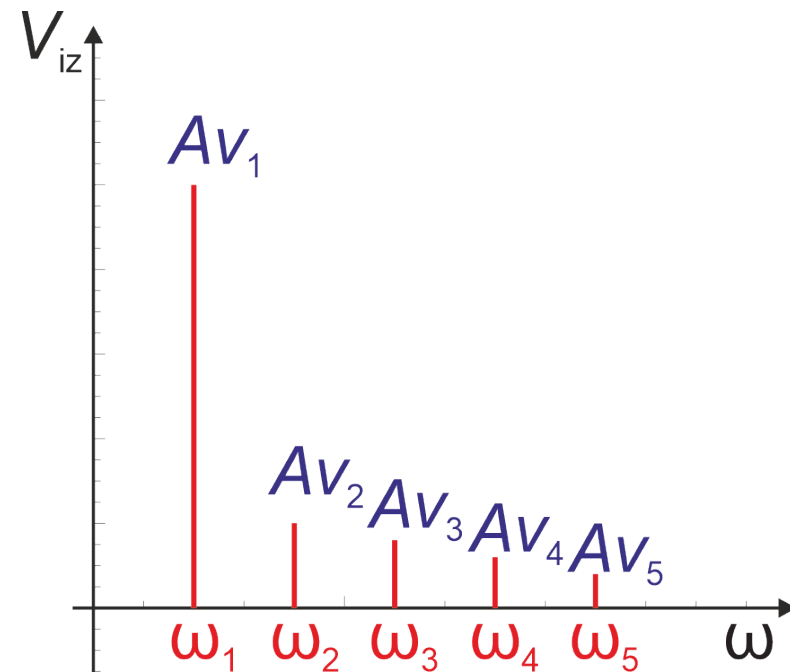
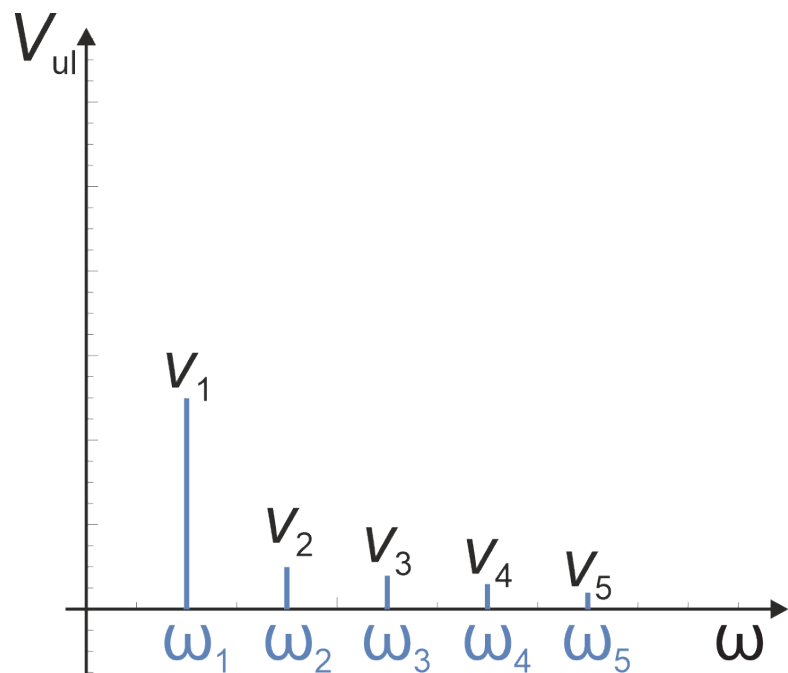
Pojačanje pojačavača (frekvencijski domen)



A – naponsko pojačanje pojačavača

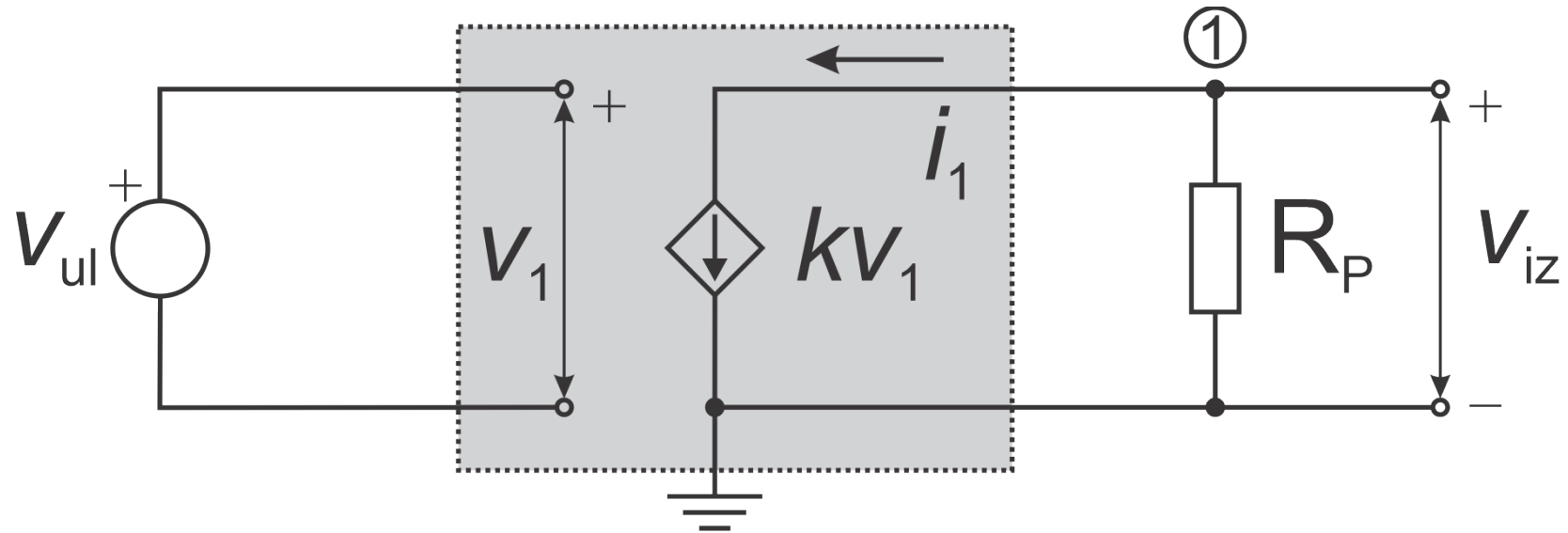
$$V_{iz} = A \cdot V_{ul}$$

Pojačanje pojačavača (frekvencijski domen)



$$V_{iz} = A \cdot V_{ul}$$

Realizacija pojačavača



- Pojačavač se može realizovati pomoću kontrolisanog (strujnog) izvora.

$$\frac{v_{iz}}{R_P} + kv_1 = 0, \quad v_1 = v_{ul} \quad v_{iz} = -k \cdot v_{ul} \cdot R_P \quad v_{iz} = A \cdot v_{ul} \quad A = -k \cdot R_P$$

Realizacija pojačavača

- Idealizovani model pojačavača je **linearan**, gde izlazni napon linearno zavisi od ulaznog, a struja kontrolisanog izvora je linearno zavisna od ulaznog napona.
- Analizom karakteristika tranzistora, može se uočiti da se bipolarni tranzistor u aktivnom režimu i MOSFET u režimu zasićenja ponašaju kao kontrolisani strujni izvori.
- Nasuprot modelu pojačavača, tranzistori su nelinearni elementi. Struja kolektora bipolarnog tranzistora u aktivnom režimu zavisi od napona između baze i emitora eksponencijalno, dok je zavisnost struje kanala od napona između gejta i sorsa MOSFET-a u režimu zasićenja kvadratna.

Realizacija pojačavača

- Zbog nelinearnih karakteristika tranzistora, neophodno je pronaći uslove pod kojima je moguće iskoristiti tranzistore kao kontrolisane strujne izvore u kolima pojačavača.
- U cilju pronalaženja ovih uslova, biće razmotren najjednostavniji slučaj pojačavača sa zajedničkim emitorom/sorsom, pri čemu je na ulaz pojačavača doveden prostoperiodični signal v_{ul} , amplitude V_m , kružne frekvencije ω .
- Napon između baze i emitora, (odnosno gejta i sorsa) ima srednju vrednost (jednosmernu komponentu) jednaku V_{BB} (V_{GG}), koja je neophodna za direktnu polarizaciju emitorskog spoja (kod bipolarnog tranzistora), odnosno formiranje provodnog kanala (kod MOSFET-a).

Konvencija označavanja napona i struja tranzistora

- Vremenski promenljivi naponi i struje se označavaju **malim slovom i velikim slovima u indeksima**:

$$i_B, i_C, i_E, v_{BE}, v_{CE}, i_D, v_{GS}, v_{DS}$$

- Jednosmerne vrednosti napona i struja se označavaju **velikim slovom i velikim slovima u indeksima**:

$$I_B, I_C, I_E, V_{BE}, V_{CE}, I_D, V_{GS}, V_{DS}$$

- Vremenski promenljive vrednosti napona i struja bez jednosmerne vrednosti (njihova srednja vrednost jednaka je nuli) se označavaju **malim slovom i malim slovima u indeksima**:

$$i_b, i_c, i_e, v_{be}, v_{ce}, i_d, v_{gs}, v_{ds}$$

Konvencija označavanja napona i struja tranzistora

- Zavisnost vremenski promenljivih napona i struja od vremena se podrazumeva, tako da nije eksplicitno istaknuta:

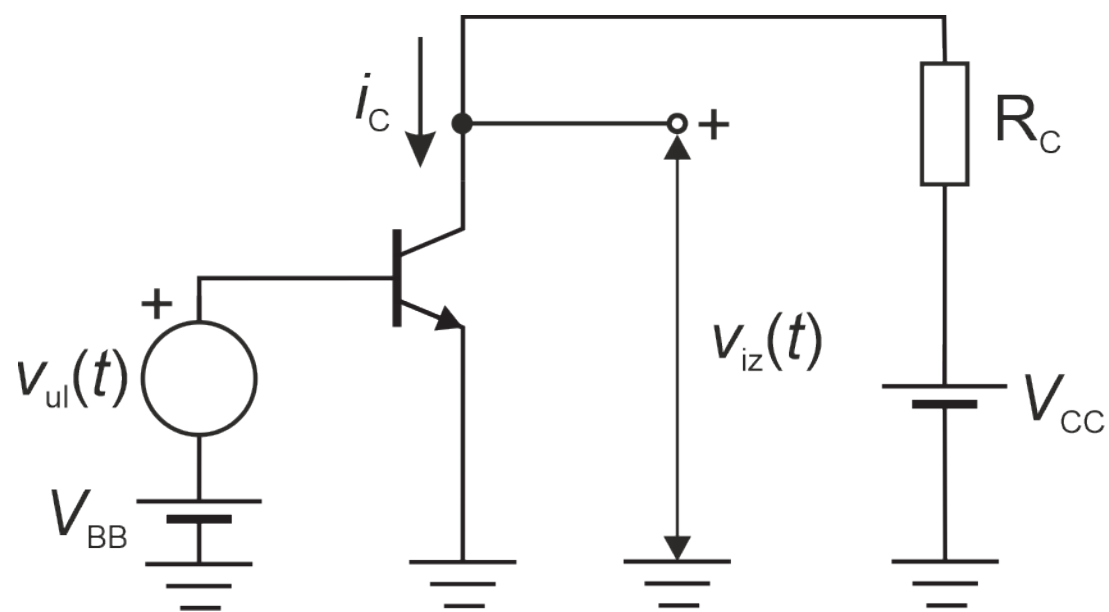
$$i_C = i_C(t), v_{BE} = v_{BE}(t), v_{DS} = v_{DS}(t), \dots$$

$$i_c = i_c(t), v_{be} = v_{be}(t), v_{ds} = v_{ds}(t), \dots$$

- Prema konvenciji, važe jednačine:

$$i_C = i_c + I_C, v_{BE} = v_{be} + V_{BE}, v_{DS} = v_{ds} + V_{DS}, \dots$$

Realizacija pojačavača sa bipolarnim tranzistorom



$$v_{ul}(t) = V_m \sin \omega t$$

$$v_{iz}(t) = v_{CE}$$

$$v_{iz}(t) = V_{CC} - i_C \cdot R_C$$

$$i_C = I_S \left(\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right)$$

$$v_{BE} = V_{BB} + v_{ul}(t)$$

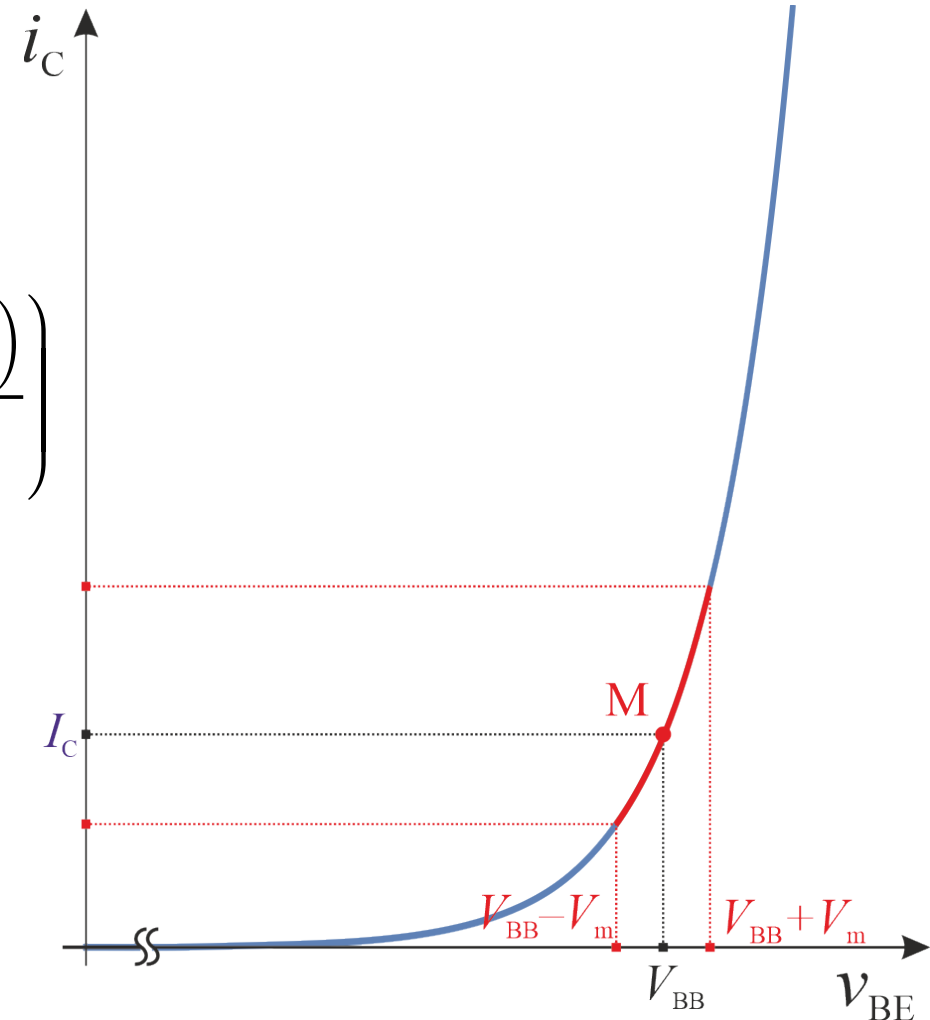
Struja kolektora i_C

$$i_C = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$i_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BB} + v_{ul}(t)}{V_T}\right) = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BB}}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{v_{ul}(t)}{V_T}\right)$$

$$i_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BB}}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_m \cdot \sin \omega t}{V_T}\right)$$

$$i_C = I_C \cdot \exp\left(\frac{V_m \cdot \sin \omega t}{V_T}\right)$$



Aproksimacija eksponencijalne funkcije

- Eksponencijalna funkcija može da se aproksimira Tejlorovim (*Taylor*) redom u okolini nule:

$$e^x = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots$$

- Za male vrednosti argumenta x , članovi višeg stepena u redu su manji od x , tako da se mogu zanemariti:

$$|x| \ll 1$$

$$e^x \approx 1 + x$$

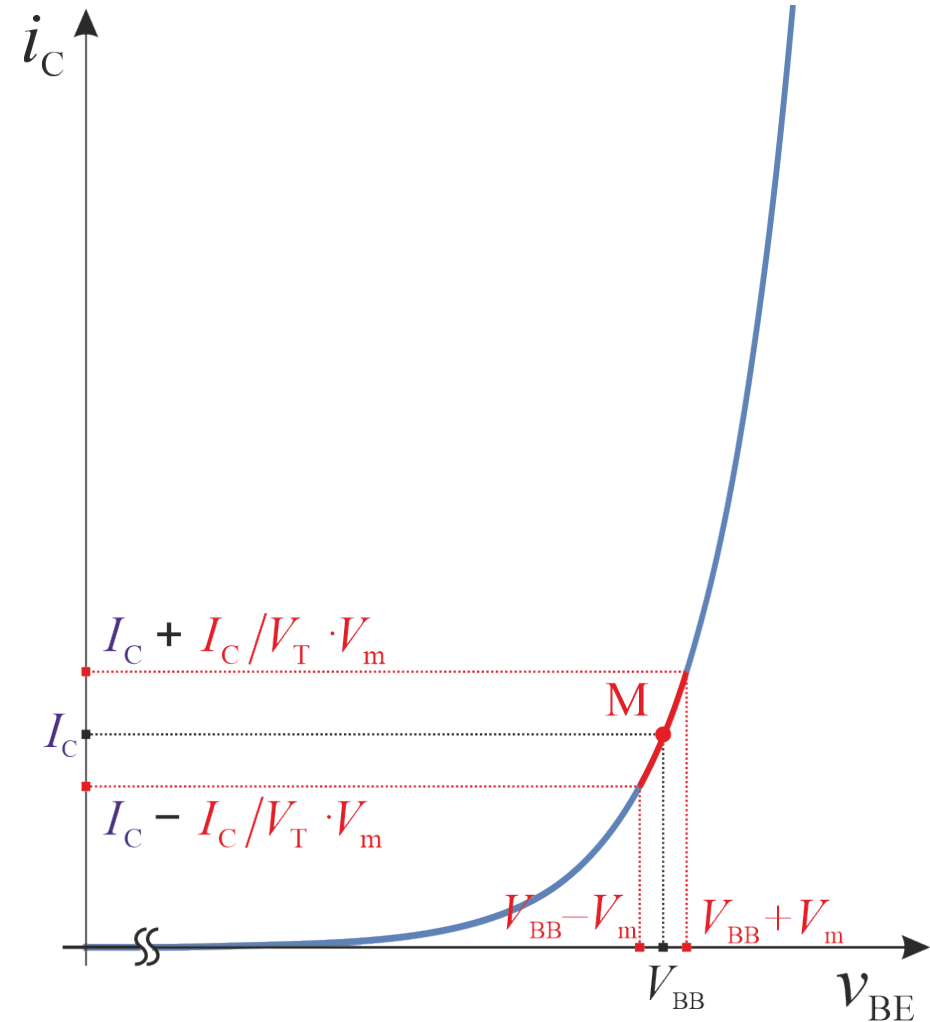
Struja kolektora i_C

- Sinusna funkcija je manja ili jednaka jedinici, i ukoliko je $V_m < V_T$, eksponencijalna funkcija se može aproksimirati linearnom:

$$i_C = I_C \cdot \exp\left(\frac{V_m}{V_T} \cdot \sin \omega t\right)$$

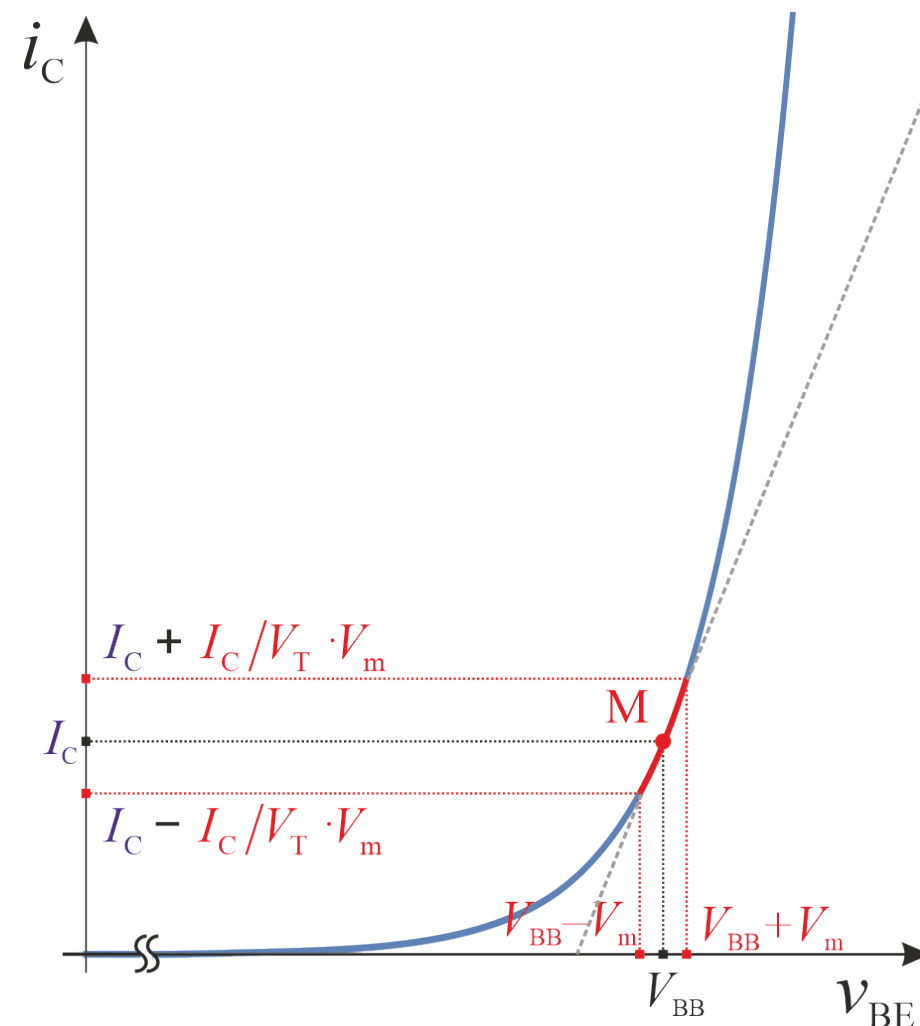
$$V_m < V_T \Rightarrow i_C \approx I_C \cdot \left(1 + \frac{V_m}{V_T} \cdot \sin \omega t\right)$$

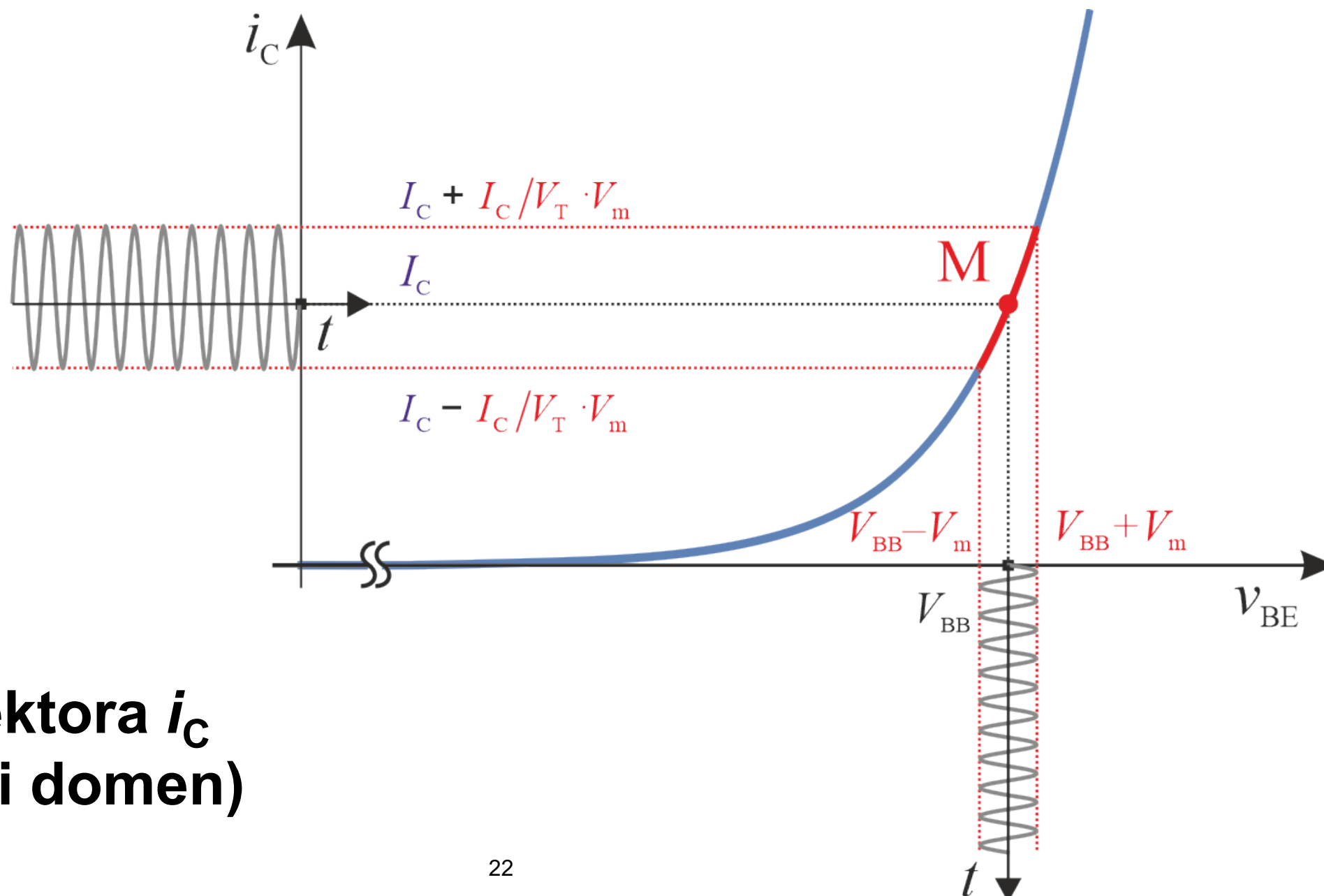
$$i_C = I_C + \frac{I_C}{V_T} \cdot V_m \sin \omega t = I_C + \frac{I_C}{V_T} \cdot v_{ul}(t)$$



Linearizacija

- Postupak aproksimiranja nelinearne karakteristike tranzistora tangentom u određenoj tački se naziva **linearizacija**.
- Za **signale malih amplituda**, $V_m < V_T$, prenosna karakteristika bipolarnog tranzistora se može linearizovati (aproksimirati tangentom) u tački M.
- Tačka **M** se naziva **radna tačka tranzistora**, i ona je određena jednosmernom komponentom napona v_{BE} , u ovom konkretnom slučaju naponom V_{BB} .





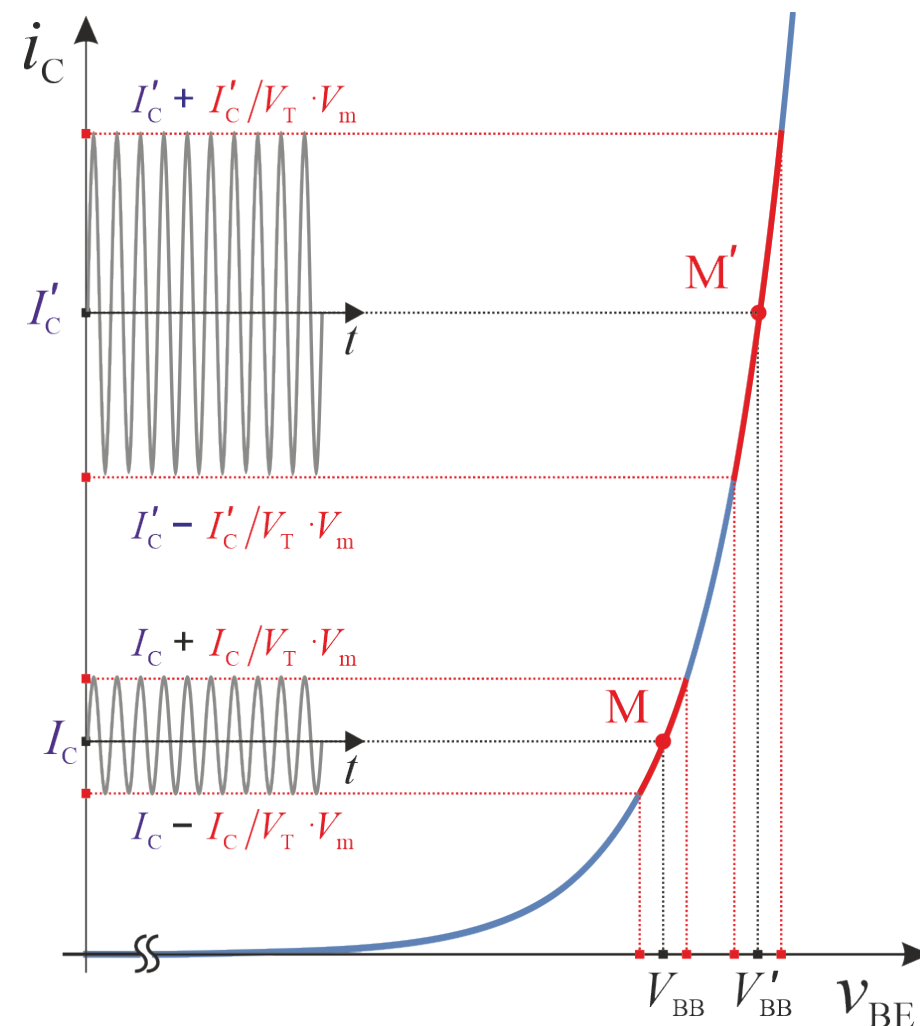
**Struja kolektora i_C
(vremenski domen)**

Struja kolektora i_C (vremenski domen)

- Amplituda vremenski promenljive komponente struje kolektora zavisi od jednosmerne komponente I_C , odnosno položaja radne tačke M:

$$i_C = I_C + i_c = I_C + \frac{I_C}{V_T} \cdot v_{ul}(t)$$

- Kako bi se ostvarila potrebna amplituda kolektorske struje, neophodno je pravilno odabrati jednosmernu komponentu napona v_{BE} , u ovom konkretnom slučaju napon V_{BB} .



Transkonduktansa bipolarnog tranzistora

- Izvod kolektorske struje po naponu između baze i emitora, u određenoj radnoj tački M (u prethodnom primeru $v_{BE} = V_{BB}$) se naziva **transkonduktansa bipolarnog tranzistora (g_m)**:

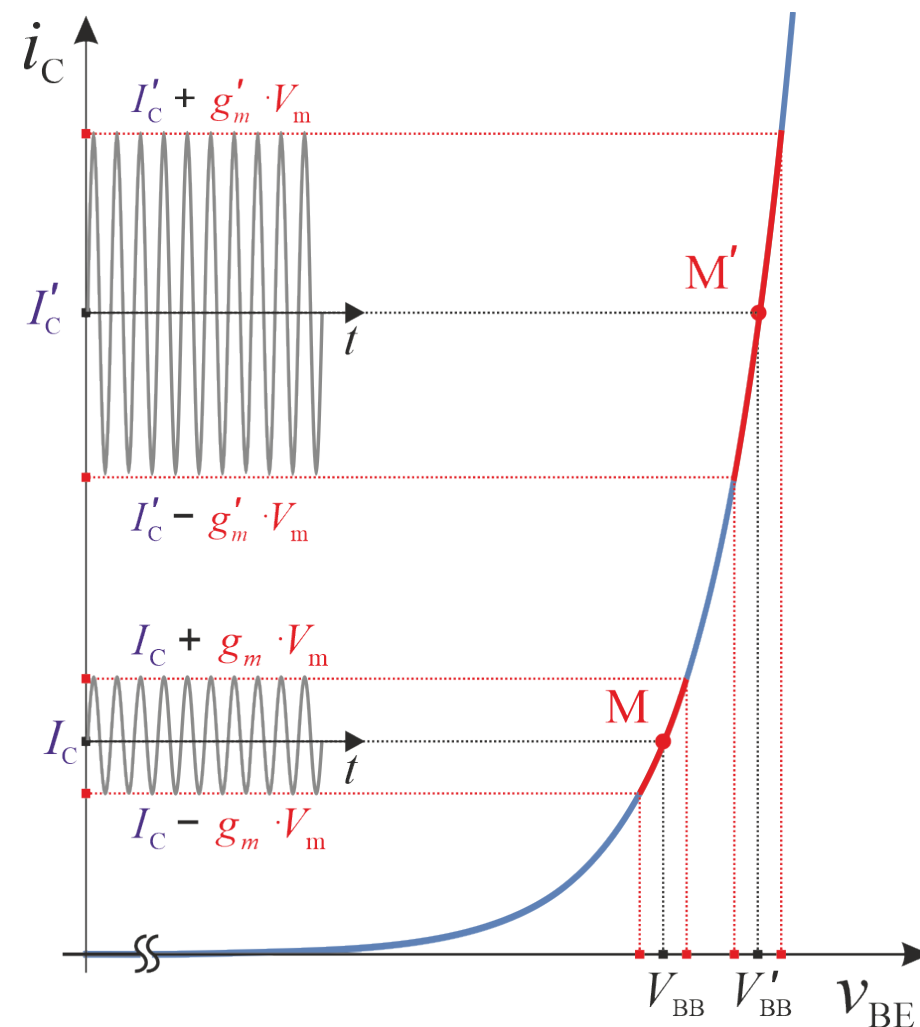
$$g_m = \left. \frac{di_C}{dv_{BE}} \right|_{v_{BE}=V_{BB}} = \left. \frac{d}{dv_{BE}} \left(I_S \cdot \exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) \right) \right|_{v_{BE}=V_{BB}}$$

$$g_m = \frac{1}{V_T} \cdot I_S \cdot \exp \left(\frac{V_{BB}}{V_T} \right) = \frac{I_C}{V_T}$$

Transkonduktansa bipolarnog tranzistora

- Transkonduktansa zavisi od izbora radne tačke, odnosno jednosmerne komponente napona v_{BE} .
- Transkonduktansa je kvantitativna mera pojačanja tranzistora.
- Struja kolektora se može izraziti preko transkonduktanse:

$$i_C = I_C + g_m \cdot V_m \sin \omega t = I_C + \underbrace{g_m \cdot v(t)}_{i_c(t)}$$



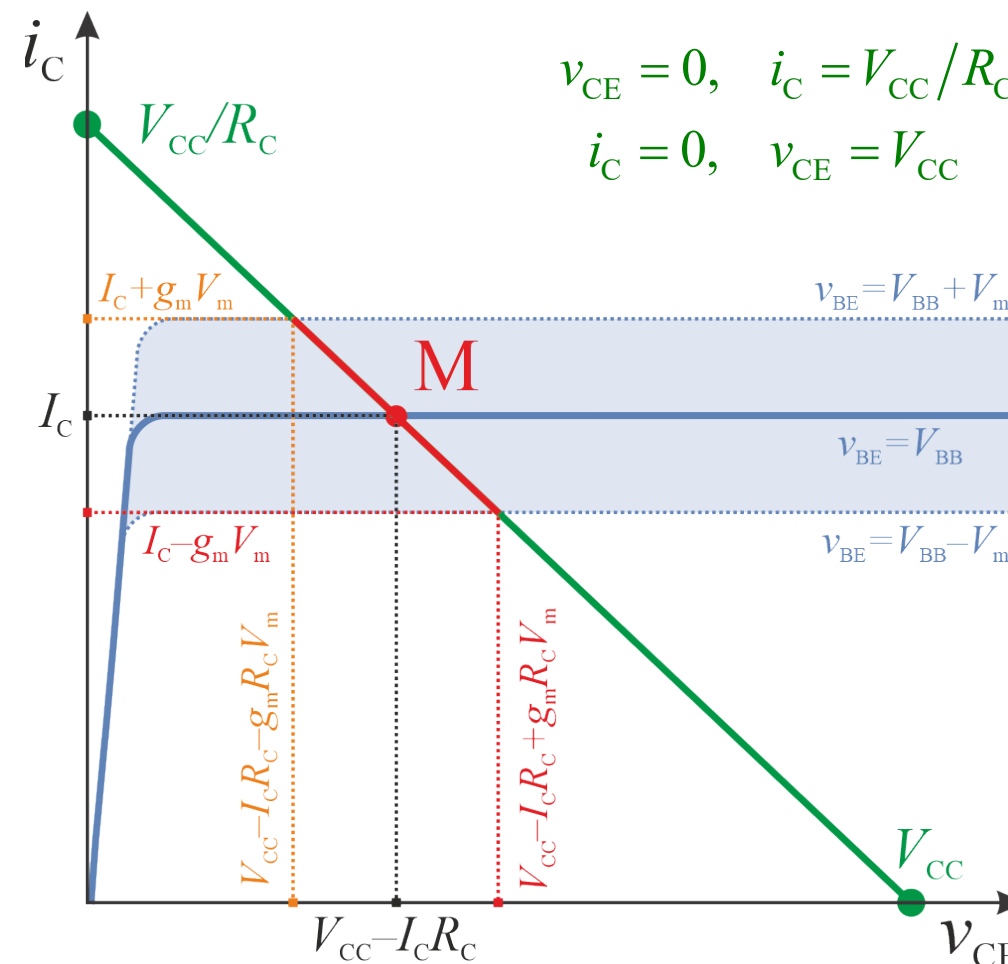
Radna prava i radna tačka

- Radna tačka tranzistora M na izlaznoj karakteristici se nalazi na preseku izlazne karakteristike i **radne prave**, karakteristike naponskog generatora V_{CC} sa redno vezanim otpornikom R_C .
- Promenom napona v_{BE} menja se položaj izlazne karakteristike, samim tim i presek karakteristike sa radnom pravom, tj. položaj radne tačke M.

$$i_C = (V_{CC} - v_{CE}) / R_C$$

$$v_{CE} = 0, \quad i_C = V_{CC} / R_C$$

$$i_C = 0, \quad v_{CE} = V_{CC}$$



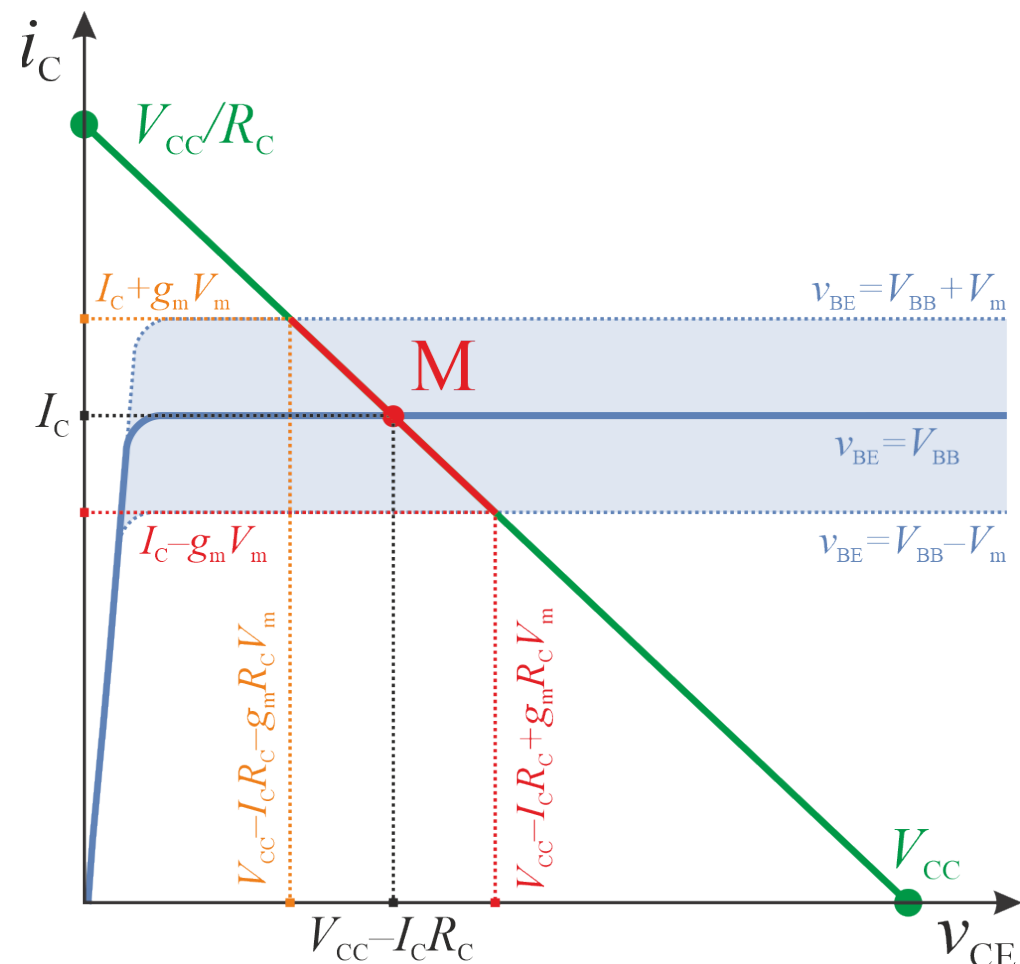
Pojačanje pojačavača sa bipolarnim tranzistorom

$$v_{iz}(t) = v_{CE}$$

$$v_{iz}(t) = V_{CC} - i_C \cdot R_C$$

$$v_{iz}(t) = V_{CC} - R_C \cdot (I_C + g_m \cdot V_m \sin \omega t)$$

$$v_{iz}(t) = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_C \cdot g_m \cdot V_m \sin \omega t$$

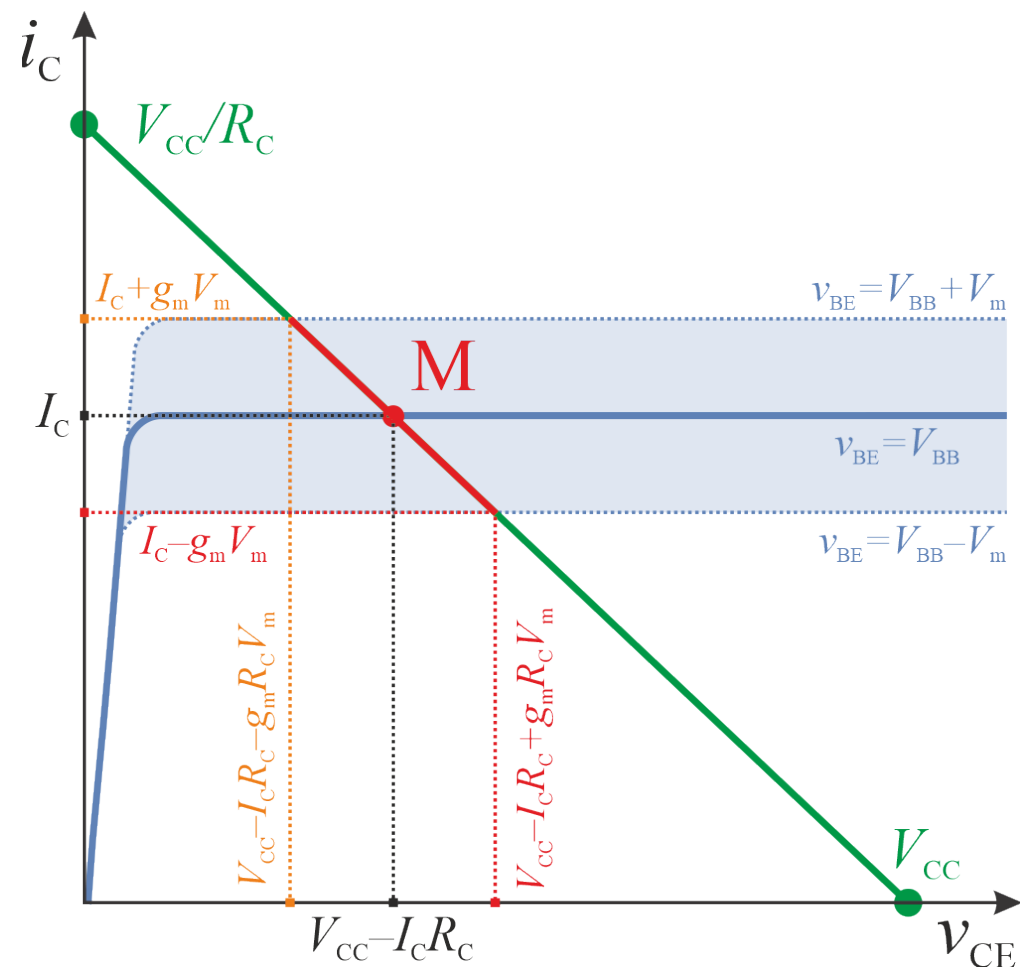


Pojačanje pojačavača sa bipolarnim tranzistorom

$$v_{iz}(t) = \underbrace{V_{CC} - R_C \cdot I_C}_{V_{CE}} - R_C \cdot g_m \cdot \underbrace{V_m \sin \omega t}_{v_{ul}(t)}$$

$$v_{iz}(t) = -g_m R_C \cdot v_{ul}(t) + V_{CE}$$

$$A = -g_m R_C$$



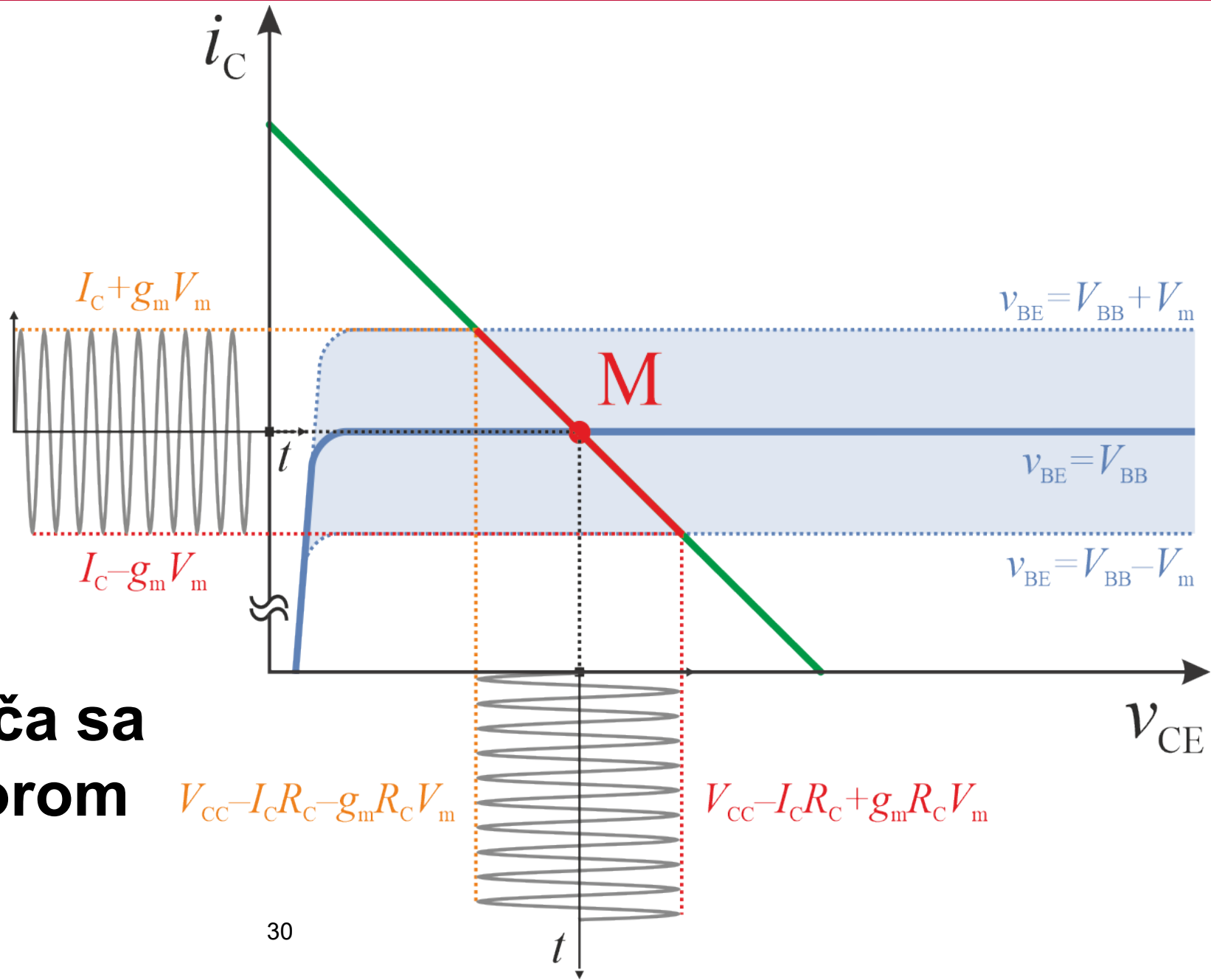
Pojačanje pojačavača sa bipolarnim tranzistorom

- Pojačanje pojačavača sa bipolarnim tranzistorom, u konfiguraciji zajedničkog emitora je **negativno**.
- U slučaju **prostoperiodičnih signala**, negativno pojačanje znači da je izlazni napon v_{iz} u **protivfazi** u odnosu na ulazni napon v_{ul} , odnosno izlazni napon **kasni u odnosu na ulazni za polovinu perioda**:

$$v_{iz}(t) = -g_m R_C \cdot v_{ul}(t) + V_{CE} = R_C \cdot g_m \cdot v_{ul}\left(t - \frac{T}{2}\right) + V_{CE}$$

- U frekvencijskom domenu, **kašnjenje prostoperiodičnog izlaznog signala u odnosu na ulazni signal** odgovara faznoj razlici od π radijana.

Pojačanje pojačavača sa bipolarnim tranzistorom (vremenski domen)



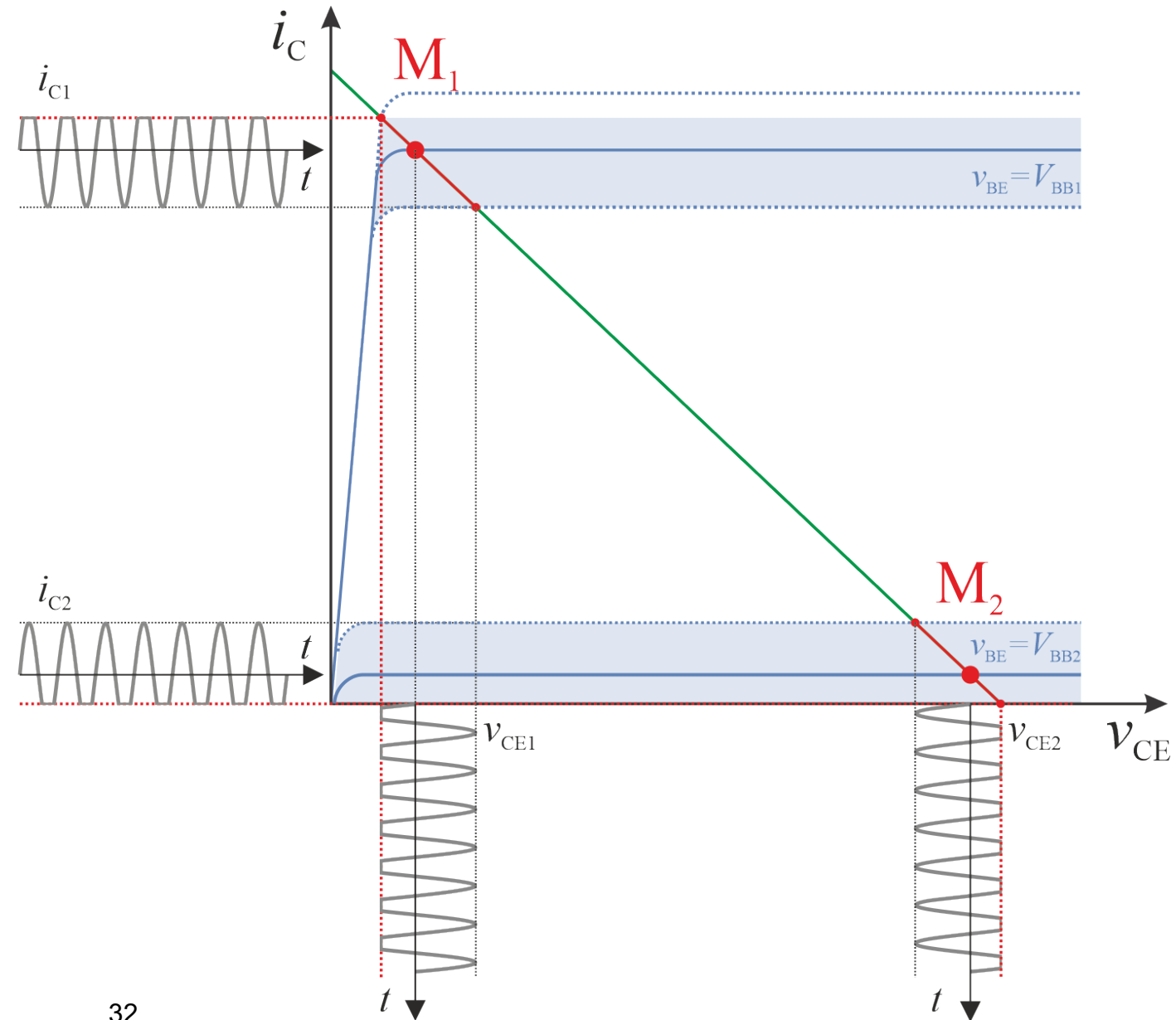
Polarizacija bipolarnog tranzistora

- Da bi se obezbedio aktivni režim bipolarnog tranzistora i adekvatno pojačanje pojačavača, neophodna je odgovarajuća **polarizacija**, odnosno povezivanje jednosmernih izvora napajanja V_{BB} i V_{CC} .
- Naponom V_{BB} se određuje radna tačka na prenosnoj karakteristici. Povećanjem tog napona se povećavaju transkonduktansa tranzistora, pojačanje pojačavača i struja kolektora.
- Ukupna snaga napajanja pojačavača jednaka je proizvodu jednosmerne struje kolektora I_C i napona izvora napajanja V_{CC} , pa je za veće naponsko pojačanje neophodno i povećanje snage napajanja, što u nekim primenama nije poželjno¹.

¹Struja baze I_B je znatno manja, tako da se snaga generatora V_{BB} može zanemariti.

Polarizacija bipolarnog tranzistora

- Prilikom izbora napona V_{BB} , V_{CC} i otpornosti R_C , treba obezbediti da tranzistor bude u aktivnom režimu za sve moguće vrednosti ulaznog signala, tj. da radna tačka na izlaznoj karakteristici ne bude blizu oblasti zasićenja (M_1) i oblasti zakočenja (M_2). U suprotnom, može doći do odsecanja signala.

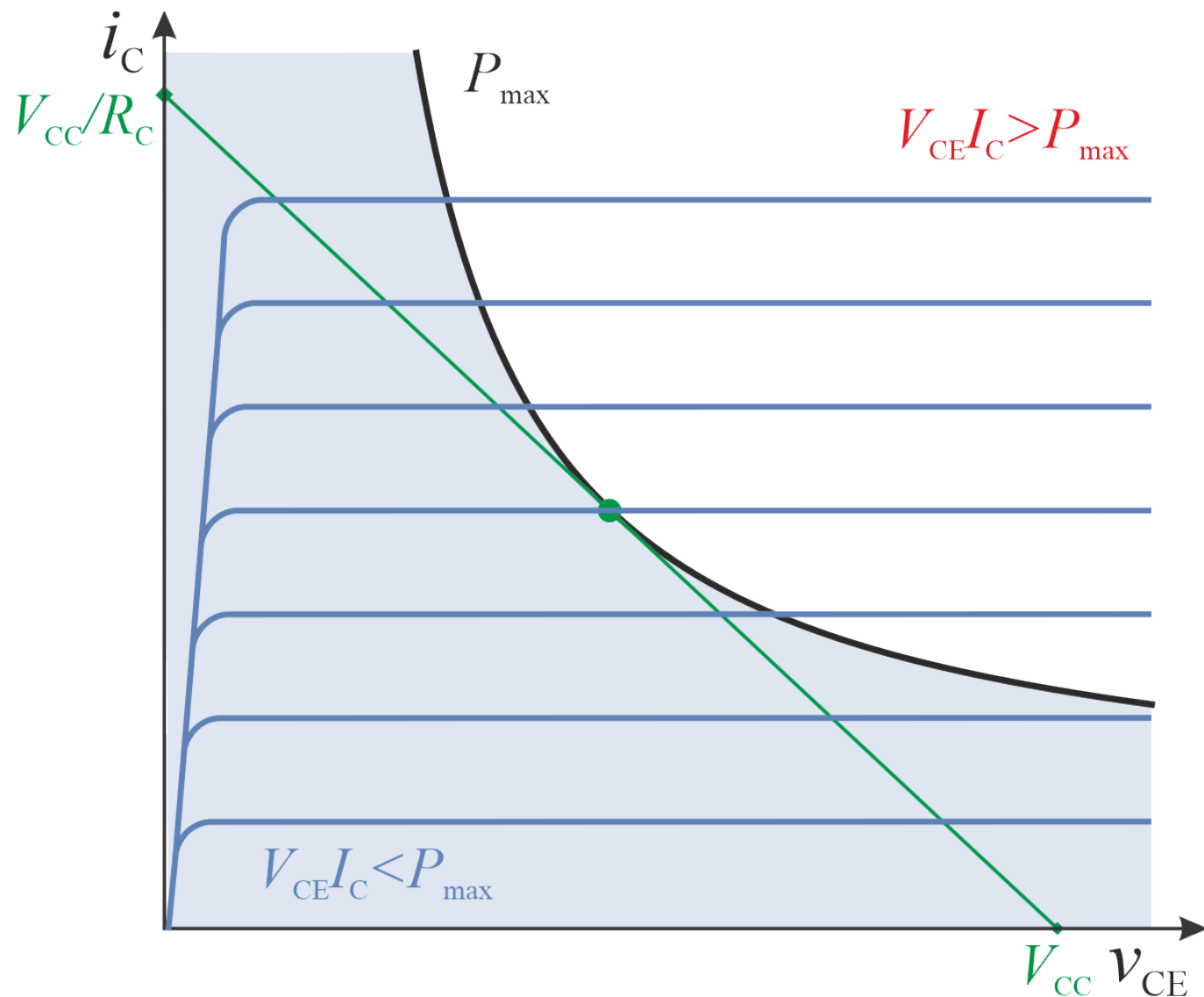


Polarizacija bipolarnog tranzistora

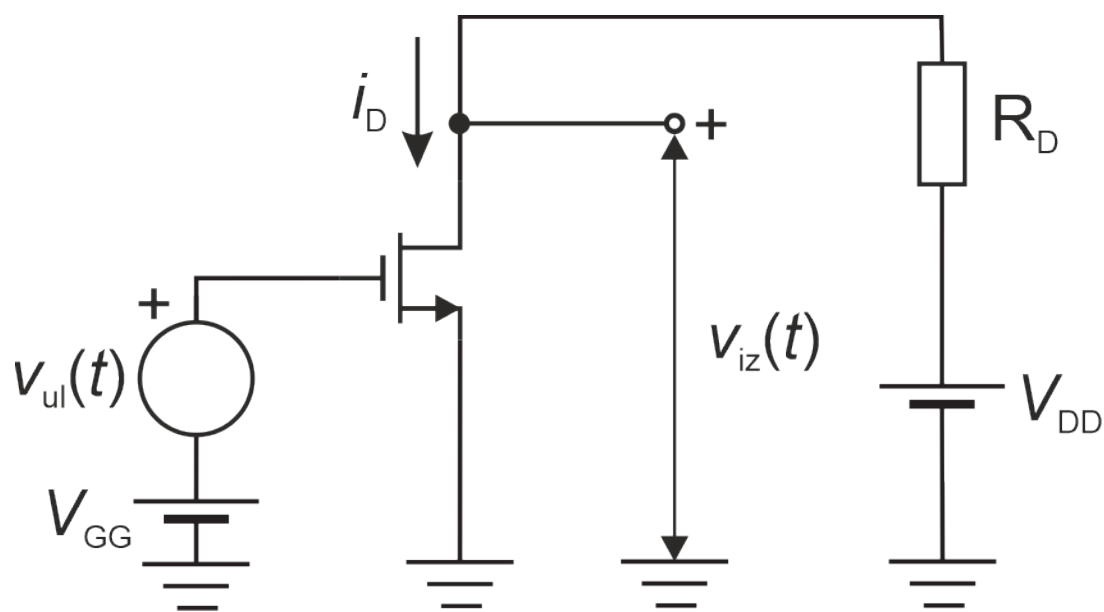
- Ukupna snaga tranzistora je:

$$P = V_{CE} \cdot I_C$$

- Maksimalna dozvoljena snaga koja se može razviti na tranzistoru, P_{max} , na karakteristici je predstavljena hiperbolum snage. Radna prava se mora nalaziti u dozvoljenoj oblasti, i ne sme da seče hiperbolu maksimalne snage.



Realizacija pojačavača sa MOSFET-om



$$v_{ul}(t) = V_m \sin \omega t$$

$$v_{iz}(t) = v_{DS}$$

$$v_{iz}(t) = V_{DD} - i_D \cdot R_D$$

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

$$v_{GS} = V_{GG} + v_{ul}(t)$$

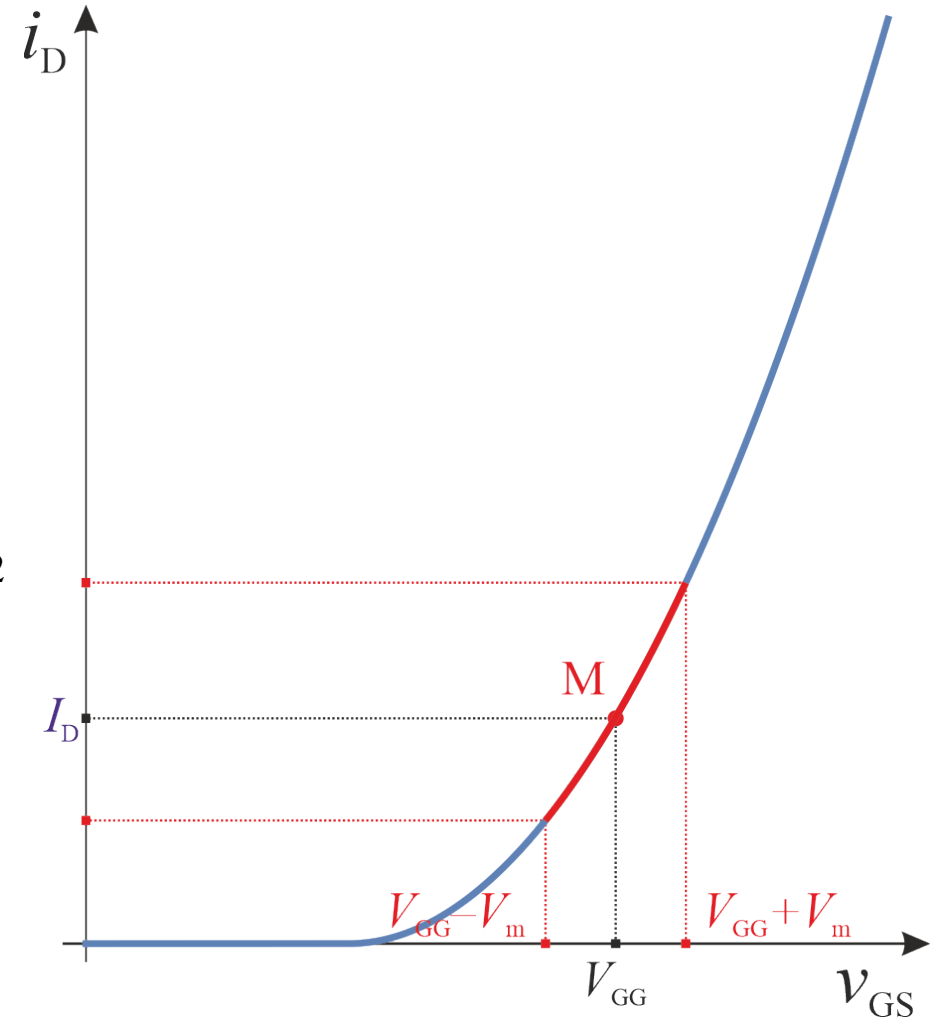
Struja kanala i_D

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

$$i_D = I_{DS} \cdot \left(\left(\frac{V_{GG}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 + 2 \left(\frac{V_{GG}}{V_{TH}} - 1 \right) \frac{v_{ul}(t)}{V_{TH}} + \left(\frac{v_{ul}(t)}{V_{TH}} \right)^2 \right)$$

$$i_D = I_{DS} \cdot \left(\frac{V_{GG}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 + 2I_{DS} \left(\frac{V_{GG}}{V_{TH}} - 1 \right) \frac{v_{ul}(t)}{V_{TH}} + I_{DS} \left(\frac{v_{ul}(t)}{V_{TH}} \right)^2$$

$$i_D = I_D + 2I_{DS} \left(\frac{V_{GG}}{V_{TH}} - 1 \right) \cdot \frac{v_{ul}(t)}{V_{TH}} + I_{DS} \left(\frac{v_{ul}(t)}{V_{TH}} \right)^2$$



Aproksimacija kvadratne funkcije

- Kvadratna funkcija može da se aproksimira linearnom funkcijom ukoliko je drugi član binoma mnogo manji od prvog.

$$(1 + x)^2 = 1 + 2x + x^2$$

- Za male vrednosti argumenta x , kvadratni član je mnogo manji od linearnog:

$$|x| \ll 1$$

$$(1 + x)^2 \approx 1 + 2x$$

Transkonduktansa MOSFET-a

- Izvod struje kanala po naponu između gejta i sorsa, u određenoj radnoj tački M (u ovom slučaju $v_{GS} = V_{GG}$) se naziva **transkonduktansa MOSFET-a (g_m)**:

$$g_m = \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{v_{GS}=V_{GG}} = \left. \frac{d}{dv_{GS}} \left(I_{DS} \cdot \left(\frac{v_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right)^2 \right) \right|_{v_{GS}=V_{GG}}$$

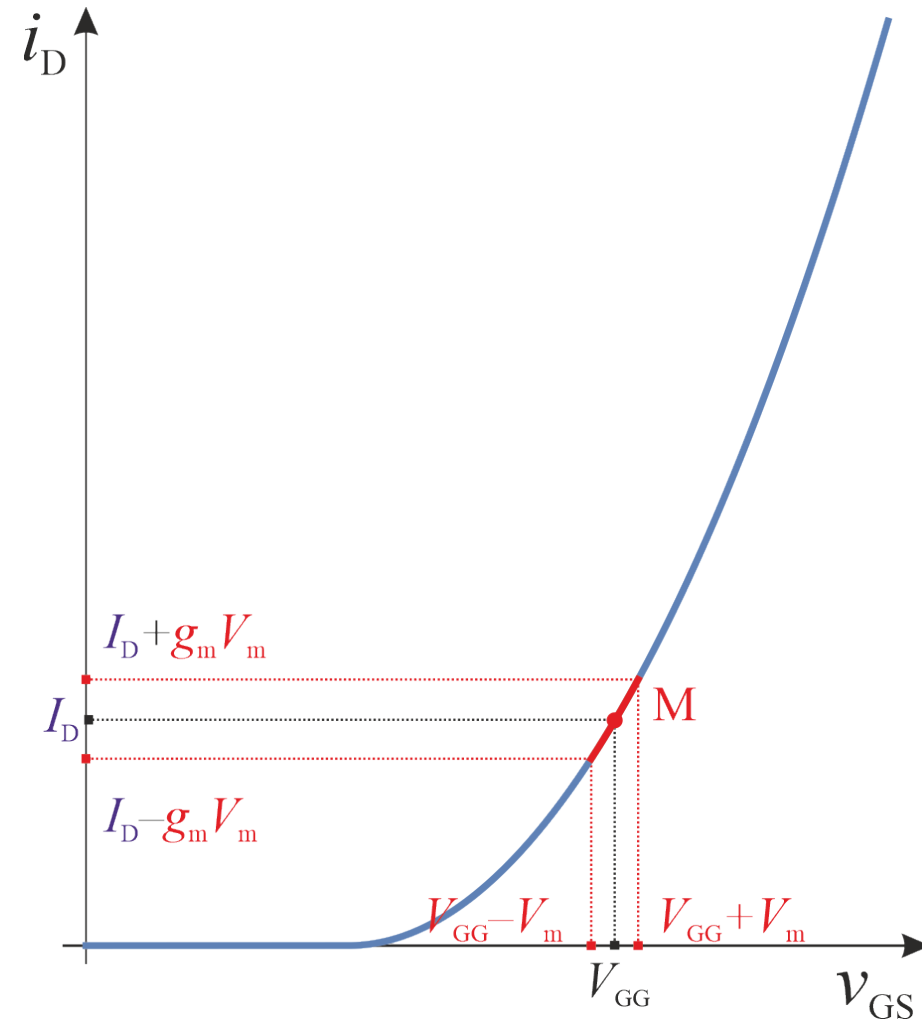
$$g_m = \left. \frac{2I_{DS}}{V_{TH}} \cdot \left(\frac{v_{GS}}{V_{TH}} - 1 \right) \right|_{v_{GS}=V_{GG}} = \frac{2I_{DS}}{V_{TH}} \cdot \left(\frac{V_{GG}}{V_{TH}} - 1 \right)$$

Struja kanala i_D

- Sinusna funkcija je manja ili jednaka jedinici, a ukoliko je $V_m < V_{TH}$, kvadratni član se može zanemariti:

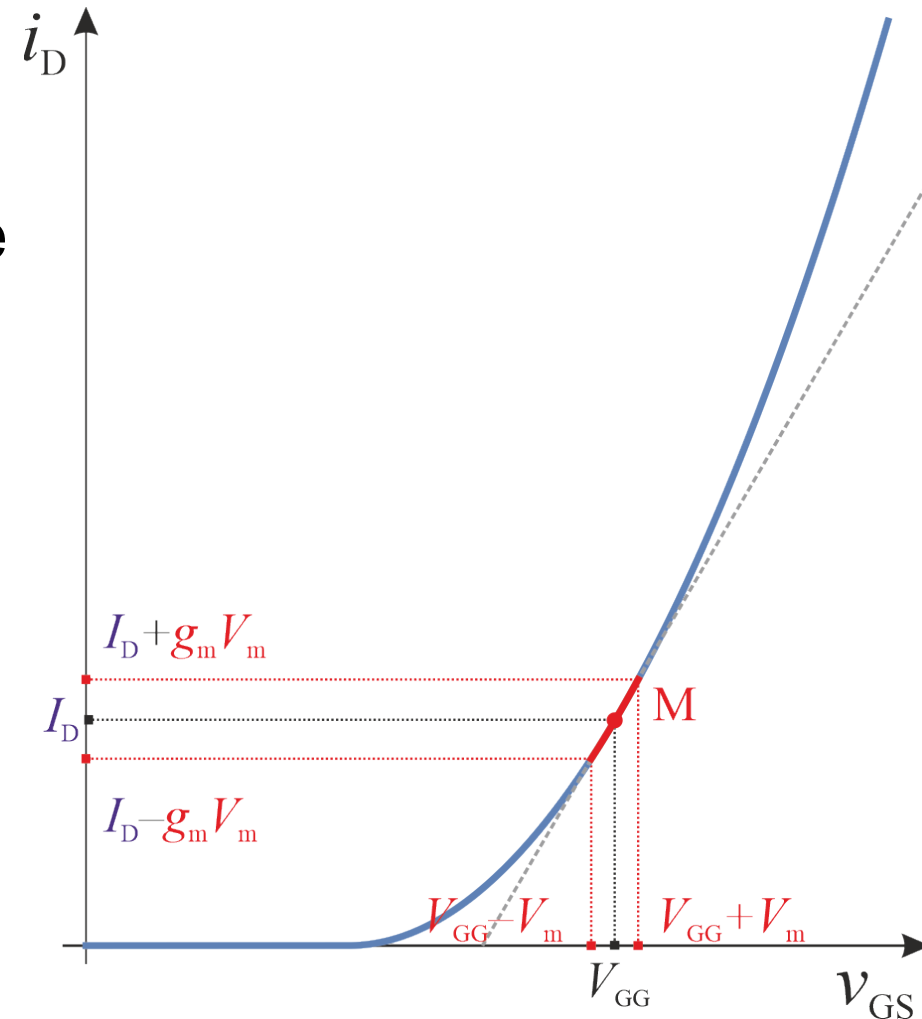
$$i_D = I_D + \frac{2I_{DS}}{V_{TH}} \left(\frac{V_{GG}}{V_{TH}} - 1 \right) \cdot V_m \sin \omega t$$

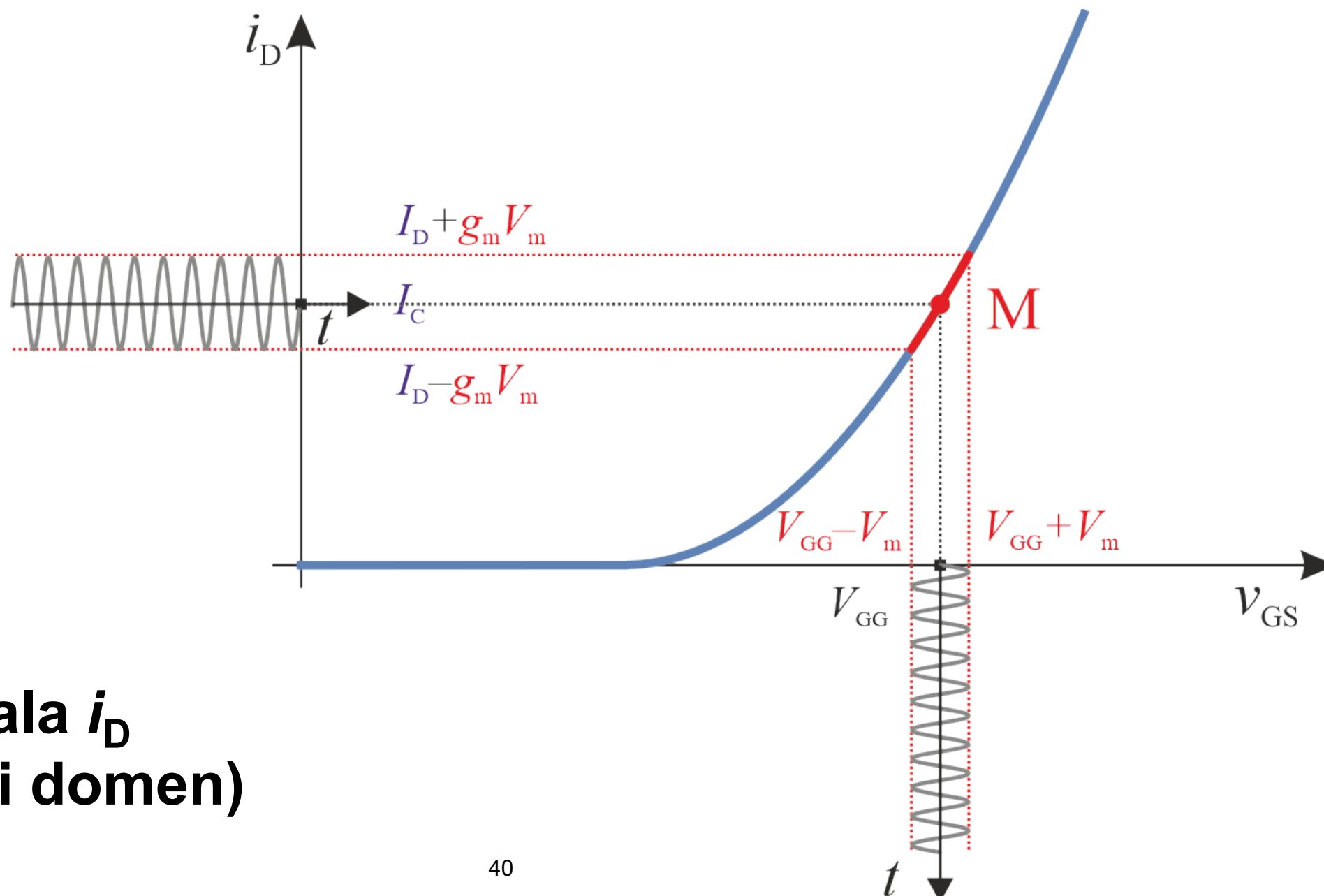
$$i_D = I_D + g_m \cdot V_m \sin \omega t = I_D + g_m \cdot v_{ul}(t)$$



Linearizacija

- Već je pomenuto da postupak aproksimiranja nelinearne karakteristike tranzistora tangentom u određenoj tački se naziva **linearizacija**.
- Za **signale malih amplituda**, $V_m < V_{TH}$, prenosna karakteristika MOSFET-a se može linearizovati (aproksimirati tangentom) u tački M.
- Tačka **M** se naziva **radna tačka tranzistora**, i ona je određena jednosmernom komponentom napona v_{GS} , u ovom konkretnom slučaju naponom V_{GG} .





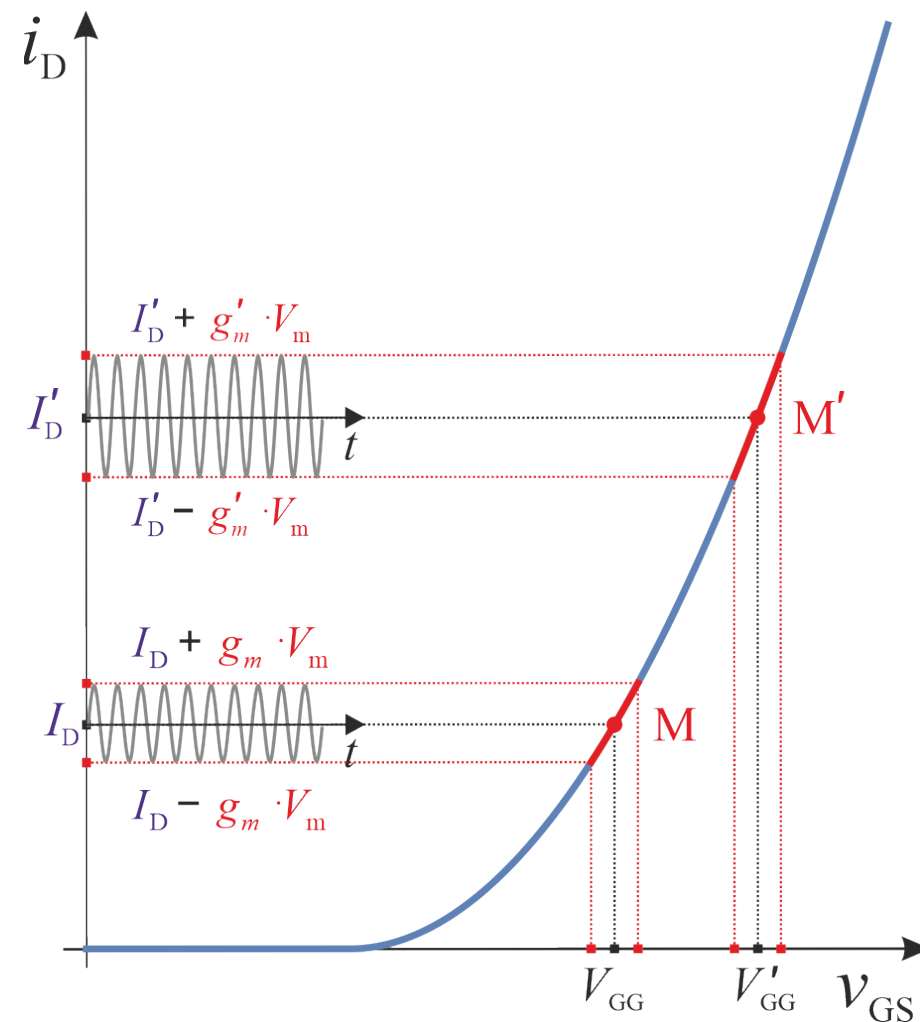
**Struja kanala i_D
(vremenski domen)**

Struja kanala i_D (vremenski domen)

- Amplituda vremenski promenljive komponente struje kanala i_D zavisi od jednosmerne komponente napona v_{GS} , odnosno položaja radne tačke M:

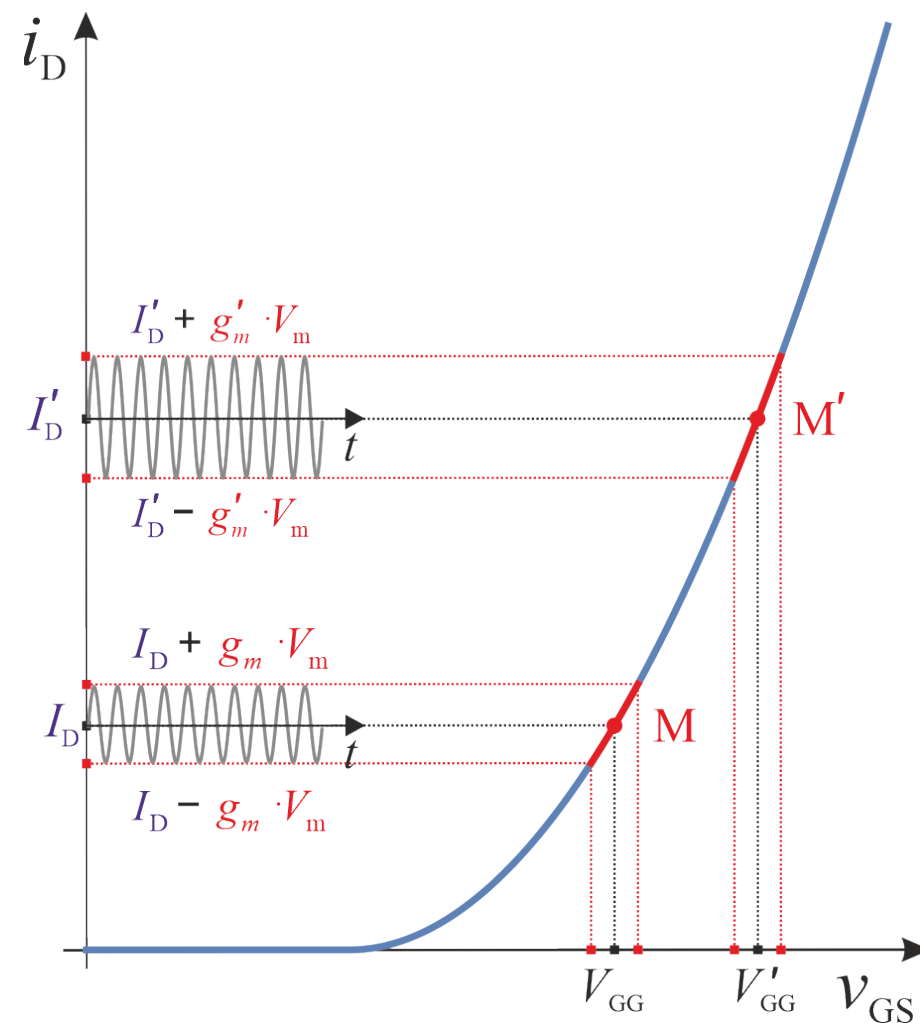
$$i_D = I_D + i_d = I_D + g_m \cdot v_{ul}(t)$$

- Kako bi se ostvarila potrebna amplituda struje kanala i_D , neophodno je pravilno odabrati jednosmernu komponentu napona v_{GS} , u ovom konkretnom slučaju napon V_{GG} .



Transkonduktansa MOSFET-a

- Transkonduktansa MOSFET-a zavisi od izbora radne tačke, odnosno jednosmerne komponente napona v_{GS} .
- Transkonduktansa je kvantitativna mera pojačanja MOSFET-a.



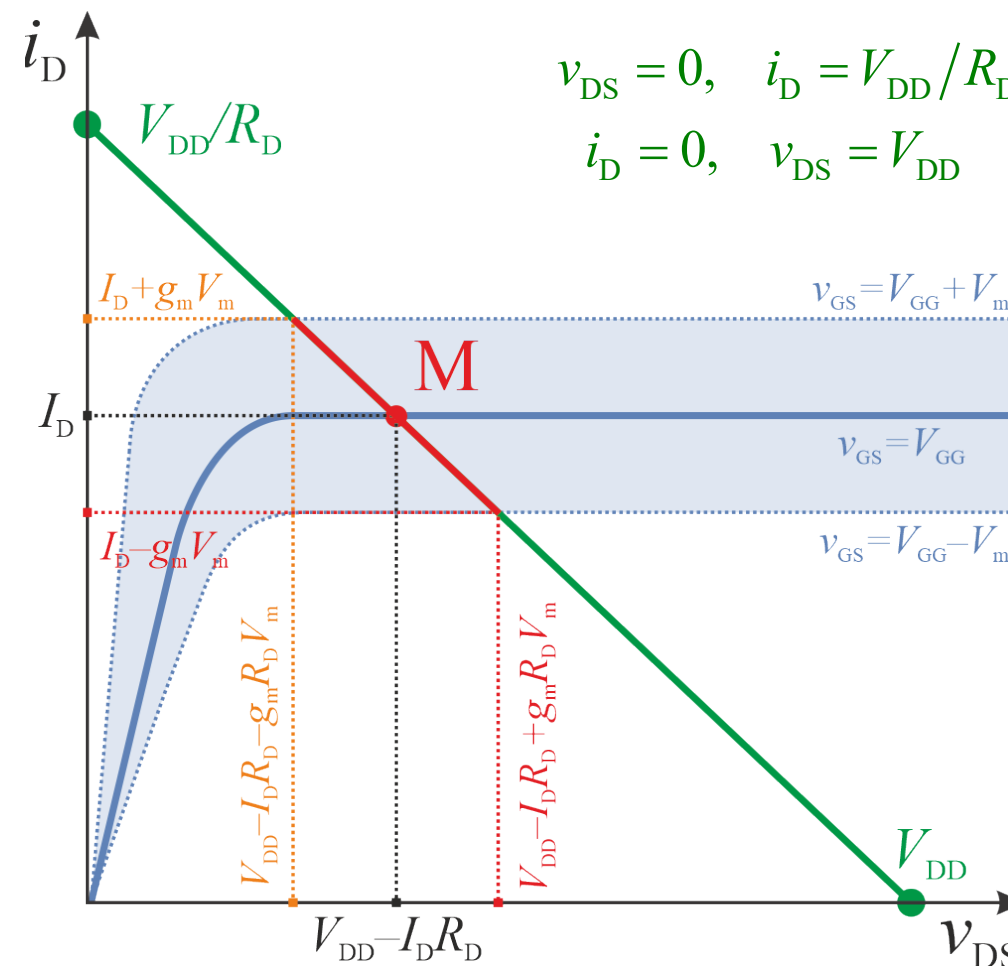
Radna prava i radna tačka

- Radna tačka MOSFET-a M na izlaznoj karakteristici se nalazi na preseku izlazne karakteristike i **radne prave**, karakteristike naponskog generatora V_{DD} sa redno vezanim otpornikom R_D .
- Promenom napona v_{GS} menja se položaj izlazne karakteristike, a samim tim i presek karakteristike sa radnom pravom, tj. položaj radne tačke M.

$$i_D = (V_{DD} - v_{DS}) / R_D$$

$$v_{DS} = 0, \quad i_D = V_{DD} / R_D$$

$$i_D = 0, \quad v_{DS} = V_{DD}$$



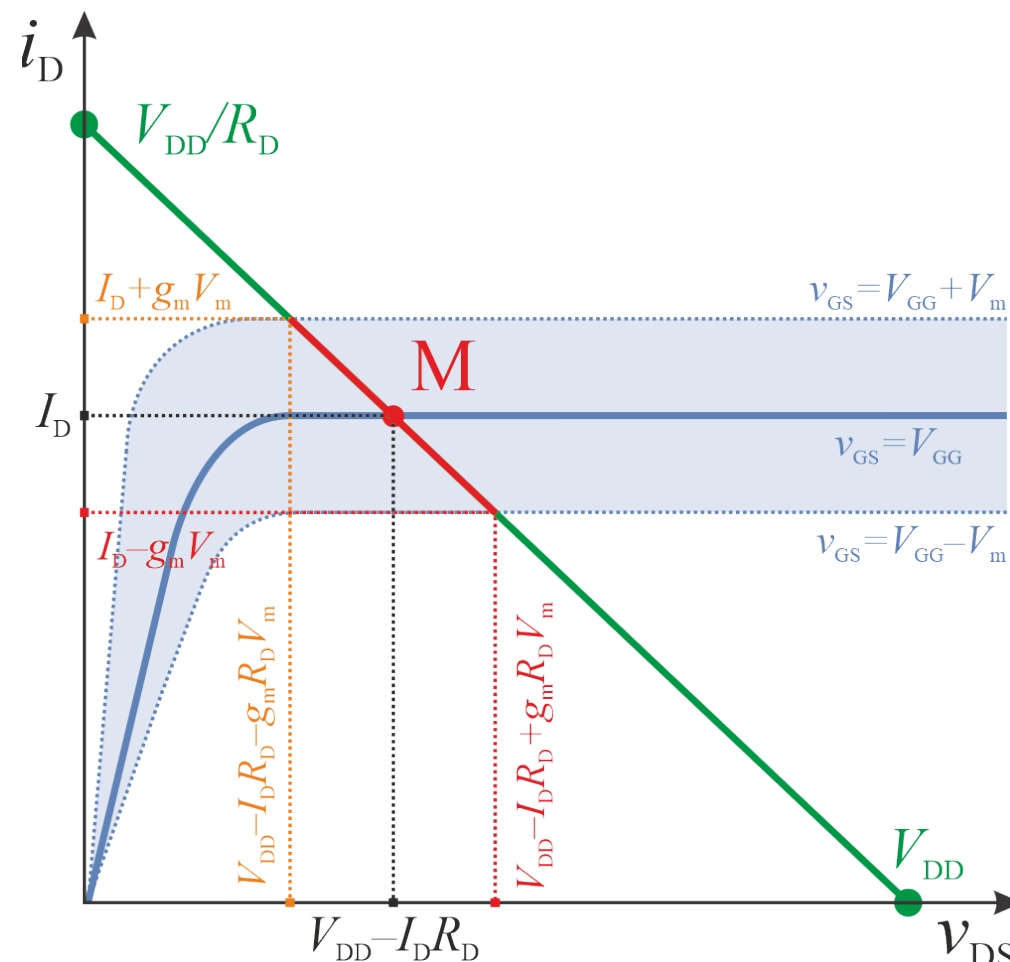
Pojačanje pojačavača sa MOSFET-om

$$v_{iz}(t) = v_{DS}$$

$$v_{iz}(t) = V_{DD} - i_D \cdot R_D$$

$$v_{iz}(t) = V_{DD} - R_D \cdot (I_D + g_m \cdot V_m \sin \omega t)$$

$$v_{iz}(t) = V_{DD} - R_D \cdot I_D - R_D \cdot g_m \cdot V_m \sin \omega t$$

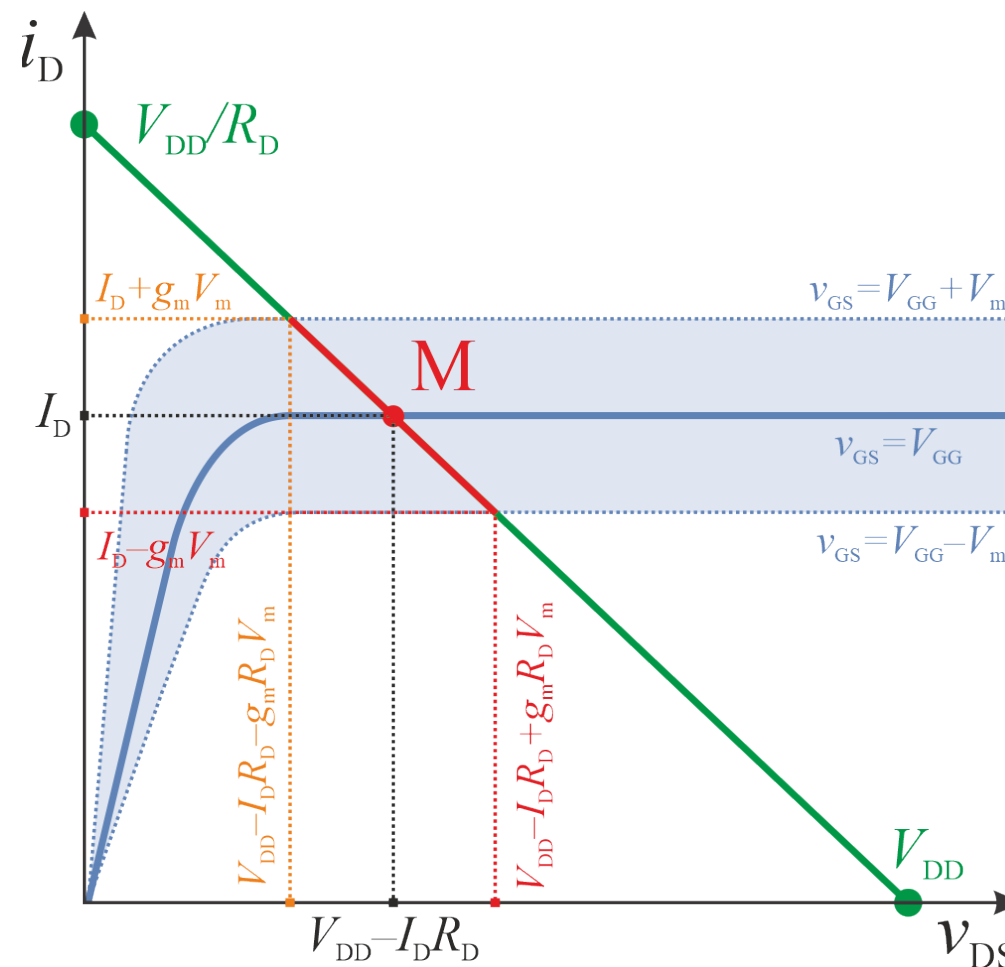


Pojačanje pojačavača sa MOSFET-om

$$v_{iz}(t) = \underbrace{V_{DD} - R_D \cdot I_D}_{V_{DS}} - R_D \cdot g_m \cdot \underbrace{V_m \sin \omega t}_{v_{ul}(t)}$$

$$v_{iz}(t) = -g_m R_D \cdot v_{ul}(t) + V_{DS}$$

$$A = -g_m R_D$$



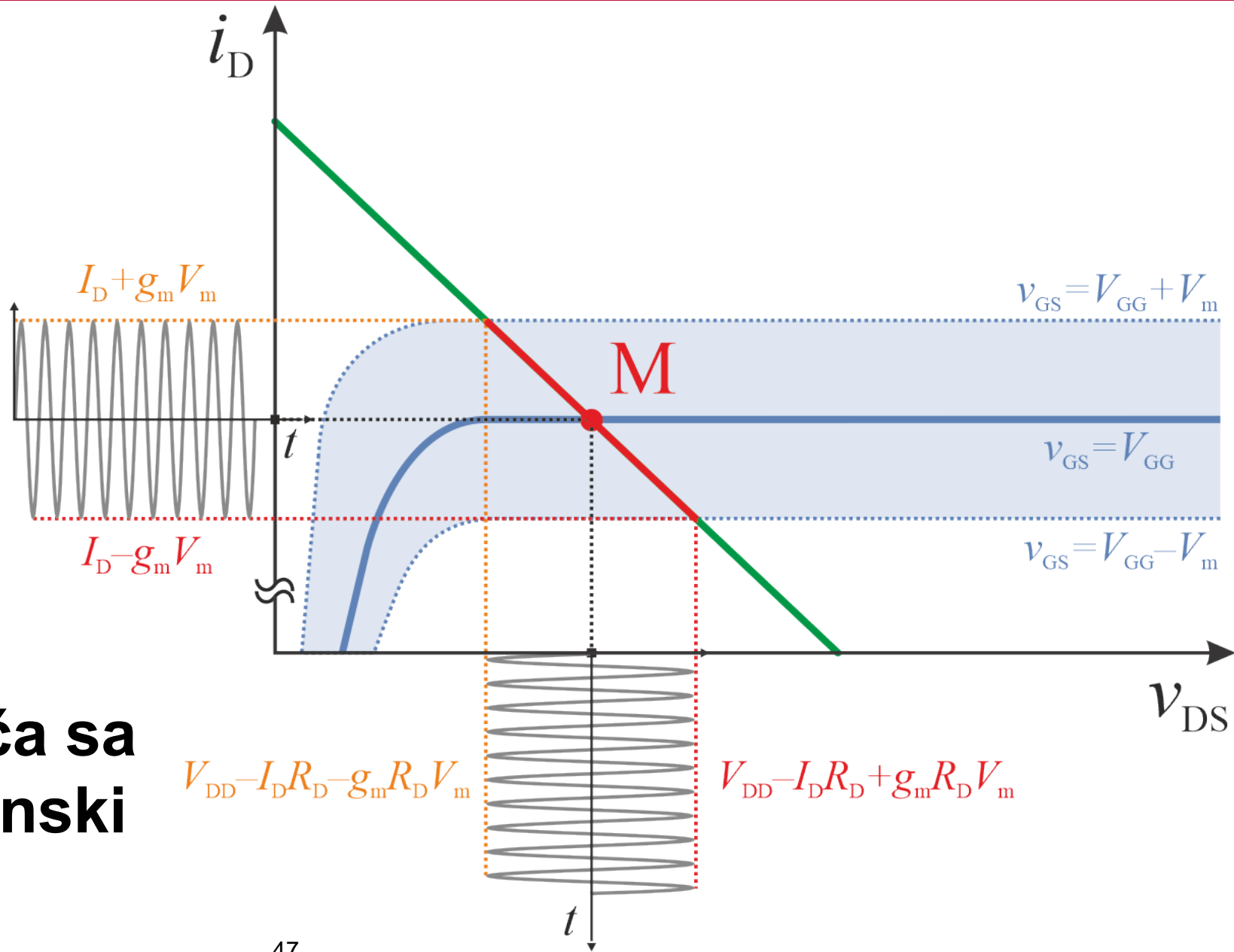
Pojačanje pojačavača sa MOSFET-om

- Pojačanje pojačavača sa MOSFET-om, u konfiguraciji zajedničkog sorsa je **negativno**.
- U slučaju **prostoperiodičnih signala**, negativno pojačanje znači da je izlazni napon v_{iz} u **protivfazi** u odnosu na ulazni napon v_{ul} , odnosno izlazni napon **kasni u odnosu na ulazni za polovinu perioda**:

$$v_{iz}(t) = -g_m R_D \cdot v_{ul}(t) + V_{DS} = R_D \cdot g_m \cdot v_{ul}\left(t - \frac{T}{2}\right) + V_{DS}$$

- U frekvencijskom domenu, **kašnjenje prostoperiodičnog izlaznog signala u odnosu na ulazni signal** odgovara faznoj razlici od π radijana.

Pojačanje pojačavača sa MOSFET-om (vremenski domen)

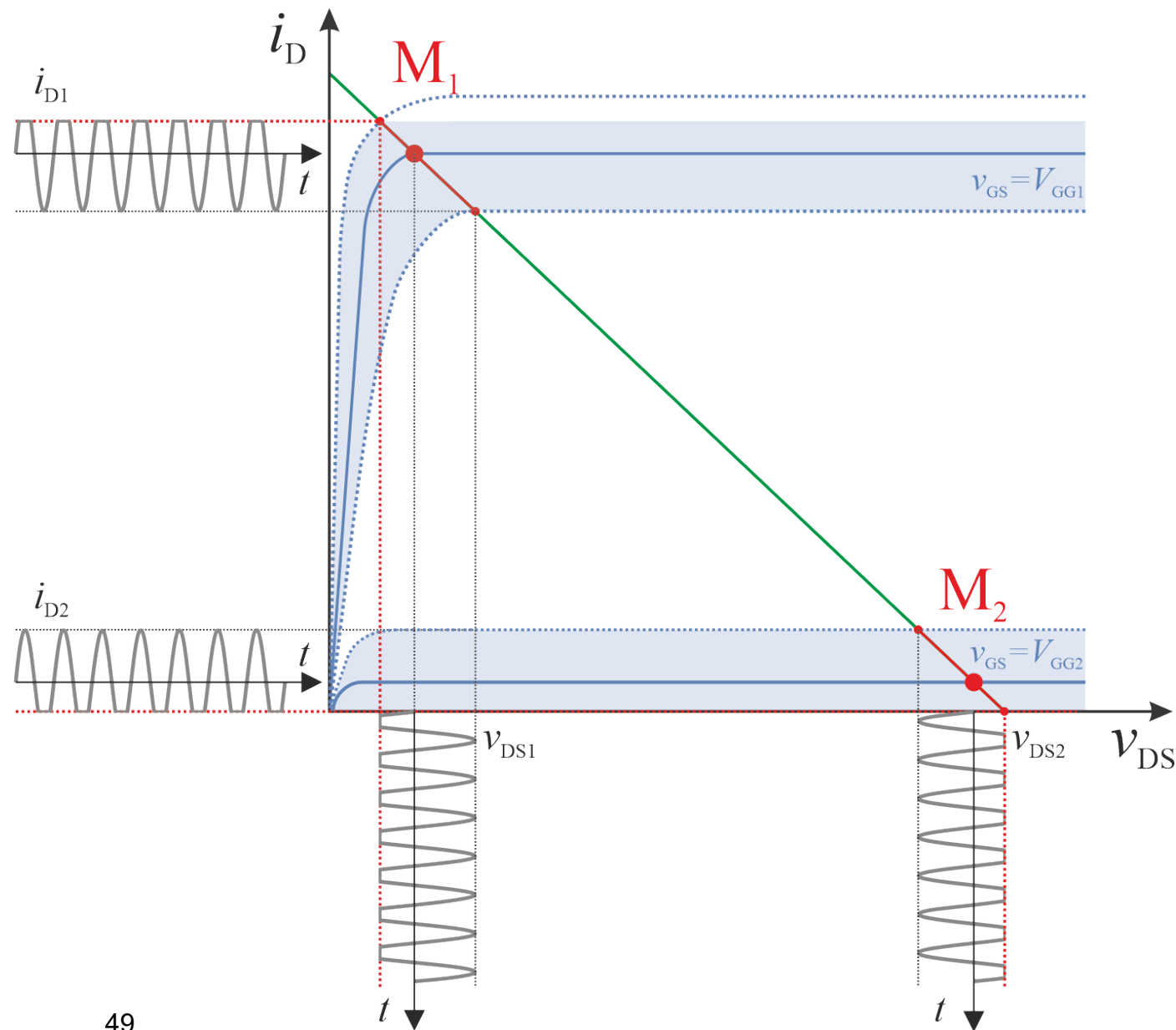


Polarizacija MOSFET-a

- Da bi se obezbedio režim zasićenja MOSFET-a i adekvatno pojačanje pojačavača, neophodna je odgovarajuća **polarizacija**, odnosno povezivanje jednosmernih izvora napajanja V_{GG} i V_{DD} .
- Naponom V_{GG} se određuje radna tačka na prenosnoj karakteristici. Povećanjem ovog napona se povećavaju transkonduktansa MOSFET-a, pojačanje pojačavača i struja kanala.
- Ukupna snaga napajanja pojačavača jednaka je proizvodu jednosmerne struje kanala I_D i napona V_{DD} , pa je za veće naponsko pojačanje neophodno i povećanje snage napajanja, što u nekim primenama nije poželjno.

Polarizacija MOSFET-a

- Prilikom izbora napona V_{GG} , V_{DD} i otpornosti R_D , treba obezbediti da MOSFET bude u režimu zasićenja za sve moguće vrednosti ulaznog signala, tj. da radna tačka na izlaznoj karakteristici ne bude blizu triodne oblasti (M_1) i oblasti zakočavanja (M_2). U suprotnom, može doći do odsecanja signala.

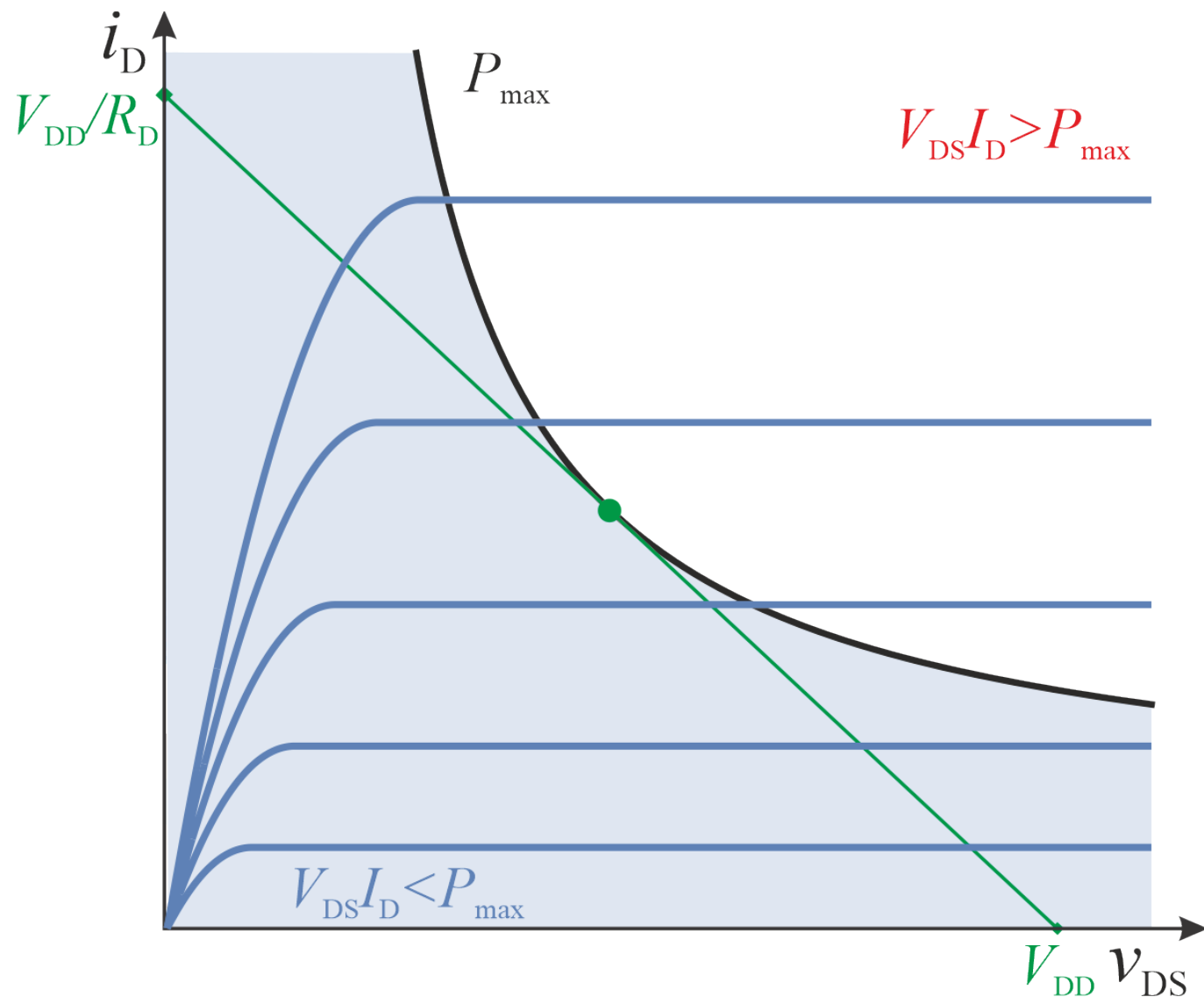


Polarizacija MOSFET-a

- Ukupna snaga MOSFET-a je:

$$P = V_{DS} \cdot I_D$$

- Maksimalna dozvoljena snaga koja se može razviti na MOSFET-u, P_{\max} , na karakteristici je predstavljena hiperbolom snage. Radna prava se mora nalaziti u dozvoljenoj oblasti, i ne sme da seče hiperbolu maksimalne snage.



Zaključak

- Pojačavači su osnovna elektronska kola, čija je funkcija pojačanje signala. Pojačavači su četvoropoli.
- **Bipolarni tranzistor u aktivnom režimu i MOSFET u režimu zasićenja**, povezani sa pasivnim elementima u odgovarajućoj konfiguraciji, pojačavaju signale. Za postizanje radnih režima i određivanje radne tačke, neophodna je **polarizacija** tranzistora.
- Tranzistori su nelinearni elementi. Ukoliko je amplituda ulaznog signala mala (u odnosu na V_T kod bipolarnog, odnosno V_{TH} kod MOS tranzistora), karakteristike tranzistora se mogu aproksimirati tangentom u radnoj tački, odnosno predstaviti linearnim modelom.

Zaključak

- Kola koja se sastoje od linearnih i linearizovanih elemenata su **linearna kola**.
- U linearnim kolima napon bilo kog čvora i struja bilo koje grane su linearne funkcije pobudnih napona i struja.
- Jedan od najvažnijih principa koji važi za linearna kola je **superpozicija: u linearnom kolu, ukupan odziv koji izazivaju dve ili više pobuda je zbir odziva koje bi izazvala svaka pobuda pojedinačno**. (Ako pobuda v_A prouzrokuje odziv v_X , a pobuda v_B prouzrokuje odziv v_Y , onda pobuda $(v_A + v_B)$ proizvodi odziv $(v_X + v_Y)$.)

Zaključak

- Zahvaljujući principu superpozicije, analiza pojačavača može da se sprovede u dva koraka: **analiza jednosmernog režima** (određivanje jednosmernih napona i struja u kolu) i **analiza naimeničnog režima** (određivanje vremenski promenljivih napona i struja u kolu).
- Druga važna posledica linearizacije je mogućnost primene Furijeove transformacije. Pobudni signal može da se predstavi Furijeovim redom i primenom principa superpozicije kolo pojačavača može da se analizira za prostoperiodične pobude na različitim frekvencijama.