

ЈЕДНОСМЕРНИ ПРЕТВАРАЧИ

- *Подела једносмерних претварача према управљаној величини:*

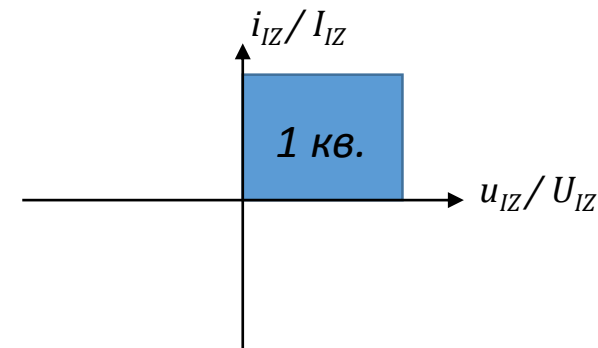
- └─▶ • једносмерни претварачи са управљаном струјом / чопери –
остварују излазну струју мале таласности, $\Delta I_{IZ} \ll I_{IZ}$

- └─▶ • једносмерни претварачи са управљаним напонем / једносмерни напајачи –
остварују излазни напон мале таласности, $\Delta U_{IZ} \ll U_{IZ}$

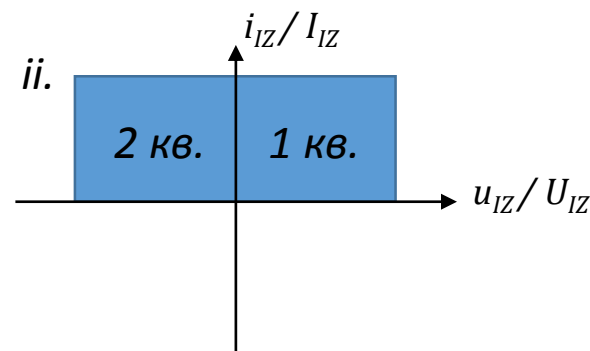
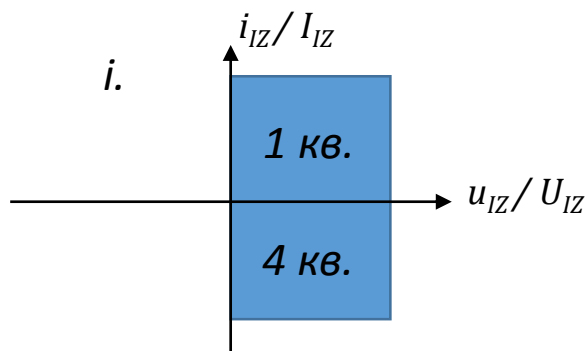
ЧОПЕРИ

- Подела чопера према остваривој тренутној и средњој вредности излазног напона и струје:

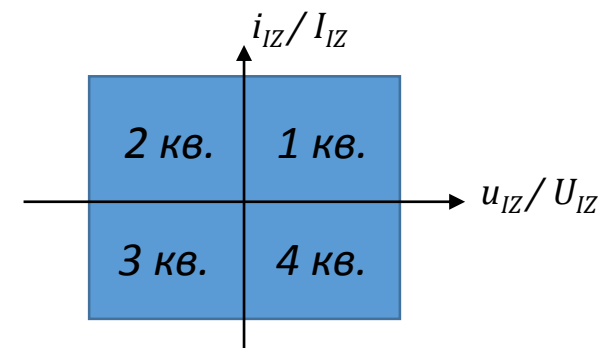
→ • једноквадрантни чопер – $U_{IZ} > 0, I_{IZ} > 0$



→ • двоквадрантни чопери –
i. $U_{IZ} > 0, I_{IZ} < 0$
ii. $U_{IZ} < 0, I_{IZ} > 0$

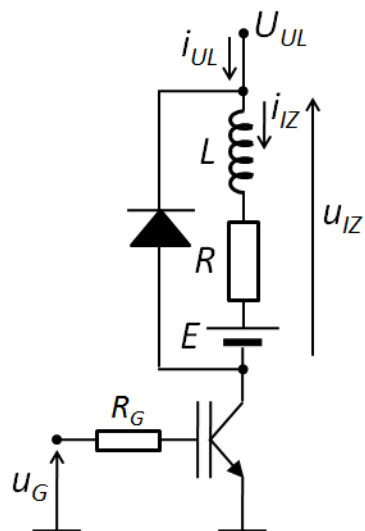


→ • четвороквадрантни чопер – $U_{IZ} < 0, I_{IZ} < 0$



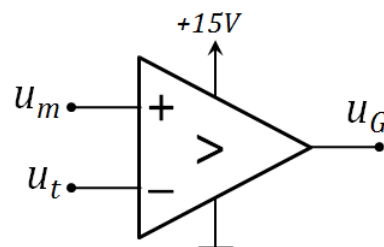
ЈЕДНОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

• КОЛО:

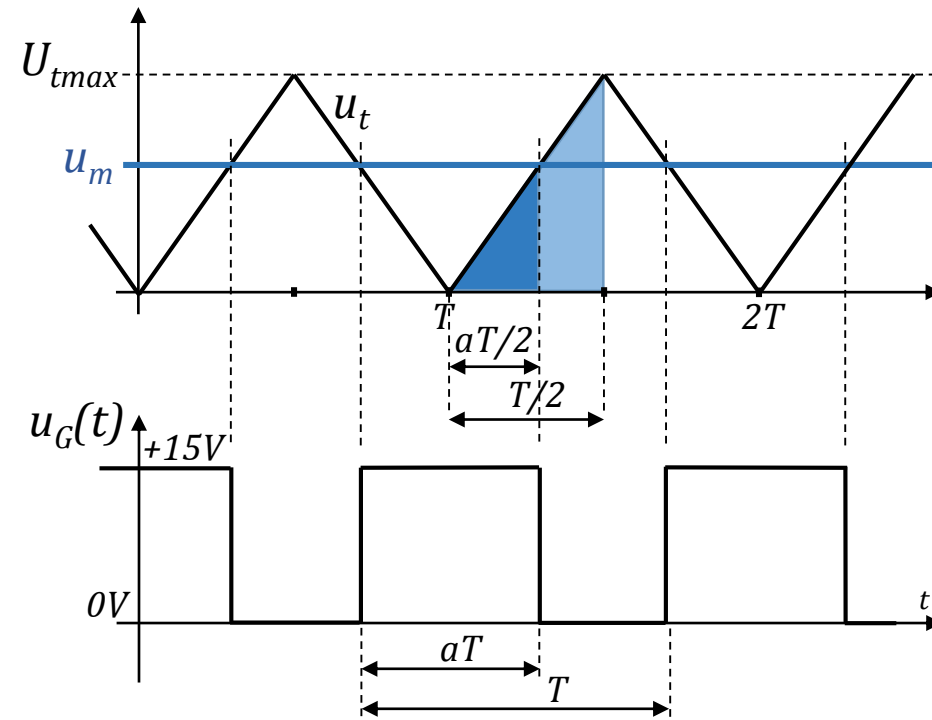


• управљање (импулсно-ширинска модулација):

модулятор једноквадрантног чопера



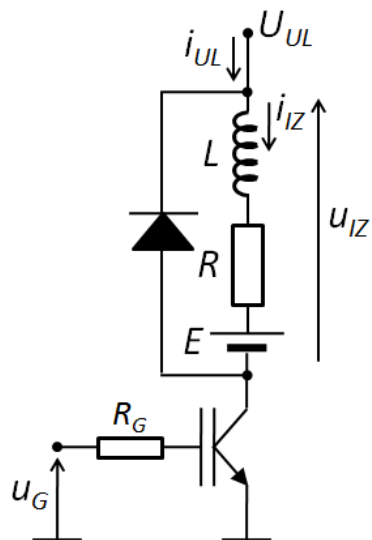
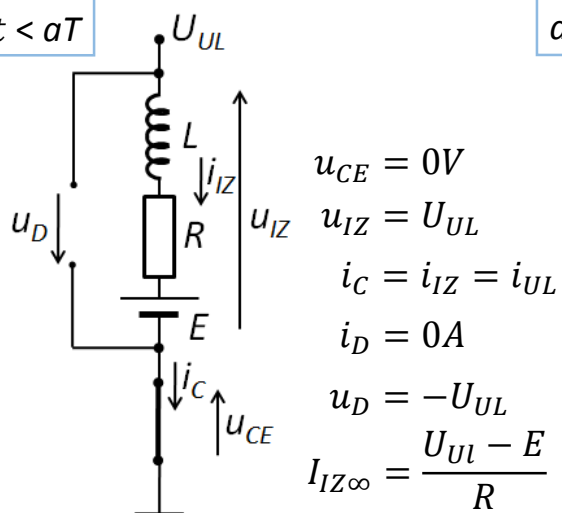
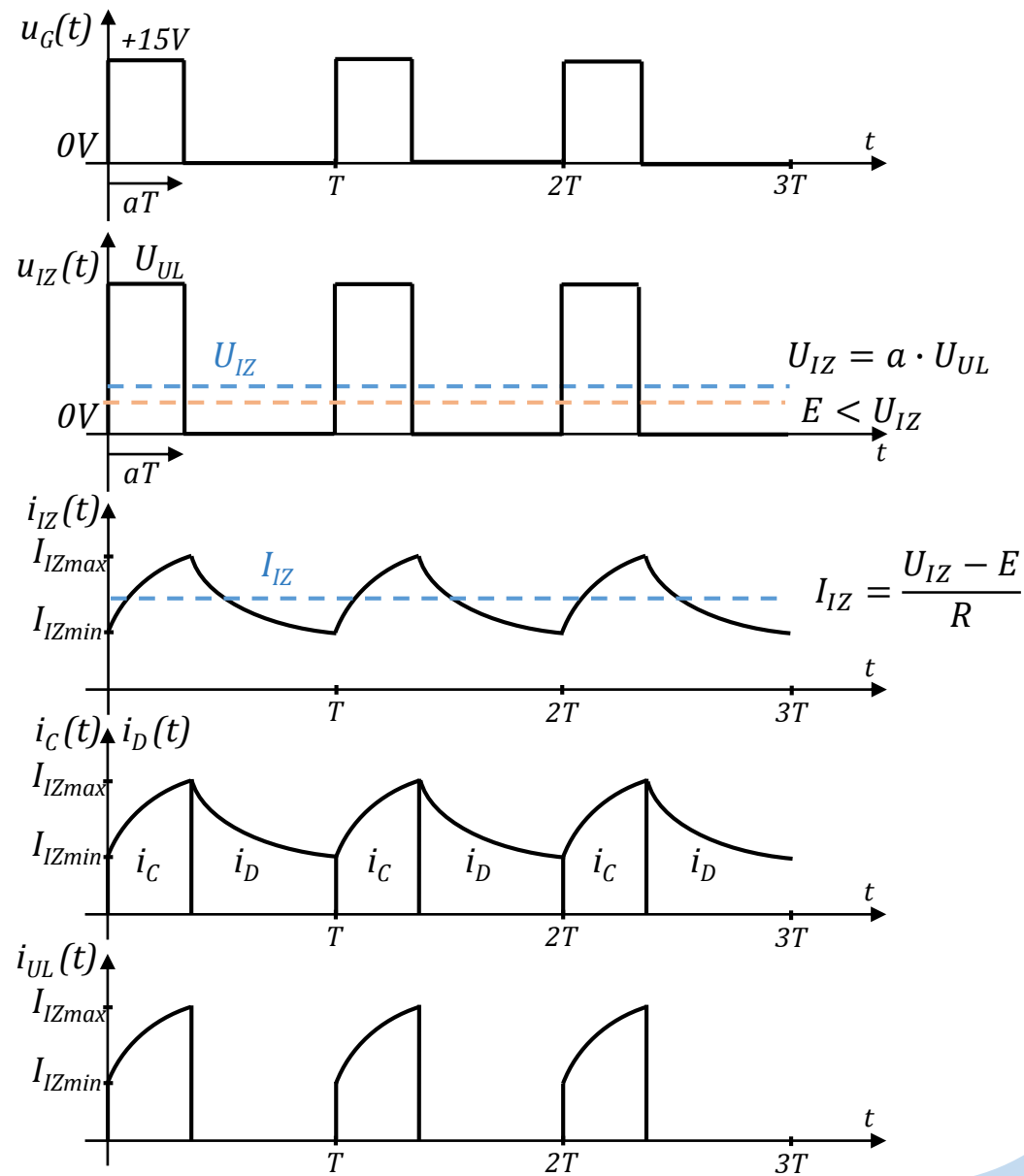
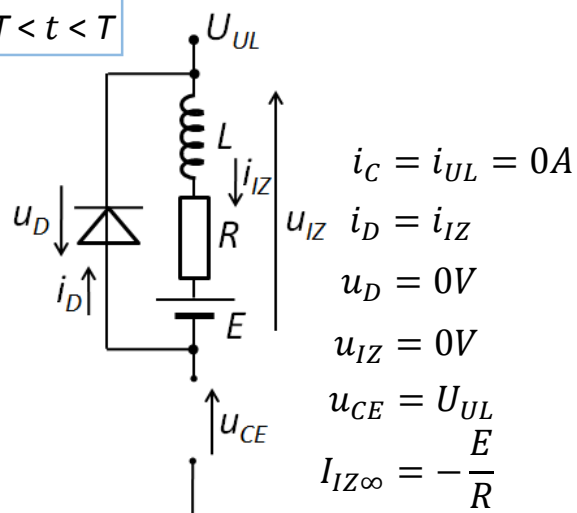
$$\frac{a \frac{T}{2}}{\frac{T}{2}} = \frac{u_m}{U_{tmax}} \Rightarrow a = \frac{u_m}{U_{tmax}}$$



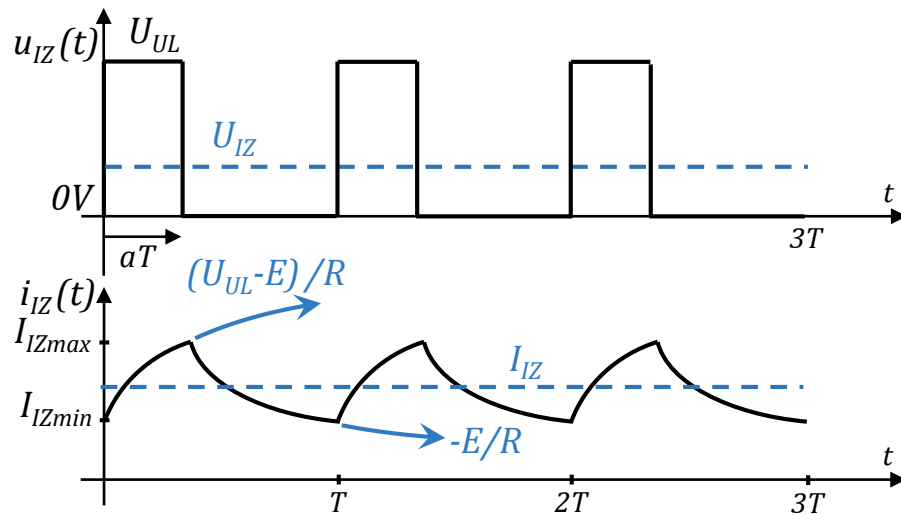
Основни параметри ИШМ управљачког сигнала:

- период прекидања - T
- фактор испуне - a .

ЈЕДНОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР - континуалан рад


 $0 < t < aT$

 $aT < t < T$


ЈЕДНОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР континуалан рад



Решење диференцијалне једначине 1. реда са константним улазом:

$$i_{IZ}(t) = I_{IZ\infty} + (I_{IZ0} - I_{IZ\infty}) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad \tau = L/R$$

$$0 < t < aT \quad i_{IZ}(t) = \frac{U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmin} - \frac{U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(aT) = I_{IZmax} = \frac{U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmin} - \frac{U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{aT}{\tau}} \quad [1]$$

$$aT < t < T \quad i_{IZ}(t) = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmax} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t-aT}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(T) = I_{IZmin} = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmax} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{(1-a)T}{\tau}} \quad [2]$$

- вршне вредности i_{IZ} :

$$[1] \leftrightarrow [2] \Rightarrow I_{IZmin} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$I_{IZmax} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - \frac{E}{R}$$

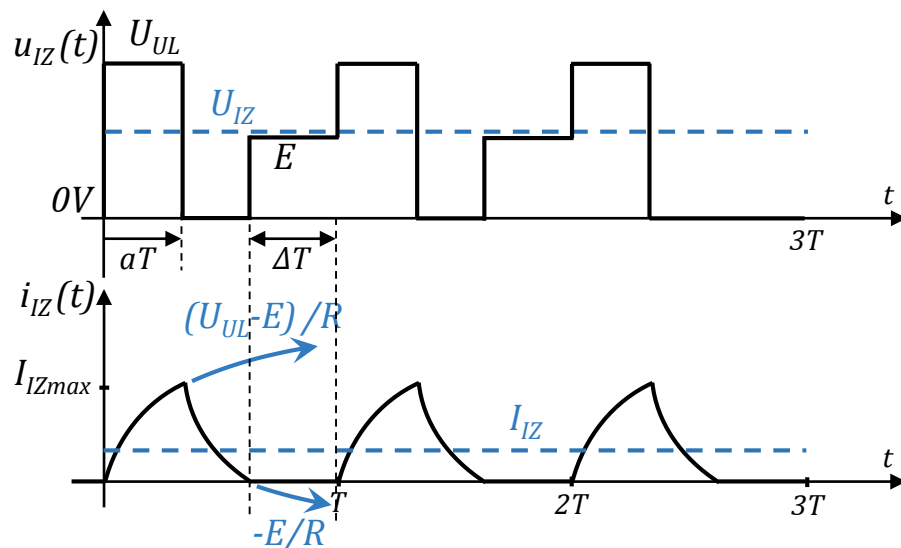
- средње вредности u_{IZ} и i_{IZ} :

$$U_{IZ} = a \cdot U_{UL}$$

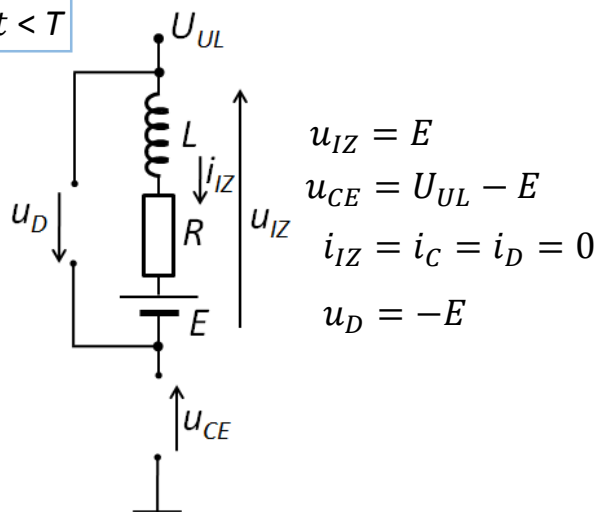
$$U_{IZ} = R \cdot I_{IZ} + U_L + E \xrightarrow{U_L=0} U_{IZ} = R \cdot I_{IZ} + E$$

$$\Rightarrow I_{IZ} = \frac{U_{IZ} - E}{R} = \frac{a \cdot U_{UL} - E}{R}$$

ЈЕДНОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР дисконтинууалан рад



$$T - \Delta T < t < T$$



$$0 < t < aT \quad i_{IZ}(t) = \frac{U_{UL} - E}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$i_{IZ}(aT) = I_{IZmax} = \frac{U_{UL} - E}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{aT}{\tau}})$$

$$aT < t < (1-\Delta)T \quad i_{IZ}(t) = -\frac{E}{R} + (I_{IZmax} + \frac{E}{R}) \cdot e^{-\frac{t-aT}{\tau}}$$

$$i_{IZ}[(1-\Delta)T] = 0 = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmax} + \frac{E}{R}\right) \cdot e^{-\frac{(1-a-\Delta)T}{\tau}}$$

$$\Rightarrow \Delta = 1 - a - \frac{\tau}{T} \cdot \ln\left(\frac{R \cdot I_{IZmax}}{E} + 1\right)$$

- средње вредности u_{IZ} и i_{IZ} :

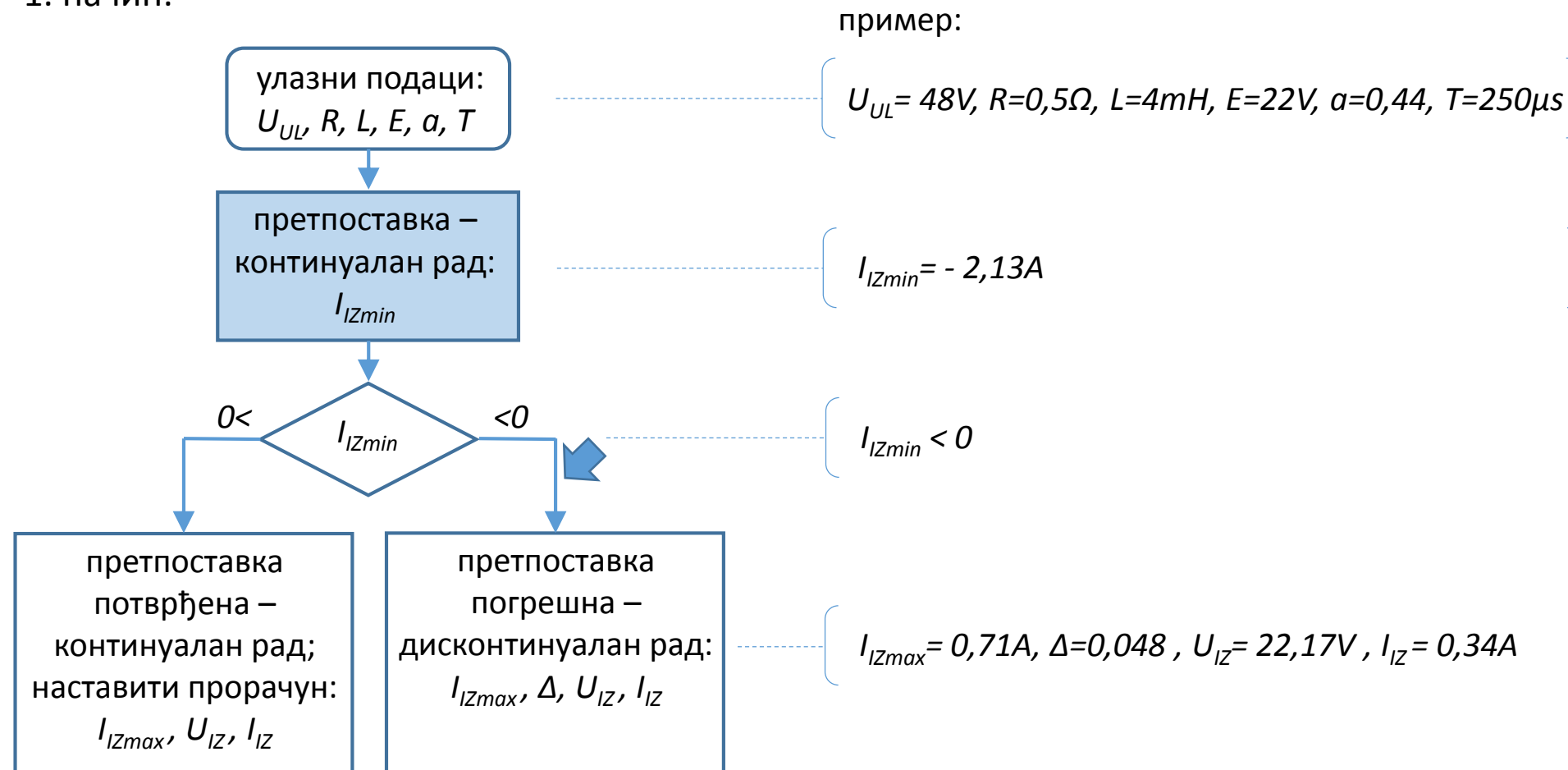
$$U_{IZ} = a \cdot U_{UL} + \Delta \cdot E$$

$$U_{IZ} = R \cdot I_{IZ} + E \Rightarrow I_{IZ} = \frac{U_{IZ} - E}{R}$$

ЈЕДНОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

начин (алгоритам) прорачуна радне тачке

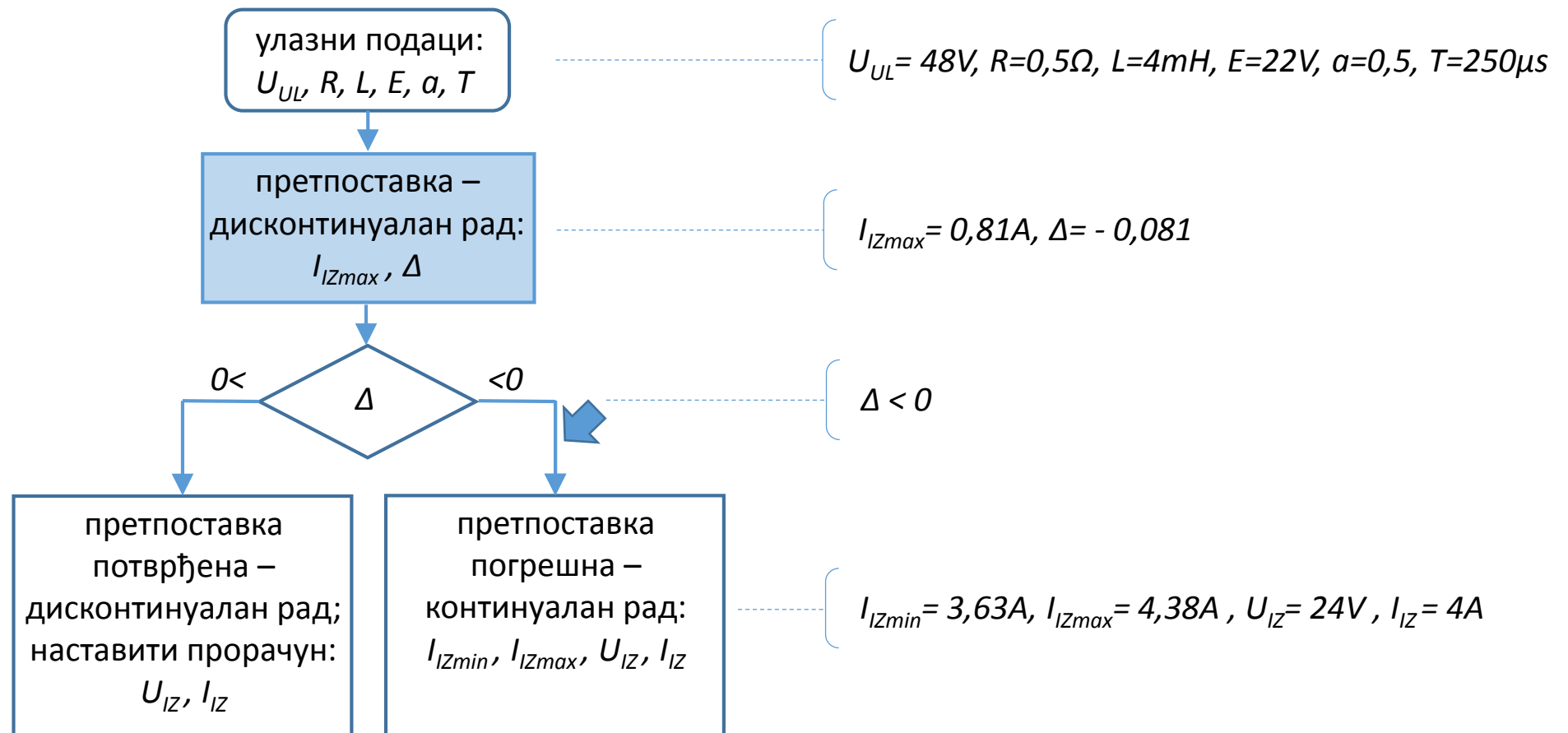
- 1. начин:



ЈЕДНОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР
начин (алгоритам) прорачуна радне тачке

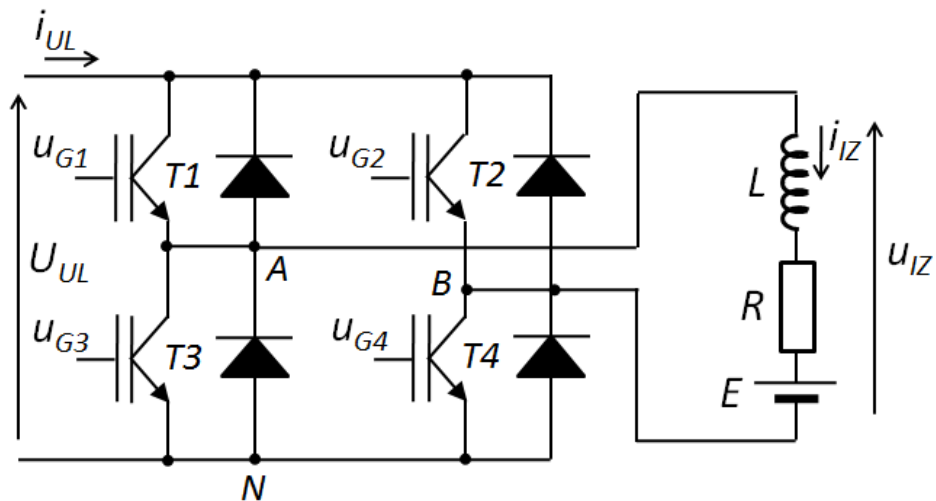
- 2. начин:

пример:

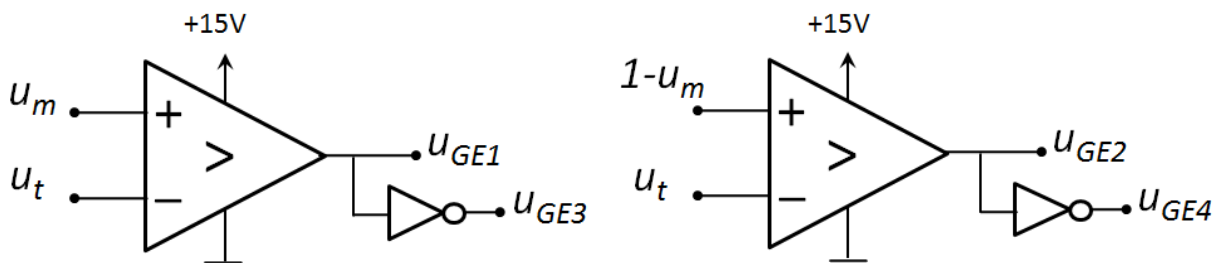


ЧЕТВОРОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

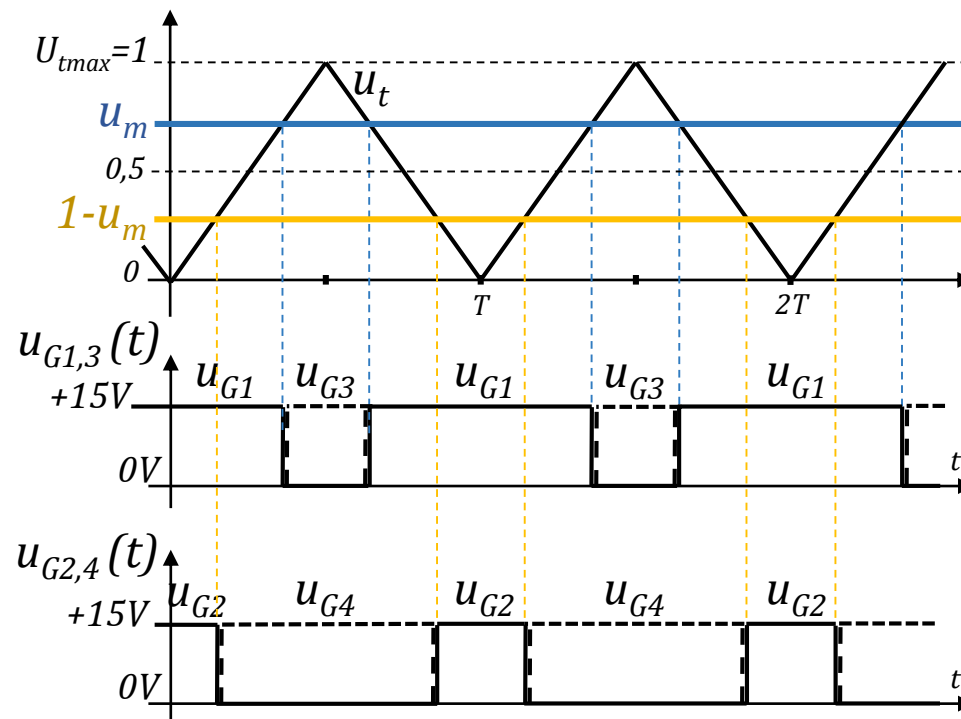
- КОЛО:



- униполарни ИШМодулятор):

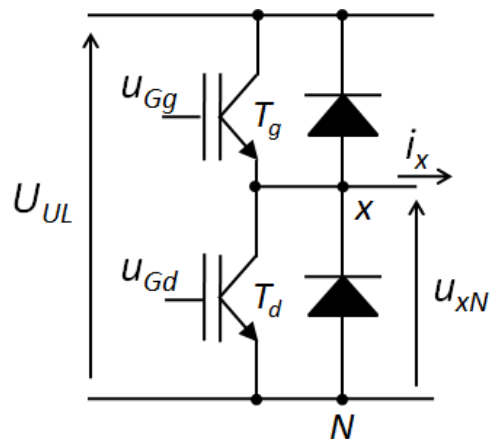


- управљање (униполарна импулсно-ширинска модулација):



ЧЕТВОРОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

- основна правила управљања полумостом:

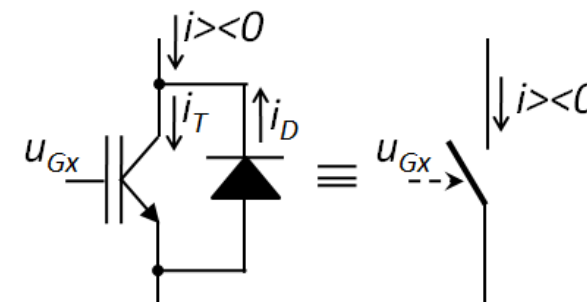


- није дозвољено истовремено побудити оба транзистора у полумосту: ~~$u_{Gg}=+15V, u_{Gd}=+15V$~~
- тежи се да се транзистори у полумосту наизменично укључују: $u_{Gg}=+15V, u_{Gd}=0V$ или $u_{Gg}=0V, u_{Gd}=+15V$
- ограничење за правило 2. је неопходно мртво време потребно да се транзистор сигурно искључи пре укључења другог: $u_{Gg}=0V, u_{Gd}=0V$
- међусобни утицај полумостова се може занемарити – стање неке гране и вредност струје i_x занемарљиво утичу на U_{UL}

- рад полумоста:

$u_{Gg}=+15V$ $u_{Gd}=0V$	$i_x > 0$	$T_g = \text{укљ.}$	$u_{xN} = U_{UL}$
	$i_x < 0$	$D_g = \text{укљ.}$	$u_{xN} = U_{UL}$
$u_{Gg}=0V$ $u_{Gd}=+15V$	$i_x > 0$	$D_d = \text{укљ.}$	$u_{xN} = 0V$
	$i_x < 0$	$T_d = \text{укљ.}$	$u_{xN} = 0V$
$u_{Gg}=0V$ $u_{Gd}=0V$	$i_x > 0$	$D_d = \text{укљ.}$	$u_{xN} = 0V$
	$i_x < 0$	$D_g = \text{укљ.}$	$u_{xN} = U_{UL}$

Рад пара транзистор / диода се испољава као рад прекидача који проводи струју у оба смера, а управљан је са u_{Gx} .



ЧЕТВОРОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

1. квадрант

$$0 < t < aT/2$$

$$i_{IZ}(t) = \frac{U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmin} - \frac{U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(aT/2) = I_{IZmax} = \frac{U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmin} - \frac{U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{aT}{2\tau}} \quad [1]$$

$$aT/2 < t < T/2$$

$$i_{IZ}(t) = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmax} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t-aT/2}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(T/2) = I_{IZmin} = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmax} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{(1-a)T}{2\tau}} \quad [2]$$

$$[1] \leftrightarrow [2] \Rightarrow$$

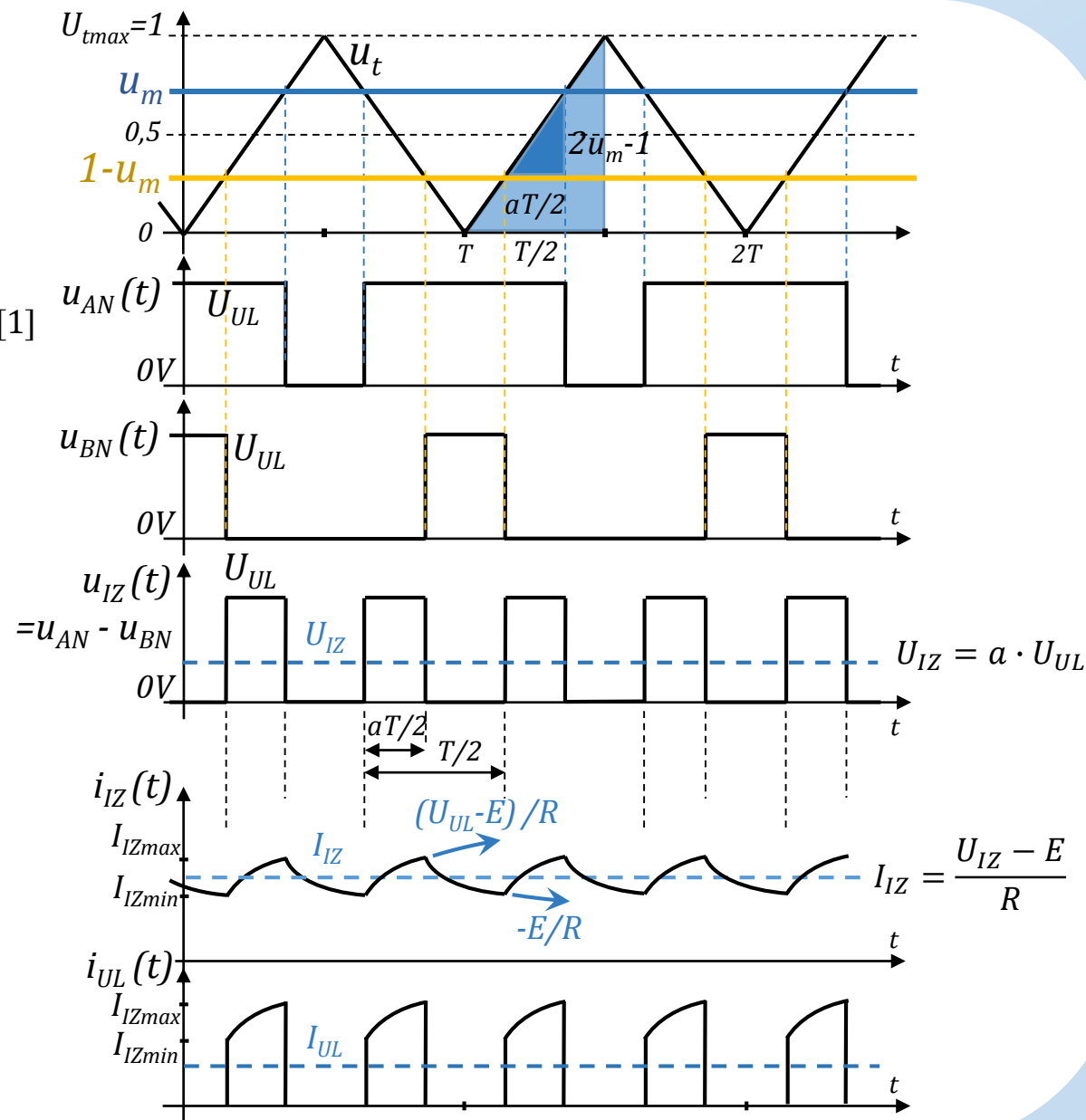
$$I_{IZmin} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$I_{IZmax} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$U_{IZ} = a \cdot U_{UL}$$

$$a = \frac{u_m - 0,5}{0,5}$$

$$I_{IZ} = \frac{U_{IZ} - E}{R} = \frac{a \cdot U_{UL} - E}{R}$$



ЧЕТВОРОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

4. квадрант

$$0 < t < aT/2$$

$$i_{IZ}(t) = \frac{U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmin} - \frac{U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(aT/2) = I_{IZmax} = \frac{U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmin} - \frac{U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{aT}{2\tau}} \quad [1]$$

$$aT/2 < t < T/2$$

$$i_{IZ}(t) = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmax} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t-aT/2}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(T/2) = I_{IZmin} = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmax} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{(1-a)T}{2\tau}} \quad [2]$$

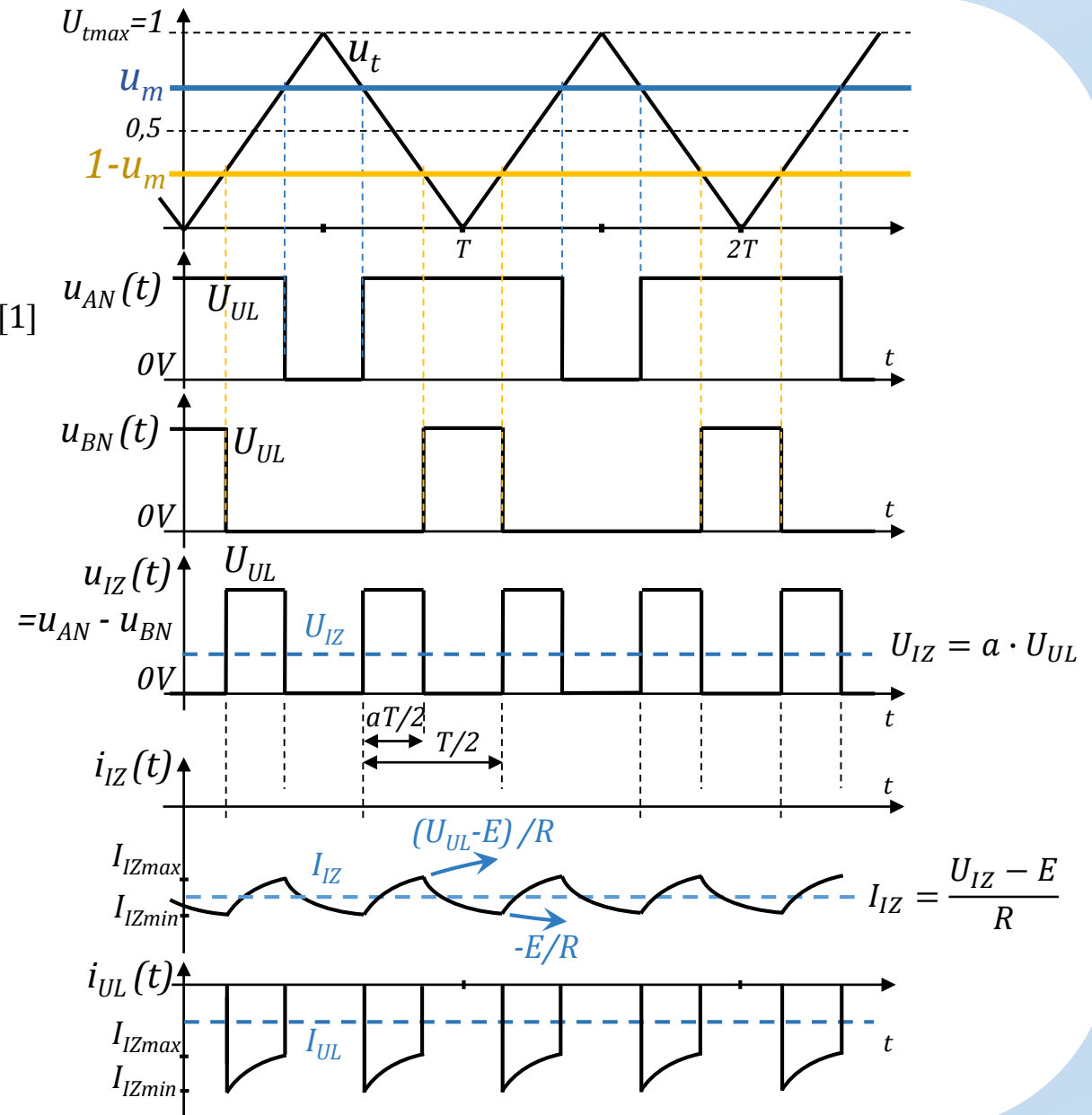
$$[1] \leftrightarrow [2] \Rightarrow I_{IZmin} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$I_{IZmax} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$U_{IZ} = a \cdot U_{UL}$$

$$a = \frac{u_m - 0,5}{0,5}$$

$$I_{IZ} = \frac{U_{IZ} - E}{R} = \frac{a \cdot U_{UL} - E}{R}$$



ЧЕТВОРОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

3. квадрант

$$0 < t < aT/2$$

$$i_{IZ}(t) = \frac{-U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmax} - \frac{-U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(aT/2) = I_{IZmin} = \frac{-U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmax} - \frac{-U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{aT}{2\tau}}$$

$$aT/2 < t < T/2$$

$$i_{IZ}(t) = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmin} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t-aT/2}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(T/2) = I_{IZmax} = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmin} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{(1-a)T}{2\tau}} \quad [2]$$

аналогија $u_m > 0,5 / u_m < 0,5$

$u_m > 0,5$	$u_m < 0,5$
$u_m - 0,5$	$ u_m - 0,5 $
U_{UL}	$-U_{UL}$
I_{IZmin}	I_{IZmax}
I_{IZmax}	I_{IZmin}

$$[1] \leftrightarrow [2] \Rightarrow$$

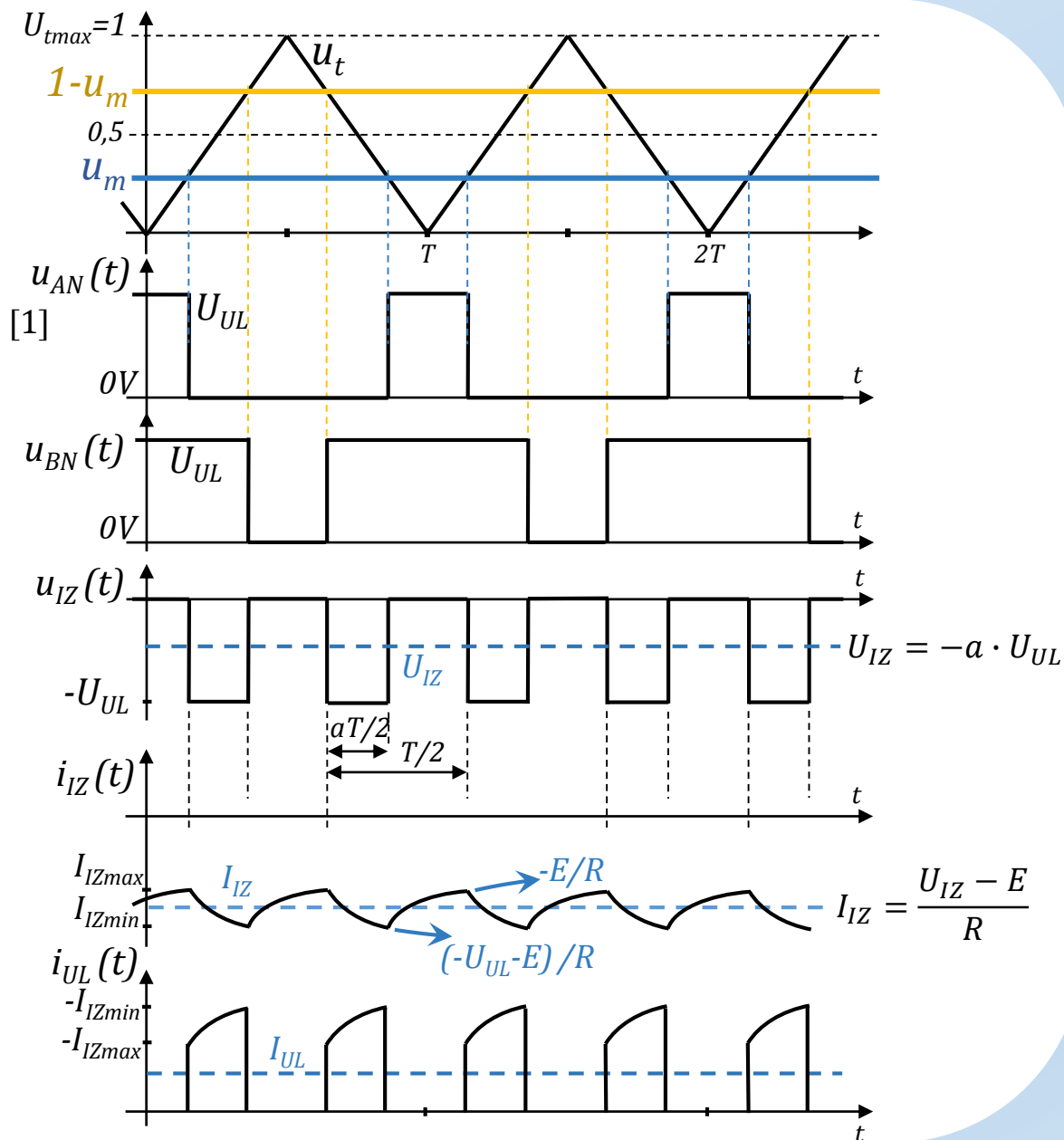
$$I_{IZmin} = -\frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$I_{IZmax} = -\frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$U_{IZ} = -a \cdot U_{UL}$$

$$a = \left| \frac{u_m - 0,5}{0,5} \right|$$

$$I_{IZ} = \frac{U_{IZ} - E}{R} = \frac{-a \cdot U_{UL} - E}{R}$$



ЧЕТВОРОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

2. квадрант

$$0 < t < aT/2$$

$$i_{IZ}(t) = \frac{-U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmax} - \frac{-U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(aT/2) = I_{IZmin} = \frac{-U_{UL} - E}{R} + \left(I_{IZmax} - \frac{-U_{UL} - E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{aT}{2\tau}}$$

$$aT/2 < t < T/2$$

$$i_{IZ}(t) = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmin} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t-aT/2}{\tau}}$$

$$i_{IZ}(T/2) = I_{IZmax} = -\frac{E}{R} + \left(I_{IZmin} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{(1-a)T}{2\tau}} \quad [2]$$

аналогија $u_m > 0,5 / u_m < 0,5$

$u_m > 0,5$	$u_m < 0,5$
$u_m - 0,5$	$ u_m - 0,5 $
U_{UL}	$-U_{UL}$
I_{IZmin}	I_{IZmax}
I_{IZmax}	I_{IZmin}

$$[1] \leftrightarrow [2] \Rightarrow$$

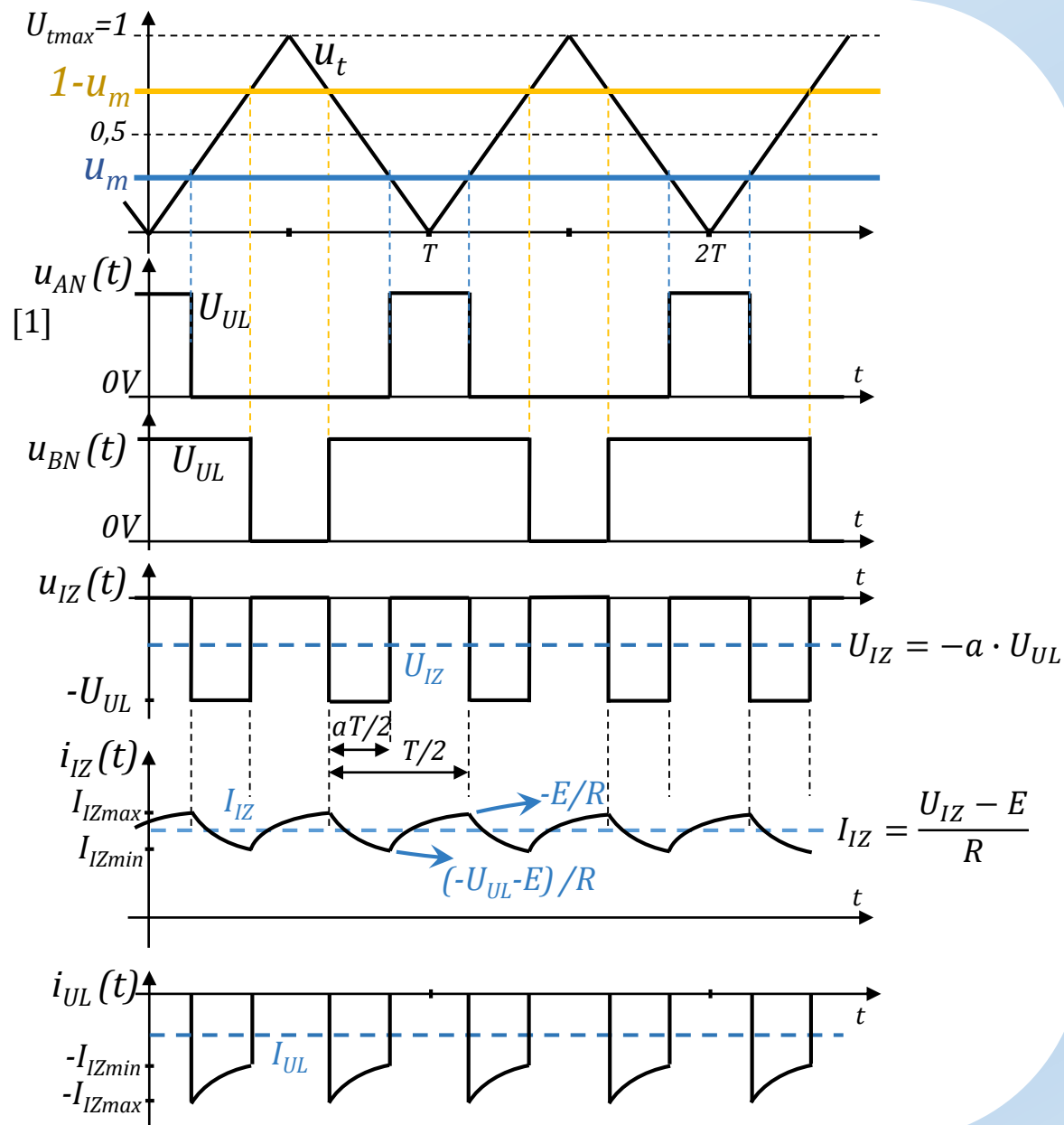
$$I_{IZmin} = -\frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$I_{IZmax} = -\frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$U_{IZ} = -a \cdot U_{UL}$$

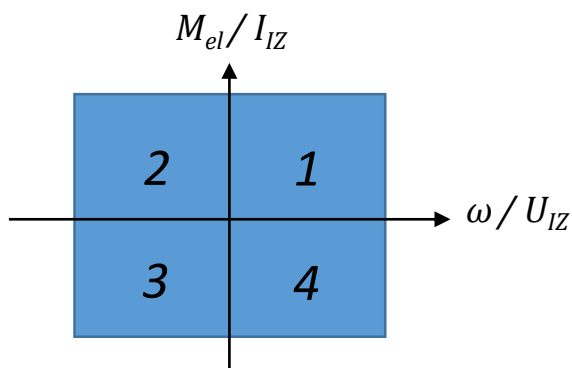
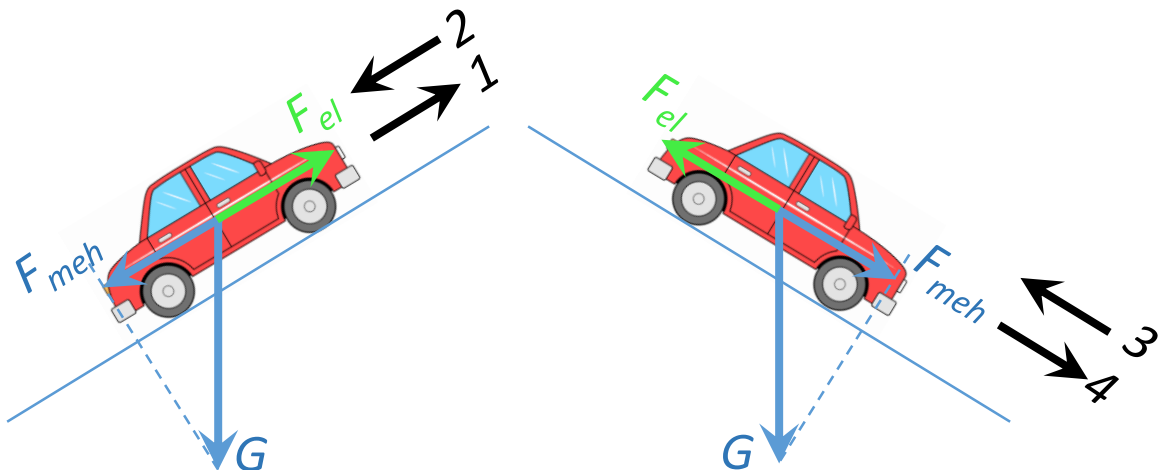
$$a = \left| \frac{u_m - 0,5}{0,5} \right|$$

$$I_{IZ} = \frac{U_{IZ} - E}{R} = \frac{-a \cdot U_{UL} - E}{R}$$



ЧЕТВОРОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

- пример управљивости - електромобил:



- представа машине једносмерне струје:

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a, \quad e_a = \omega \cdot \psi_f$$

$$m_{el}(t) = i_a \cdot \psi_f$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_{el} - m_{meh}$$

- усрењена представа машине једносмерне струје:

$$U_a = R_a \cdot I_a + E_a, \quad E_a = \omega \cdot \psi_f$$

$$M_{el} = I_a \cdot \psi_f$$

$$M_{el} = M_{meh}$$

- пример управљивости - електромобил:

- називни подаци машине и параметри:

$$U_{aN} = 200V, I_{aN} = 113A, n_N = 2500 \text{ } ^o/\text{min}, R_a = 0,2\Omega, L_a = 0,5mH$$

- изведени подаци машине:

$$\omega_N = n_N \cdot \frac{2\pi}{60} = 261,8 \text{ rad/s} \quad \psi_{fN} = \frac{U_{aN} - R_a \cdot I_{aN}}{\omega_N} = 0,68Wb$$

$$\tau = \frac{L_a}{R_a} = 2,5ms$$

- радне тачке машине:

$$1) \nearrow \omega_{M(1)} = +200 \text{ rad/s}, \quad M_{meh} = \frac{2}{3} M_N$$

$$\xRightarrow{\psi_f = \psi_{fN}} I_{a(1)} = \frac{2}{3} I_{aN} = 75,3A$$

$$U_{a(1)} = 0,2 \cdot 75,3 + 200 \cdot 0,68 = 151,1V$$

$$2) \swarrow \omega_{M(2)} = -50 \text{ rad/s}, \quad M_{meh} = \frac{2}{3} M_N$$

$$\xRightarrow{\psi_f = \psi_{fN}} I_{a(2)} = \frac{2}{3} I_{aN} = 75,3A$$

$$U_{a(2)} = 0,2 \cdot 75,3 - 50 \cdot 0,68 = -18,9V$$

$$3) \nwarrow \omega_{M(3)} = -50 \text{ rad/s}, \quad M_{meh} = -\frac{2}{3} M_N$$

$$\xRightarrow{\psi_f = \psi_{fN}} I_{a(3)} = -\frac{2}{3} I_{aN} = -75,3A$$

$$U_{a(3)} = -0,2 \cdot 75,3 - 50 \cdot 0,68 = -49,1V$$

$$4) \searrow \omega_{M(4)} = 200 \text{ rad/s}, \quad M_{meh} = -\frac{2}{3} M_N$$

$$\xRightarrow{\psi_f = \psi_{fN}} I_{a(4)} = \frac{2}{3} I_{aN} = -75,3A$$

$$U_{a(4)} = -0,2 \cdot 75,3 + 200 \cdot 0,68 = 121,0V$$

- пример управљивости - електромобил:

- радне тачке машине:

1) ↗ $I_{a(1)} = 75,3A$, $U_{a(1)} = 151,1V$, $E_{a(1)} = 136,0V$

$$a_{(1)} = \frac{U_{a(1)}}{U_{UL}} = 0,687 \quad I_{amin(1)} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E_{a(1)}}{R} = 71,0A \quad I_{amax(1)} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E_{a(1)}}{R} = 80,4A$$

2) ↙ $I_{a(2)} = 75,3A$, $U_{a(2)} = -18,9V$, $E_{a(2)} = -34,0V$

$$a_{(2)} = \left| \frac{U_{a(1)}}{U_{UL}} \right| = 0,0861 \quad I_{amin(2)} = -\frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E_{a(2)}}{R} = 73,6A \quad I_{amax(2)} = -\frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E_{a(2)}}{R} = 77,0A$$

3) ↖ $I_{a(3)} = -75,3A$, $U_{a(3)} = -49,1V$, $E_{a(3)} = -34,0V$

$$a_{(3)} = 0,223 \quad I_{amin(3)} = -79,1A \quad I_{amax(3)} = -71,5A$$

4) ↗ $I_{a(4)} = -75,3A$, $U_{a(4)} = 121,0V$, $E_{a(4)} = 136,0V$

$$a_{(4)} = 0,550 \quad I_{amin(4)} = -80,5A \quad I_{amax(4)} = -69,6A$$

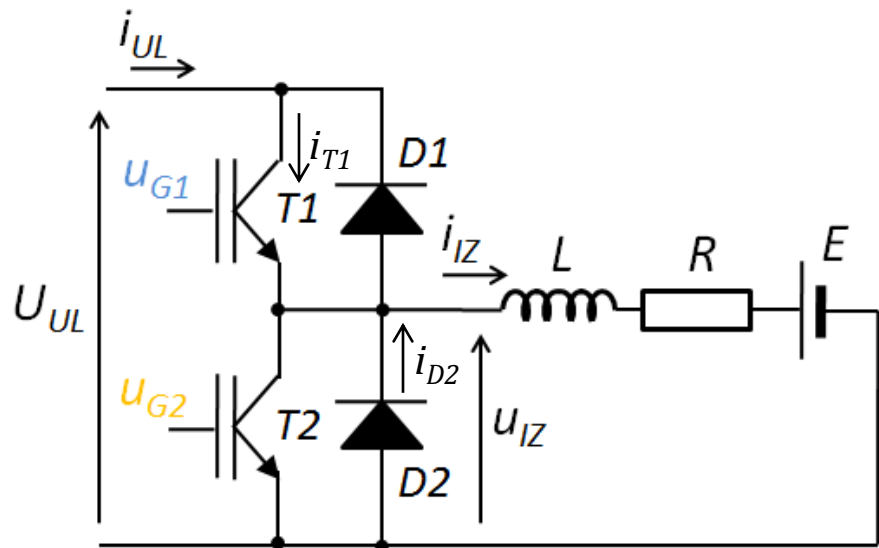
- подаци претварача: $U_{UL} = 220V$

- подаци управљања: $f = 5kHz$ ($T = 200\mu s$)

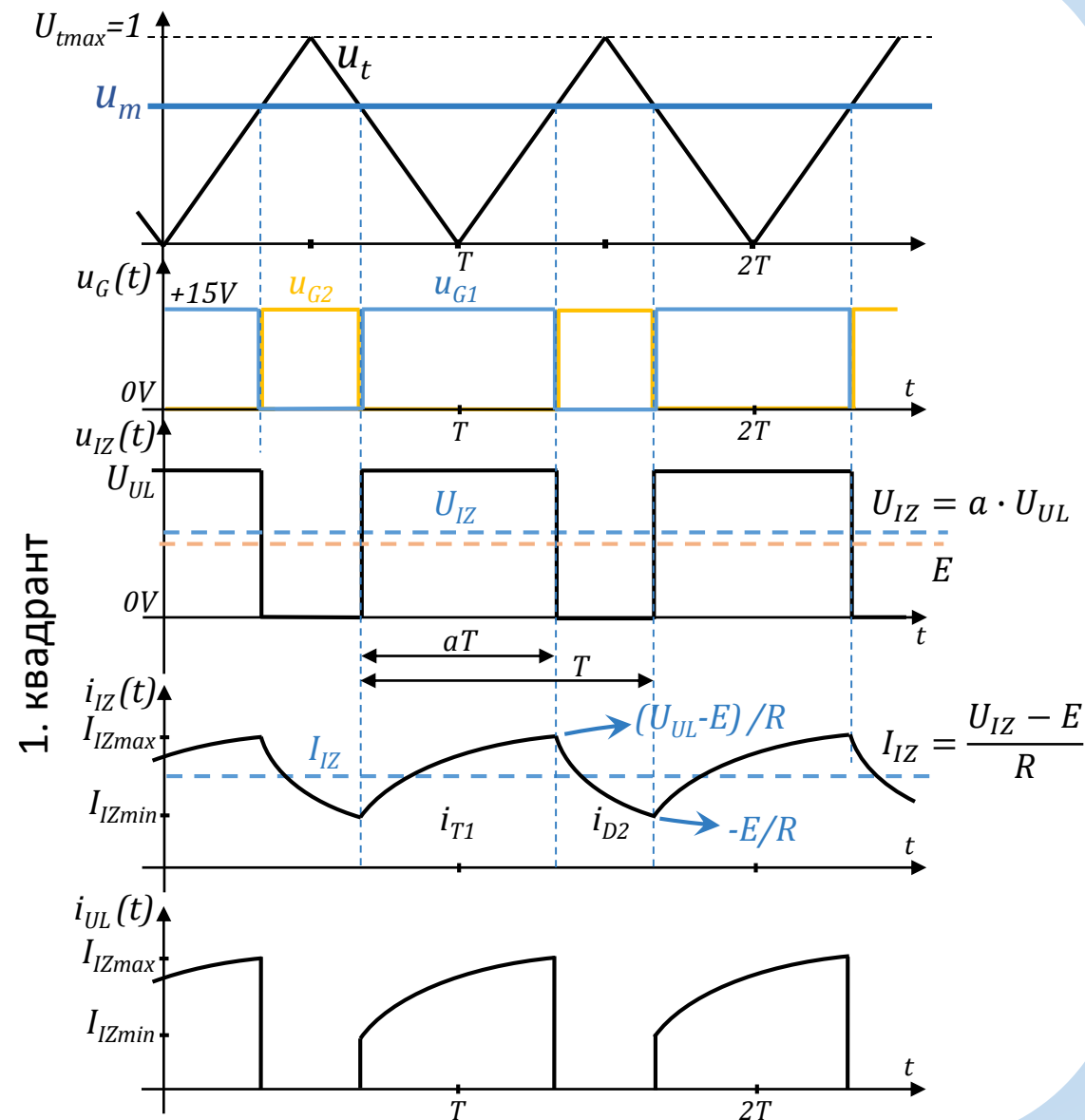
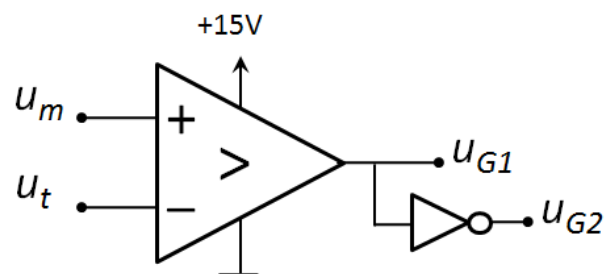
ДВОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

$$U_{IZ} > 0, I_{IZ} < 0$$

КОЛО:

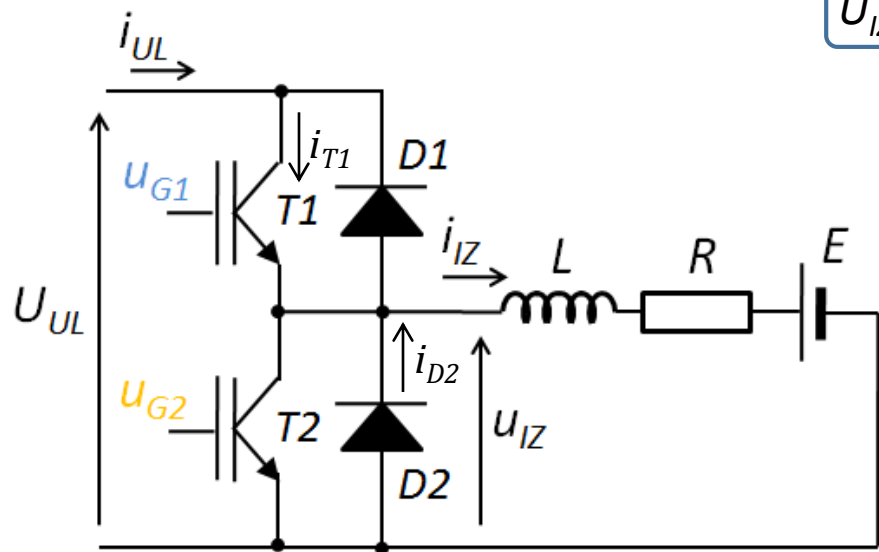


Управљање транзисторима одговара управљању једноквадрантним чопером или једним полумостом 4. квадрантног чопера.



ДВОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

$$U_{IZ} > 0, I_{IZ} < 0$$

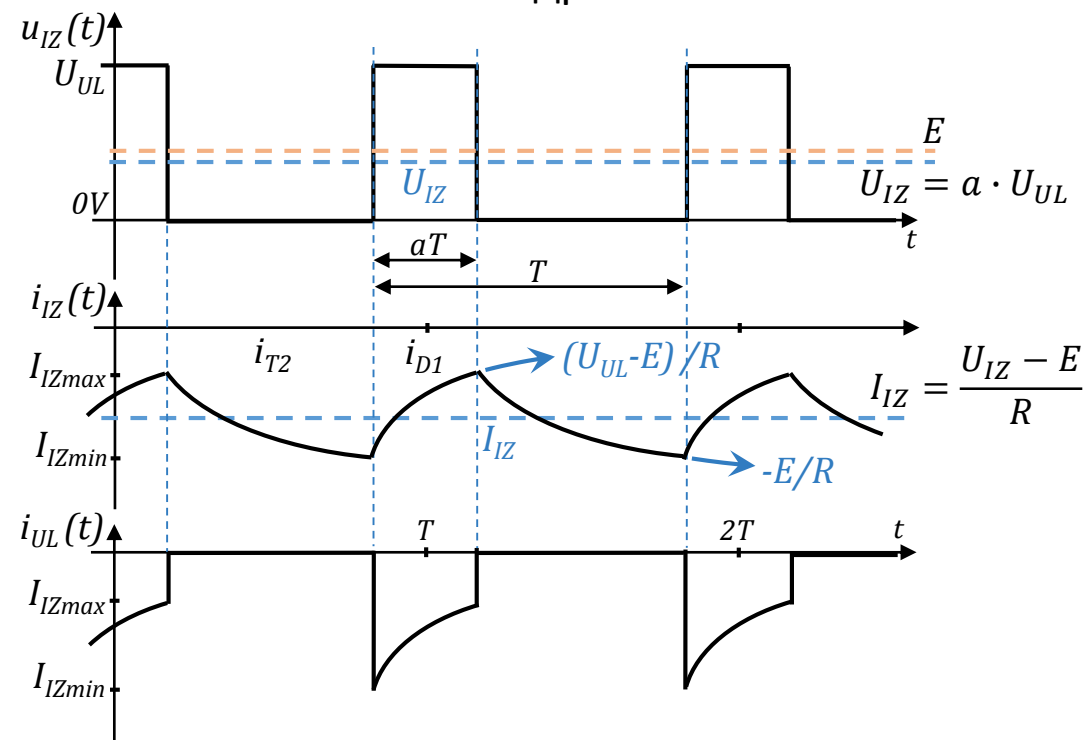


$$I_{IZmin} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - \frac{E}{R}$$

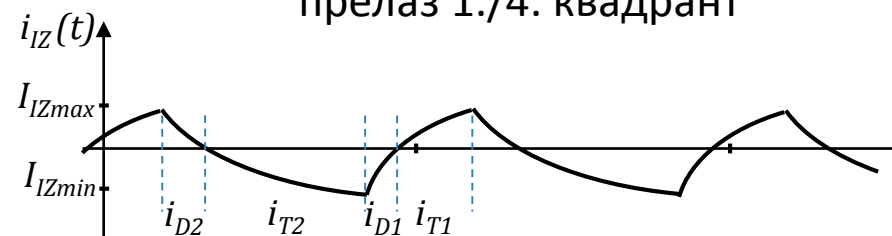
$$I_{IZmax} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$a = u_m$$

4. квадрант



прелаз 1./4. квадрант



ДВОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

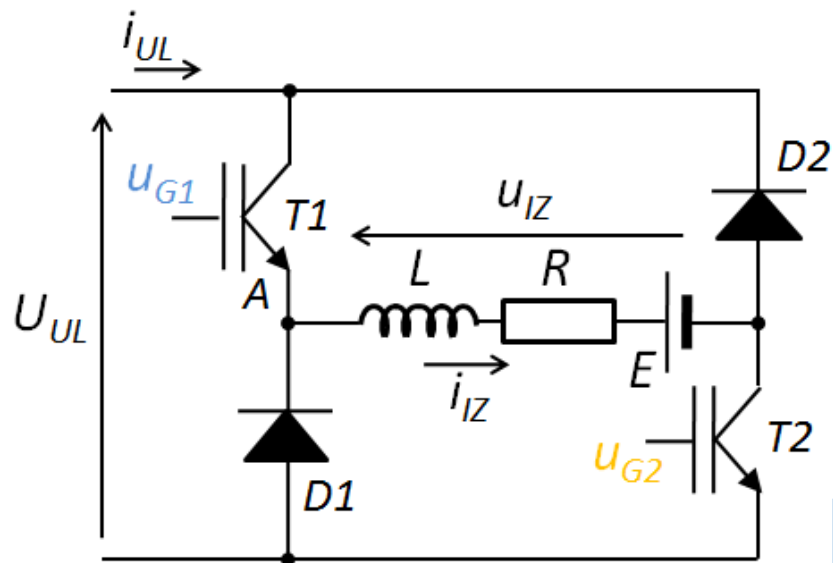
$$U_{IZ} > 0, I_{IZ} > 0$$

$$a = \frac{u_m - 0,5}{0,5}$$

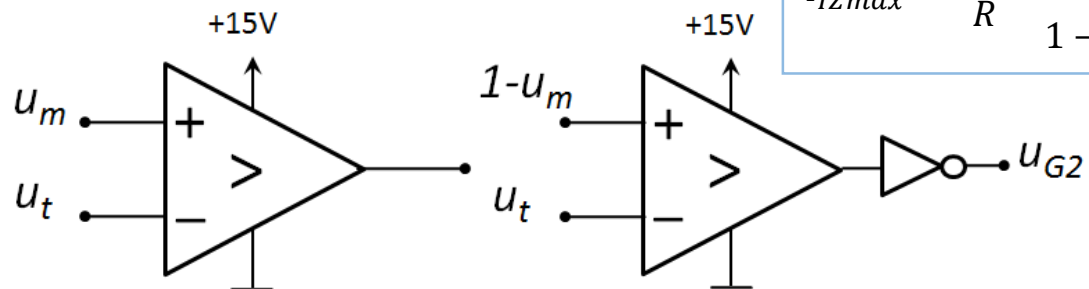
$$I_{IZmin} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$I_{IZmax} = \frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

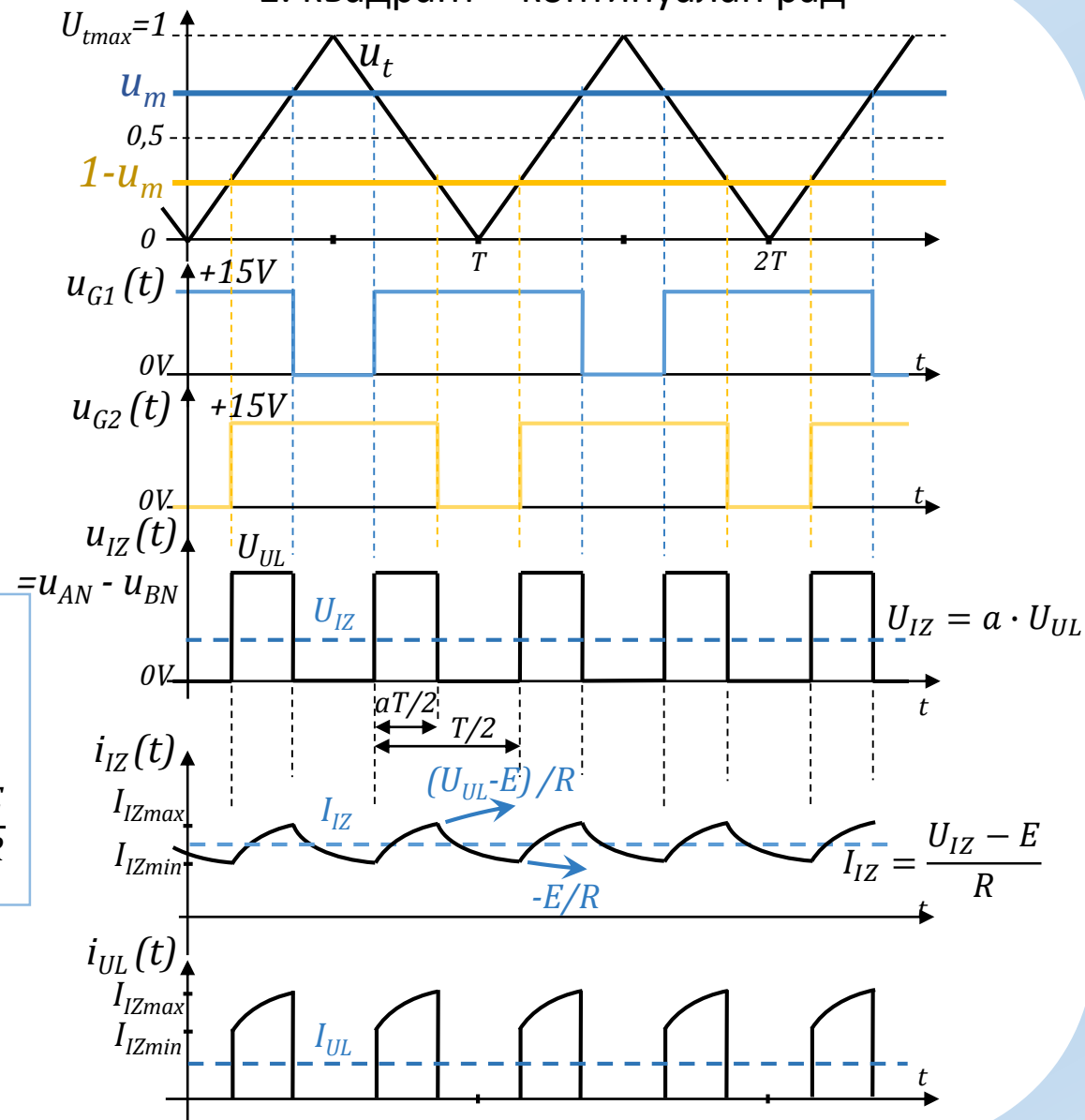
- КОЛО:



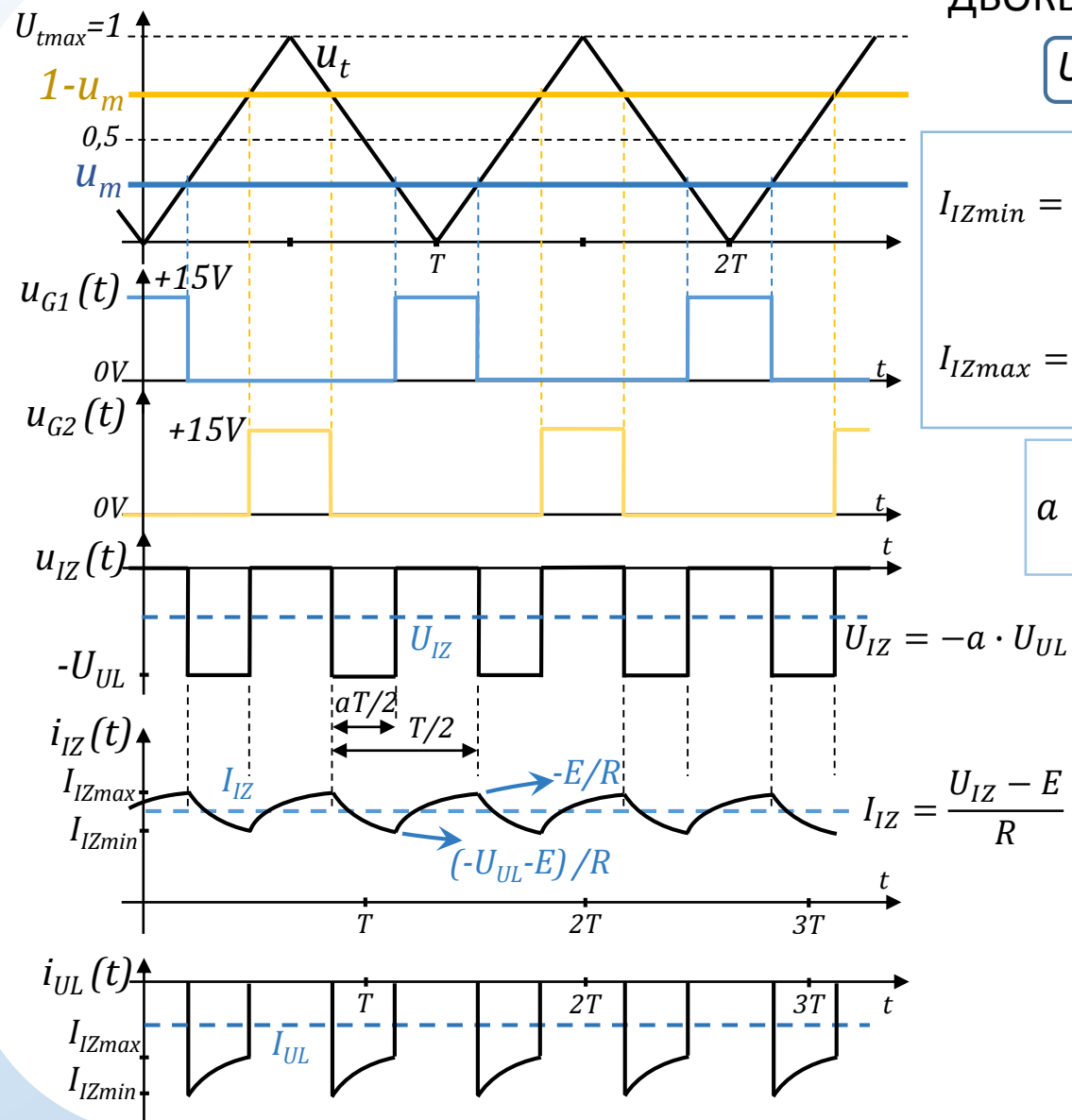
Управљање транзисторима у мосту је обрађено код 4. квадрантног чопера.



1. квадрант – континуалан рад



2. квадрант – континуалан рад



ДВОКВАДРАНТНИ ЧОПЕР

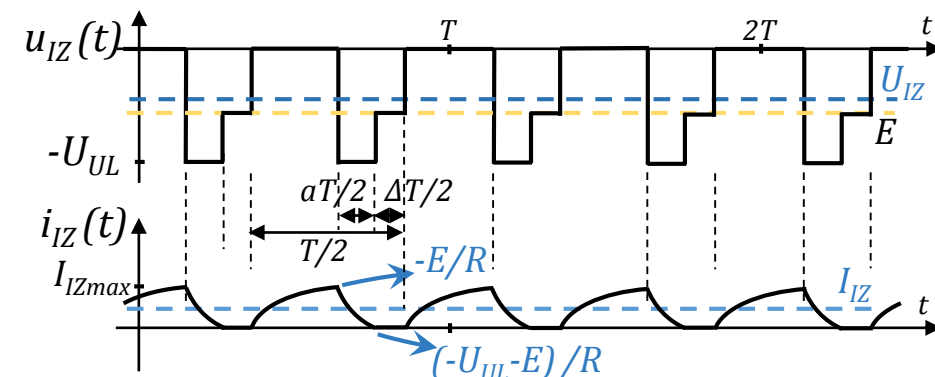
$$U_{IZ} > 0, I_{IZ} > 0$$

$$I_{IZmin} = -\frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$I_{IZmax} = -\frac{U_{UL}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{2\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}} - \frac{E}{R}$$

$$a = \left| \frac{u_m - 0,5}{0,5} \right|$$

2. квадрант – дисконтинуалан рад



$$U_{IZ} = -a \cdot U_{UL} + \Delta \cdot E$$

$$\frac{1}{2} (1 - a - \Delta) = u_m$$

$$I_{IZmax} = -\frac{E}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{(1-a-\Delta) \cdot T}{2\tau}} \right)$$

$$a = \frac{2 \cdot \tau}{T} \cdot \ln \left(\frac{R \cdot I_{IZmax}}{U_{UL} + E} + 1 \right)$$