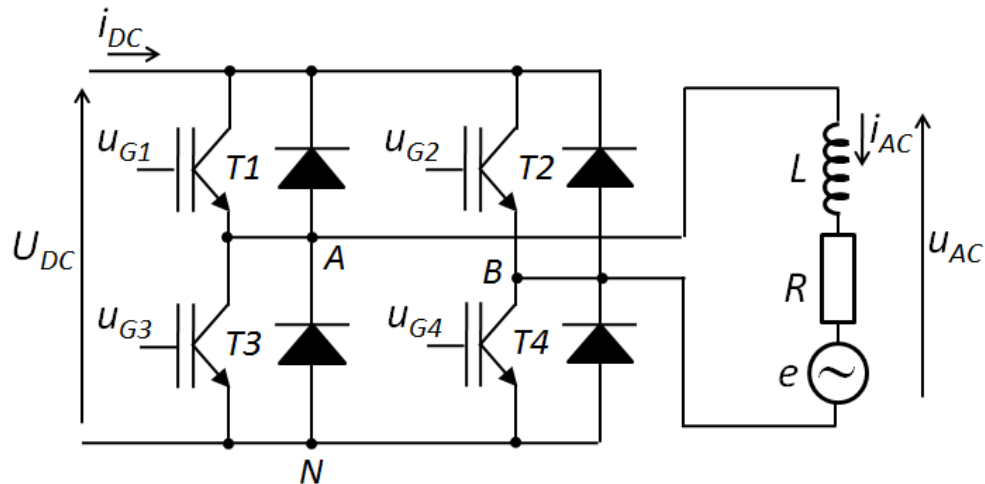


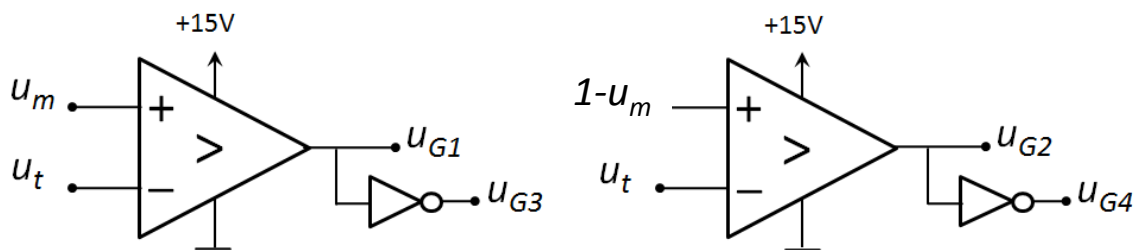
ЈЕДНОФАЗНИ НАИЗМЕНИЧНИ ПРЕТВАРАЧ

ЈЕДНОФАЗНИ НАИЗМЕНИЧНИ ПРЕТВАРАЧ

- коло:



- униполарни ИШМ модулатор:



Синусна модулација:

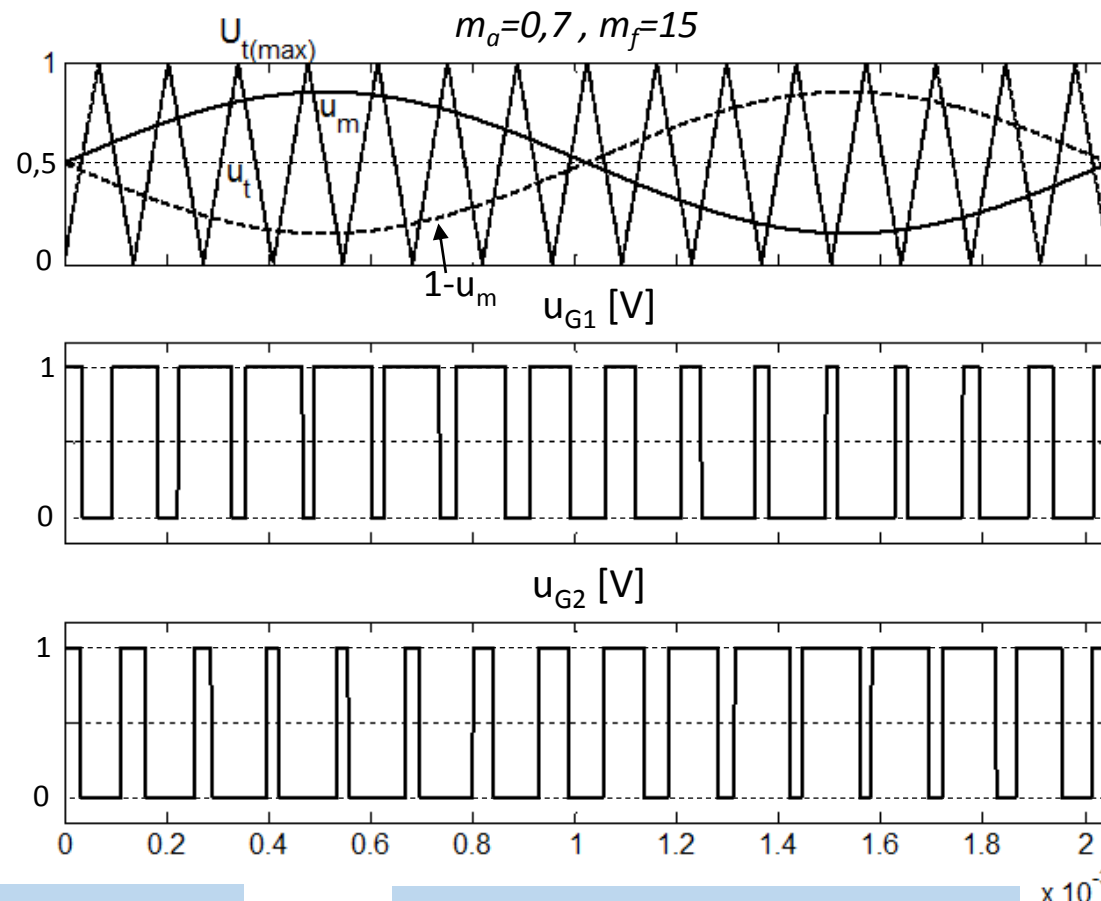
Индекс амплитудске модулације:

Индекс фреквенцијске модулације:

$$u_m = (0,5 + 0,5 \cdot m_a \cdot \sin(\omega t)) \cdot U_{t(max)} \quad m_a = \frac{1}{0,5} \left(\frac{\widehat{u_m}}{U_{t(max)}} - 0,5 \right), \quad m_a \in \{0 \div 1\}$$

$$m_f = \frac{f_t}{f_m}, \quad m_f > 9$$

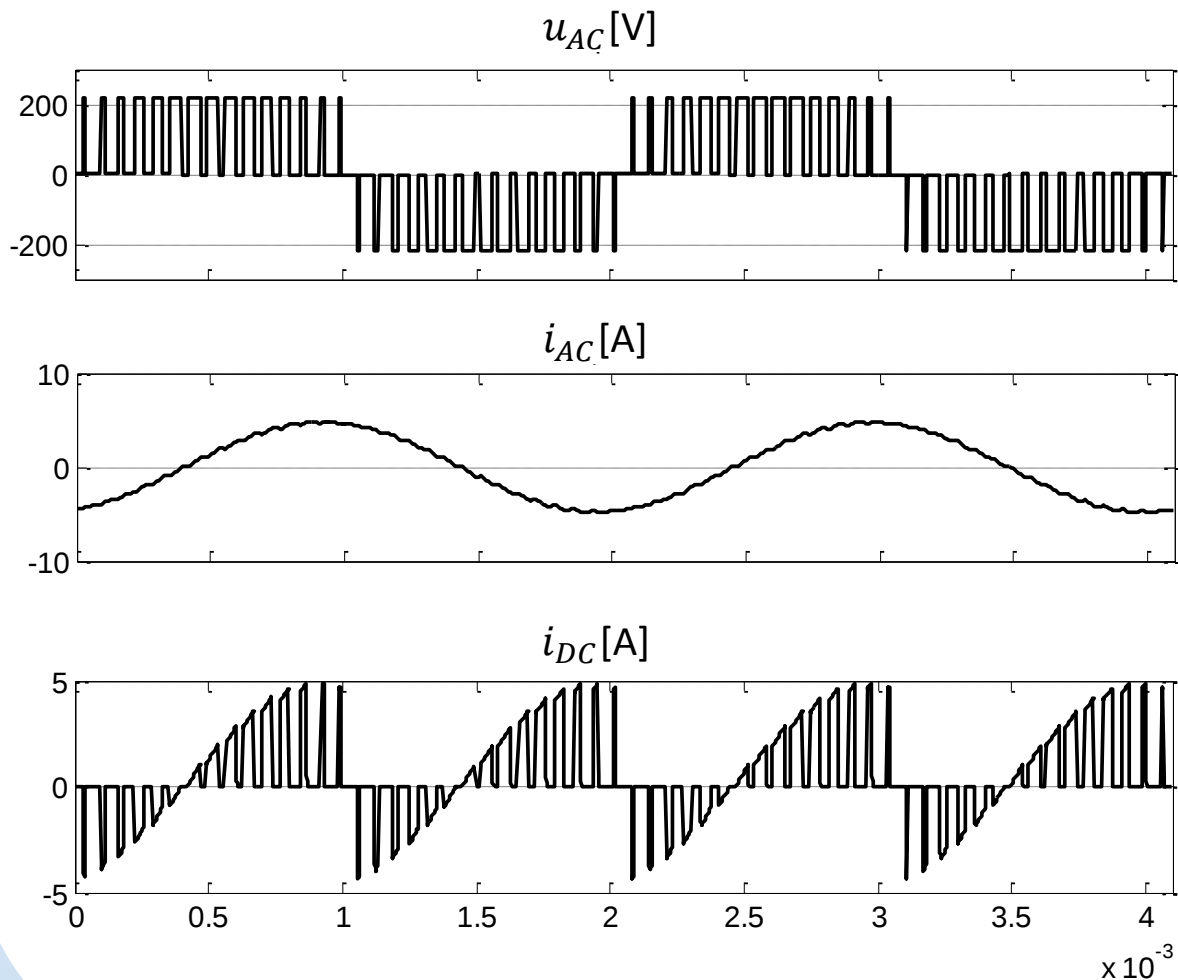
- управљање (униполарна импулсно-ширинска модулација):



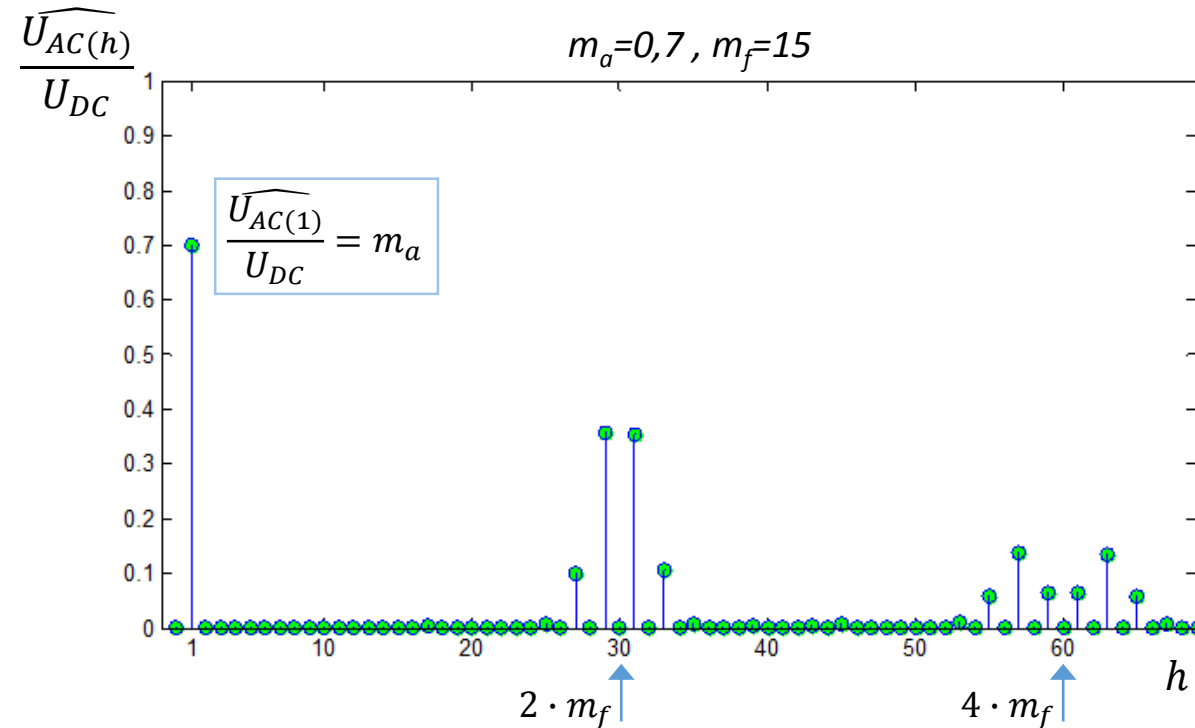
ИМПУЛСНО-ШИРИНСКА МОДУЛАЦИЈА

- одзив величина у колу:

$$U_{DC} = 220V, R = 10\Omega, L = 10mH, e = 0V$$



- хармонијски спектар излазног напона:



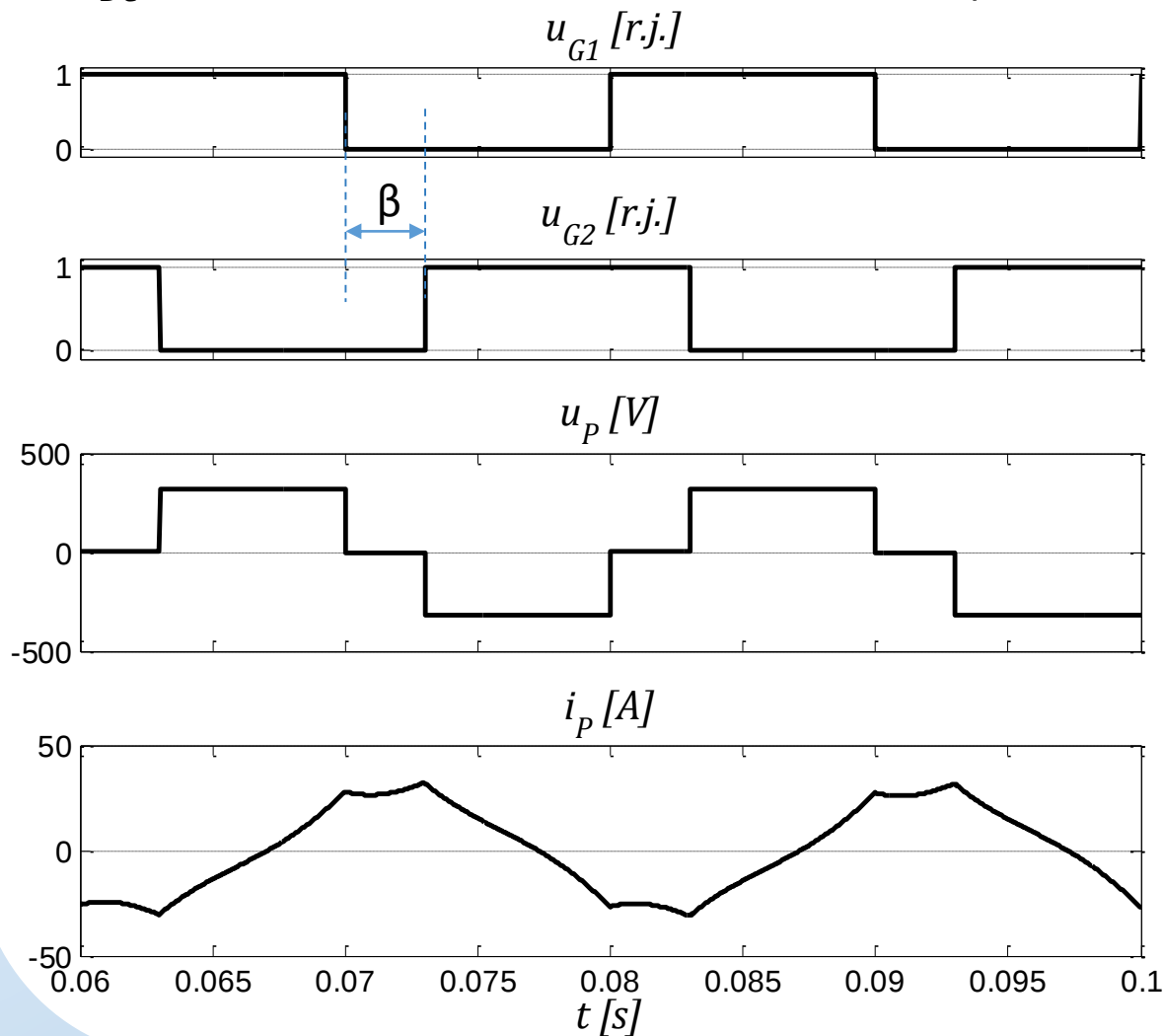
- хармонијски садржај излазне струје:

$$I_{(h)} = \frac{|U_{AC(h)}|}{|Z_{(h)}|}, \quad Z_{(h)} = \sqrt{R^2 + (h\omega L)^2}$$

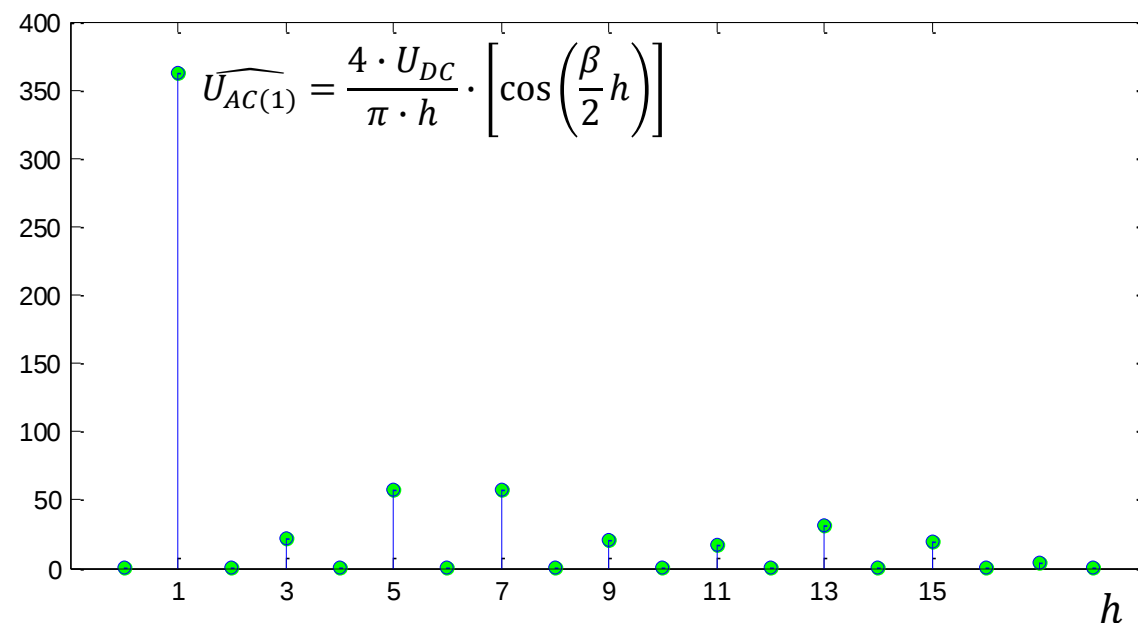
КВАЗИПРАВОУГАОНО УПРАВЉАЊЕ

- одзив величина у колу:

$$U_{DC} = 320V, R = 1\Omega, L = 20mH, e = 224\angle -10^\circ, \beta = 0,3 \cdot \pi$$



- хармонијски спектар излазног напона:



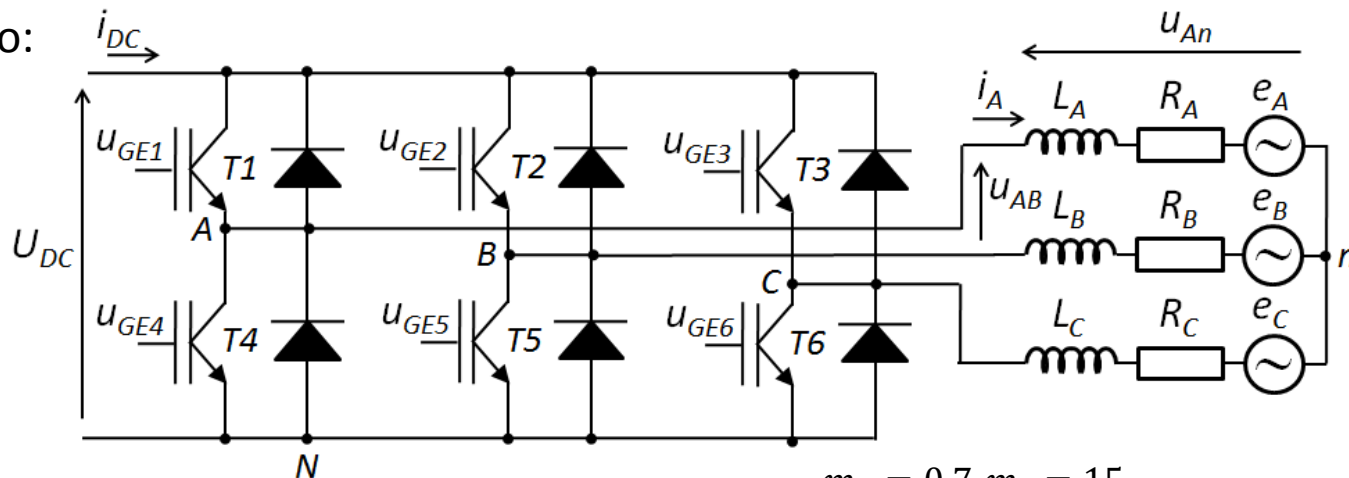
$$\widehat{U_{AC(1)}} = \frac{4 \cdot U_{DC}}{\pi \cdot h} \cdot \left[\cos\left(\frac{\beta}{2} h\right) \right]$$

$$\widehat{U_{AC(h)}} = \frac{2 \cdot U_{DC}}{\pi \cdot h} \cdot \left[\cos\left(\frac{\beta}{2} h\right) - \cos\left(\left(\pi - \frac{\beta}{2}\right) h\right) \right]$$

$$U_{AC} = U_{DC} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \beta}{\pi}}$$

ТРОФАЗНИ НАИЗМЕНИЧНИ ПРЕТВАРАЧ

- КОЛО:



синусна модулација:

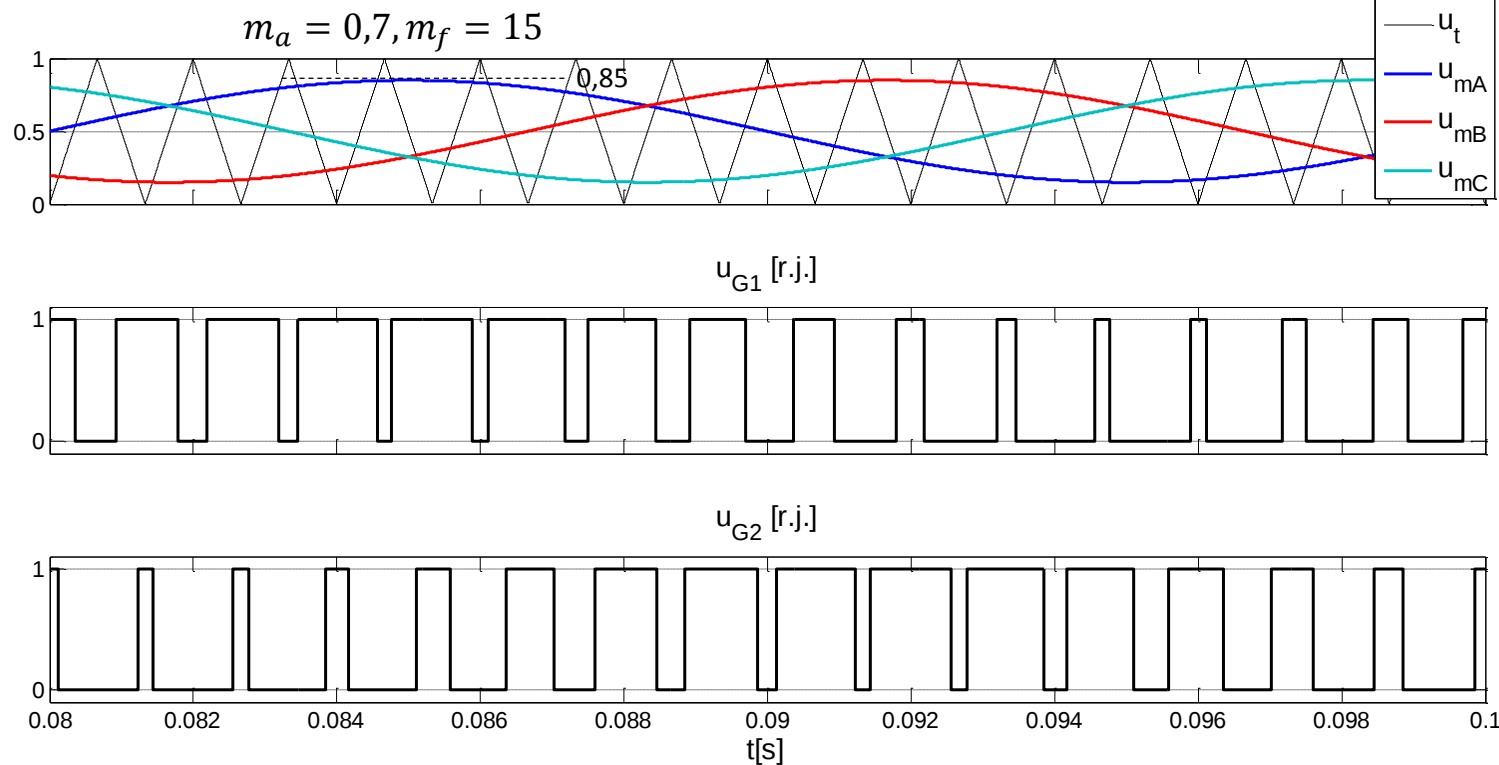
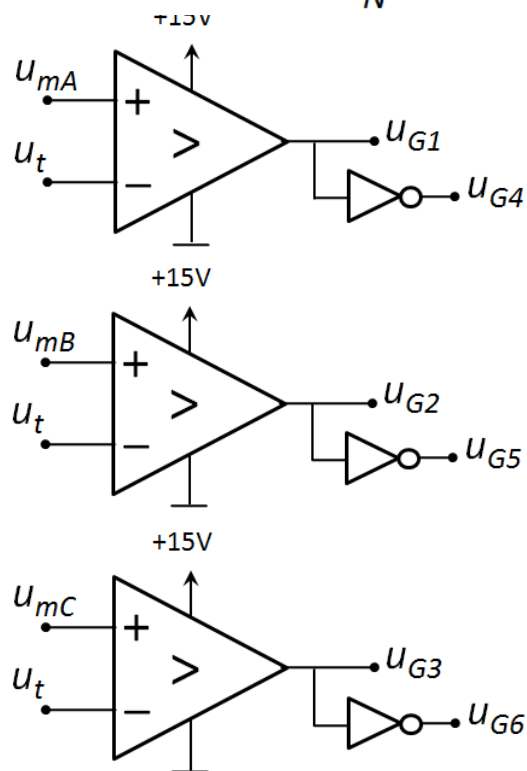
$$u_{mA} = 0,5 + 0,5 \cdot m_a \cdot \sin(\omega t)$$

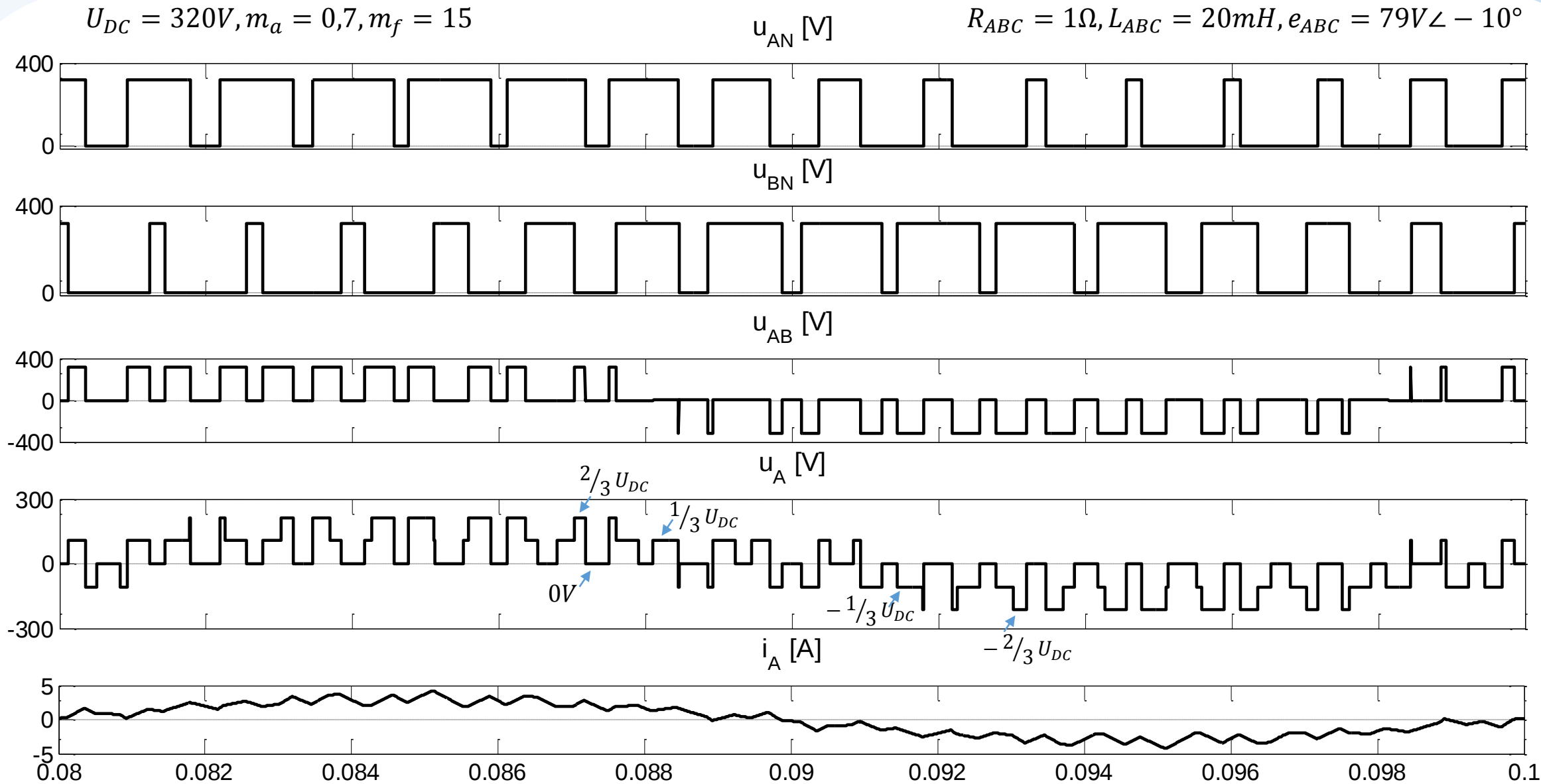
$$u_{mB} = 0,5 + 0,5 \cdot m_a \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$u_{mC} = 0,5 + 0,5 \cdot m_a \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

$$u_t = 1 \cdot \text{tro}(m_f \cdot \omega t) \quad m_a \in [0 \div 1]$$

- трофазни ИШМ модулатор:





- међуфазни напони:

$$u_{AB} = u_{AN} - u_{BN}$$

u_{AN}	$0V$	U_{DC}	$0V$	U_{DC}
u_{BN}	$0V$	$0V$	U_{DC}	U_{DC}
u_{AB}	$0V$	U_{DC}	$-U_{DC}$	$0V$

- фазни напони:

$$u_{An} = u_{AN} - u_{nN}$$

$$u_{Bn} = u_{BN} - u_{nN}$$

$$u_{Cn} = u_{CN} - u_{nN} \quad [1]$$

$$u_{An} = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + e_A$$

$$u_{Bn} = R_B \cdot i_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt} + e_B$$

$$u_{Cn} = R_C \cdot i_C + L_C \cdot \frac{di_C}{dt} + e_C$$

симетричан потрошач:

$$R_A = R_B = R_C = R$$

$$L_A = L_B = L_C = L$$

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

потрошач повезан у звезду:

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

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

$$u_{An} = \frac{2}{3}u_{AN} - \frac{1}{3}(u_{BN} + u_{CN})$$

$$u_{Bn} = \frac{2}{3}u_{BN} - \frac{1}{3}(u_{AN} + u_{CN})$$

$$u_{Cn} = \frac{2}{3}u_{CN} - \frac{1}{3}(u_{AN} + u_{BN})$$

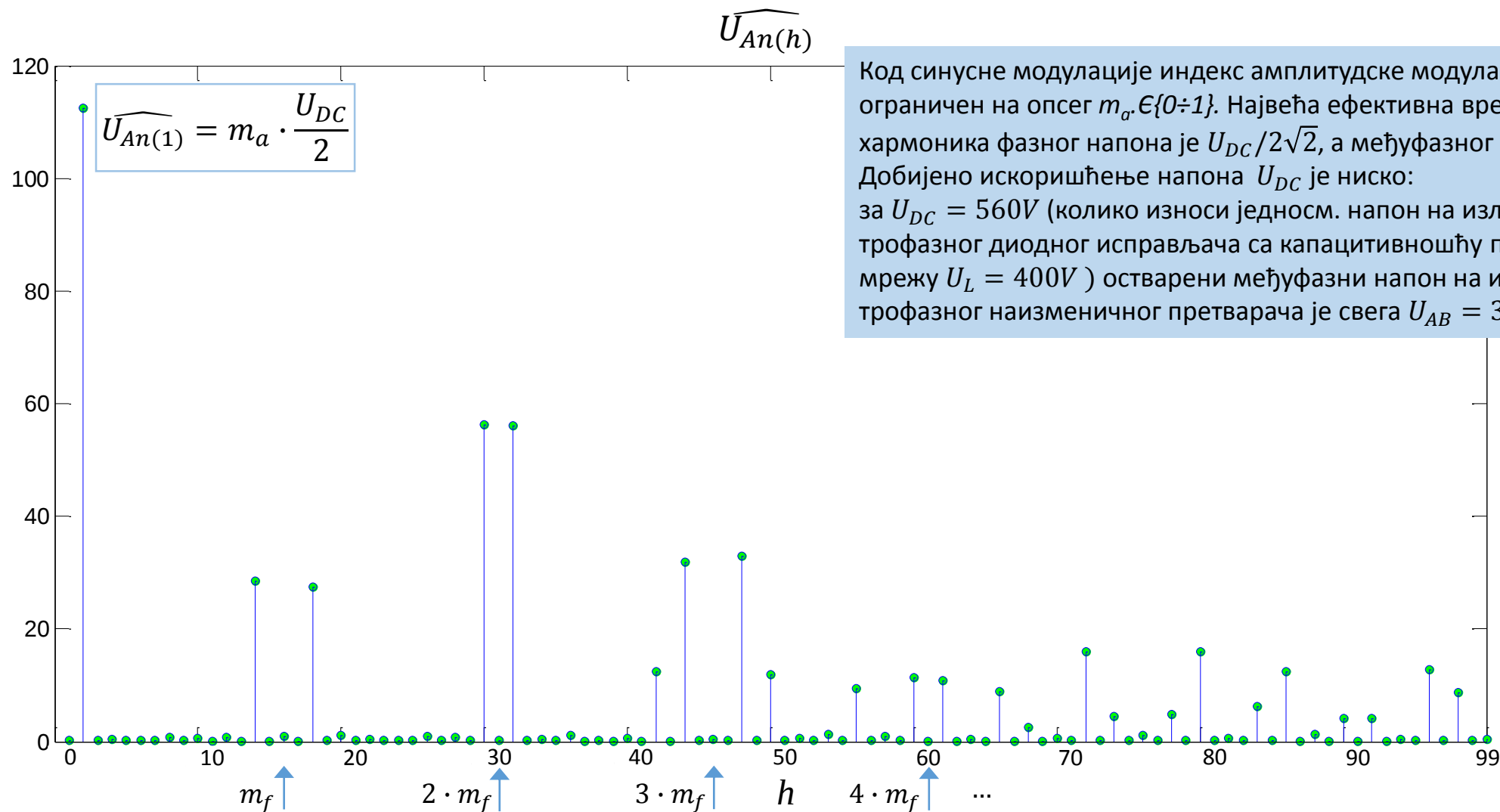
$$u_{An} + u_{Bn} + u_{Cn} = 0 \quad [2]$$

u_{AN}	u_{BN}	u_{CN}	u_{An}
$0V$	$0V$	$0V$	$0V$
U_{DC}	$0V$	$0V$	$\frac{2}{3}U_{DC}$
$0V$	U_{DC}	$0V$	$-\frac{1}{3}U_{DC}$
U_{DC}	U_{DC}	$0V$	$\frac{1}{3}U_{DC}$
$0V$	$0V$	U_{DC}	$-\frac{1}{3}U_{DC}$
U_{DC}	$0V$	U_{DC}	$\frac{1}{3}U_{DC}$
$0V$	U_{DC}	U_{DC}	$-\frac{2}{3}U_{DC}$
U_{DC}	U_{DC}	U_{DC}	$0V$

- прорачун напона потрошача:

синусна модулација

- хармонијски спектар фазног напона:



синусна модулација са додатком 3. хармоника

$$u_{mA} = 0,5 \cdot (1 + m_a \cdot (\sin(\omega t) + 0,142 \cdot \sin(3\omega t)))$$

$$m_a \in [0 \div 1,15]$$

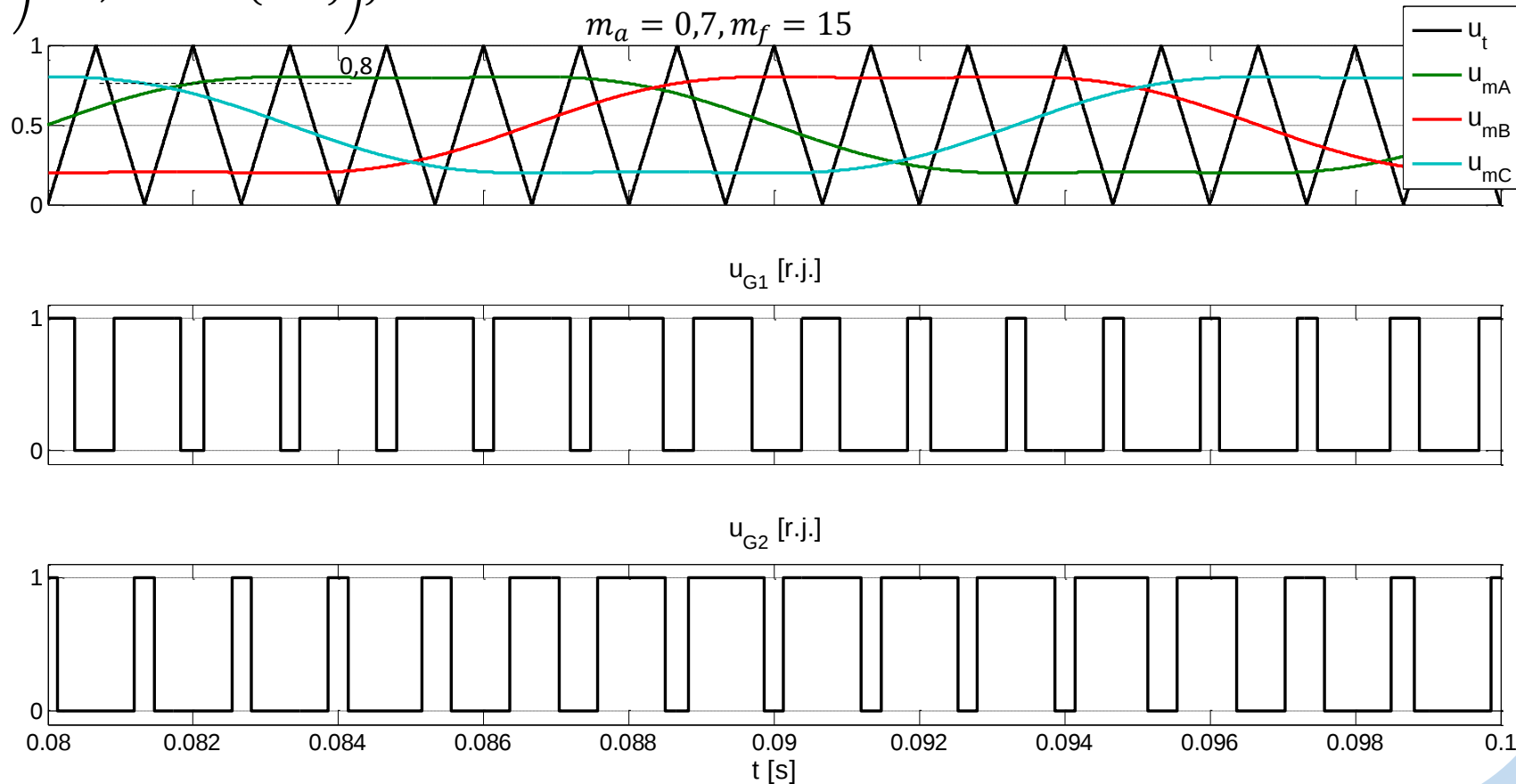
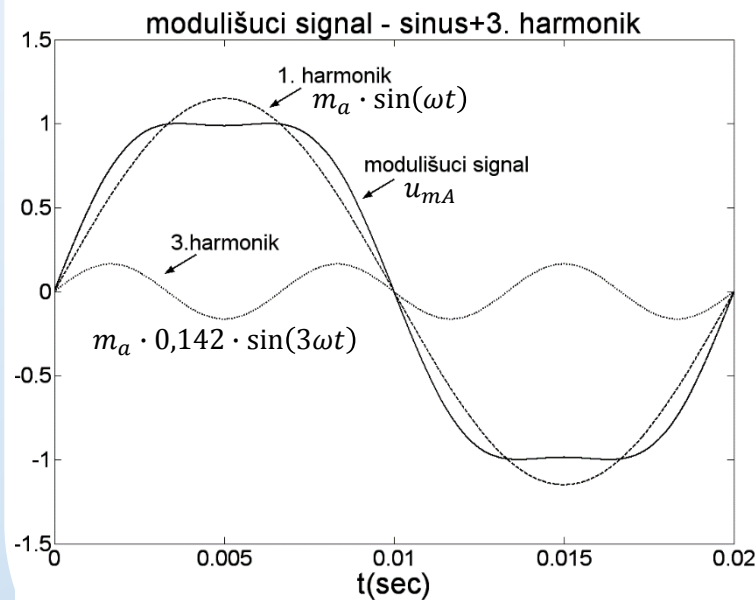
Модулатор је непромењен

$$u_{mB} = 0,5 \cdot (1 + m_a \cdot (\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + 0,142 \cdot \sin(3\omega t)))$$

$$\text{за } m_a = 1,15 \Rightarrow m_a \cdot 0,142 \cdot \sin(3\omega t) = 0,164 \cdot \sin(3\omega t)$$

$$u_{mC} = 0,5 \cdot (1 + m_a \cdot (\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + 0,142 \cdot \sin(3\omega t)))$$

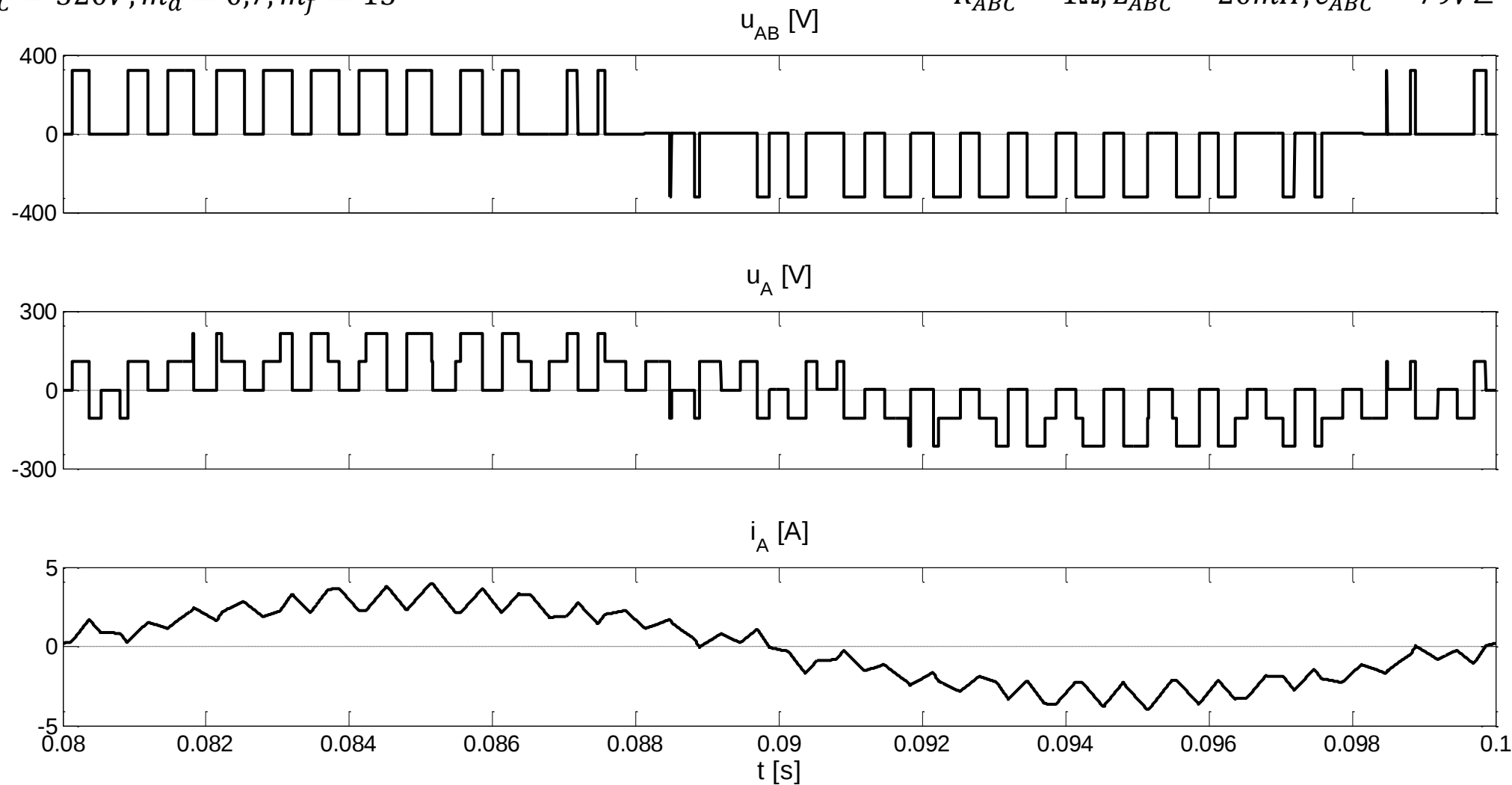
Начин додавања 3. хармоника:



одзиви величина на потрошачу за исте вредности управљачких сигнала
и податке потрошача као у огледу са синусном модулацијом

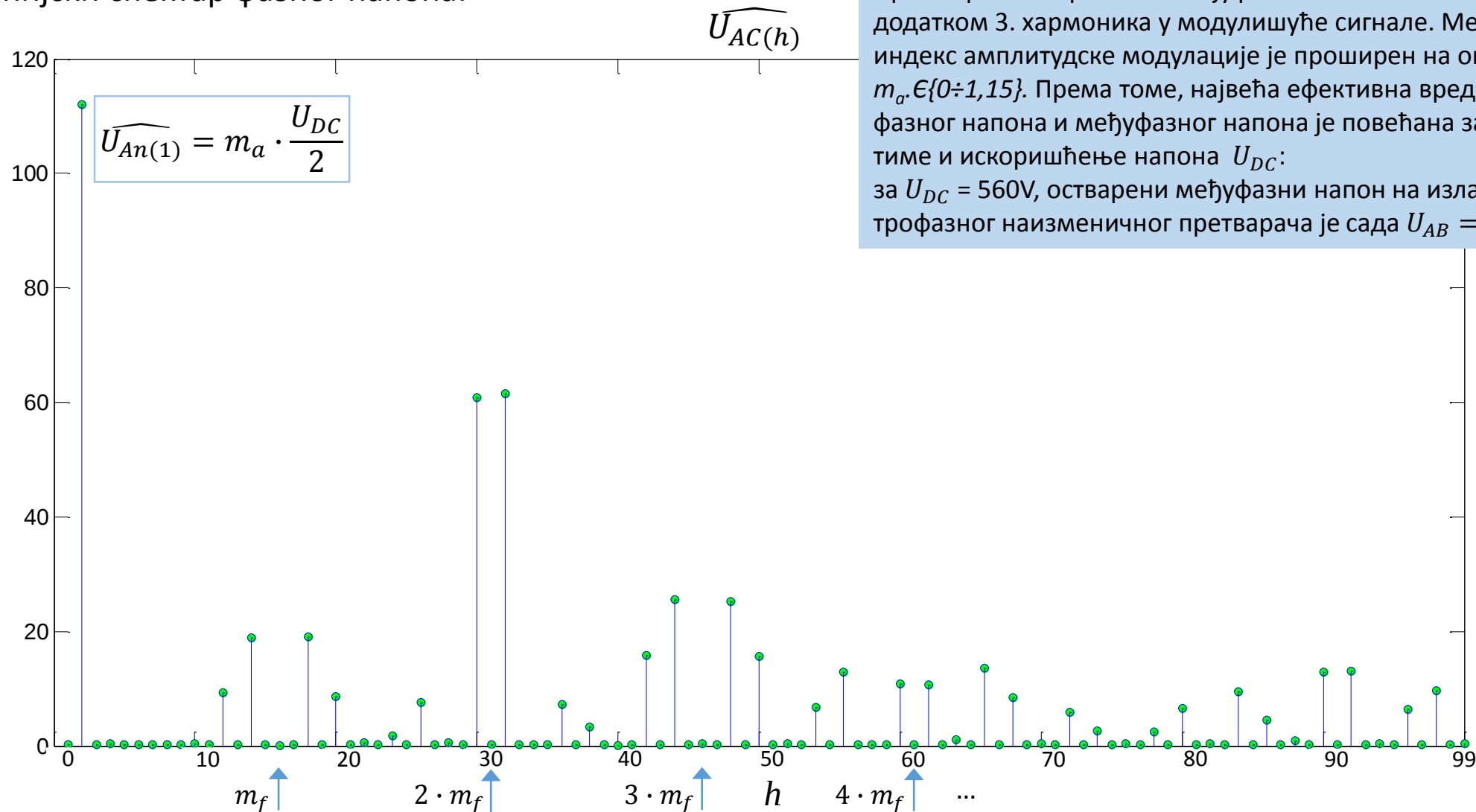
$$U_{DC} = 320V, m_a = 0,7, m_f = 15$$

$$R_{ABC} = 1\Omega, L_{ABC} = 20mH, e_{ABC} = 79V \angle -10^\circ$$



синусна модулација са додатком 3. хармоника

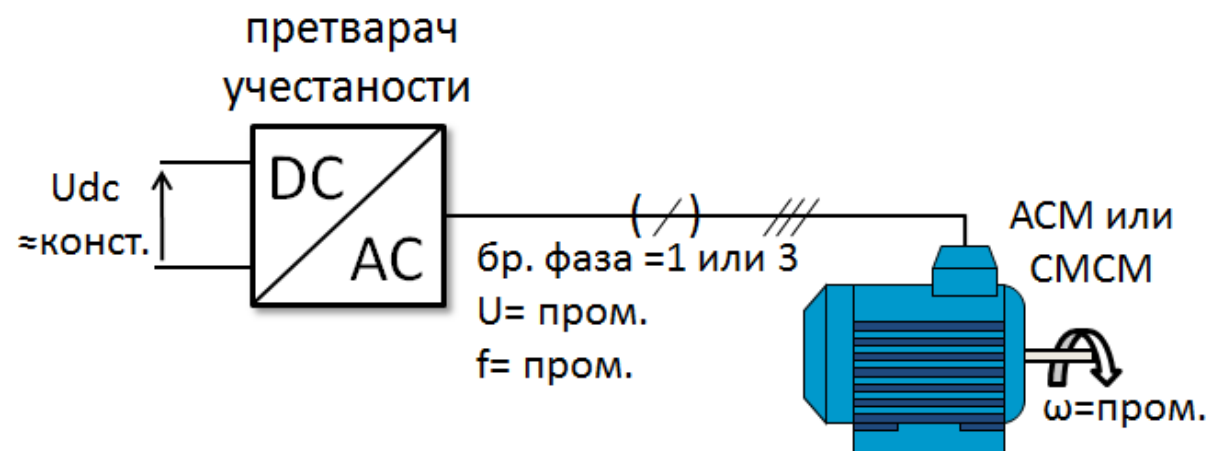
- хармонијски спектар фазног напона:



Први хармоник фазног и међуфазног напона се не мења додатком 3. хармоника у модулишуће сигнале. Међутим, индекс амплитудске модулације је проширен на опсег $m_a \in \{0 \div 1, 15\}$. Према томе, највећа ефективна вредност фазног напона и међуфазног напона је повећана за $\times 1,15$, а тиме и искоришћење напона U_{DC} :
за $U_{DC} = 560V$, остварени међуфазни напон на излазу трофазног наизменичног претварача је сада $U_{AB} = 394V$.

ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

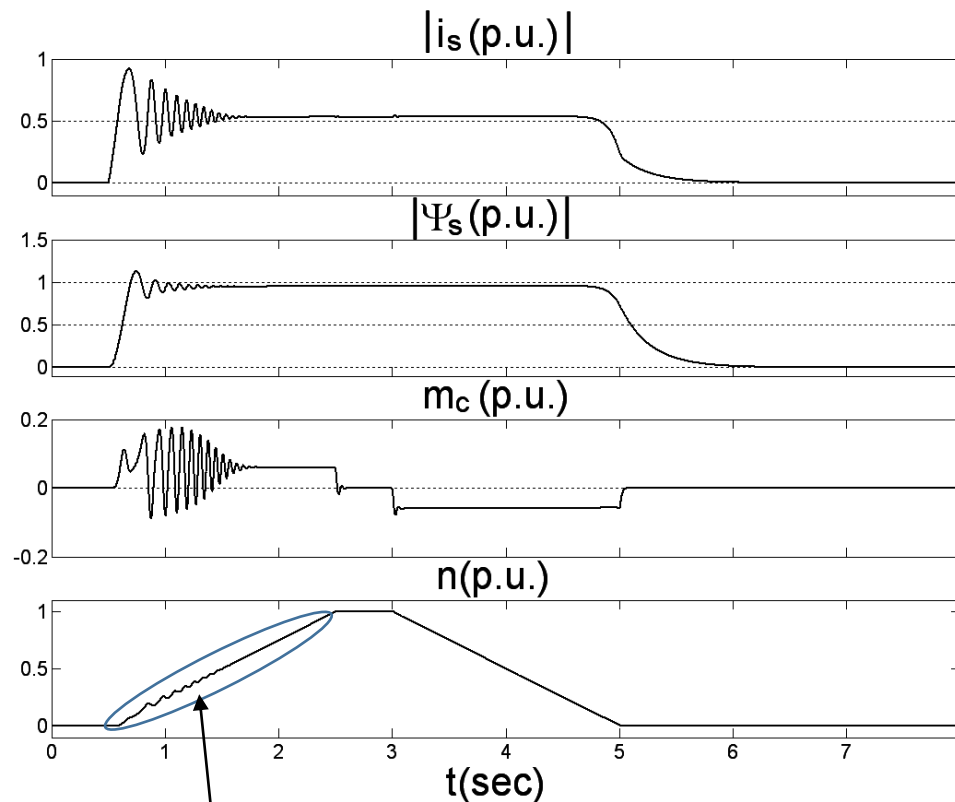
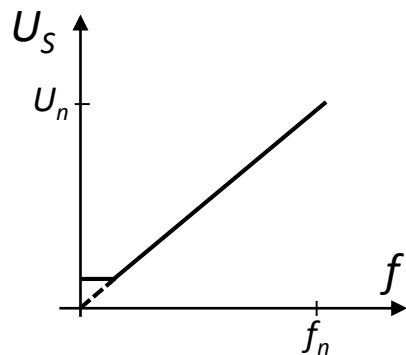
1. погони машина наизменичне струје (АСМ или СМСМ):



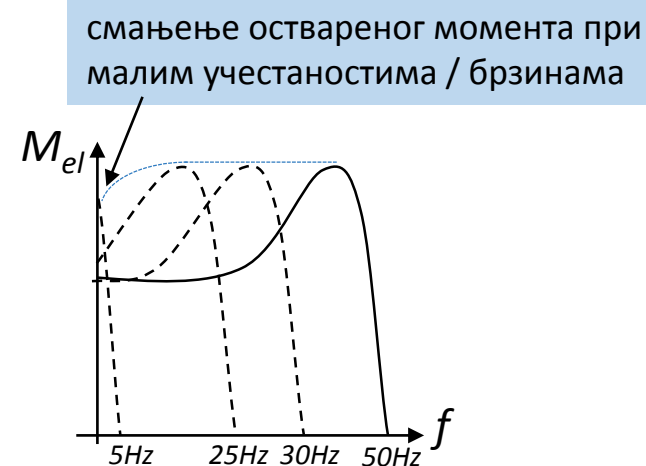
ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

1.a. U/f управљање асинхронном машином:

... или скаларно управљање –
довођење напона напајања независно
од положаја ротора и стања електро-
магнетних величина у машини:



ограничена динамика промене
брзине / положаја ротора

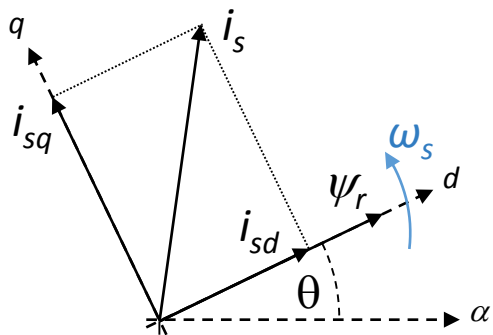


промена електромагнетног момента M_{el} у
зависности од учестаности напона U_s :

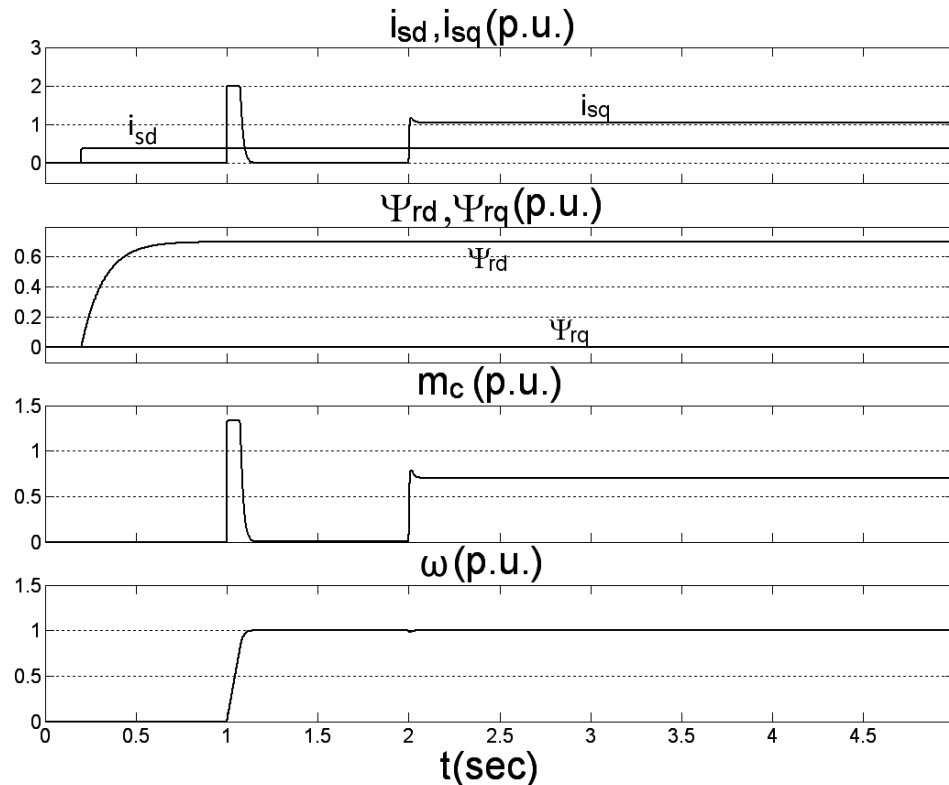
ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

1.6. векторско управљање асинхроним машином:

Када се величине у машини посматрају у ротирајућем dq координатном систему, нпр. из угла посматрања флуksа ротора, оне добијају облик једносмерних величина. Те једносмерне вредности електромагнетних величина представљају модуле њихових вектора. Координатни систем ротира синхроним брзином ω_s , а његов тренутни угао у односу на осу намотаја α је једнак θ .



Уобичајено се ротирајући dq координатни систем, везује за положај вектора флуksа ротора $\underline{\psi}_r = \underline{\psi}_{rd}$.



- математички модел асинх. машине у dq координатном систему:

$$m_{el} = \frac{L_m}{L_r} \cdot \underline{\psi}_r \times \underline{i}_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_{rd} \cdot i_{sq}$$

$$\frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\psi_{rd}}{dt} + \psi_{rd} = L_m \cdot i_{sd}$$

$$\omega_s = \omega + \omega_r = \omega + \frac{R_r \cdot L_m}{L_r} \cdot \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}}$$

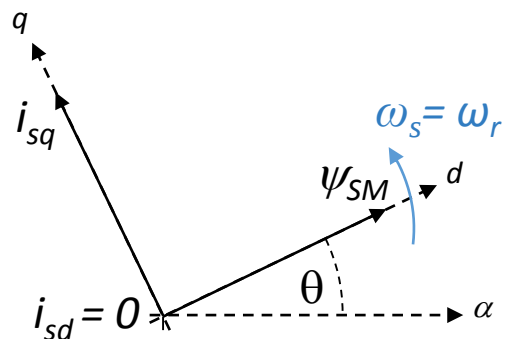
$$\theta = \int \omega_s \cdot dt$$

Независном контролом флуksа (ψ_{rd}) и момента (m_{el}) остварује се велика динамика погона (по угледу на машину једносмерне струје):

- контролом струје i_{sd} регулише се флуksа ротора ψ_{rd} ,
- контролом струје i_{sq} регулише се електромагнетни момент m_{el} .

ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

1.в. векторско управљање синхроним машином са сталним магнетима:



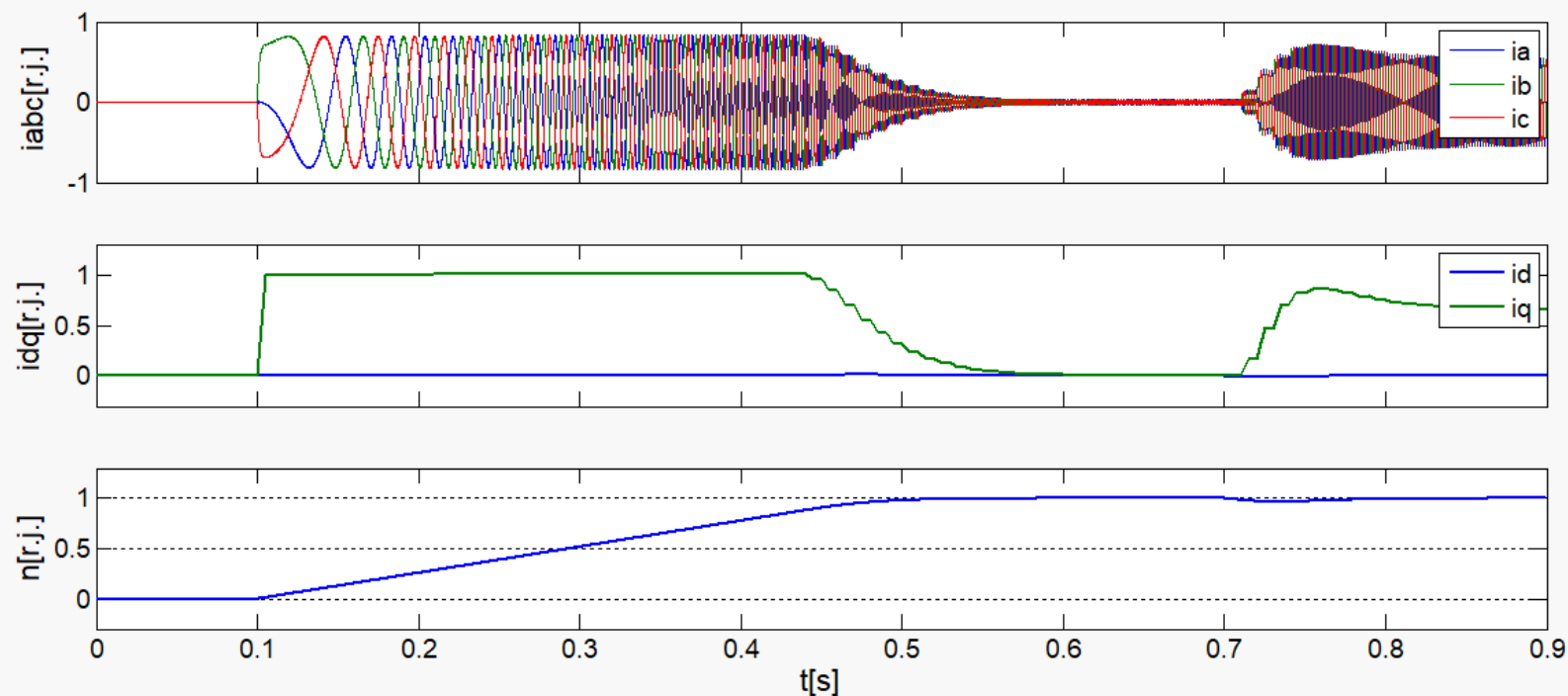
Ротирајући dq координатни систем, везује за положај вектора флукса сталних магнета ψ_{SM} , односно за одговарајући положај ротора θ .

Синхрона машина са сталним магнетима не може се управљати скаларном контролом – не постоји ефекат пригушења који код асинхроне машине обезбеђује кавезни ротор.

- математички модел СМСМ у dq координатном систему:

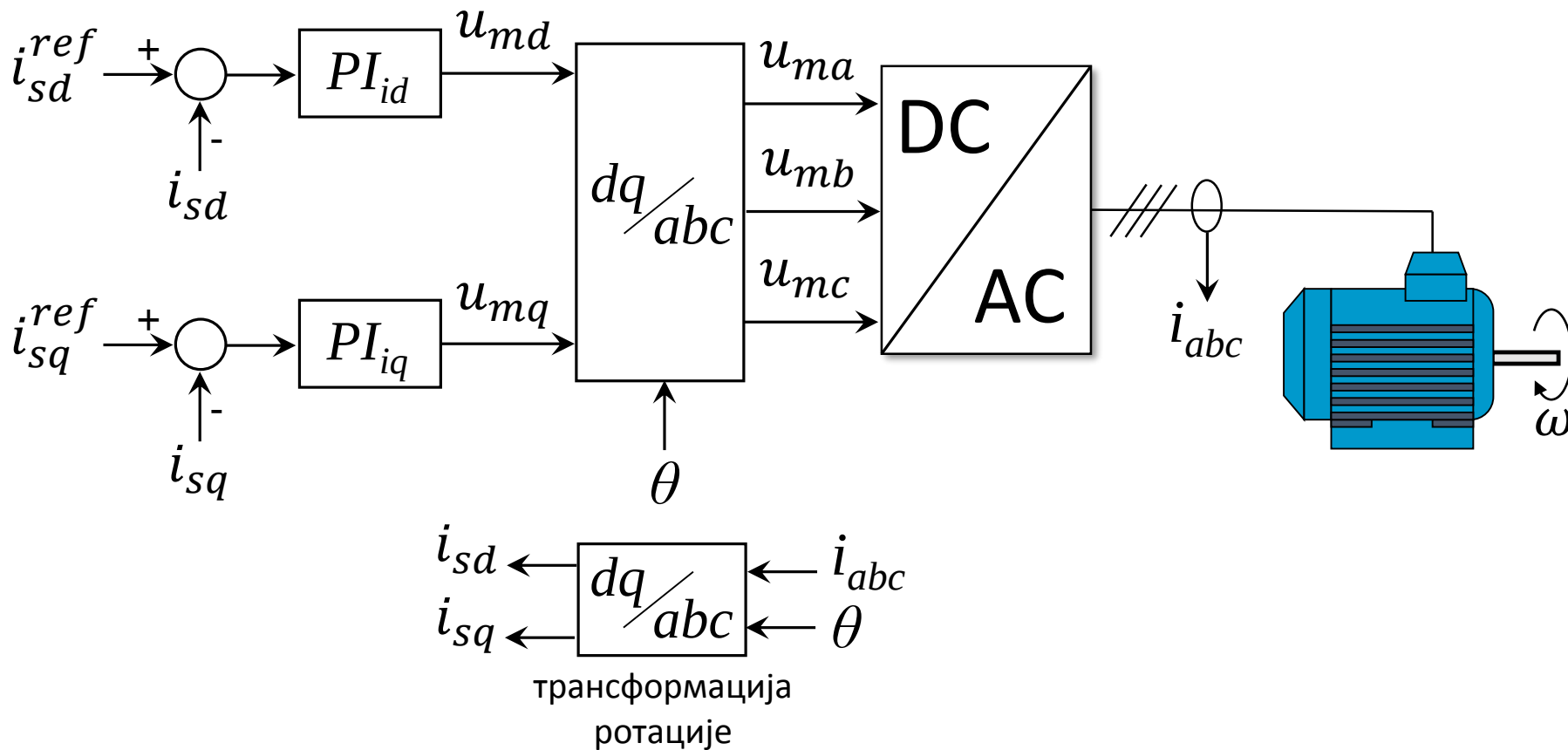
$$m_{el} = \psi_{SM} \cdot i_{sq}$$

Контролом струје (i_{sq}) остварује се контрола електромагнетни момент m_{el} .

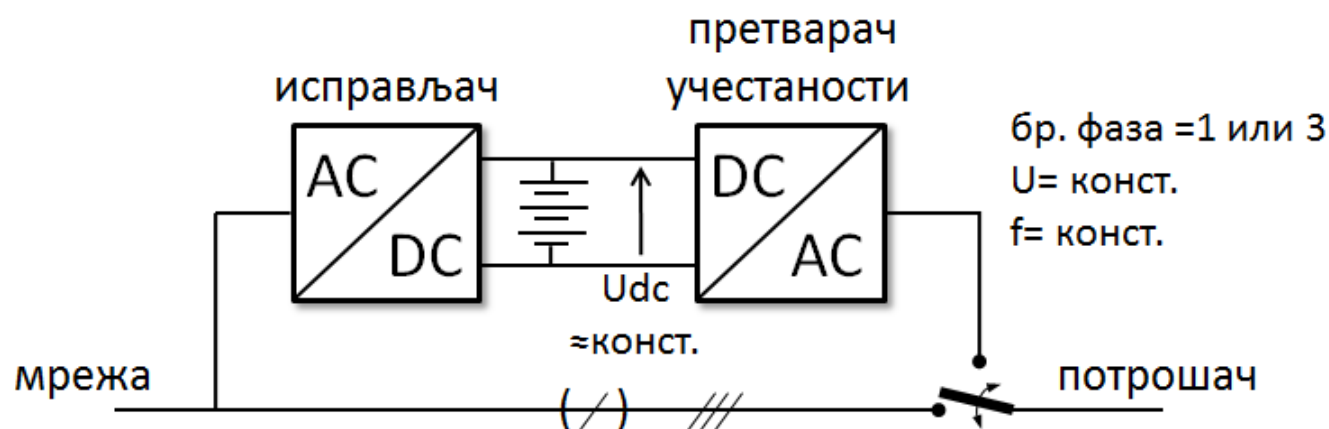


ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

1.6/в. векторско управљање струјама асинхроне/синхроне машине:



ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

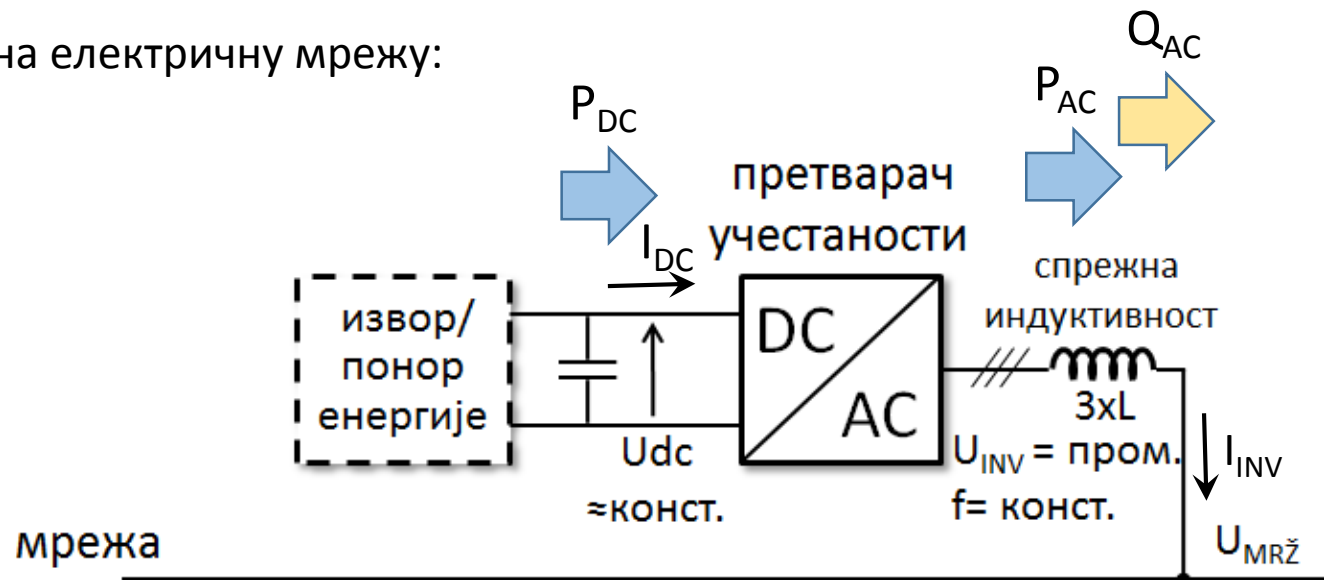
2. уређаји непрекидног напајања (*eng. Uninterruptible Power Supply - UPS*):

Подела:

- уређаји којих је претварач учестаности током називних услова у мрежи одспојени од потрошача – претварач напаја потрошач када је препознат поремећај у мрежи
- уређаји код којих претварач учестаности редовно напаја потрошач из батерије – претварач се преспаја преклопником када дође до кvara претварача (*Smart UPS*)

ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

3. претварач повезан на електричну мрежу:



- основни принципи:

активна снага: $P_{DC} = U_{DC} \cdot I_{DC} \approx P_{AC} = \sqrt{3} \cdot U_{MR\check{Z}} \cdot I_{INV} \cdot \cos\varphi$

реактивна снага; $Q_{AC} = \sqrt{3} \cdot U_{MR\check{Z}} \cdot I_{INV} \cdot \sin\varphi$

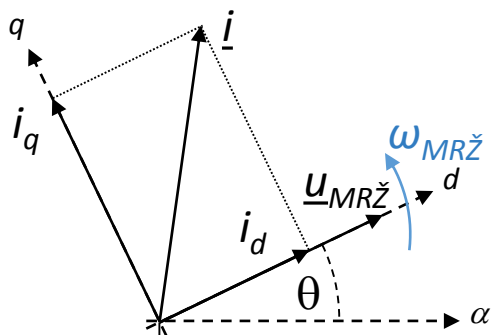
- упрошћено коло
(еквивалнетно коло основног хармоника):

$$\underline{u}_{INV} = \underline{u}_{MR\check{Z}} + \underline{u}_L$$

$$= \underline{u}_{MR\check{Z}} + jx_L \cdot \underline{i}$$

ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

3. векторско управљање током снаге претвараача повезаног на електричну мрежу:



Ротирајући dq координатни систем, везује за положај вектора фазора напона мреже, $\underline{u}_{MR\check{Z}}$. Угао фазора, θ , одређује PLL (*Phase-Locked-Loop*, PLL) јединица.

- математички модел тока снаге између претвараача и мреже у dq координатном систему:

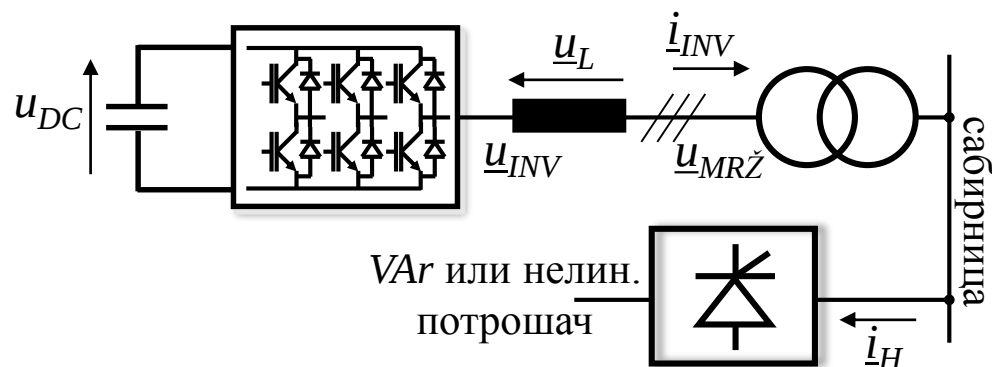
$$\underline{S}_{MRZ} = \underline{u}_{MRZ} \cdot \underline{i}^* = u_{dMRZ} \cdot (i_d - j \cdot i_q) = u_{dMRZ} \cdot i_d - j \cdot u_{dMRZ} \cdot i_q \Rightarrow$$

$$P_{MRZ} = u_{dMRZ} \cdot i_d, \quad Q_{MRZ} = -u_{dMRZ} \cdot i_q \quad \text{реф. смер према мрежи}$$

Контролом струје i_d остварује се контрола тока активне снаге, контролом струје i_q остварује се контрола тока реактивне снаге.

ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

3.а примери примене без извора / понора енергије у једносмерном колу

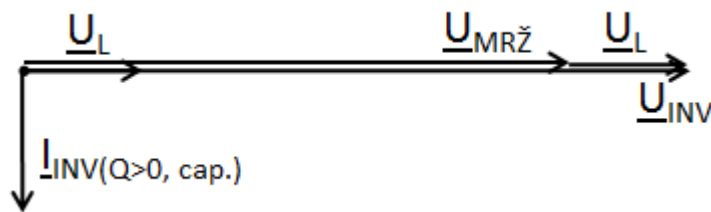


- VAr компензатор (извор / потрошач реактивне енергије):

основни принципи:

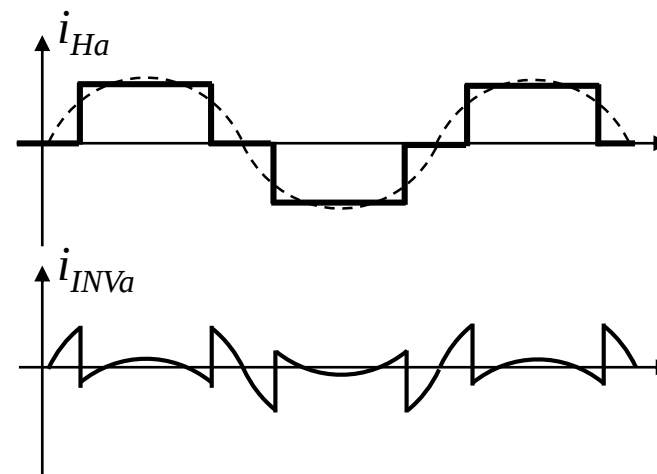
$$\underline{u}_{INV} = u_{MR\check{Z}} + \underline{u}_L$$

$$\underline{u}_L = j\omega L \cdot \underline{i}_{INV}$$



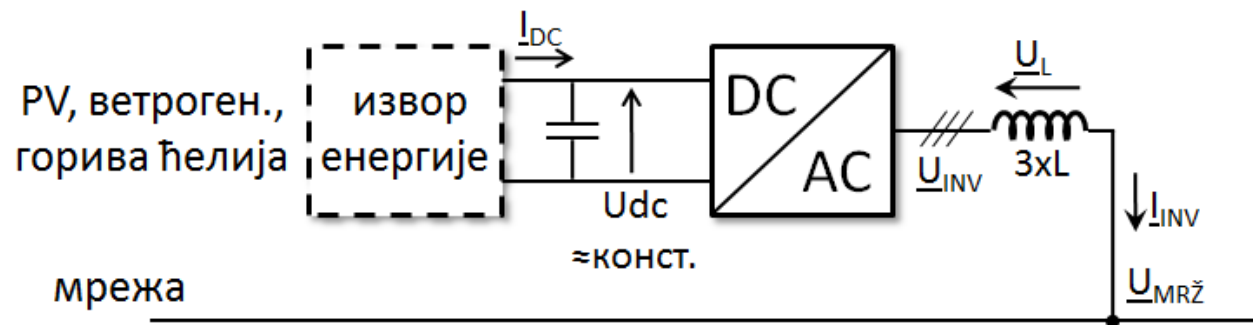
Када претвараач даје напон, U_{INV} , који је у фази са напонем мреже, $U_{MR\check{Z}}$, и веће амплитуде, он производи ток струје, I_{INV} , попут капацитивности; $Q_{AC} > 0$.
И обрнуто, када претвараач даје напон, U_{INV} , који је у фази са напонем мреже, $U_{MR\check{Z}}$, и мање амплитуде, производи ток струје, I_{INV} , попут индуктивности; $Q_{AC} < 0$.

- активни филтар (понор за више хармонике струје):



ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

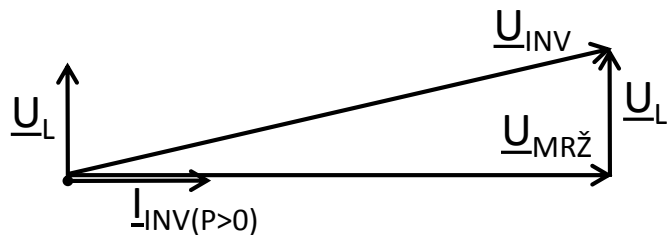
3.6 повезивање малих извора електричне енергије на мрежу:



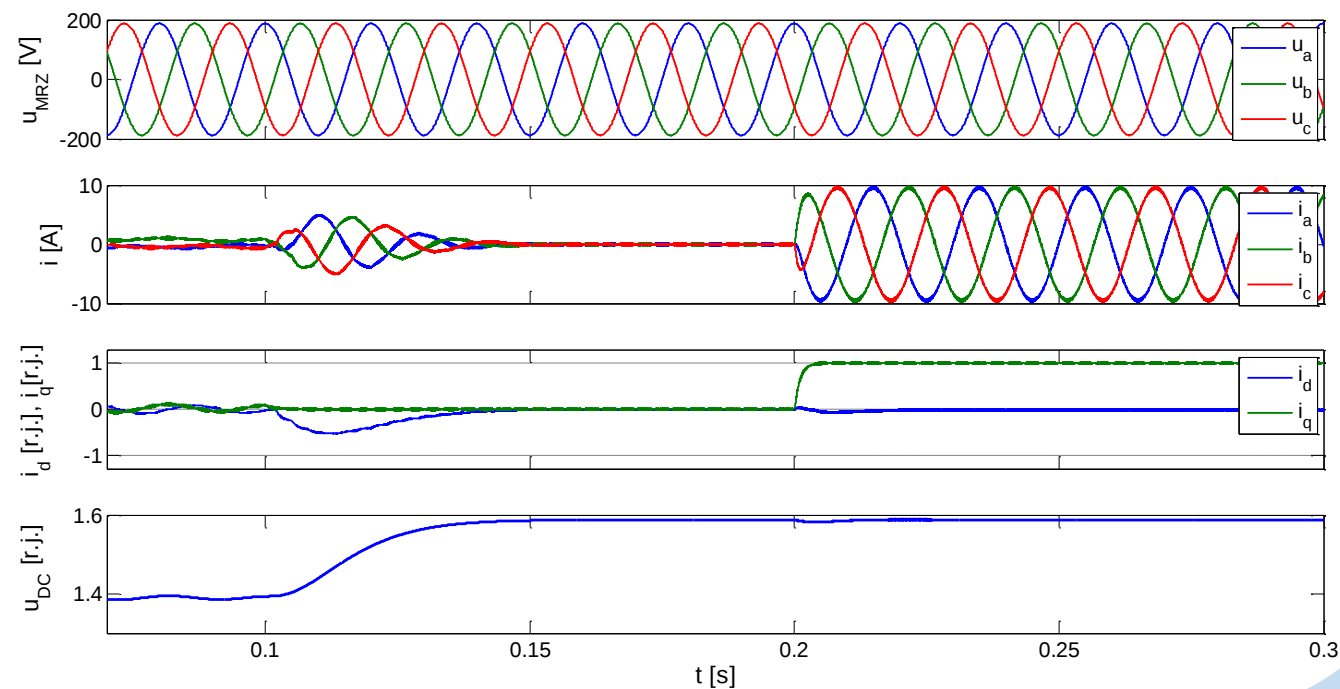
основни принципи:

$$\underline{U}_{INV} = \underline{U}_{MR\check{Z}} + \underline{U}_L$$

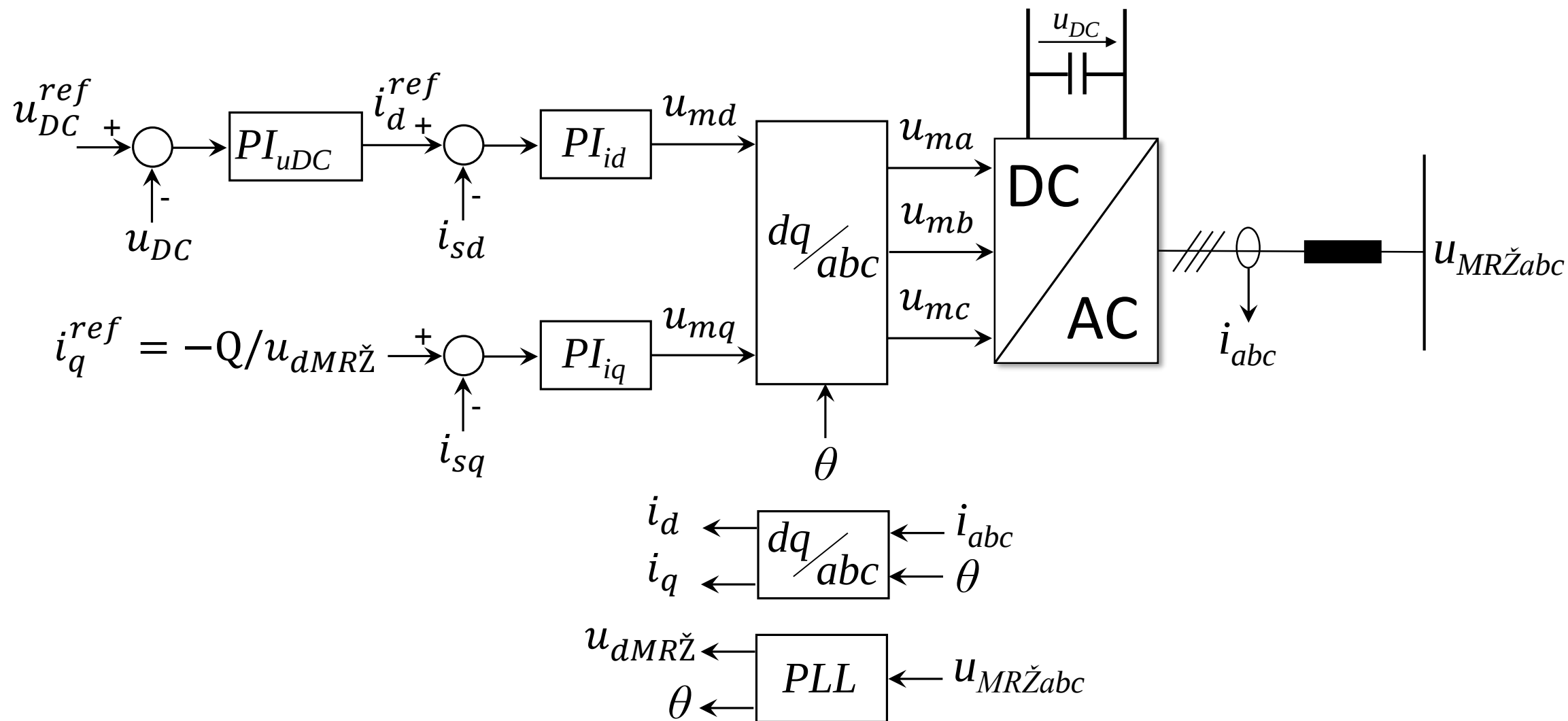
$$\underline{U}_L = j\omega L \cdot \underline{I}_{INV}$$



Када претвараач даје напон, $\underline{U}_{INV}$, који угаоно предњачи у односу на напон мреже, $\underline{U}_{MR\check{Z}}$, производи ток активне снаге ка мрежи, попут генератора; $P_{AC} > 0$.
И обрнуто, када претвараач даје напон, $\underline{U}_{INV}$, који угаоно касни у односу на напон мреже, $\underline{U}_{MR\check{Z}}$, производи негативан ток активне струје, попут потрошача; $P_{AC} < 0$.



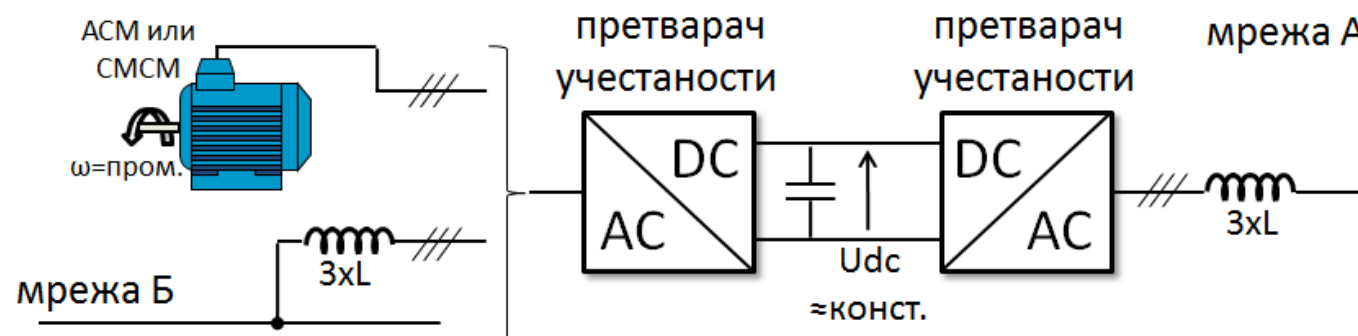
ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА



ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА

3.6 двоструки претварач (*back-to-back inverter*):

Враћање енергије у мрежу
при кочењу машине.



Повезивање две преносне електричне мреже (тзв. *High Voltage DC transmission - HVDC*, нпр. између Хокаиодо и Хоншу) или повезивање локалне мреже на преносну / дистрибутивну мрежу (нпр. ветроелектране у плитком мору и копна).

ПРИМЕНА НАИЗМЕНИЧНИХ ПРЕТВАРАЧА