

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 045 - 2011

NAPĚŤOVÝ PULSNÍ USMĚRŇOVAČ - NESYMETRICKÁ NAPÁJECÍ SÍŤ

Druh úkolu:	Vědecko- výzkumný
Řešitelé:	K. Zeman, V. Blahník
Vedoucí úkolu:	doc. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.
Počet stran:	44
Datum vydání:	prosinec 2011
Revize:	1

Tato zpráva vznikla s podporou projektu TA01010863 a
CZ.1.05/2.1.00/03.0094

Anotace

Výzkumná zpráva se zabývá návrhem algoritmů vektorového řízení napětového pulsního usměrňovače, napájeného z nesymetrické sítě se zdeformovaným napětím.

Obsah

1	ÚVOD.....	3
2	SLOŽKY NESYMETRICKÉHO NAPĚTÍ	3
3	ODPOROVÁ ZÁTĚŽ SÍTĚ.....	5
3.1	Symetrická síť	5
3.2	Nesymetrická síť	6
3.3	Závěry pro nesymetrickou síť a symetrickou odporovou zátěž	6
4	FUNKCE VEKTOROVÉHO ŘÍZENÍ PŘI $U_A+U_B+U_C \neq 0$	6
5	MATEMATICKÝ MODEL PULSNÍHO USMĚRŇOVAČE.....	12
5.1	Klasické stavové rovnice.....	12
5.2	Stavové veličiny ... I_d , I_q	12
6	VARIANTY SYNCHRONIZACE SOUŘADNÉHO SYSTÉMU (D, Q) S NAPĚTÍM SÍTĚ – IDEALIZOVANÝ „SINUSOVÝ“ USMĚRŇOVAČ.....	14
6.1	Varianta 1	14
6.1.1	Fázový posun napětí jednotlivých fází $= 120^\circ$	14
6.1.2	Fázový posun napětí jednotlivých fází $\neq 120^\circ$	15
6.1.3	Kmitočet sítě 48 Hz.....	16
6.2	Varianta 2	16
6.3	Varianta 3	17
6.4	Varianta 4	19
6.5	Varianta 5	20
6.6	Varianta 6	21
6.7	Zhodnocení variant.....	24
7	SKUTEČNÝ PULSNÍ USMĚRŇOVAČ.....	25
7.1	Varianta 1	25
7.1.1	Symetrické napětí sítě	25
7.1.2	Fázový posun napětí $\varphi_U = 120^\circ$, rozdílné amplitudy.....	26
7.1.3	Fázový posun napětí $\varphi_U \neq 120^\circ$, rozdílné amplitudy	28
7.1.4	Kmitočet sítě 48 Hz.....	29
7.1.5	Symetrická síť, zdeformovaná 5. harmonickou	30
7.1.6	Vliv periody vzorkování výpočtů na vlastnosti pohonu	31
7.1.7	Vliv tlumivky L ve střídavém obvodu PU	33
7.2	Varianta 6	34
7.2.1	Nesymetrická síť, $\varphi_U \neq 120^\circ$, $TV_{reg_1} = 1/(2 \cdot f_{pila}) = TV_{reg_2}$	35
7.2.2	Nesymetrická síť, $\varphi_U \neq 120^\circ$, $TV_{reg_1} = 1/(2 \cdot f_{pila})$, $TV_{reg_2} = 100 \mu s$	36
7.2.3	Kmitočet 48 Hz, deformace 5. harmonickou, $TV_{reg_1} = TV_{reg_2} = 100 \mu s$	37
7.2.4	Dtto, malá indukčnost ve st obvodu PU	38
7.2.5	Kontrolní výpočet – stavové veličiny I_d , I_q	39
8	ZÁVĚR.....	40
8.1	Problematika polohy souřadného systému (d,q) při nesymetrickém napětí sítě	40
8.2	Problematika harmonických proudů při zdeformovaném napětí sítě.....	41
8.3	Problematika činnosti PU při kmitočtu sítě různém od 50 Hz	42
8.4	Problematika vzorkování výpočtů.....	42
8.5	Malá tlumivka ve st obvodu PU	42

1 Úvod

Řídící a regulační algoritmy napěťových pulsních usměrňovačů plní tyto úkoly:

- Zajistit konstantní napětí kondenzátoru ve ss meziobvodu střídače
- Nulový fázový posun mezi napětím sítě a odebíraným proudem

Uvedené úkoly může plnit vektorové řízení, které pracuje takto:

- Souřadný systém (d, q) se orientuje tak, aby vektor napětí „ležel“ v ose q
- Složku proudu I_q zadává regulátor napětí ve ss meziobvodu
- Složka proudu I_d se reguluje na nulovou hodnotu $\Rightarrow \cos\varphi = 1$.

Takto principiálně jednoduše pracuje vektorové řízení v příp. symetrické napájecí sítě.

Při nesymetrické napájecí síti vznikají tyto hlavní problémy:

1. Souřadný systém (d, q) se obvykle synchronizuje s napětím sítě U_a . Pokud je fázový posun mezi napětími U_a , U_b a $U_c \dots \varphi_U \neq 120^\circ$, „leží“ vektor napětí sítě $\bar{U}$ mimo osu q. Regulace $I_d = 0$ pak nezajišťuje účinník rovný 1.

Touto problematikou se zabývají kap. 2, 6.

2. Pokud je napájecí síť nevyvážená ($U_a + U_b + U_c \neq 0$) není zpětná transformace (prostorový vektor $\rightarrow$ fázové veličiny) jednoznačná.

Touto problematikou se zabývá kap. 4.

2 Složky nesymetrického napětí

Nesouměrnou 3 fázovou soustavu napětí U_a, U_b, U_c lze rozložit na 3 soustavy:

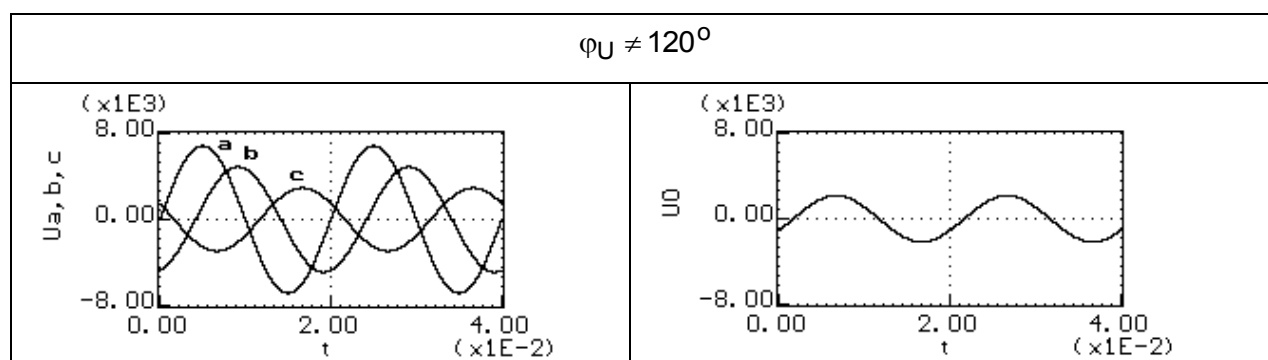
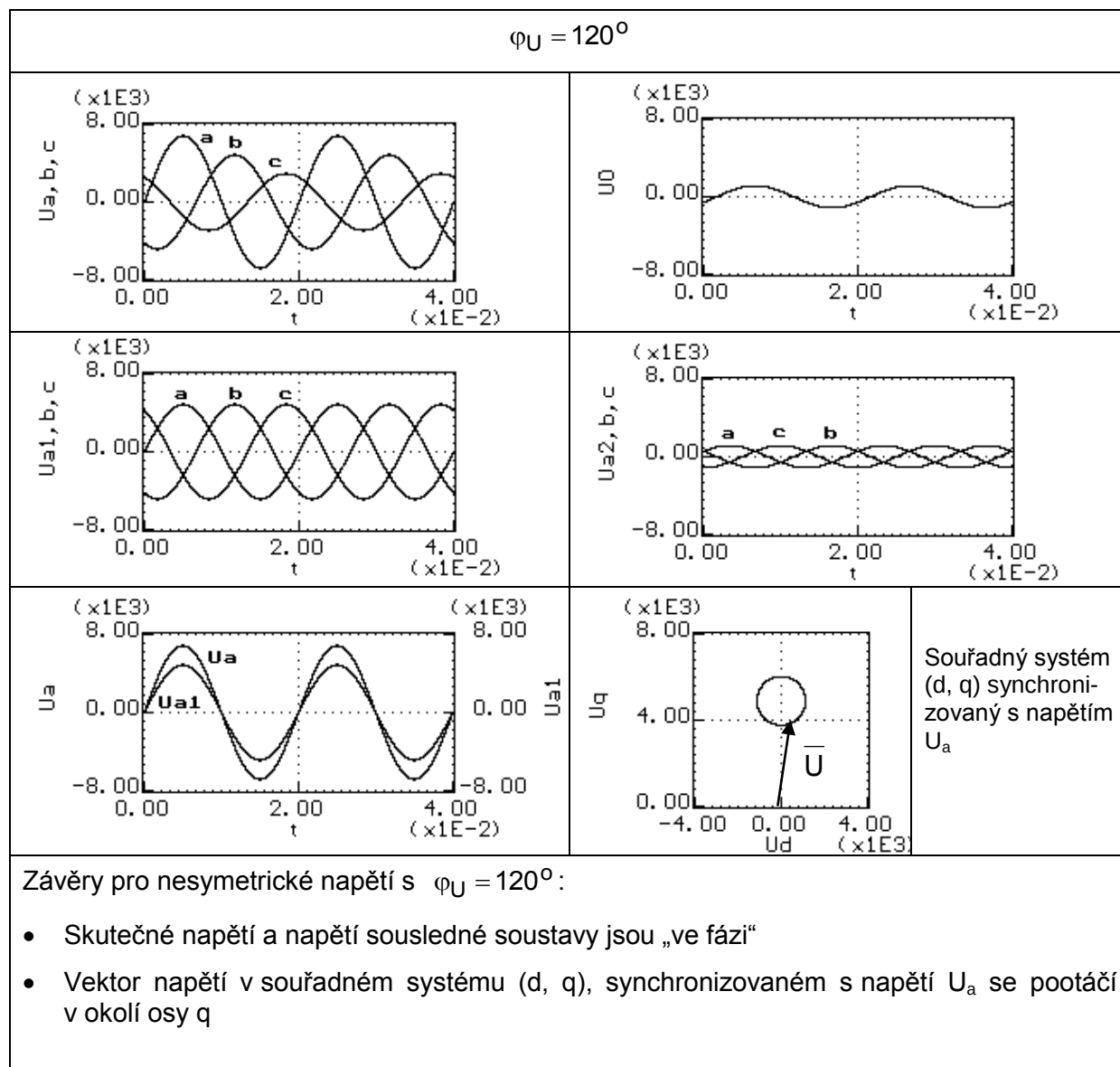
- Netočivá soustava U_0, U_0, U_0
- Sousedná soustava U_{a1}, U_{b1}, U_{c1}
- Zpětná soustava U_{a2}, U_{c2}, U_{b2}

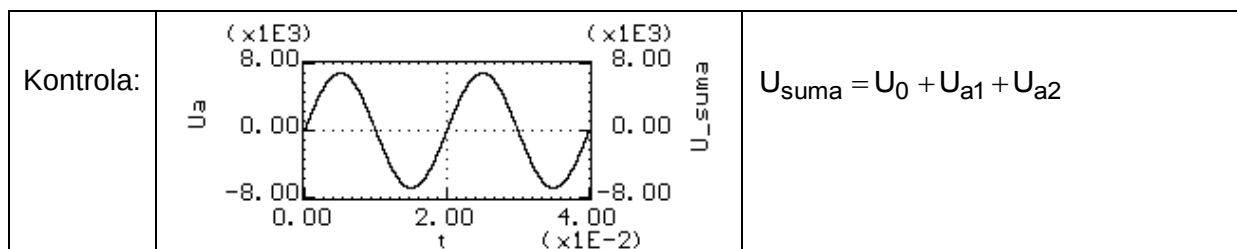
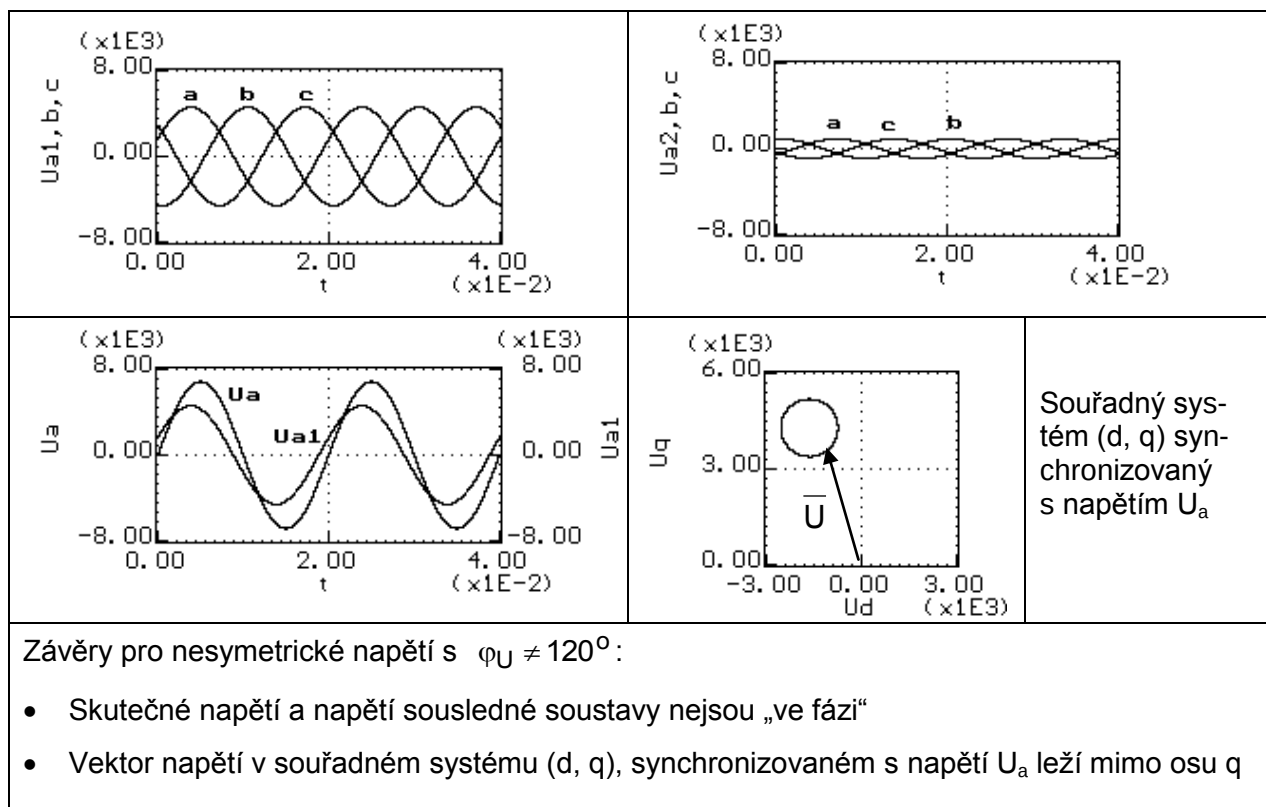
Fázory uvedených soustav jsou určeny vztahem:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_{a1} \\ \bar{U}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix}, \quad \bar{a} = e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}$$

Při následujících simulacích jsou využívány tyto třífázové soustavy napětí:

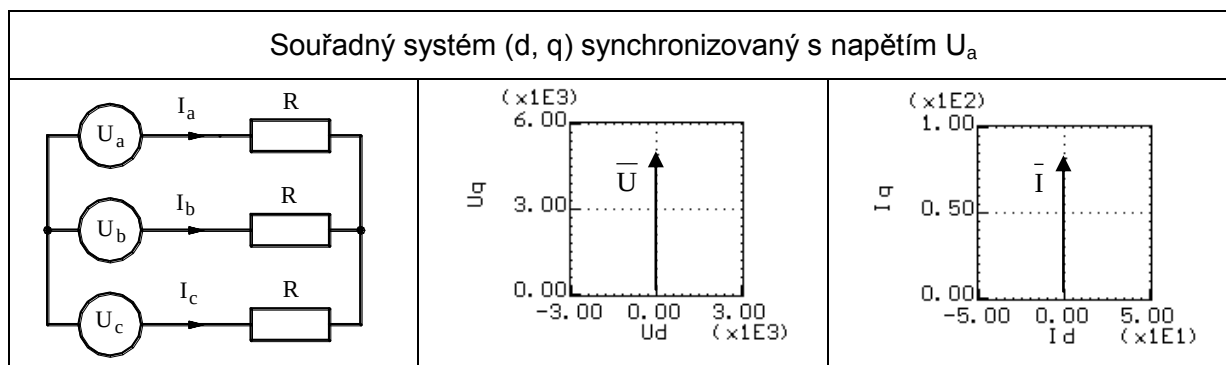
- Soustava s netočivou a zpětnou složkou – fázový posun napětí $\varphi_U = 120^\circ$
- Soustava s netočivou a zpětnou složkou – fázový posun napětí $\varphi_U \neq 120^\circ$



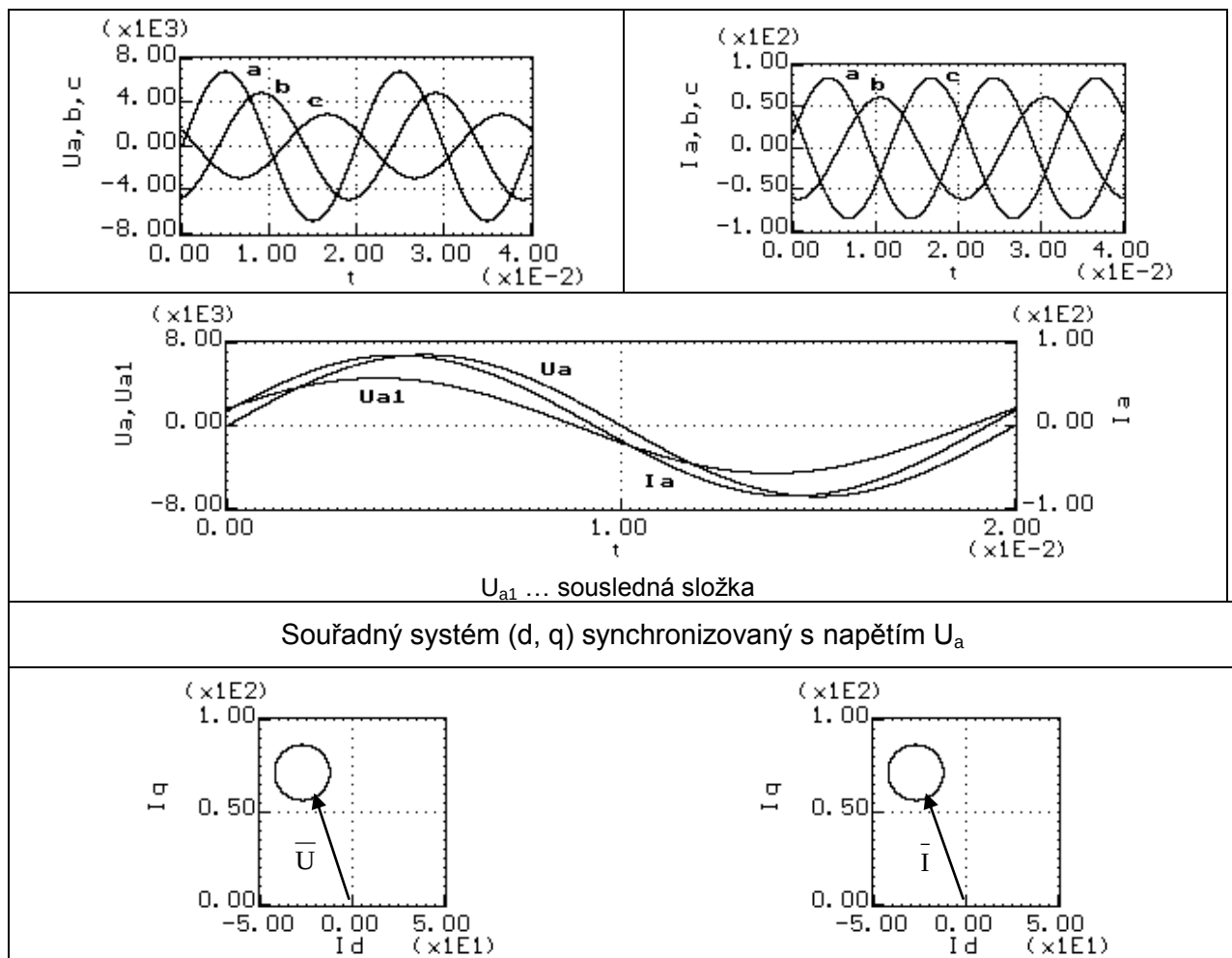


3 Odporová zátěž sítě

3.1 Symetrická síť



3.2 Nesymetrická síť

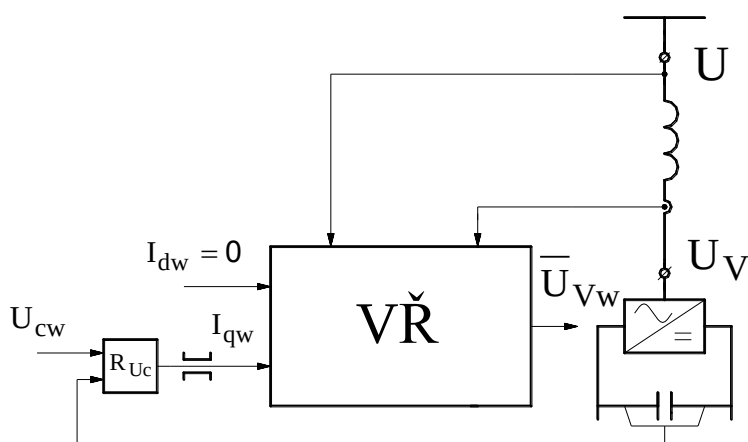


3.3 Závěry pro nesymetrickou síť a symetrickou odporovou zátěž

- Úhel mezi vektorem napětí $\bar{U}$ a vektorem proudu $\bar{I}$ je nulový.
- Fázový posun mezi napětím a proudem jednotlivých fází je **nenulový**
- Fázový posun mezi souslednou složkou napětí a proudem je také **nenulový**
- Amplituda proudů je různá

4 Funkce vektorového řízení při $U_a + U_b + U_c \text{ nerovno } 0$

Vektorové řízení generuje takový prostorový vektor napětí $\bar{U}_{Vw}$, při kterém je podélná složka prostorového vektoru proudu I_{sd} nulová.



Po zadání $I_{qw} = 0, I_{dw} = 0$ je ze sítě odebírán nulový proud. Musí tedy platit (idealizující předpoklad ...“sinusový“ usměrňovač) :

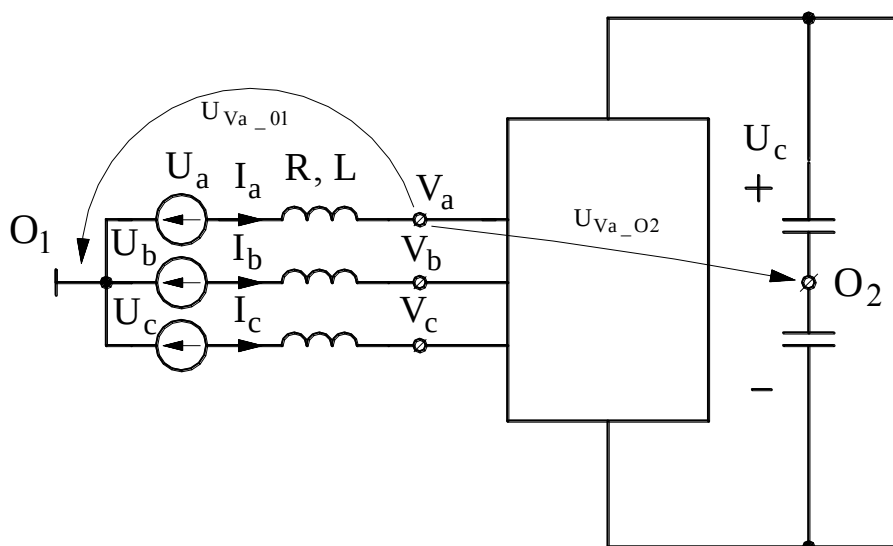
- $\bar{U}_{Vw} = \bar{U}_V = \bar{U}$
- $U_{Va} = U_a, U_{Vb} = U_b, U_{Vc} = U_c$

Při **nevyvážené soustavě** napětí sítě vzniká tento teoretický problém:

Prostorový vektor $\bar{U}_{Vw}$ neurčuje jednoznačně napětí U_{Va}, U_{Vb}, U_{Vc} . To dokazují dále uvedené obecné vztahy pro transformaci „prostorový vektor“.

Transformace „prostorový vektor“	
x_a, x_b, x_c ... okamžité hodnoty 3 fázové veličiny	
$e^{j \cdot 2 \cdot \pi / 3} = \bar{a}$ $\bar{x} = \frac{2}{3} \cdot (x_a + \bar{a} \cdot x_b + \bar{a}^2 \cdot x_c)$ $x_0 = \frac{1}{3} \cdot (x_a + x_b + x_c)$	$\operatorname{Re}\{\bar{x}\} = \frac{2}{3} \cdot x_a - \frac{1}{3} \cdot (x_b + x_c)$ $\operatorname{Im}\{\bar{x}\} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (x_b - x_c)$
Zpětná transformace	
Nevyvážená soustava	Vyvážená soustava
$x_a = \operatorname{Re}\{\bar{x}\} + x_0$ $x_b = -\frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}\{\bar{x}\} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \operatorname{Im}\{\bar{x}\} + x_0$ $x_c = -\frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}\{\bar{x}\} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \operatorname{Im}\{\bar{x}\} + x_0$	$x_{av} + x_{bv} + x_{cv} = 0$ $x_{av} = x_a - x_0$ $x_{bv} = x_b - x_0$ $x_{cv} = x_c - x_0$
$\bar{x} = \frac{2}{3} \cdot (x_a + \bar{a} \cdot x_b + \bar{a}^2 \cdot x_c)$	$\bar{x}_V = \frac{2}{3} \cdot [(x_a - x_0) + \bar{a} \cdot (x_b - x_0) + \bar{a}^2 \cdot (x_c - x_0)] =$ $= \bar{x} + \frac{2}{3} \cdot x_0 \cdot (1 + \bar{a} + \bar{a}^2) = \bar{x}$
Prostorový vektor skutečné a odpovídající vyvážené soustavy je stejný	
$\bar{x} = \bar{x}_V$	

Analysou usměrňovače lze výše uvedený teoretický problém vysvětlit.



Při nevyvážené soustavě síťového napětí může vektorové řízení pracovat dvojím způsobem:

1. Nulový vektor napětí sítě U_0 se nevyhodnocuje

Vektorové řízení vyhodnocuje požadovaný vektor $\bar{U}_{Vw}$. Za předpokladu $U_{Vw0} = 0$ platí tyto vztahy zpětné transformace pro požadovaná fázová napětí :

$$\begin{aligned} (U_{Va_02})_w &= \text{Re}\{\bar{U}_{Vw}\} \\ (U_{Vb_02})_w &= -\frac{1}{2} \cdot \text{Re}\{\bar{U}_{Vw}\} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \text{Im}\{\bar{U}_{Vw}\} \\ (U_{Vc_02})_w &= -\frac{1}{2} \cdot \text{Re}\{\bar{U}_{Vw}\} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \text{Im}\{\bar{U}_{Vw}\} \end{aligned}$$

Pozn.:
($U_{V_02})_w$... požadované napětí (řídící signál PWM modulační pulsního usměrňovače)

Soustava $(U_{Va_02})_w, (U_{Vb_02})_w, (U_{Vc_02})_w$ je vyvážená.

2. Nulový vektor napětí sítě U_0 se průběžně vyhodnocuje

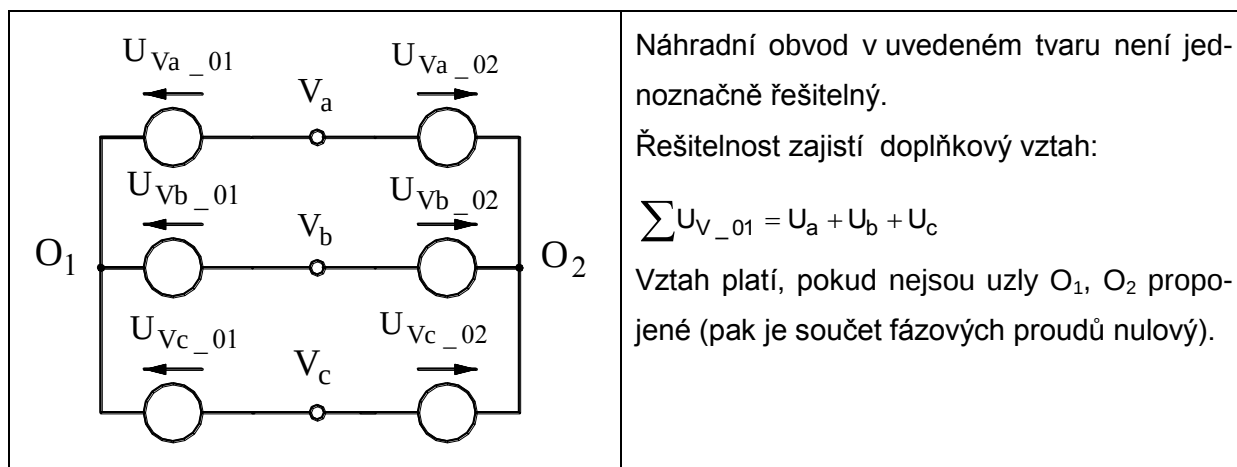
Vektorové řízení vyhodnocuje požadovaný vektor $\bar{U}_{Vw}$ a nulový vektor napětí sítě U_0 . Za předpokladu $U_{Vw0} = U_0$ platí tyto vztahy:

$$\begin{aligned} (U_{Va_02})_w &= \text{Re}\{\bar{U}_{Vw}\} + U_0 \\ (U_{Vb_02})_w &= -\frac{1}{2} \cdot \text{Re}\{\bar{U}_{Vw}\} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \text{Im}\{\bar{U}_{Vw}\} + U_0 \\ (U_{Vc_02})_w &= -\frac{1}{2} \cdot \text{Re}\{\bar{U}_{Vw}\} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \text{Im}\{\bar{U}_{Vw}\} + U_0 \end{aligned}$$

Soustava $(U_{Va_02})_w, (U_{Vb_02})_w, (U_{Vc_02})_w$ je nevyvážená.

Pozn.: Dále je dokázáno, že činnost PU je při obou variantách stejná.

Pro výpočet proudů ve střídavém obvodu PU je nutno určit napětí svorek V_a , V_b , V_c proti svorce O_1 . K výpočtu lze využít tento náhradní obvod.



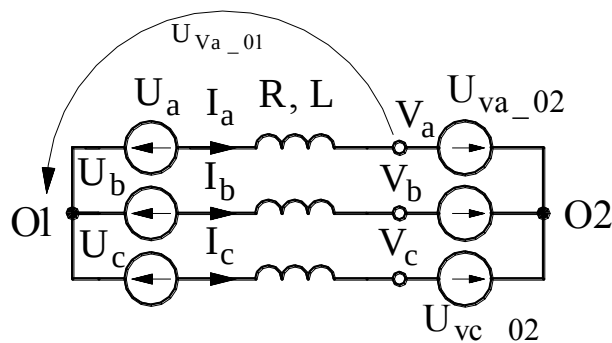
Výsledné vztahy:

$$U_{Va_01} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{Va_02} - U_{Vb_02} - U_{Vc_02}) + \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

$$U_{Vb_01} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{Vb_02} - U_{Vc_02} - U_{Va_02}) + \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

$$U_{Vc_01} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{Vc_02} - U_{Va_02} - U_{Vb_02}) + \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

Důkaz platnosti uvedených vztahů klasickým výpočtem elektrického obvodu :



$$U_{va_01}(t) = U_a - R \cdot I_a - L \cdot \frac{dI_a}{dt}$$

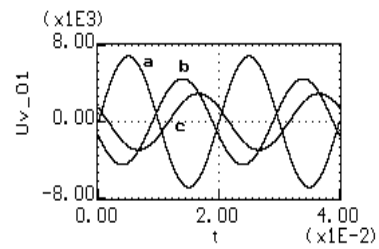
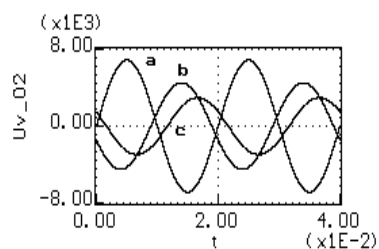
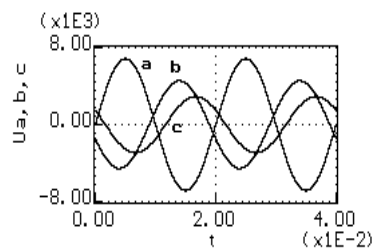
$$U_{va_01}(p) = U_a(p) - R \cdot I_a(p) - p \cdot L \cdot I_a(p) = U_a(p) - I_a(p) \cdot (R + p \cdot L)$$

$$I_a(p) = \frac{1}{3 \cdot (R + p \cdot L)} \cdot (2 \cdot U_{va_02} - U_{vb_02} - U_{vc_02} - 2 \cdot U_a + U_b + U_c)$$

$$U_{va_01} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{va_02} - U_{vb_02} - U_{vc_02}) + \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

Idealizovaný „sinusový“ usměrňovač

$$U_a + U_b + U_c = 0, I_{sdw} = 0, I_{sqw} = 0$$

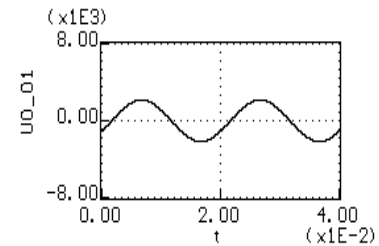
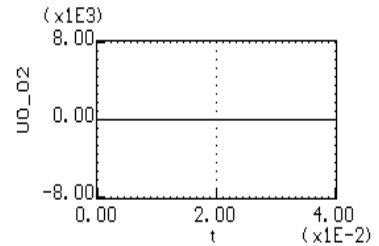
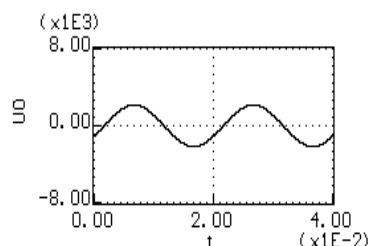
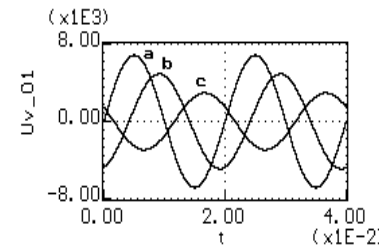
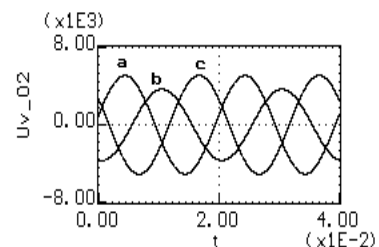
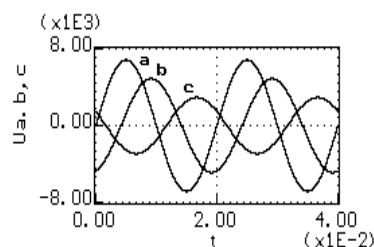


Závěr: Napětí U , U_{V_01} , U_{V_02} jsou stejná

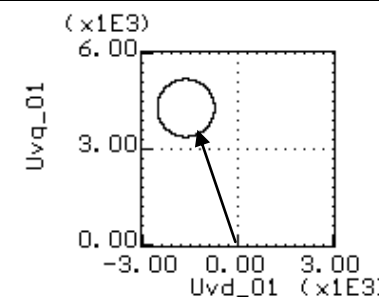
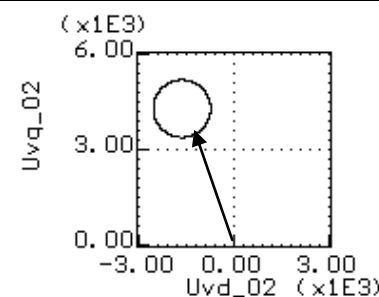
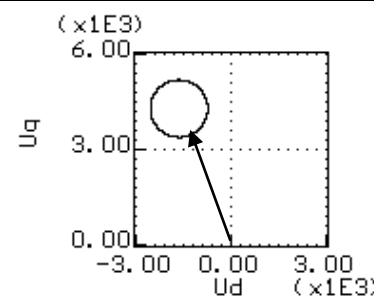
Idealizovaný „sinusový“ usměrňovač

$$U_a + U_b + U_c \neq 0, I_{sdw} = 0, I_{sqw} = 0$$

Nulový vektor napětí sítě U_0 se nevyhodnocuje ... ad 1)



Souřadný systém (d, q) synchronizovaný s napětím U_a , nulové proudy



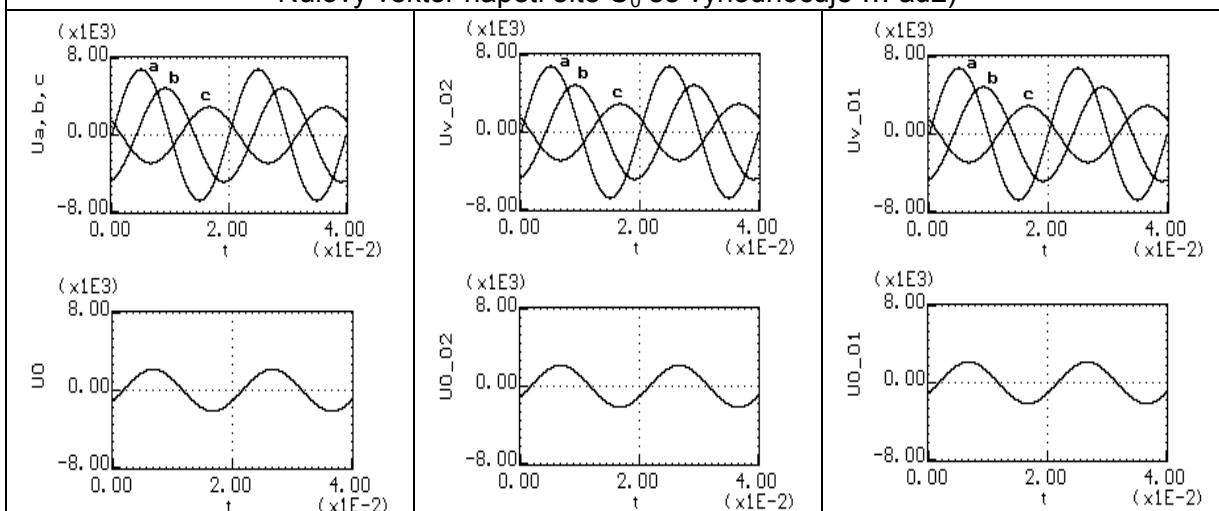
Závěr pro $I_{a,b,c} = 0$:

- $U_{vab,c_02} \neq U_{a,b,c}, U_{vab,c_01} = U_{a,b,c}$
- $\bar{U} = \bar{U}_{V_01} = \bar{U}_{V_02}$

Idealizovaný „sinusový“ usměrňovač

$$U_a + U_b + U_c \neq 0, I_{sdw} = 0, I_{sqw} = 0$$

Nulový vektor napětí sítě U_0 se vyhodnocuje ... ad2)



Obecný závěr: Napětí U_{Va,b,c_01} jsou stejná, jako při nevyhodnocovaném vektoru U_0 .

Závěr pro $I_{a,b,c} = 0$:

- $U_{a,b,c} = U_{Vab,c_01} = U_{Vab,c_02}$

Dle uvedených grafů je činnost PU stejná při vyvážené i nevyvážené soustavě U_{Vab,c_02} .

Důkaz tvrzení:

$(U_{Va,b,c_02})_I$... vyvážená soustava vypočtená z vektoru $\bar{U}_{Vw}$

$(U_{Va,b,c_02})_{II} = (U_{Va,b,c_02})_I + U_0$... nevyvážená soustava

$$\begin{aligned} U_{Va_01} &= \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot (U_{Va_02})_{II} - (U_{Vb_02})_{II} - (U_{Vc_02})_{II}] + U_0 \\ &= \frac{1}{3} \cdot \{2 \cdot [(U_{Va_02})_I + U_0] - [(U_{Vb_02})_I + U_0] - [(U_{Vc_02})_I + U_0]\} + U_0 = \\ &= \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot (U_{Va_02})_I - (U_{Vb_02})_I - (U_{Vc_02})_I] + U_0 \end{aligned}$$

Závěr:

Vektorové řízení pulsního usměrňovače může dobře pracovat i při nesymetrické napájecí síti

- Při vyvážené i nevyvážené soustavě U_a, U_b, U_c generuje vektorové řízení vektor $\bar{U}_{Vw}$.

- Vektor $\bar{U}_{Vw}$ určuje jednoznačně vyváženou soustavu napětí

$(U_{Va_02})_w, (U_{Vb_02})_w, (U_{Vc_02})_w$, kterou lze využít k řízení PU.

Vyhodnocovat nevyváženou soustavu $(U_{Va,b,c_02})_w$ není účelné.

Pozn.: Výše uvedené grafy i výpočty dokazují, že PU pracuje nezávisle na tom, zda jeho řízení je odvozeno od vyvážené nebo nevyvážené soustavy, příslušné k vektoru $\bar{U}_{Vw}$.

- Soustava $U_{Va_01}, U_{Vb_01}, U_{Vc_01}$ odpovídá soustavě U_a, U_b, U_c - buď je vyvážená, nebo nevyvážená.

5 Matematický model pulsního usměrňovače

Výstupy vektorového řízení:

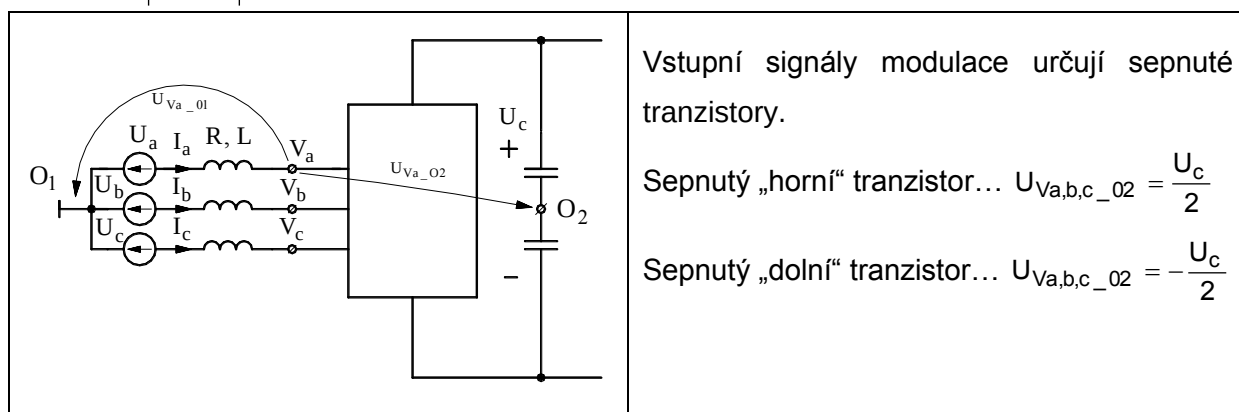
- Poloha souřadného systému (d, q) ... ϑ_s
- $\bar{U}_{Vw} = |(\bar{U}_V)_w| \cdot e^{j\beta}$... požadovaný vektor napětí v souřadném systému (d, q)

Vstupní signály modulační:

$$(U_{va})_w = |(\bar{U}_V)_w| \cdot \cos(\vartheta_s + \beta)$$

$$(U_{vb})_w = |(\bar{U}_V)_w| \cdot \cos(\vartheta_s + \beta - 2 \cdot \pi/3)$$

$$(U_{vc})_w = |(\bar{U}_V)_w| \cdot \cos(\vartheta_s + \beta - 4 \cdot \pi/3)$$



Napětí svorek $V_{a,b,c}$ proti ozlu O_1 byla odvozena v kap. 4:

$$U_{Va_01} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{Va_02} - U_{Vb_02} - U_{Vc_02}) + \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

$$U_{Vb_01} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{Vb_02} - U_{Vc_02} - U_{Va_02}) + \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

$$U_{Vc_01} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{Vc_02} - U_{Va_02} - U_{Vb_02}) + \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

5.1 Klasické stavové rovnice

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (U_a - R \cdot I_a - U_{Va_01})$$

$$\frac{dI_b}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (U_b - R \cdot I_b - U_{Vb_01})$$

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (U_c - R \cdot I_c - U_{Vc_01})$$

5.2 Stavové veličiny ... I_d, I_q

Složky vektoru napětí $\bar{U}$ v souřadném systému (α, β) :

$$U_\alpha = \frac{2}{3} \cdot U_a - \frac{1}{3} \cdot (U_b + U_c)$$

$$U_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_b - U_c)$$

Složky vektoru napětí $\bar{U}$ v souřadném systému (d, q):

$$U_d = U_\alpha \cdot \cos(\vartheta_s) + U_\beta \cdot \sin(\vartheta_s)$$

$$U_q = U_\beta \cdot \cos(\vartheta_s) - U_\alpha \cdot \sin(\vartheta_s)$$

Stejným způsobem lze vypočítat složky vektoru $\bar{U}_{V_01} \dots (U_{V_01})_d, (U_{V_01})_q$

Základní vztahy ve vektorovém tvaru:

$$\bar{U} = R \cdot \bar{I} + L \cdot \frac{d\bar{I}}{dt} + \bar{U}_{V_01}$$

$$U_0 = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} = R \cdot I_0 + \frac{dI_0}{dt} + (U_{V_01})_0$$

$$I_0 = \frac{\Sigma I}{3} = 0 \Rightarrow (U_{V_01})_0 = U_0$$

Stavové rovnice:

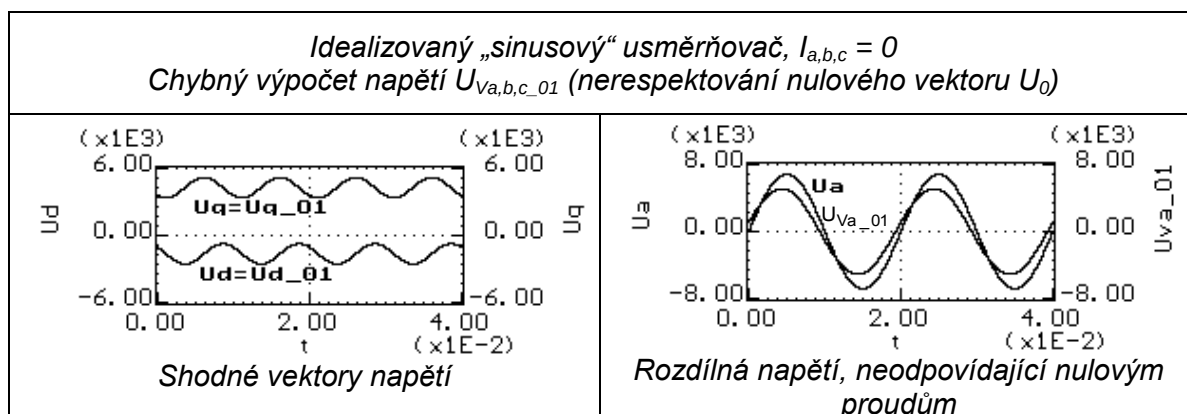
$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L} \cdot [U_d - R \cdot I_d - (U_{V_01})_d]$$

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L} \cdot [U_q - R \cdot I_q - (U_{V_01})_q]$$

$$\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{L} \cdot [U_0 - R \cdot I_0 - (U_{V_01})_0] \dots \text{vztah platí, ale je nevyužitelný, protože } I_0 = 0$$

Poznámka:

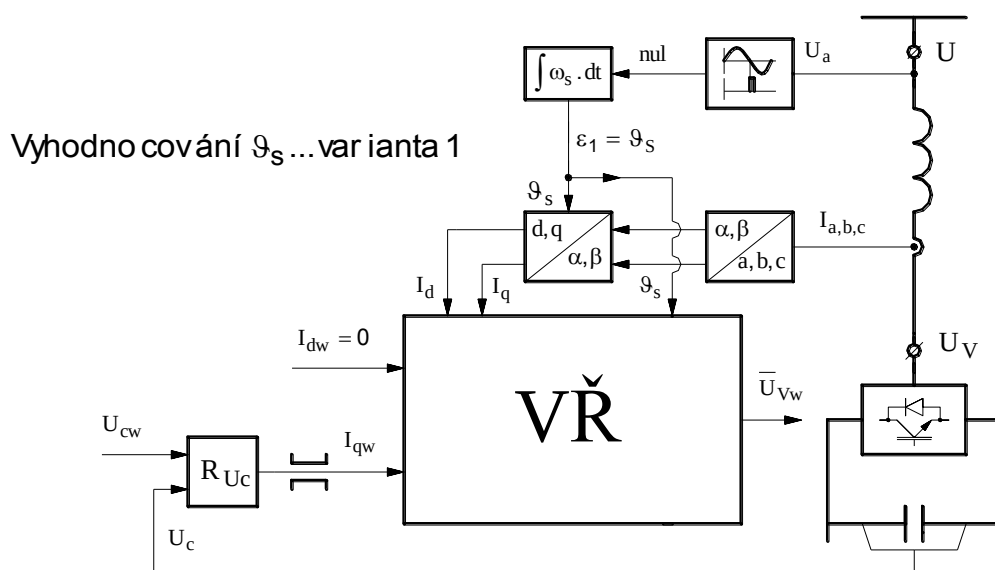
Prostorový vektor nevyvážené soustavy napětí je shodný s vektorem odpovídající vyvážené soustavy napětí (kap. 4). Z tohoto důvodu mohou při chybném výpočtu vzniknout rozporné výsledky.



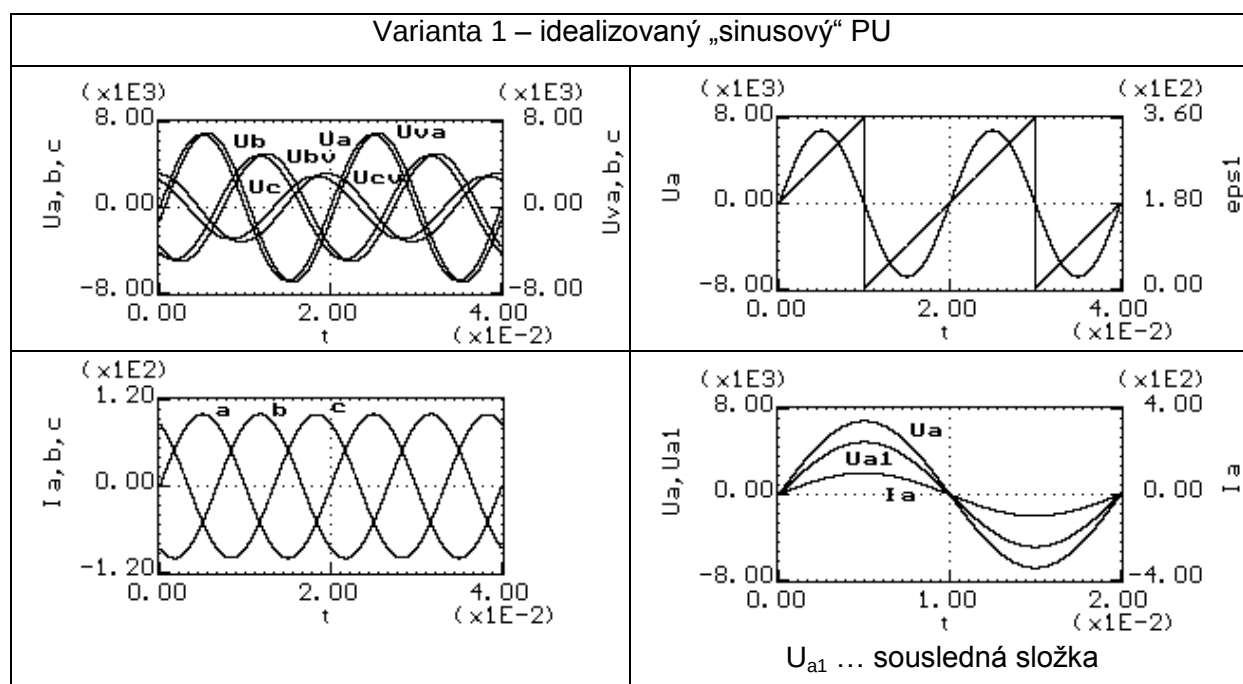
6 Varianty synchronizace souřadného systému (d, q) s napětím sítě – idealizovaný „sinusový“ usměrňovač

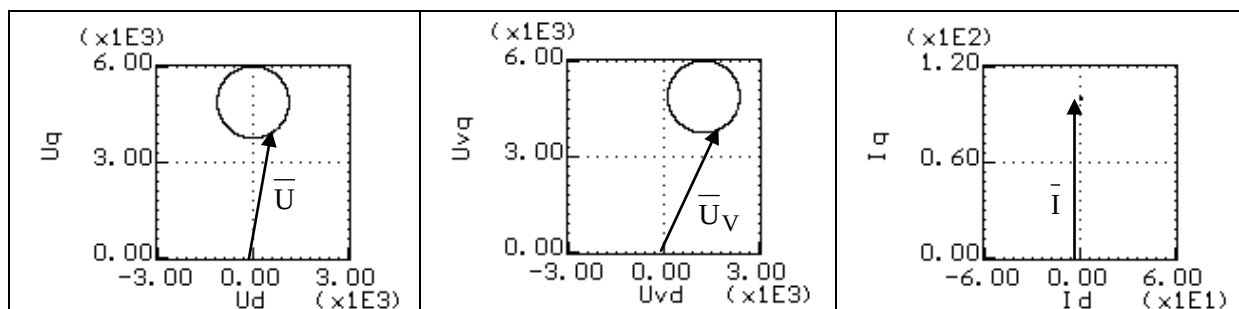
6.1 Varianta 1

- Souřadný systém (d, q) rotuje rychlostí $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s \text{ 1/s}$
Pokud není kmitočet f_s není vyhodnocován, rotuje souřadný systém stále rychlostí $2 \cdot \pi \cdot 50$.
Při následujících simulacích se vyhodnocování f_s nepředpokládá (horší varianta).
- Souřadný systém (d, q) je synchronizován s napětím U_a
Poloha osy „d“ v nerotujícím souřadném systému $(\alpha, \beta) \dots \varepsilon_1$



6.1.1 Fázový posun napětí jednotlivých fází = 120^0

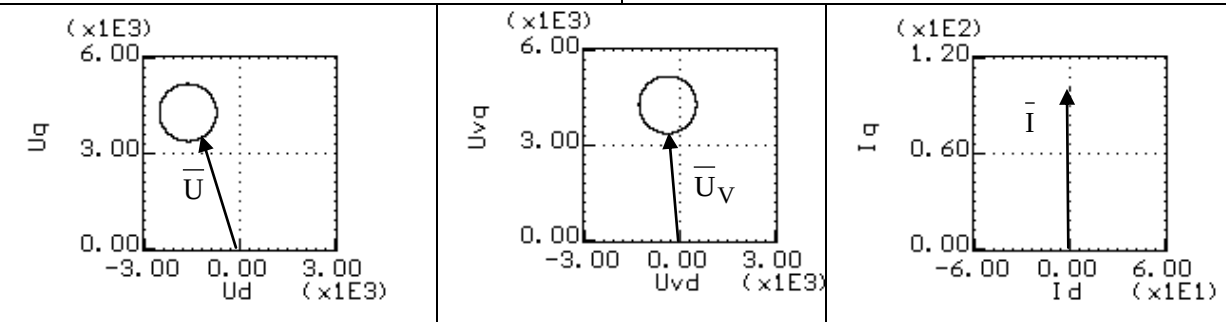
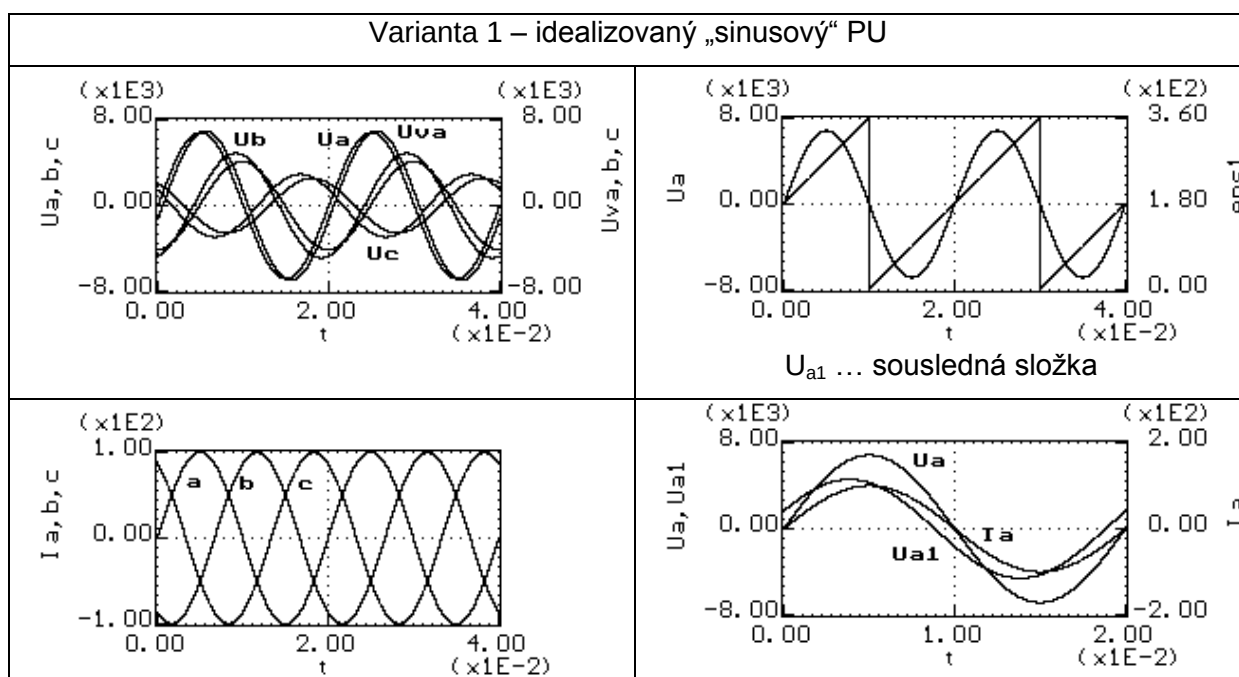




Závěry:

- Vektor $\bar{U}$ se pootáčí v okolí osy q. Proto je regulace cílená na $I_d = 0$ funkční.
- Proud I_a, I_b, I_c mají stejnou amplitudu.
- Fázový posun napětí a proudů jednotlivých fází je nulový

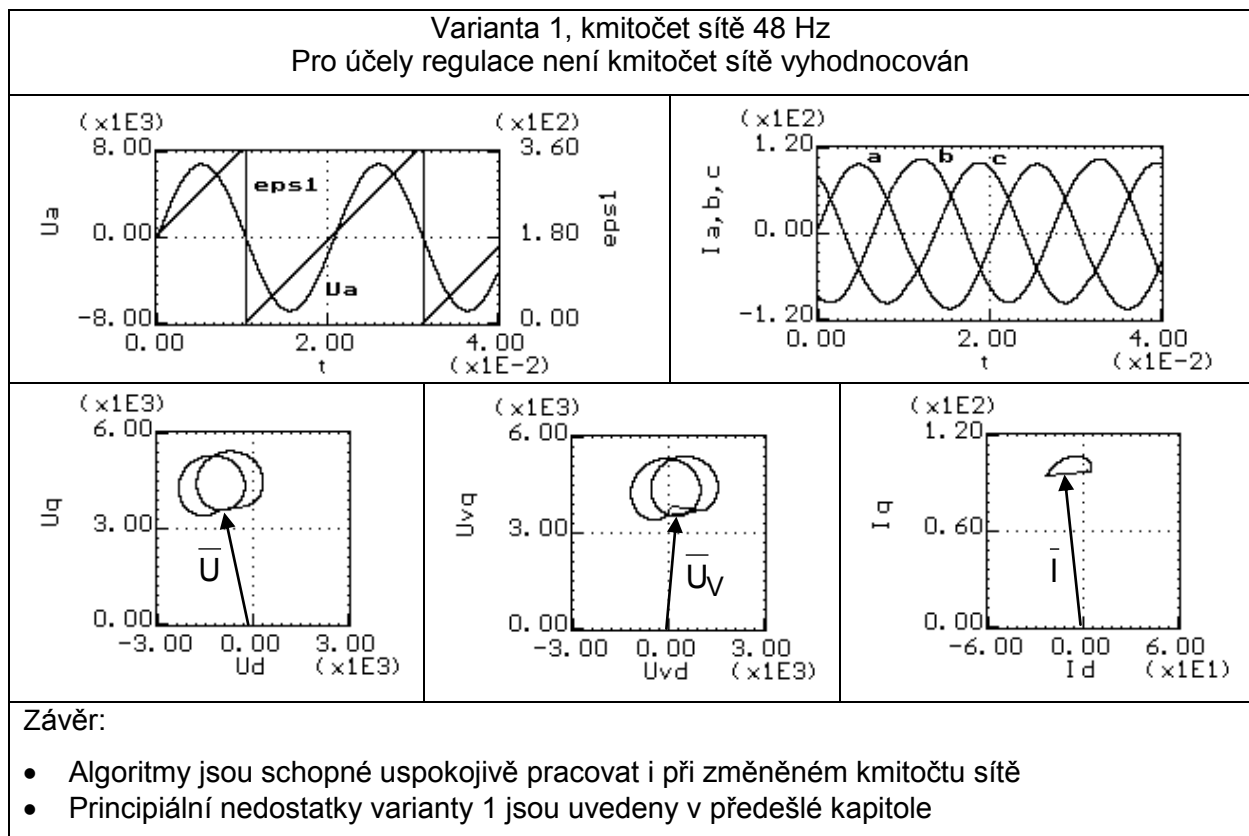
6.1.2 Fázový posun napětí jednotlivých fází $\neq 120^\circ$



Závěry:

- Vektor $\bar{U}$ neleží v ose q ($U_d \neq 0$) $\leftrightarrow$ regulace cílená na $I_d = 0$ nemůže zajistit nulový úhel mezi vektory $\bar{U}$ a $\bar{I}$.
- Proud I_a je ve fázi s napětím U_a (souřadný systém (d, q) je synchronizovaný s fází „a“)
- Proud I_a není ve fázi se souslednou složkou napětí U_{a1}
- Amplituda proudů stejná, fázový posun 120°

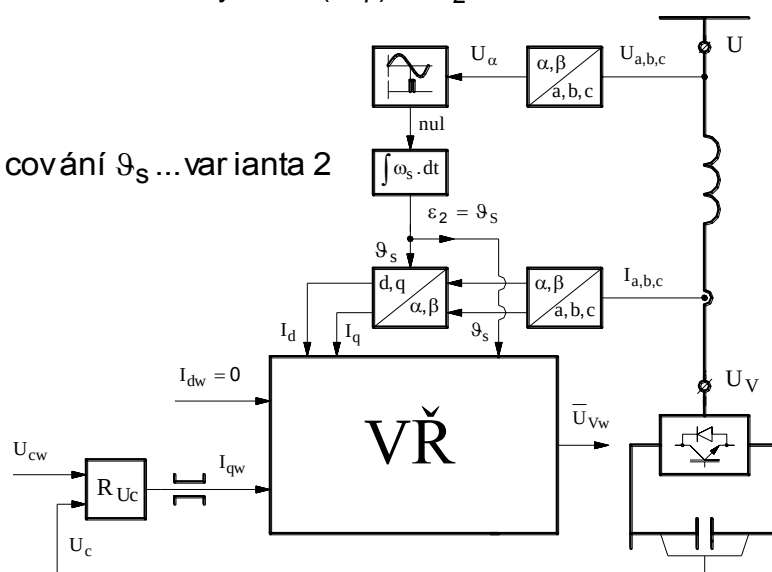
6.1.3 Kmitočet sítě 48 Hz

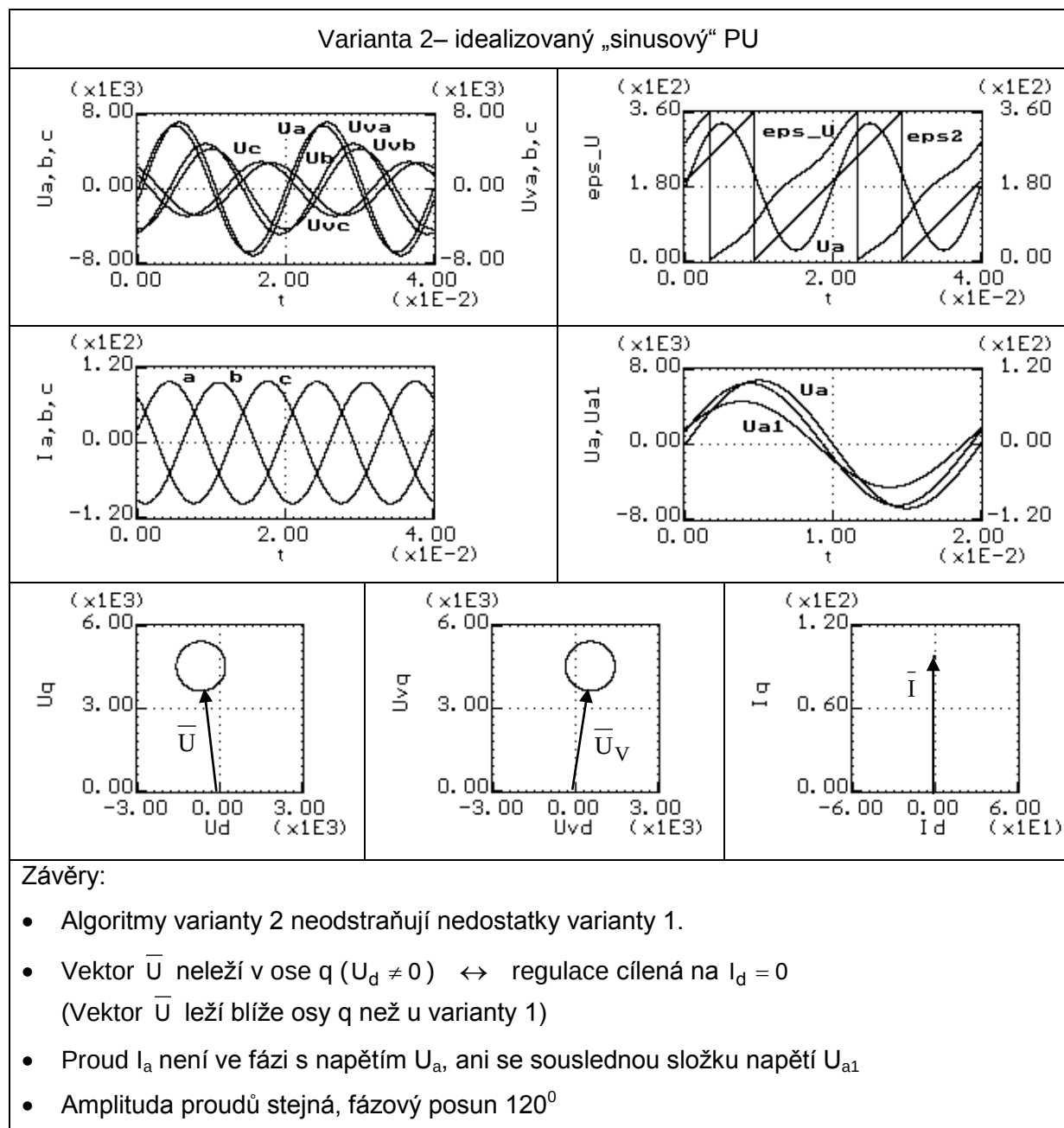


6.2 Varianta 2

- Souřadný systém (d, q) rotuje rychlostí $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot 50$
 - Souřadný systém (d, q) je synchronizován s **vektorem** napětí sítě $\bar{U}$ (se složkou U_α)
- Poloha vektoru $\bar{U}$ v souřadném systému (α, β) ... ε_U
 Poloha osy „d“ v souřadném systému (α, β) ... ε_2

Výhodnocování ϑ_s ... varianta 2

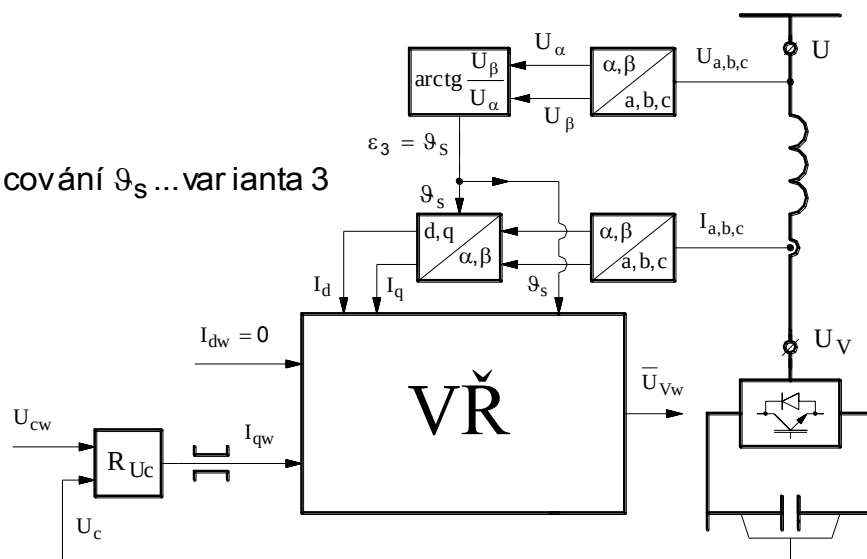




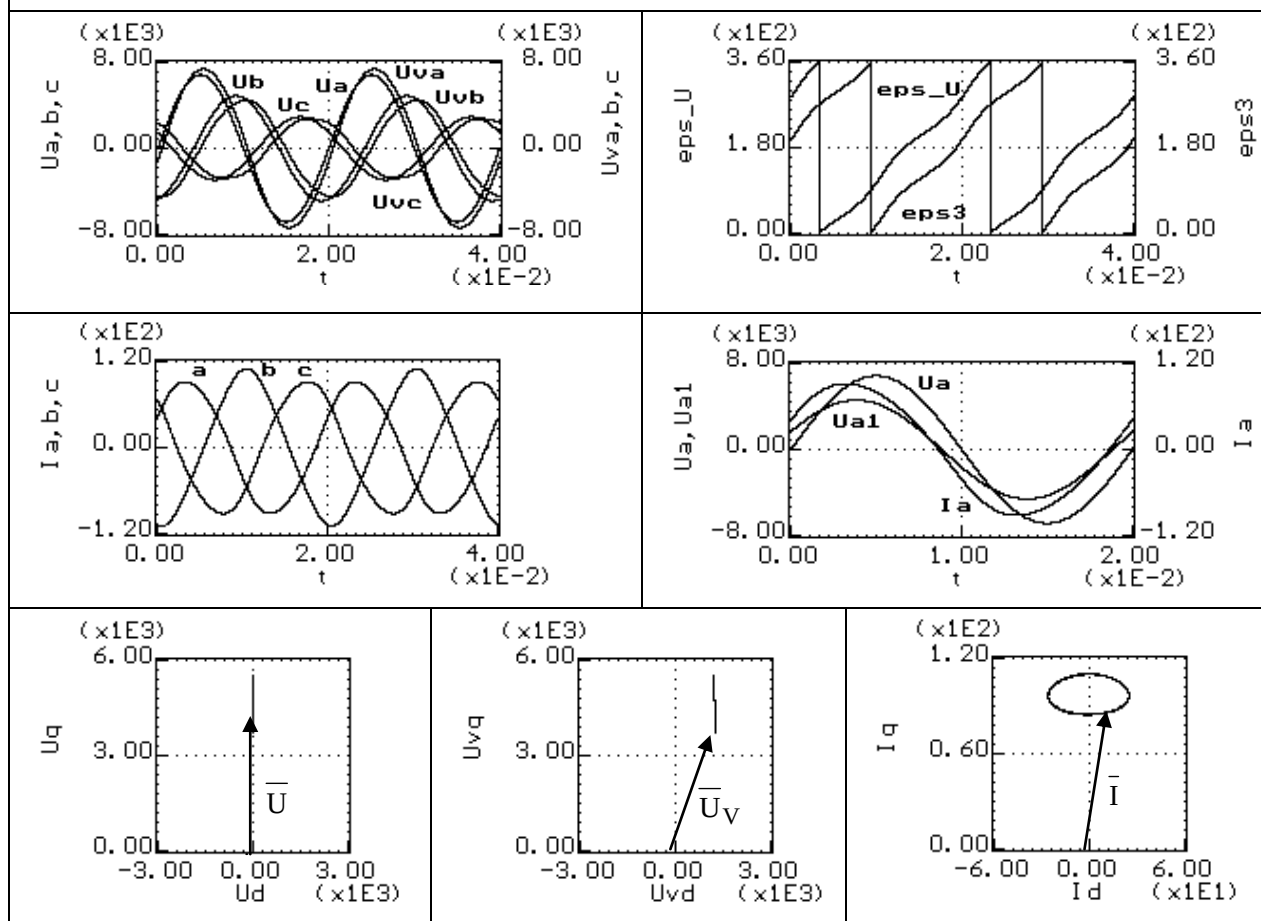
6.3 Varianta 3

- Souřadný systém (d, q) je svázán s vektorem napětí sítě $\bar{U}$ - vektor $\bar{U}$ leží v ose „q“
Poloha vektoru $\bar{U}$ v souřadném systému (α, β) ... ε_U
Poloha osy „d“ v souřadném systému (α, β) ... ε_3
- Systém (d, q) rotuje proměnnou rychlostí

Výhodnocování ϑ_s ... varianta 3



Varianta 3 – idealizovaný „sinusový“ PU



Závěry:

- Vektor $\bar{U}$ „leží“ v ose q
- Proudů jsou neharmonické
- Při větším zesílení regulátorů I_d , I_q se zmenší „kývání“ vektoru proudu, deformace proudů se zvětší.

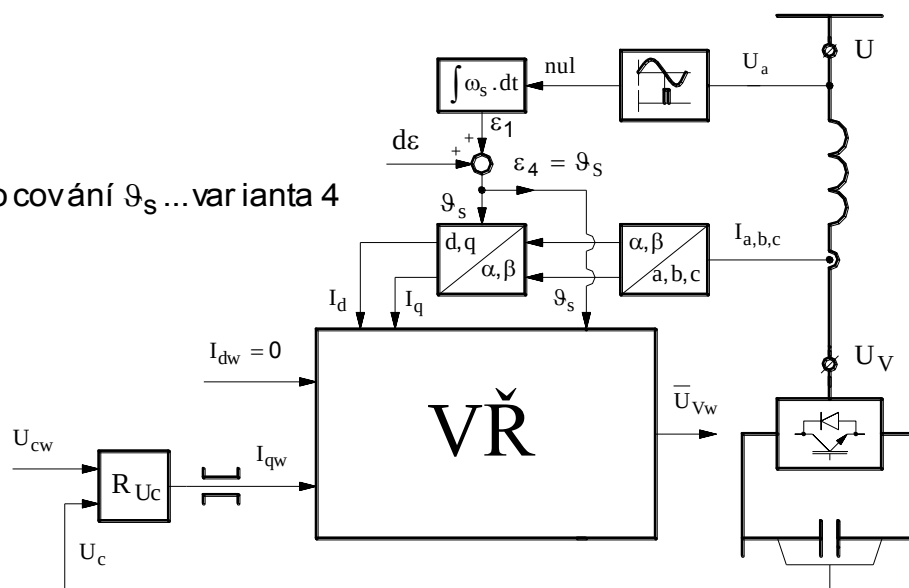
6.4 Varianta 4

- Souřadný systém (d, q) rotuje rychlostí $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot 50$
- Poloha souřadného systému (d, q) upravována **zkusmo** tak, aby vektor $\bar{U}$ byl v okolí osy „q“.

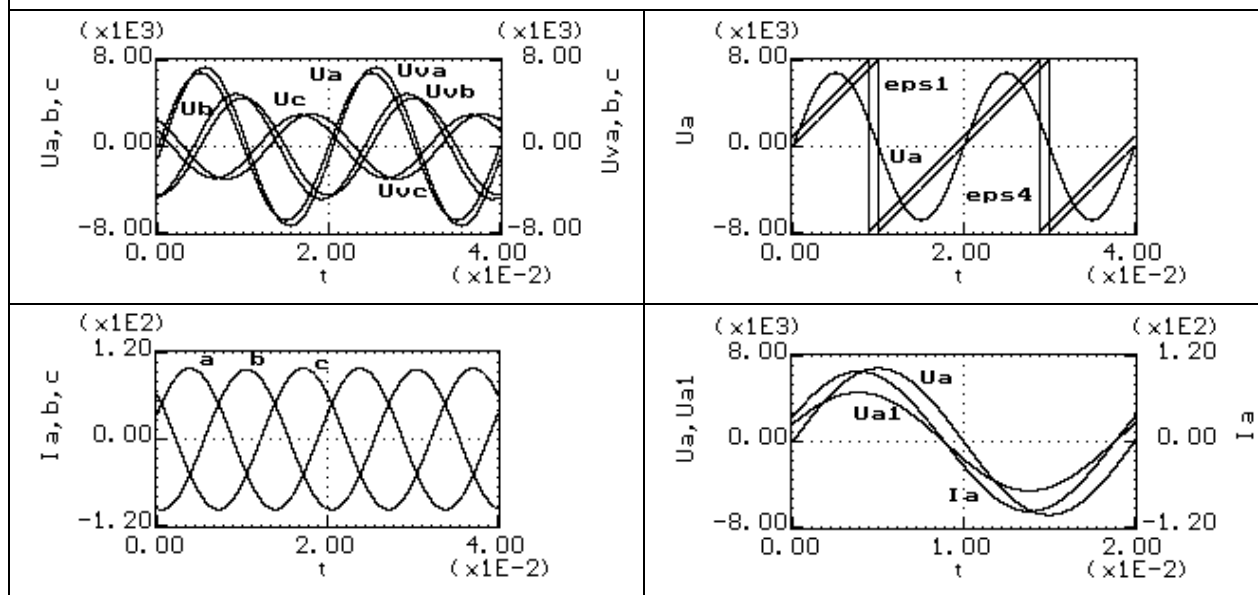
Poloha osy „d“ v souřadném systému (α, β) ... ε_4

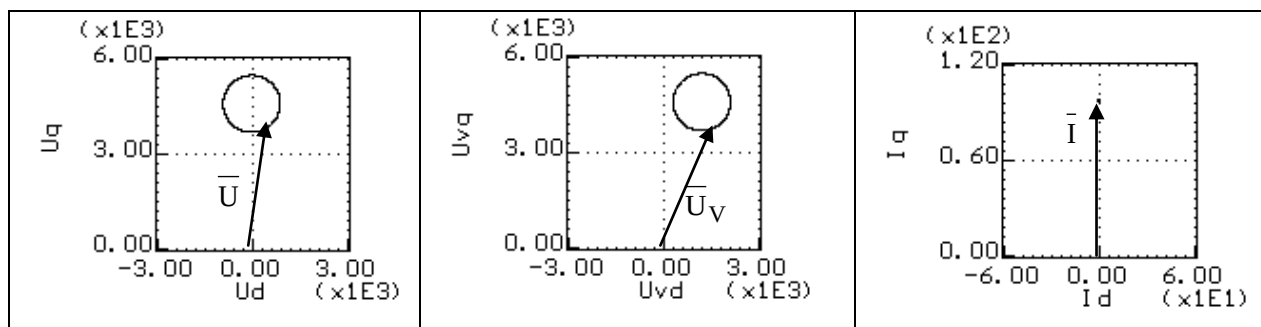
Pozn.: Varianta 4 je zařazena ze studijních důvodů ... zavedením signálu $d\varepsilon$ lze souřadný systém natočit tak, aby vektor vektor napětí byl v okolí osy q.

Výhodnocování ϑ_s ... varianta 4



Varianta 4 – idealizovaný „sinusový“ PU



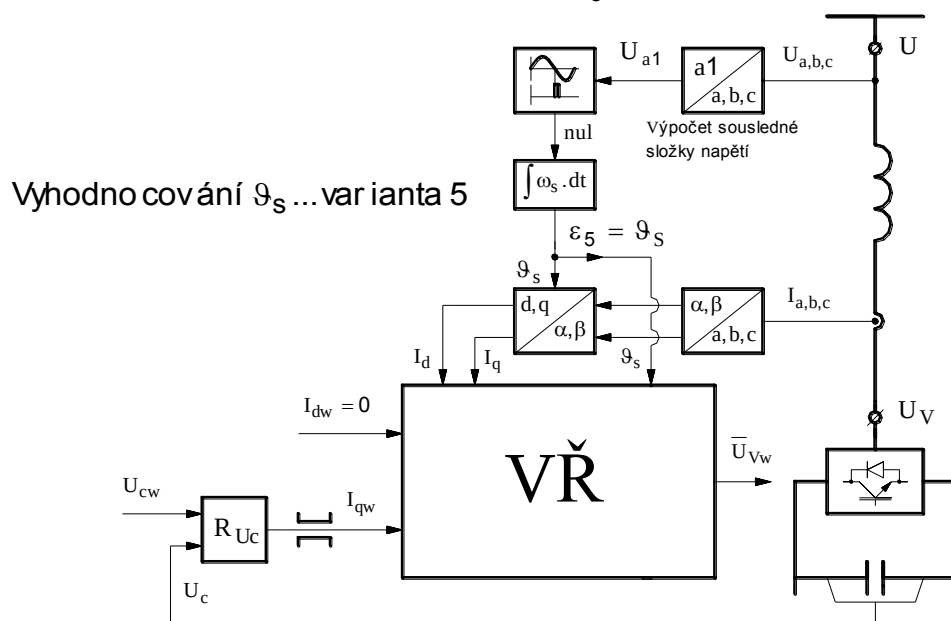


Závěry:

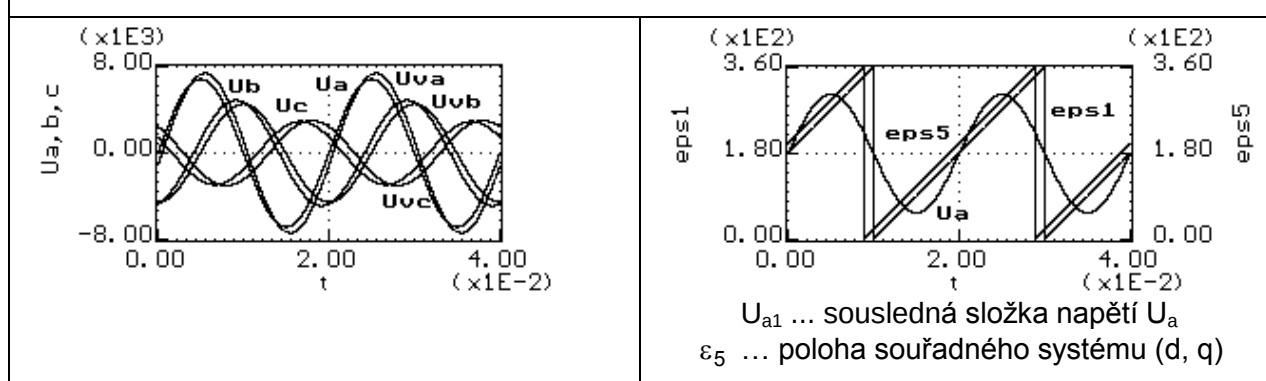
- Vektor $\bar{U}$ leží v okolí osy q, regulace cílená na $I_d = 0$ zajišťuje blízkou polohu vektorů $\bar{U}$, $\bar{I}$
- Proud I_a je ve fázi se souslednou složkou napětí U_{a1}
- Amplituda proudů stejná, fázový posun 120°

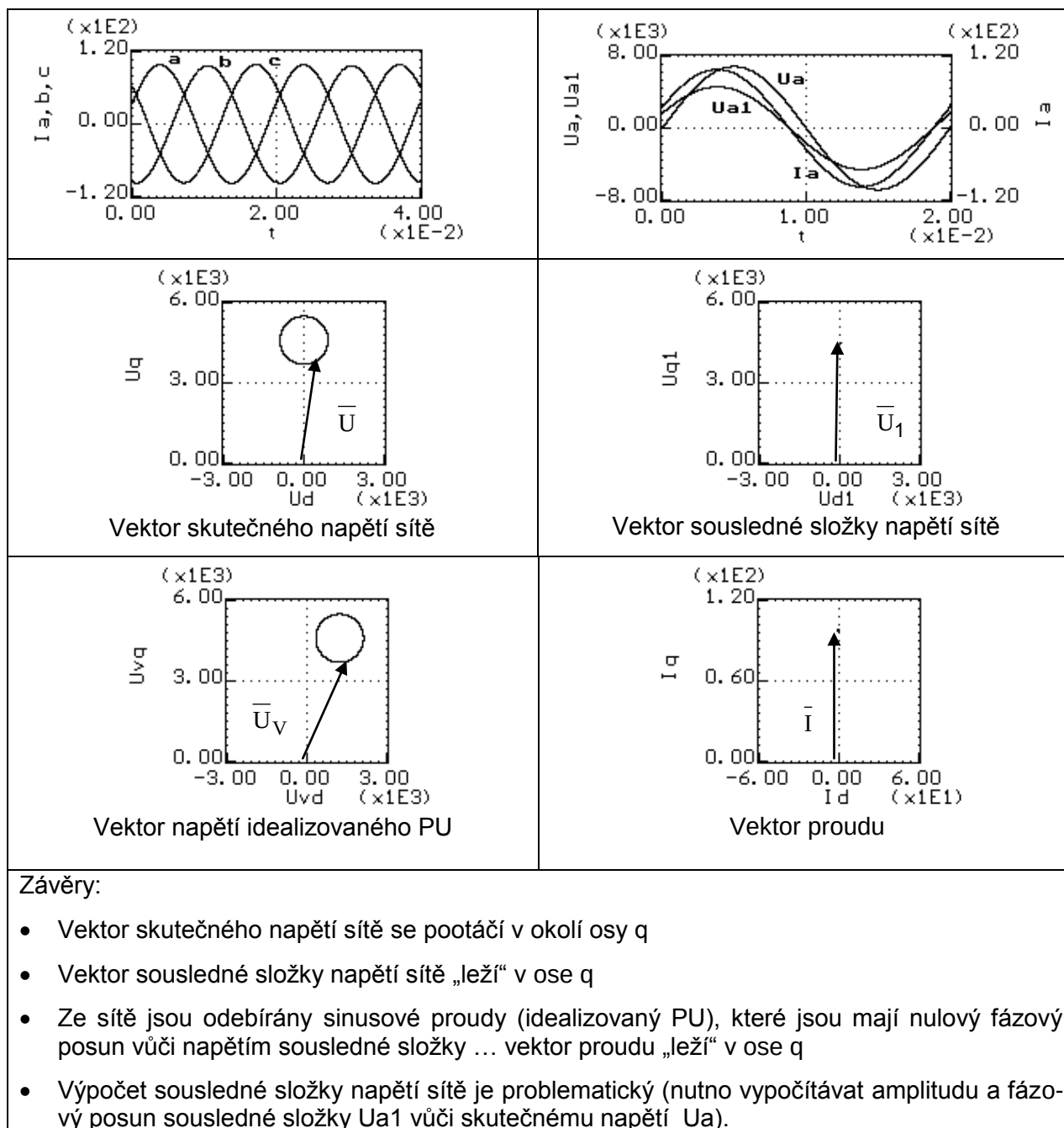
6.5 Varianta 5

- Souřadný systém (d, q) rotuje rychlostí $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot 50$
 - Souřadný systém (d, q) je synchronizován s napětím fáze „a“ **sousledné složky**
- Poloha osy „d“ v souřadném systému (α, β) ... ε_5



Varianta 5 – idealizovaný „sinusový“ PU



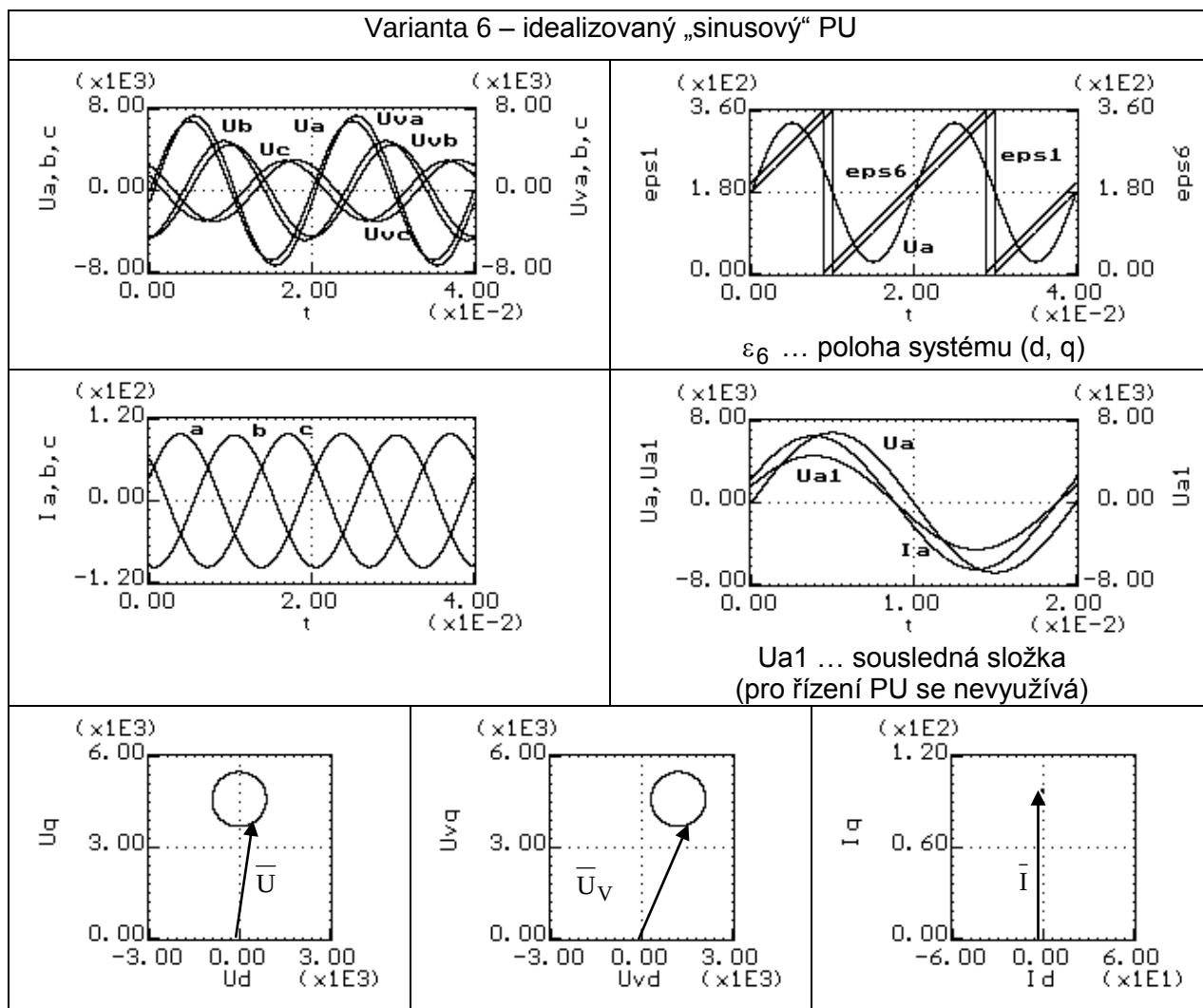
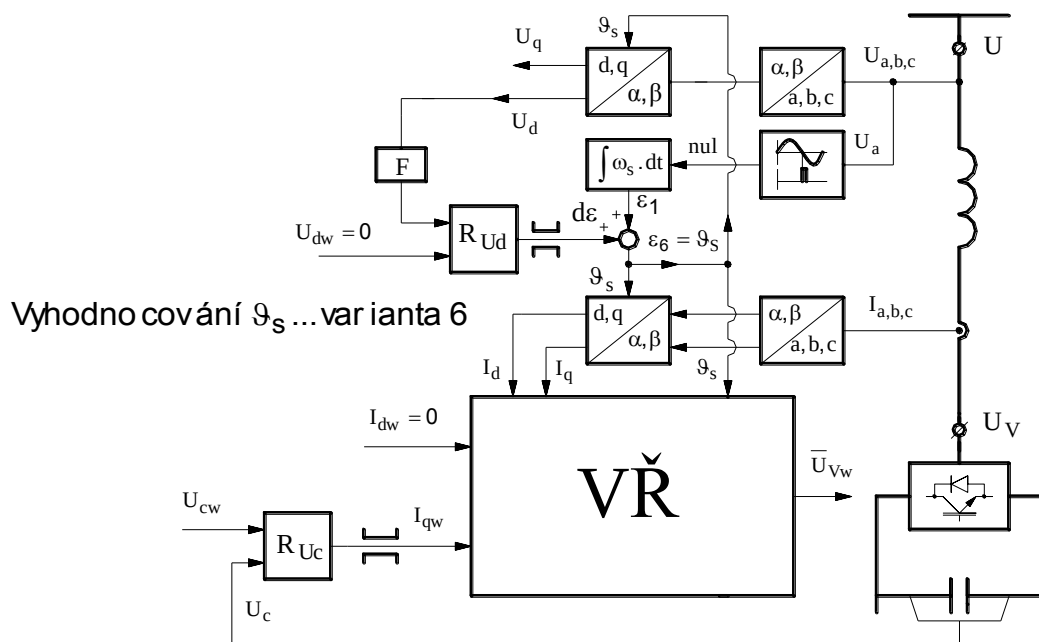


6.6 Varianta 6

- Výchozí poloha souřadného systému je synchronizována s napětím U_a (jako varianta 1), nebo s vektorem napětí sítě $\bar{U}$ (jako varianta 2)
- **Poloha (d,q) je upravována regulátorem napětí U_d ($U_{dw} = 0$)**

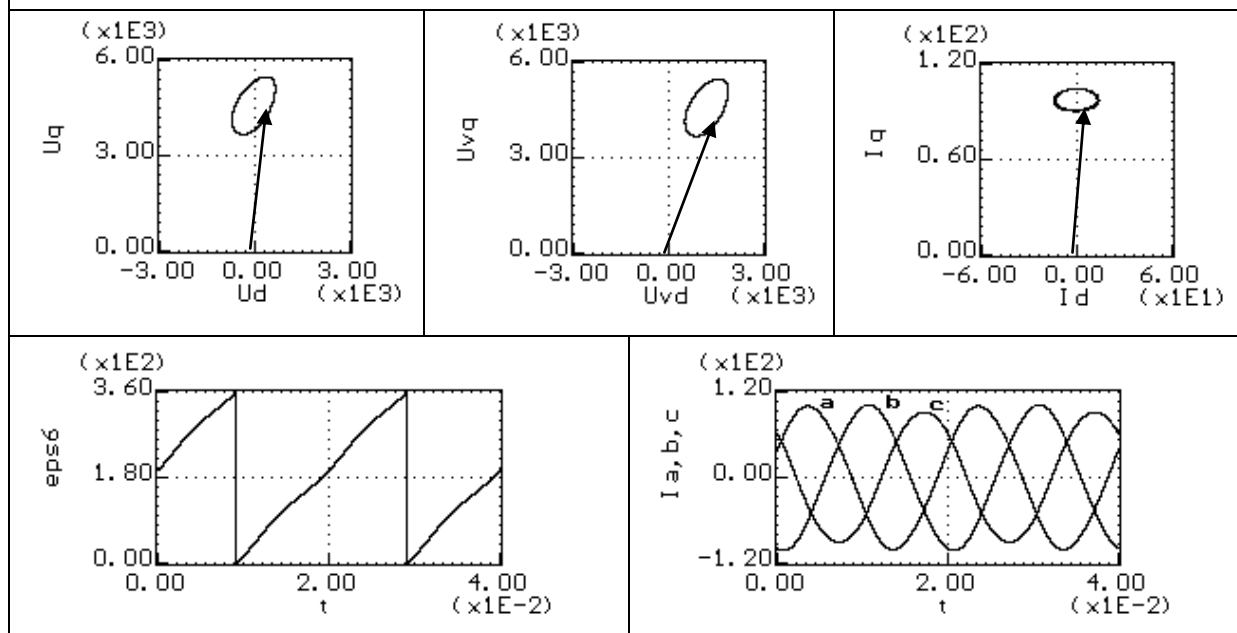
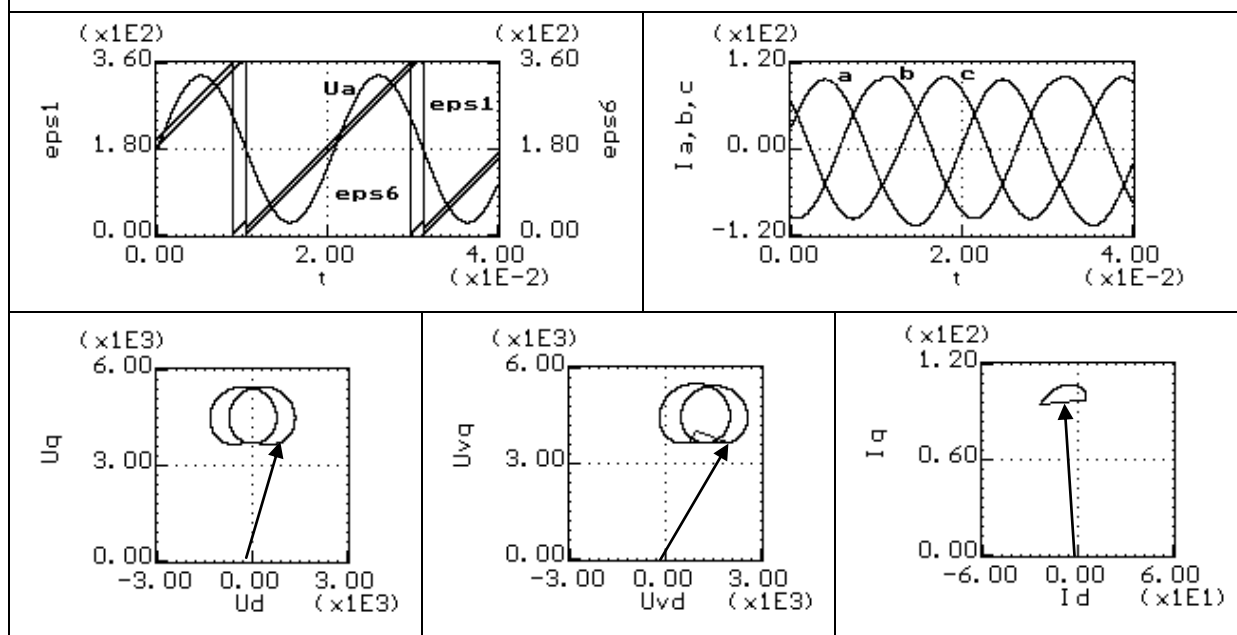
*Pozn.: Z důvodu pravidelné rotace (d, q) je nutno filtrovat zpětnou vazbu regulátoru R_{Ud} .
(při pravidelné rotaci jsou proudy PU harmonické)*

- Poloha osy „d“ v souřadném systému (α, β) ... ε_6



Závěry:

- PU má takřka stejné vlastnosti jako s variantou 5
- Není nutno vyhodnocovat souslednou složku napětí, je nutno průběžně vyhodnocovat složku napětí sítě U_d .
- Při nesprávných parametrech regulátoru R_{Ud} se vlastnosti PU s řízením varianta 6 blíží vlastnostem PU s řízením varianta 3 (nesinusové proudy).

Nesprávné parametry regulátoru a filtru U_d Varianta 6 – idealizovaný „sinusový“ PU
Kmitočet sítě (nevyhodnocovaný) 48 Hz

Závěr: Algoritmy varianty 6 mohou uspokojivě pracovat i při změněném kmitočtu sítě

6.7 Zhodnocení variant

Varianta 1

- Sinusové proudy odebírané ze sítě mají stejnou amplitudu a vzájemný fázový posun 120°
- Vzhledem v sousledné složce napětí sítě $\dots \cos \varphi \neq 1$
- Změněný kmitočet sítě neovlivní podstatně činnost pohonu
- Snadná realizovatelnost

Varianta 2

- Vlastnosti obdobné jako varianta 1
- Průběžně nutno vyhodnocovat vektor napětí sítě

Varianta 3

- Vektory napětí a proudu stále ve shodné poloze
- Nesinusové proudy
- Průběžně nutno vyhodnocovat vektor napětí sítě

Varianta 4 - zavedena pouze ze studijních důvodů

Varianta 5

- Vzhledem v sousledné složce napětí sítě $\dots \cos \varphi = 1$
- Sinusové proudy odebírané ze sítě mají stejnou amplitudu a vzájemný fázový posun 120°
- Průběžně nutno vyhodnocovat souslednou složku napětí sítě

Varianta 6

- Vlastnosti obdobné jako varianta 5
- Změněný kmitočet sítě neovlivní podstatně činnost pohonu
- Není nutno vyhodnocovat souslednou složku napětí sítě

Výběr optimální varianty

Zvolená kritéria optimality:

1. Harmonické proudy
2. Nulový fázový posun proudů vůči sousledné složce napětí sítě
3. Co nejjednodušší algoritmy řízení

1. Splňují všechny varianty kromě varianty 3 a varianty 6 s nesprávným regulátorem R_{Ud}
2. Splňují varianty 5, 6
3. Splňuje varianta 1, částečně varianty 2, 6

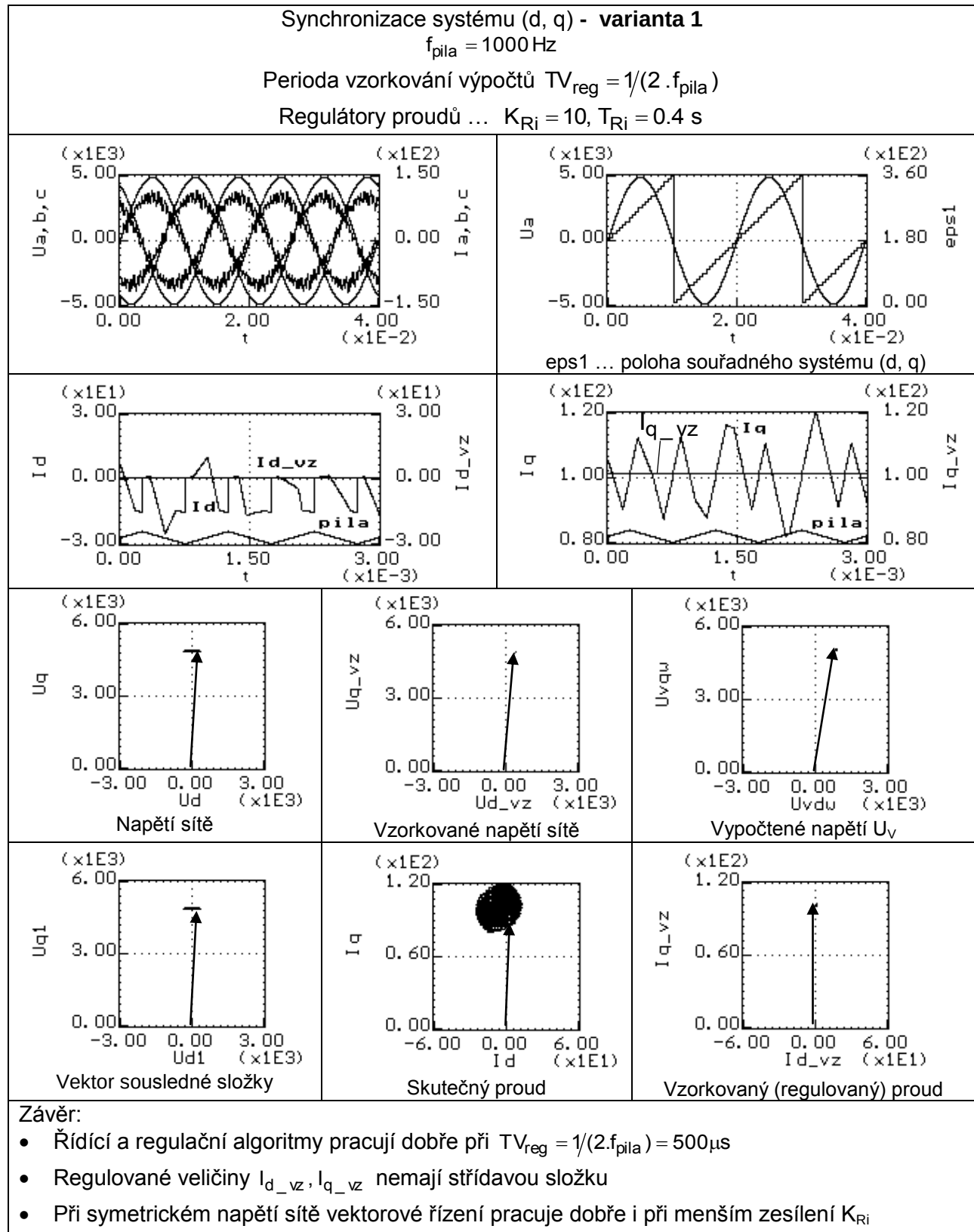
Optimální varianta pro sítě s malým fázovým posunem mezi fázovými napětími: 1

Optimální varianta pro sítě s velkým fázovým posunem mezi fázovými napětími: 6

7 Skutečný pulsní usměrňovač

7.1 Varianta 1

7.1.1 Symetrické napětí sítě



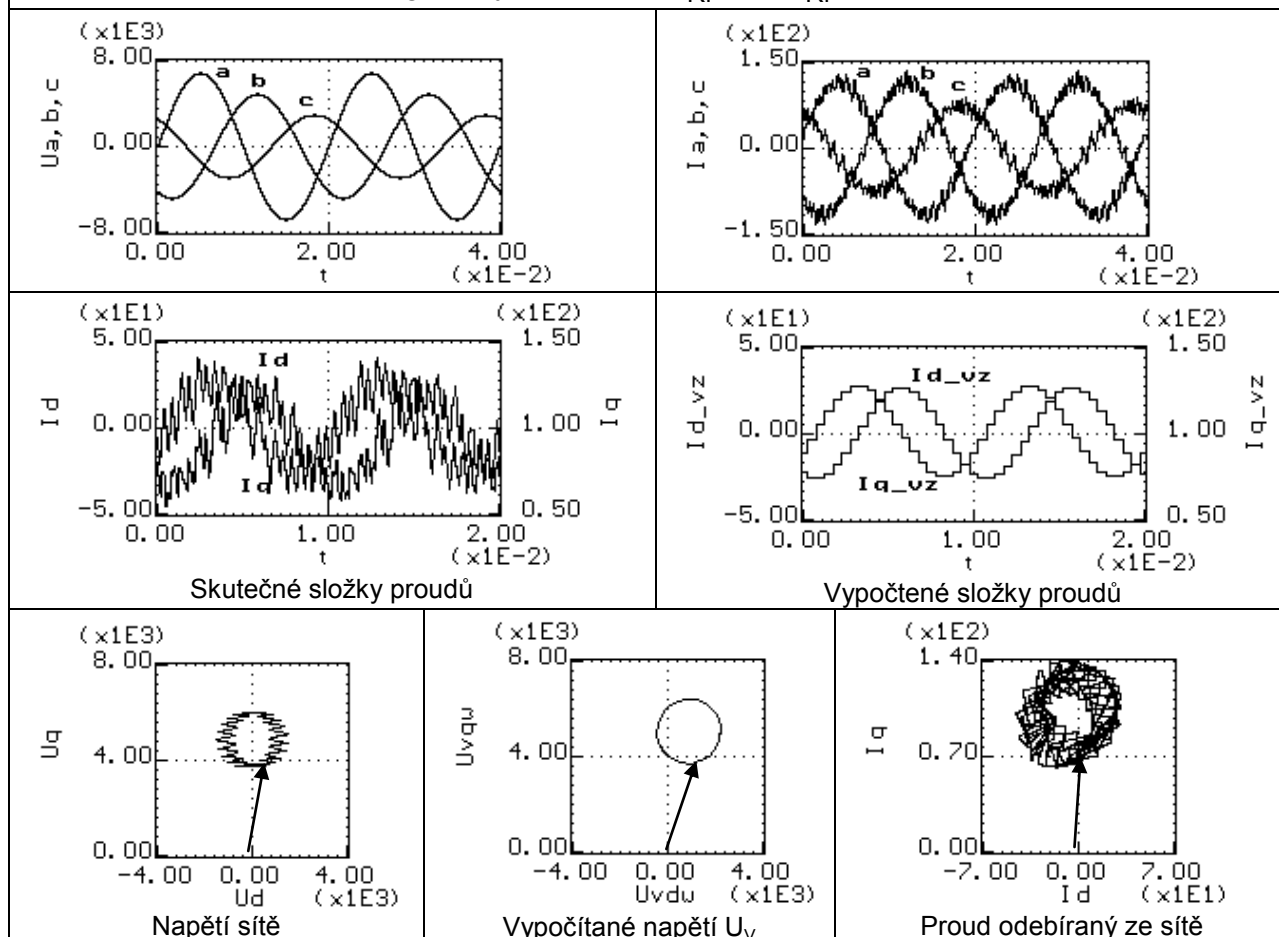
7.1.2 Fázový posun napětí $\varphi_U = 120^\circ$, rozdílné amplitudy

Varianta 1 – nesymetrická síť, $\varphi_U = 120^\circ$

$f_{pila} = 1000 \text{ Hz}$

Perioda vzorkování výpočtů $T_{Vreg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$

Regulátory proudů ... $K_{Ri} = 10$, $T_{Ri} = 0.4 \text{ s}$



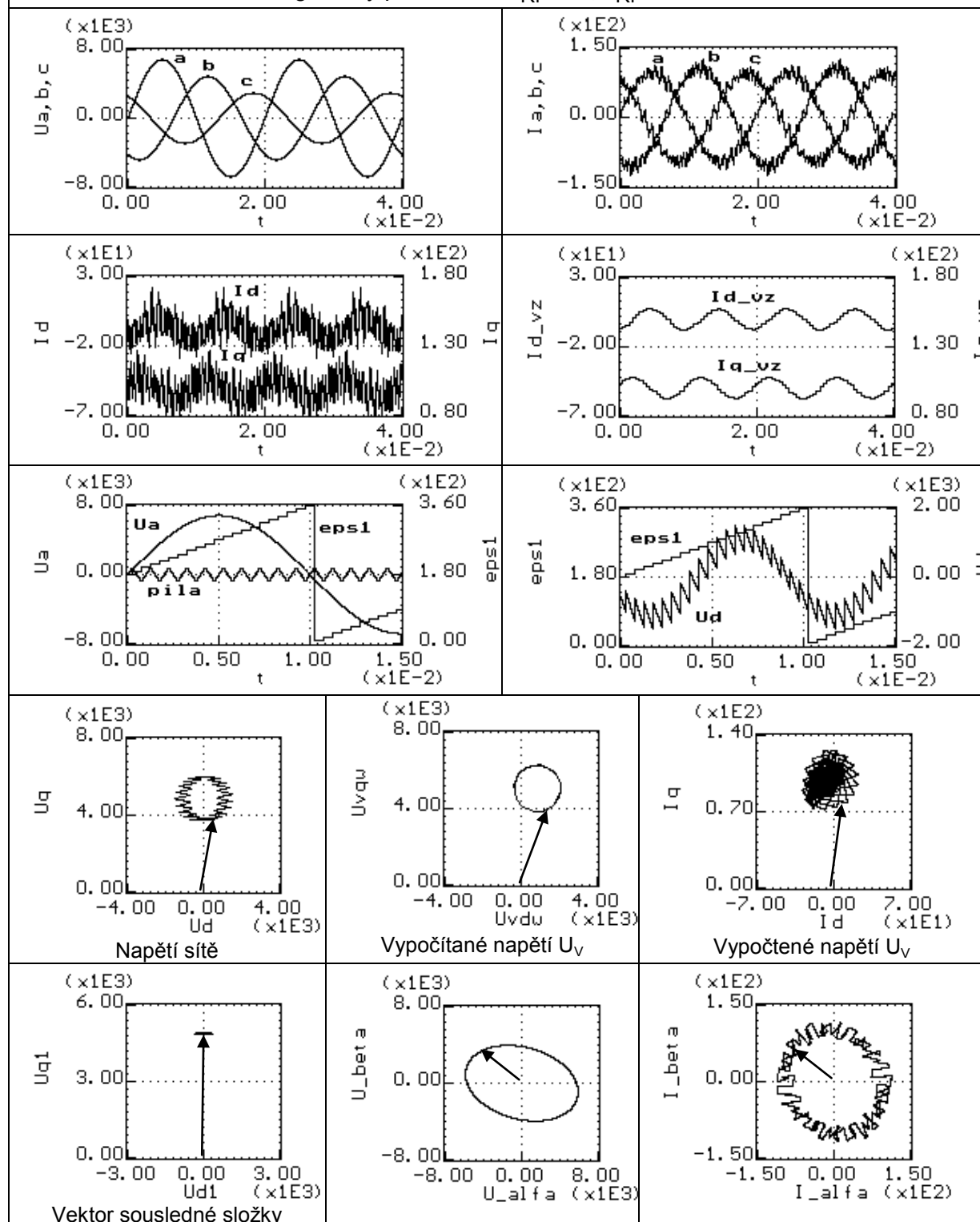
Závěry:

- Výpočet polohy souřadného systému (d, q) ... ε_1 je při $\varphi_U = 120^\circ$ bezproblémový
- Při nesymetrickém napětí sítě nepracuje vektorové řízení s menším zesílením regulátorů proudů dobře.

Varianta 1 – nesymetrická síť, $\varphi_U = 120^\circ$

$$f_{pila} = 1000 \text{ Hz}, \quad T_{V_{reg}} = 1/(2 \cdot f_{pila})$$

Regulátory proudů ... $K_{Ri} = 50, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$



Závěry:

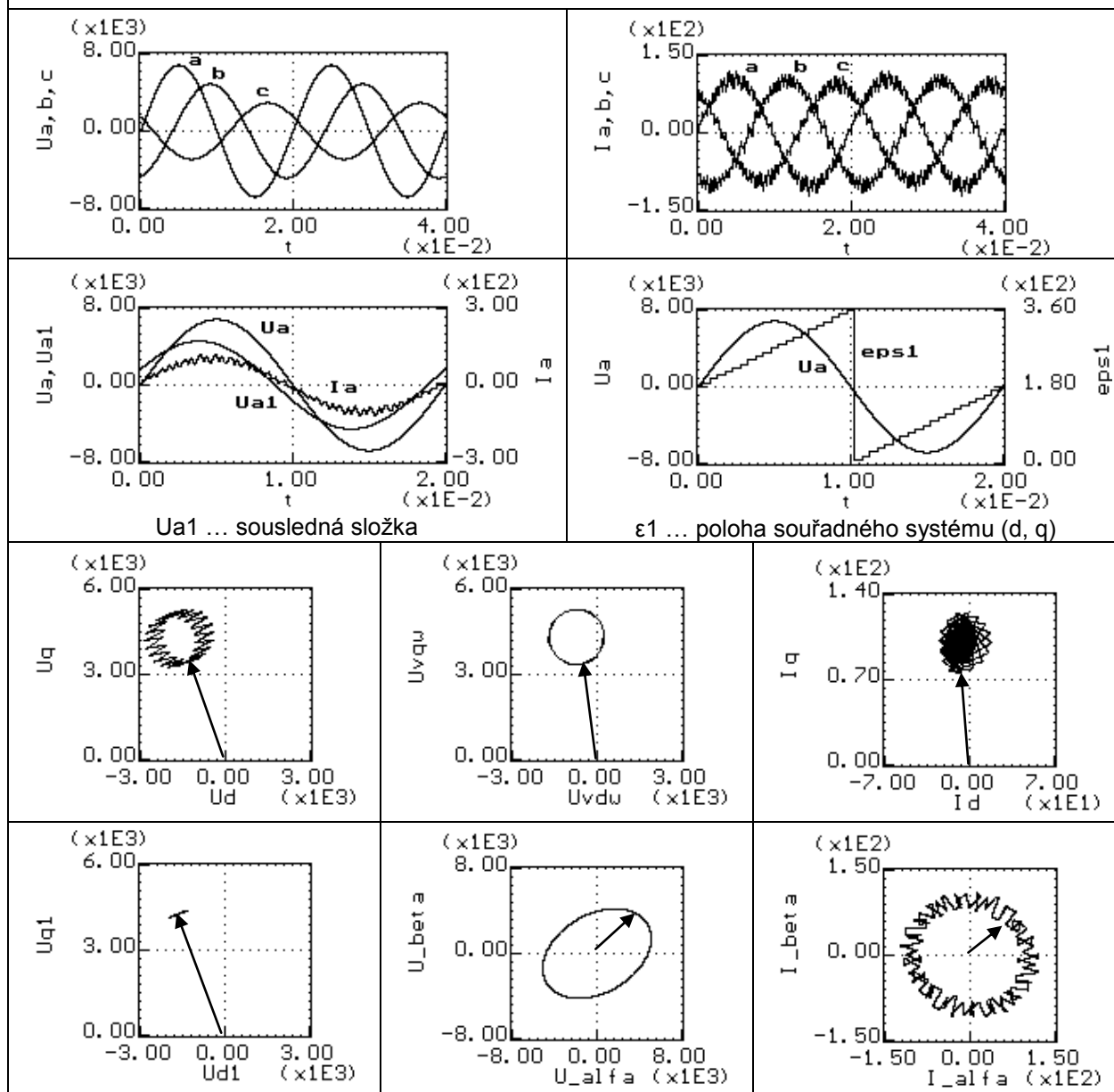
- S velkým zesílením regulátorů proudů je činnost vektorového řízení uspokojivá
- Výpočet polohy souřadného systému (d, q) ... ϵ_1 je při $\varphi_U = 120^\circ$ bezproblémový

7.1.3 Fázový posun napětí $\varphi_U \neq 120^\circ$, rozdílné amplitudy

Varianta 1 – nesymetrická síť, $\varphi_U \neq 120^\circ$

$f_{pila} = 1000 \text{ Hz}$, $T_{Vreg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$

Regulátory proudů ... $K_{Ri} = 50$, $T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$



Závěry:

- Algoritmy varianty 1 neumějí souřadný systém (d, q) nastavit tak, aby se vektor napětí $\vec{U}$ pohyboval v okolí osy q ... regulace proudu I_d na nulovou hodnotu je proto nelogická
- Důsledek: Účinník vztahovaný k sousledné složce napětí ... $\cos \varphi \neq 1$

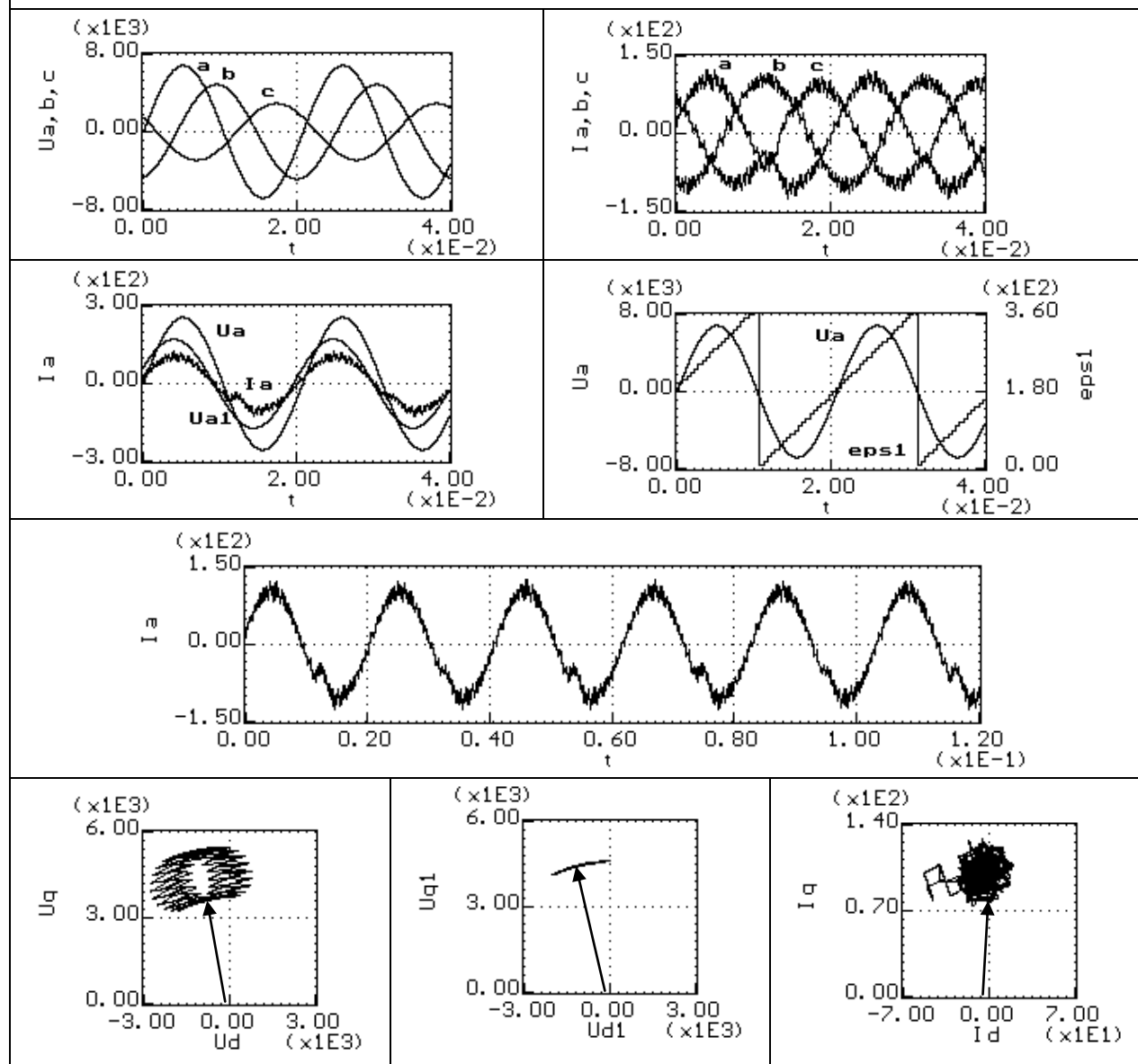
7.1.4 Kmitočet sítě 48 Hz

Varianta 1 – nesymetrická síť, $\varphi_U \neq 120^\circ$, kmitočet 48 Hz

$$f_{pila} = 1000 \text{ Hz}, \quad TV_{reg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$$

Regulátory proudů ... $K_{Ri} = 50, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$

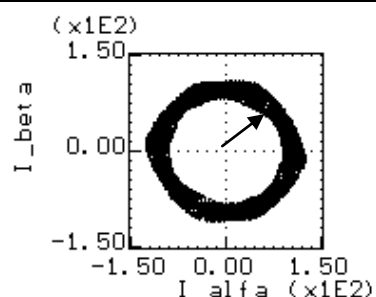
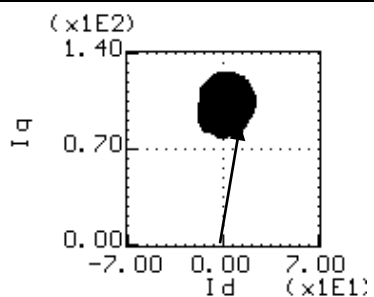
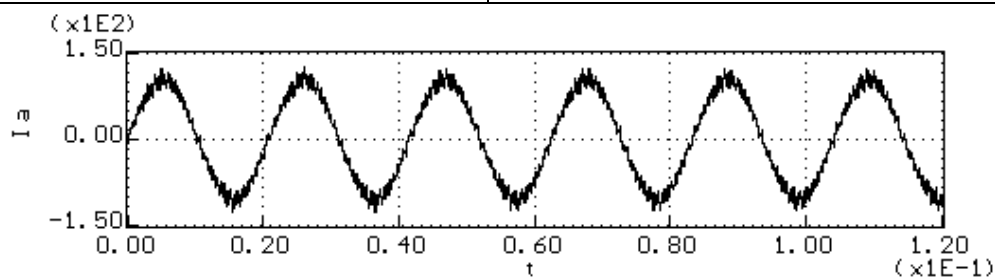
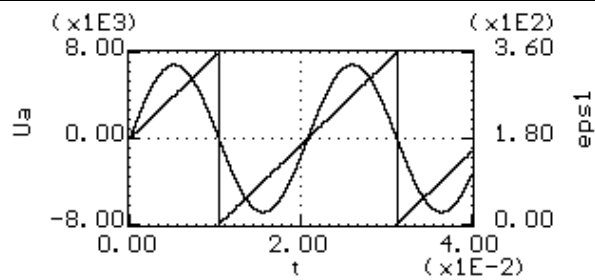
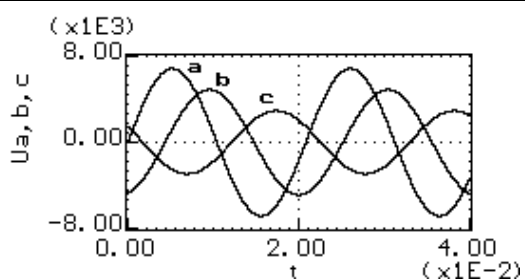
Kmitočet není vyhodnocován.



Závěry:

- Pohon je funkční
- Pokud algoritmy řízení PU nevyhodnocují kmitočet sítě (strmost nárůstu ε_1 nezměněn) vzniká deformace proudu.

Vyhodnocovaný kmitočet sítě využíván k výpočtu polohy (d, q) – $\epsilon 1$



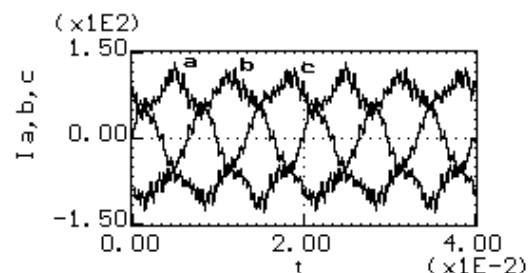
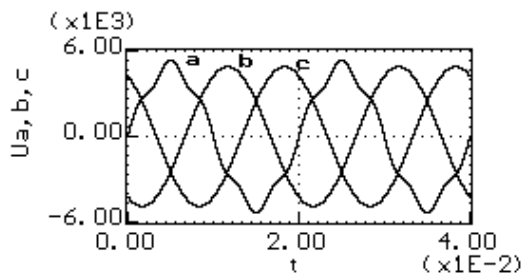
Závěr: Deformace proudu odstraněna

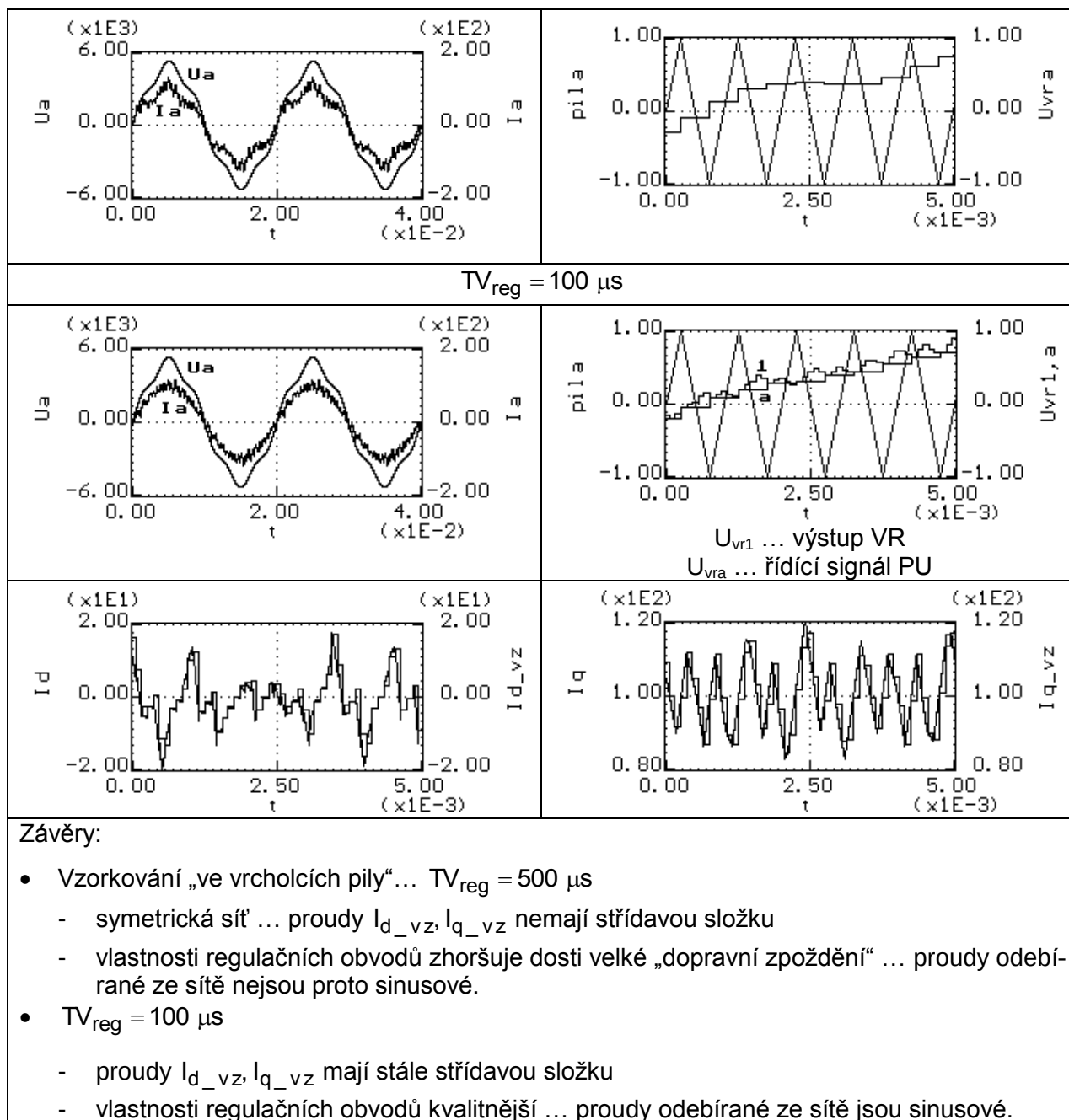
7.1.5 Symetrická síť, zdeformovaná 5. harmonickou

Varianta 1 – symetrická síť, zdeformovaná 5.harmonickou

Regulátory proudů ... $K_{Ri} = 50$, $T_{Ri} = 0.04$ s, $f_{pila} = 1000$ Hz

$$TV_{reg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$$



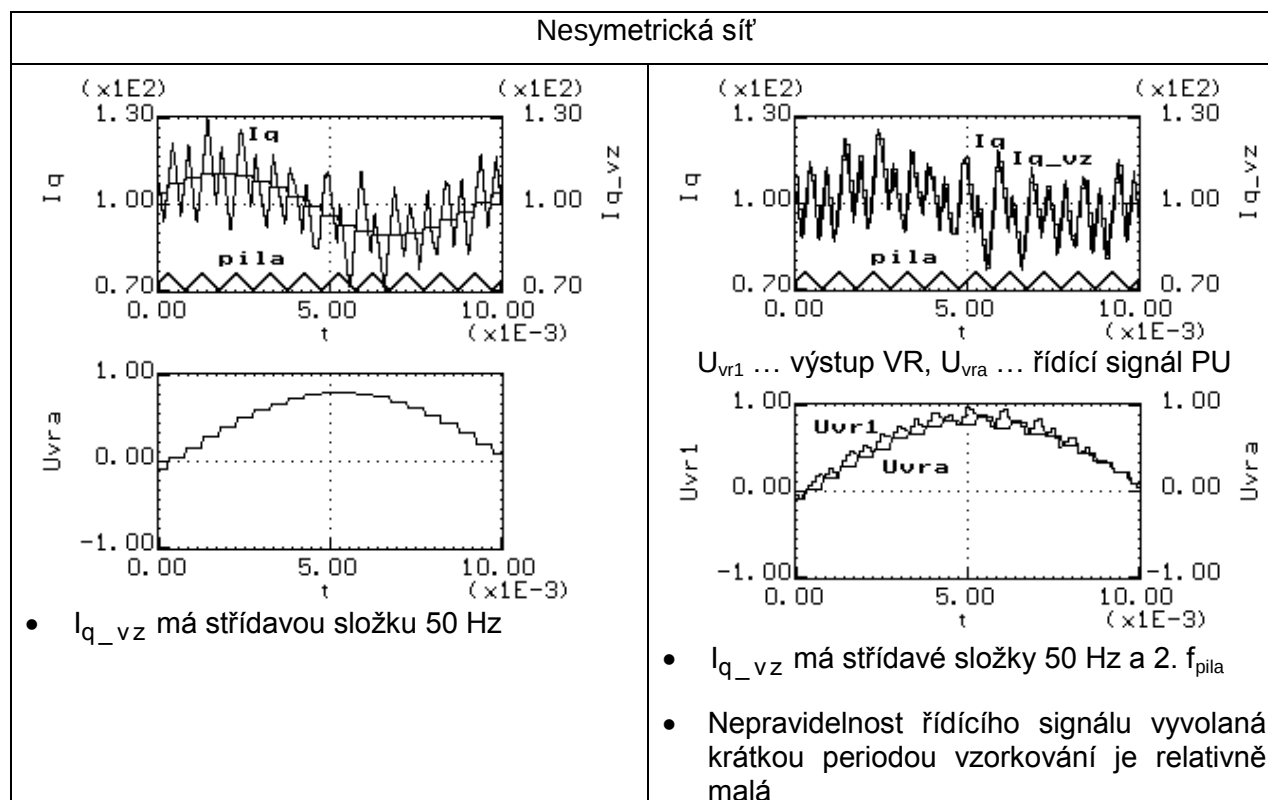
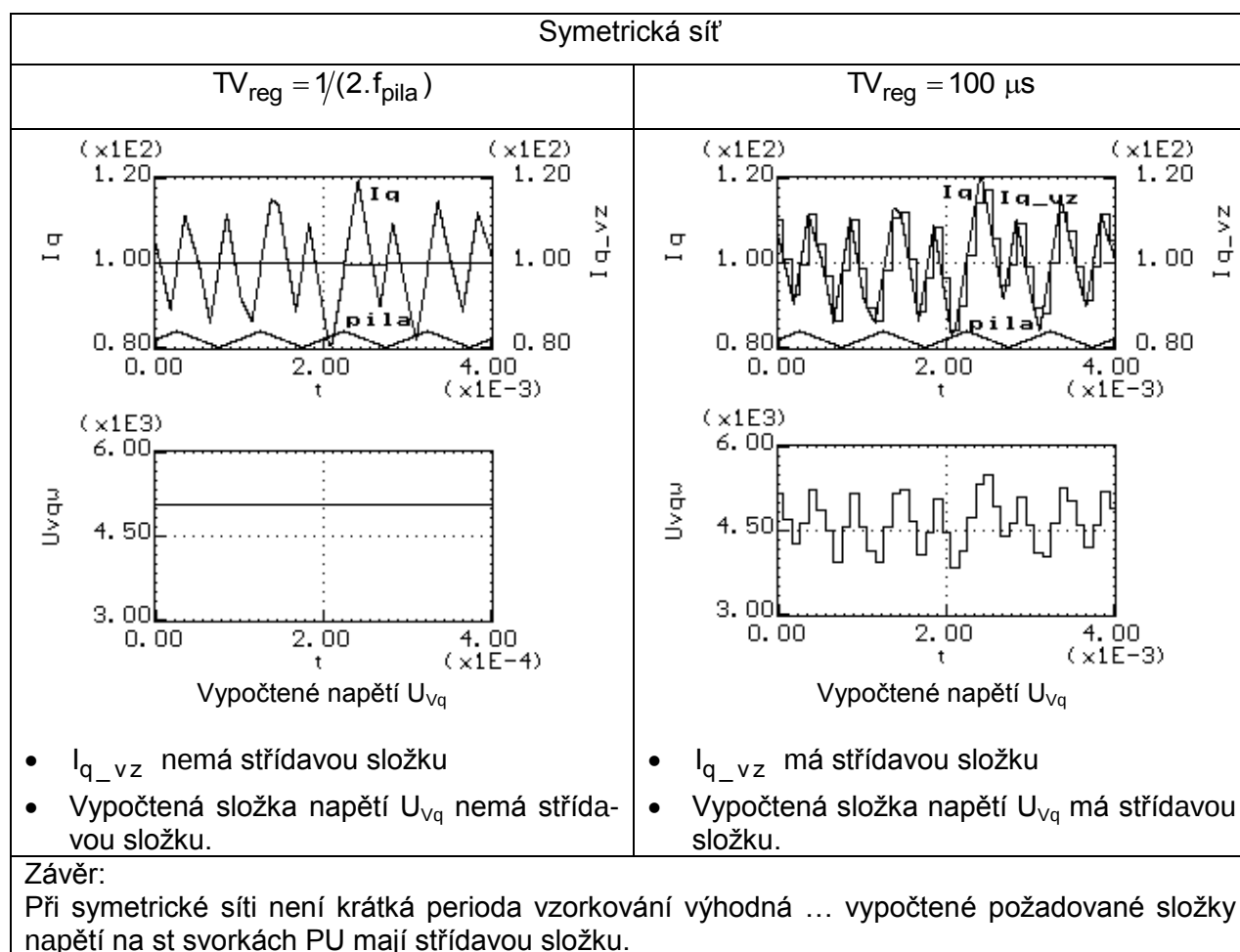


7.1.6 Vliv periody vzorkování výpočtů na vlastnosti pohonu

Při symetrické, nezdeformované síti je vhodné vzorkování výpočtů synchronizovat s řídicí „pilou“ pulsního usměrňovače.

Dlouhá perioda vzorkování výpočtů TV_{reg} (z důvodu spínacích ztrát na polovodičích PU nelze zvyšovat modulační kmitočet) však způsobuje v regulačních algoritmech vznik „dopravního zpoždění“, které zhoršuje dynamické vlastnosti PU.

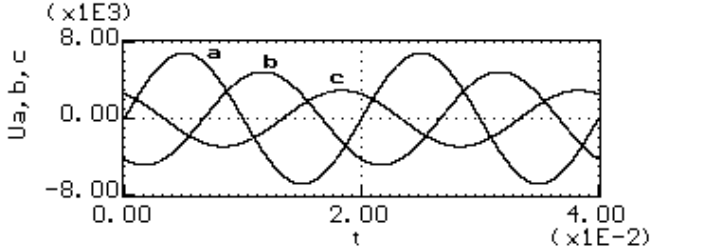
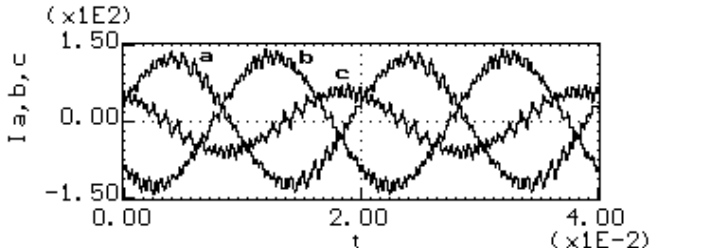
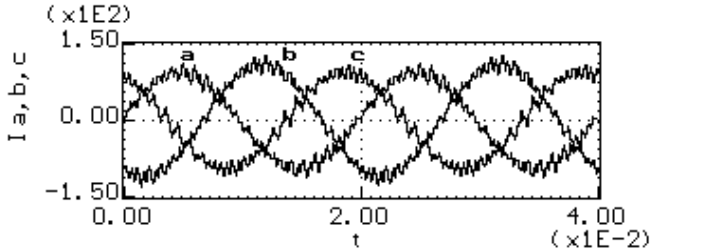
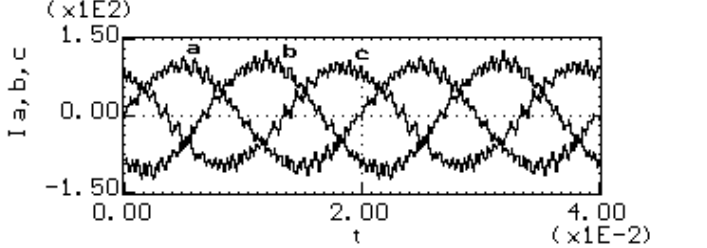
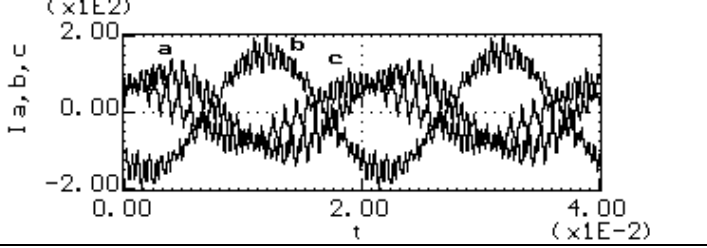
Pozn.: Při simulacích probíhají výpočty v okamžicích vzorkování okamžitě, bez zpoždění. Zpoždění odpovídající výpočtu v reálném čase se respektuje využíváním výsledků, vypočtených v čase $(t - TV_{reg})$.

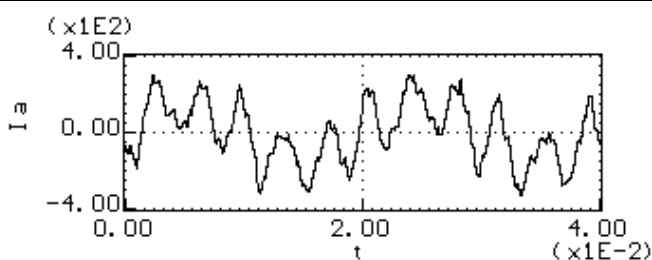
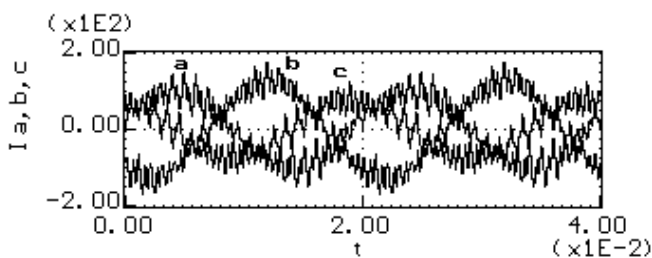
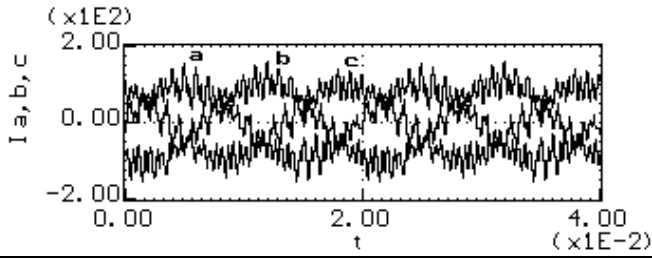


Závěry:

- V příp. symetrické sítě je vzorkování výpočtů synchronizované s „pilou“ velmi vhodné
- V příp. nesymetrické sítě je synchronizované vzorkování diskutabilní:
 - Nároky na regulované obvodu jsou větší, synchronizované vzorkování vnáší do regulačních algoritmů „dopravní zpoždění“
 - Nepravidelnost řídicího signálu PU se v příp. nesymetrické sítě realizací nesynchronizovaného vzorkování zvětší relativně málo.

7.1.7 Vliv tlumivky L ve střídavém obvodu PU

Varianta 1 – nesymetrická síť $\varphi_U = 120^\circ$	
$L = 40 \text{ mH}$ $K_{Ri} = 10, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$ $TV_{reg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$	
$L = 40 \text{ mH}$ $K_{Ri} = 50, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$ $TV_{reg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$	
$L = 40 \text{ mH}$ $K_{Ri} = 50, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$ $TV_{reg} = 100 \mu\text{s}$	
$L = 15 \text{ mH}$ $K_{Ri} = 10, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$ $TV_{reg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$	

$L = 15 \text{ mH}$ $K_{Ri} = 50, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$ $TV_{reg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$	
$L = 15 \text{ mH}$ $K_{Ri} = 10, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$ $TV_{reg} = 100 \mu\text{s}$	
$L = 15 \text{ mH}$ $K_{Ri} = 50, T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$ $TV_{reg} = 100 \mu\text{s}$	
Závěry: • S malou tlumivkou ve st obvodu PU je činnost regulačních obvodů obtížnější • S malou tlumivkou může PU dobře pracovat pouze za těchto podmínek: - Větší zesílení regulátorů proudů K_{Ri} - Krátká perioda vzorkování výpočtů TV_{reg}	

7.2 Varianta 6

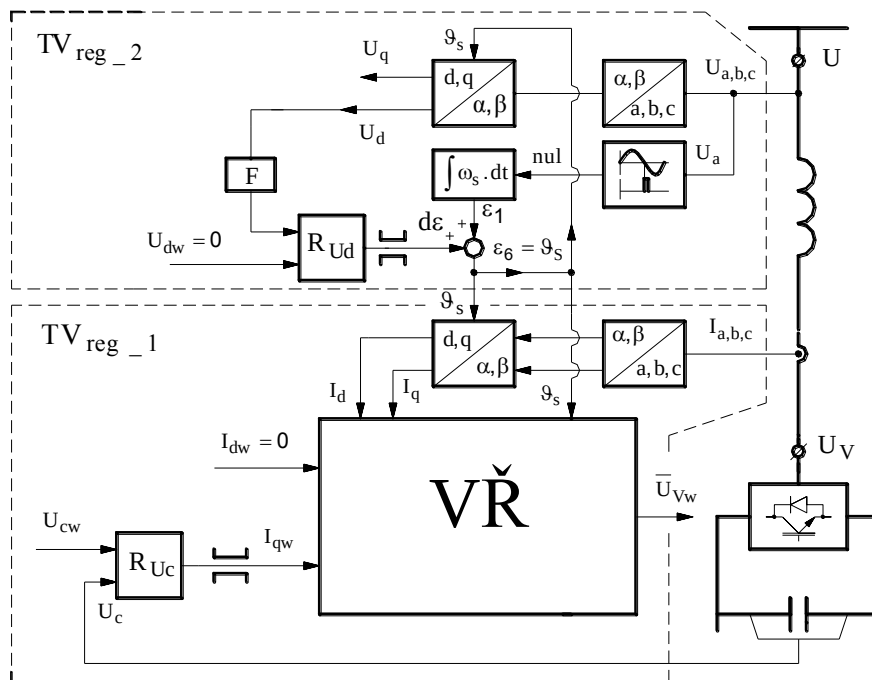
Algoritmy varianty 6 natočí souřadný systém (d, q) tak, že vektor napětí $\bar{U}$ se pohybuje v okolí osy q. Regulace $I_d = 0$ je pak smysluplná.

Proudy I_a, I_b, I_c obsahují výraznou harmonickou složku o kmitočtu $2 \cdot f_{pila}$. Proto je vhodné výpočty I_d, I_q provádět s periodou vzorkování $TV_{reg_1} = 1/(2 \cdot f_{pila})$.

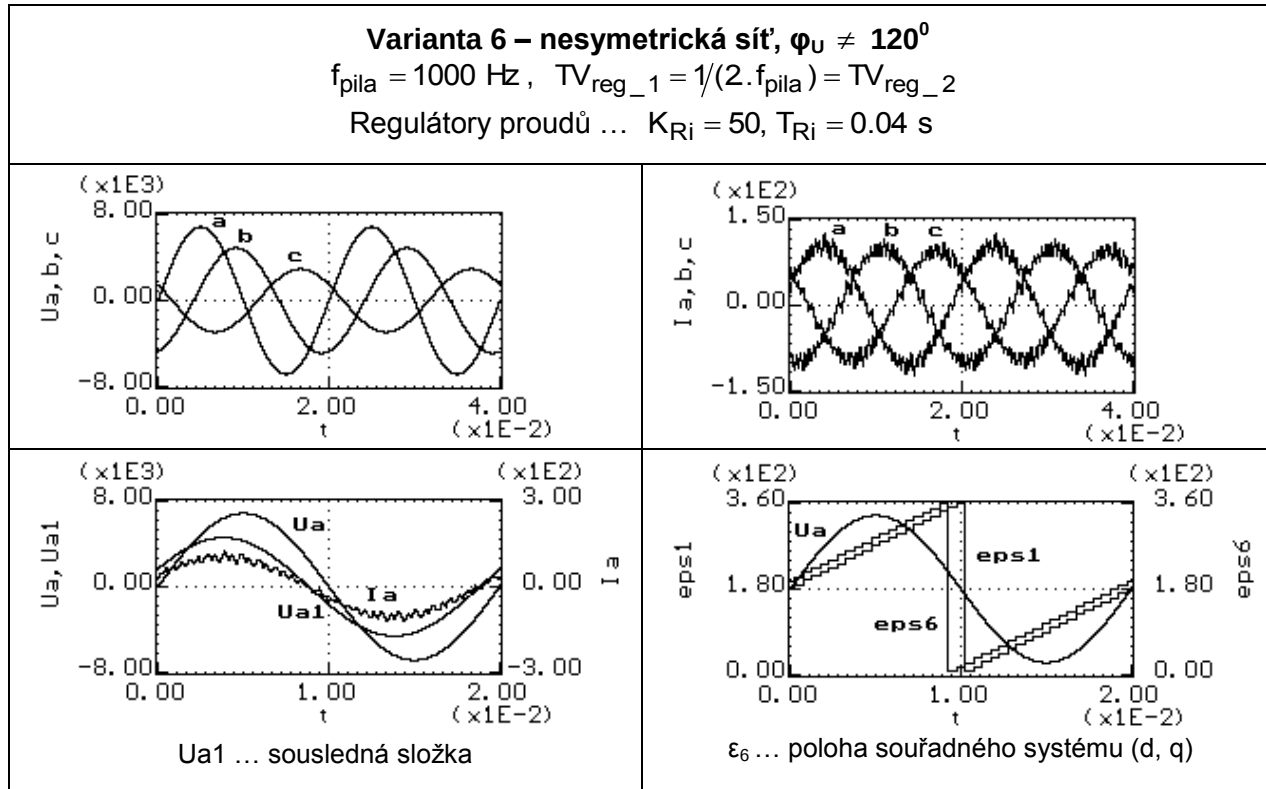
Napětí sítě je činností pulsního usměrňovače deformováno málo, harmonická složka napětí o kmitočtu $2 \cdot f_{pila}$ bývá malá. Proto je možno výpočet U_d, U_q provádět s kratší periodou vzorkování TV_{reg_2} . Korekce polohy souřadného systému (d, q) algoritmy varianty 6 je pak ještě účinnější.

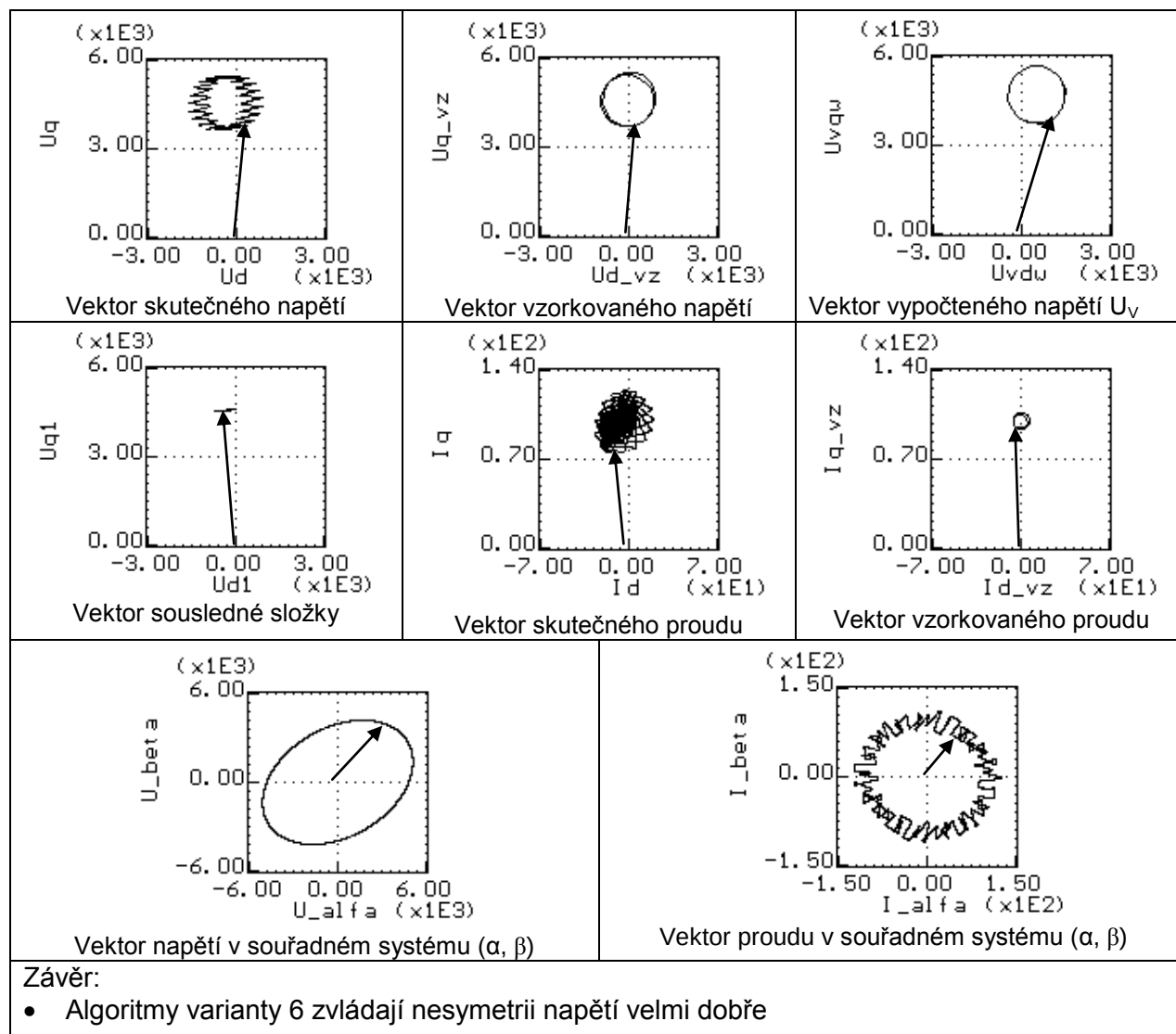
Pokud je napětí sítě neharmonické, vzrůstají nároky na kvalitu regulačních obvodů. Vzorkování $TV_{reg_1} = 1/(2 \cdot f_{pila})$ působí jako „dopravní zpoždění“, které kvalitu regulačních obvodů

kazí. Proto je vhodné periodu vzorkování TV_{reg_1} zkrátit. Negativní důsledky této volby jsou diskutovány v kap. 7.1.6.

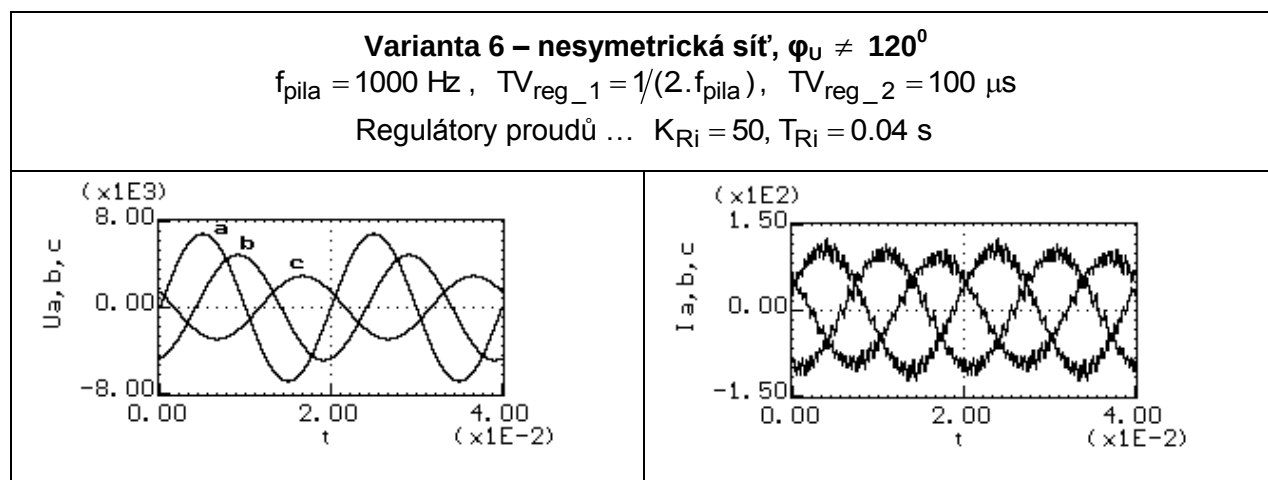


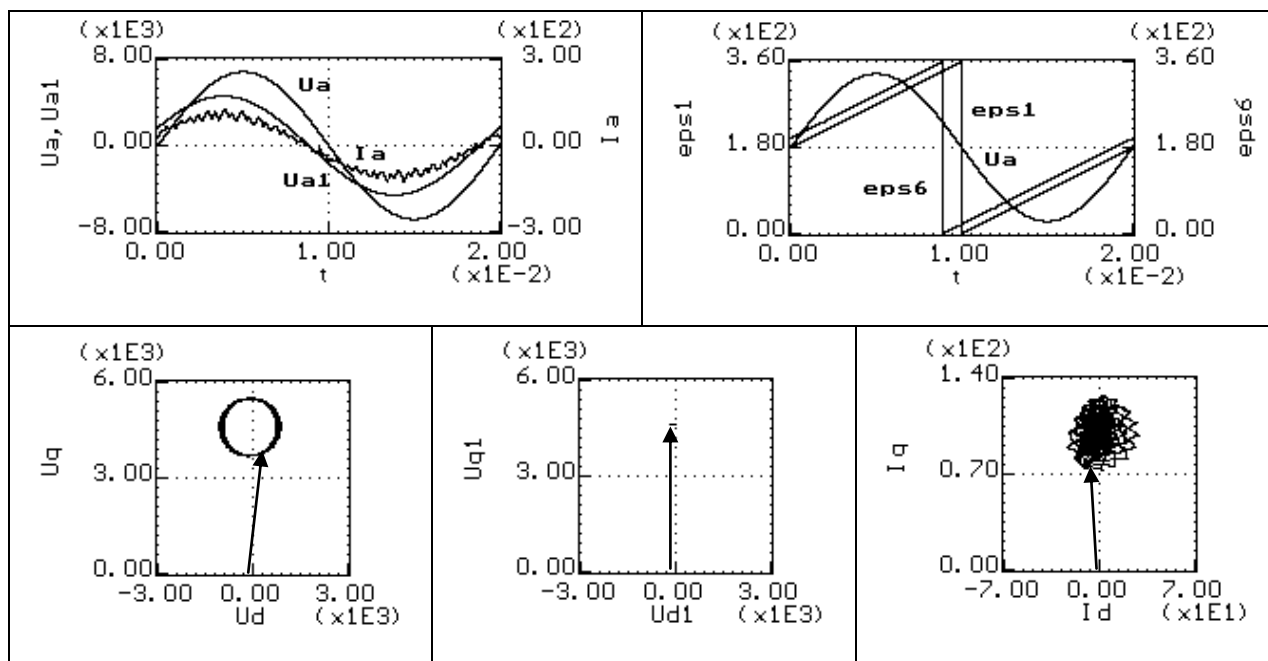
7.2.1 Nesymetrická síť, $\varphi_U \neq 120^\circ$, $TV_{reg_1} = 1/(2 \cdot f_{pila}) = TV_{reg_2}$





7.2.2 Nesymetrická síť, $\varphi_U \neq 120^\circ$, $TV_{reg_1} = 1/(2 \cdot f_{pila})$, $TV_{reg_2} = 100 \mu s$





Závěry:

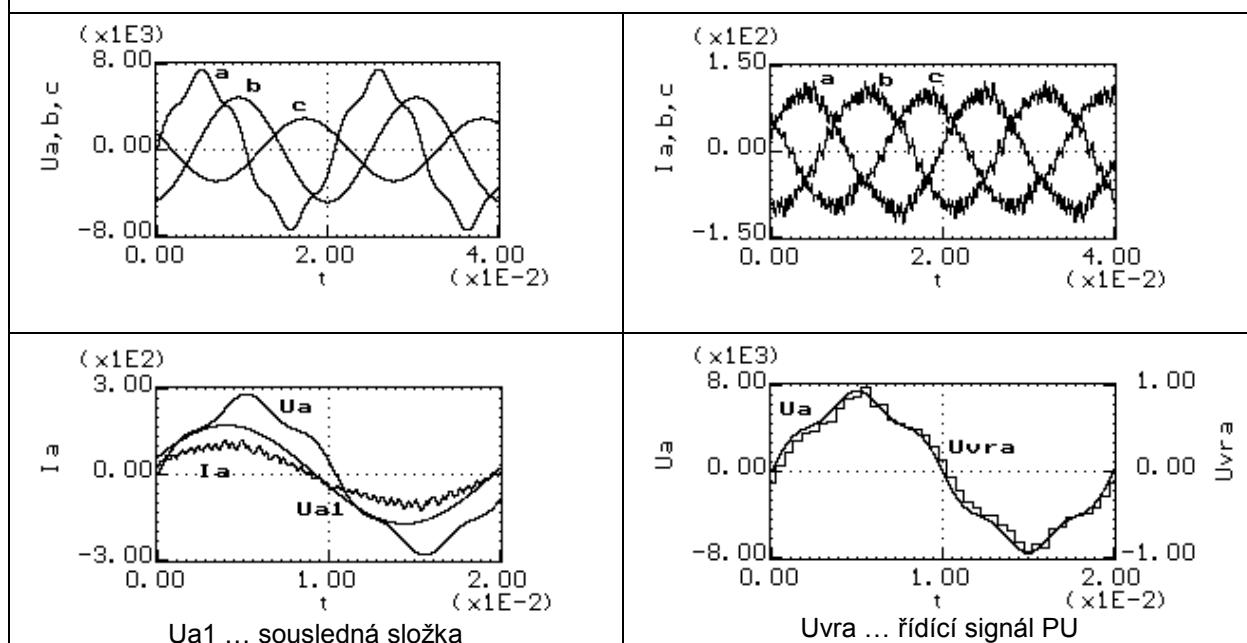
- Zkrácení TV_{reg_2} zkvalitní výpočet polohy systému (d, q) ... $\varepsilon_6 \Rightarrow$ vektor napětí sousledné složky $\bar{U}_1$ leží přesně v ose q.
- Zlepšení vlastností pohonu zkrácením TV_{reg_2} však není podstatné.

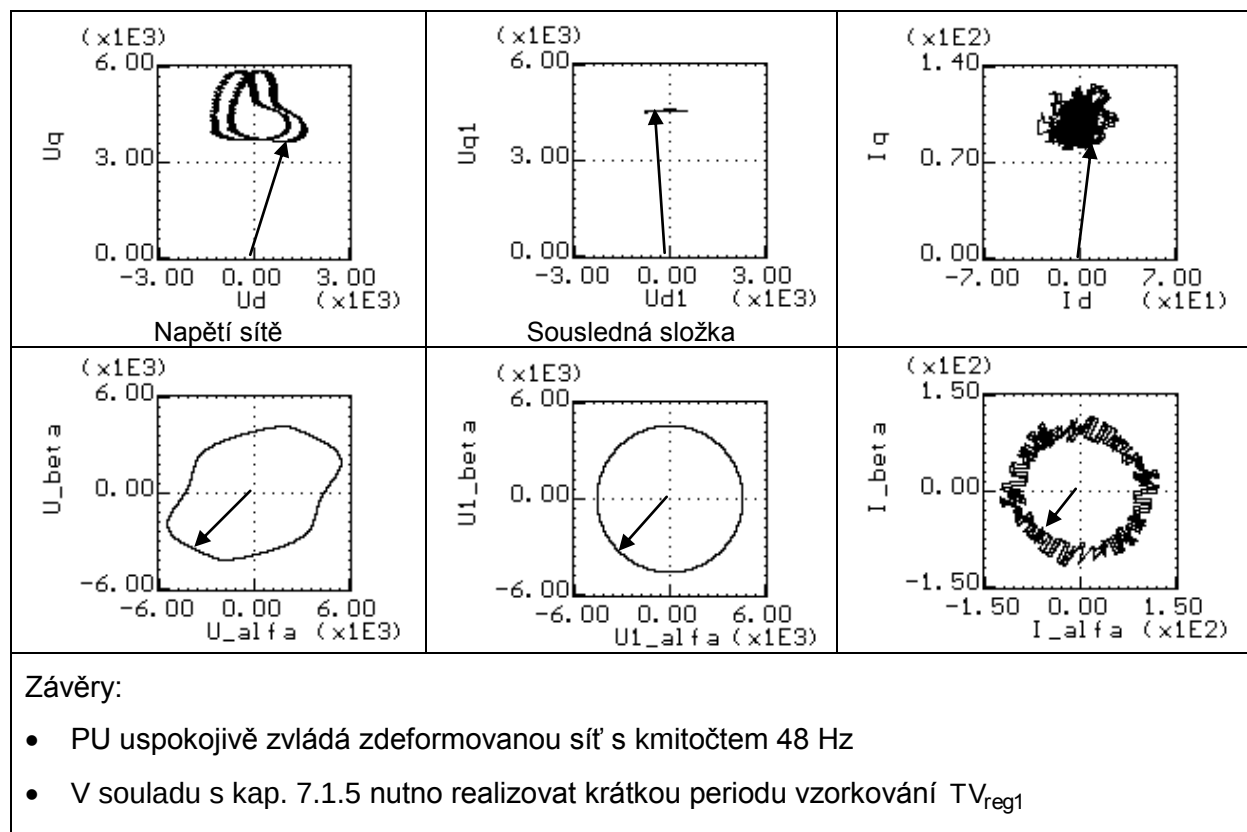
7.2.3 Kmitočet 48 Hz, deformace 5. harmonickou, $TV_{reg_1} = TV_{reg_2} = 100 \mu s$

Varianta 6 – kmitočet 48 Hz, deformace 5. harmonickou

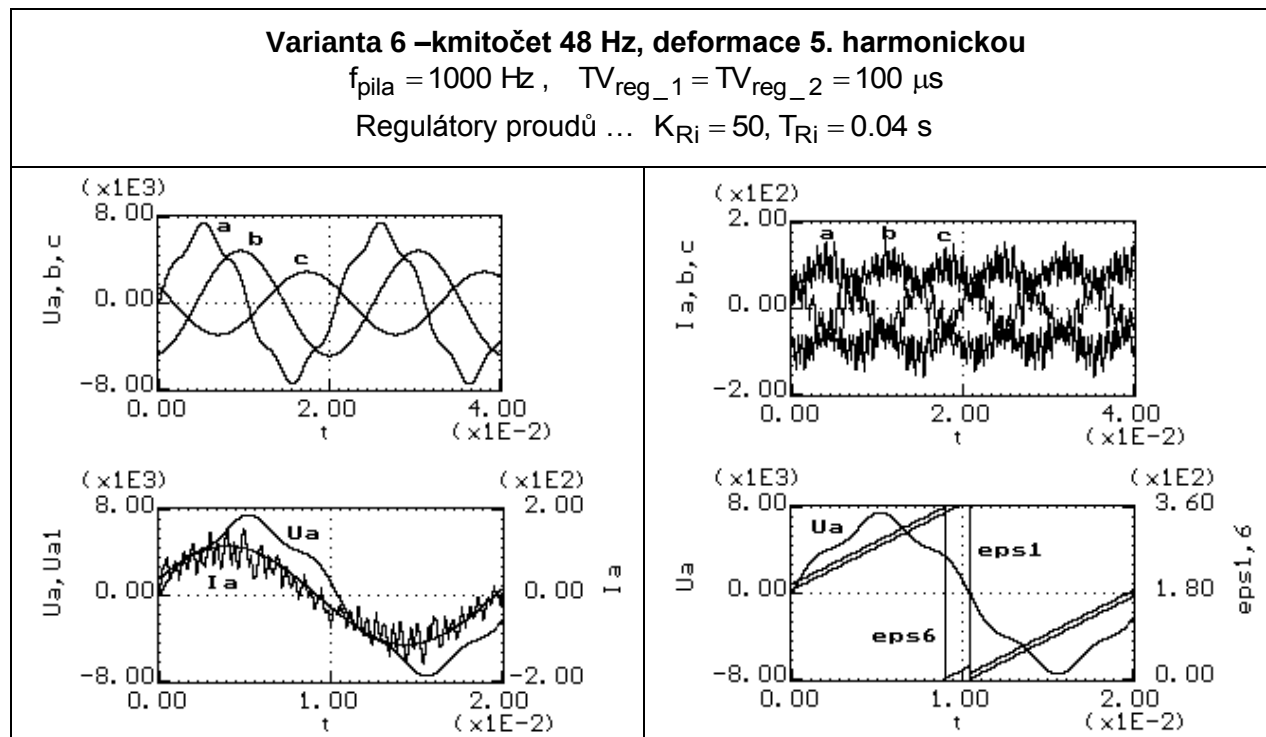
$f_{pila} = 1000 \text{ Hz}$, $TV_{reg_1} = TV_{reg_2} = 100 \mu s$

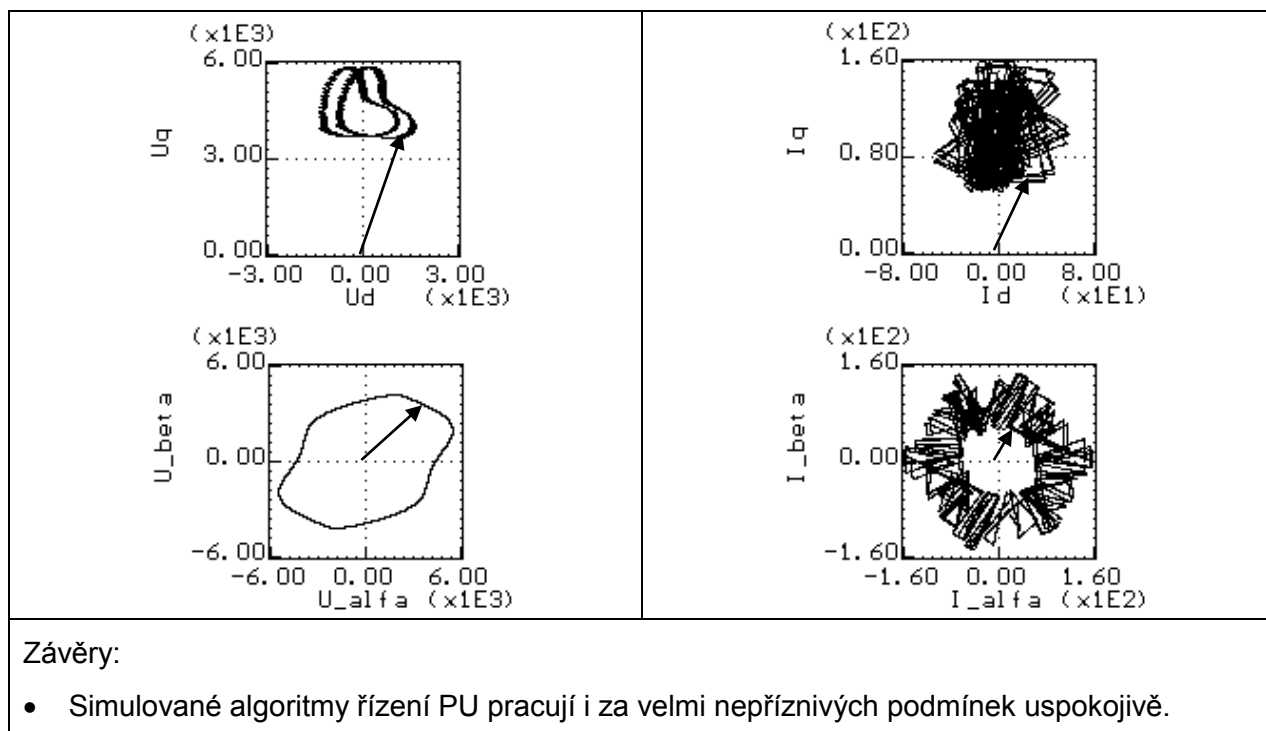
Regulátory proudů ... $K_{Ri} = 50$, $T_{Ri} = 0.04 \text{ s}$



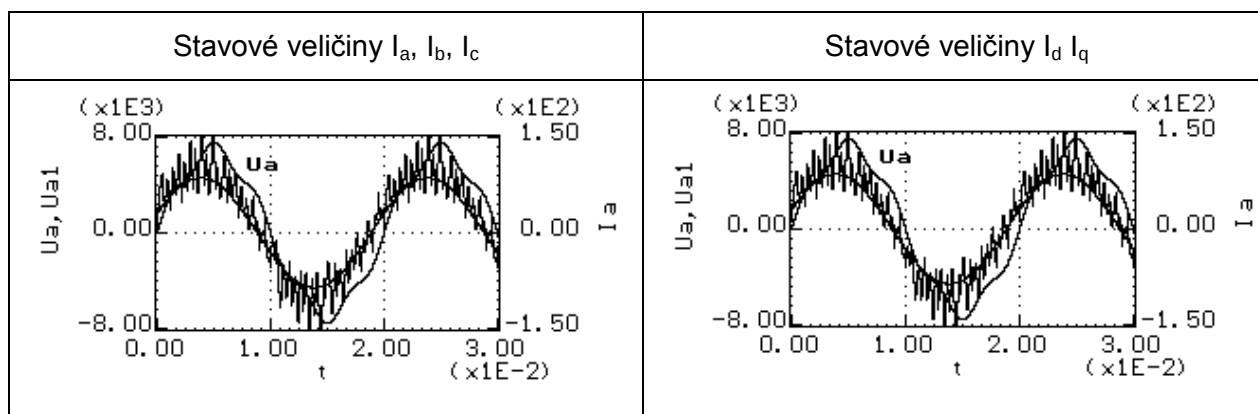


7.2.4 Dtto, malá indukčnost ve st obvodu PU





7.2.5 Kontrolní výpočet – stavové veličiny I_d , I_q



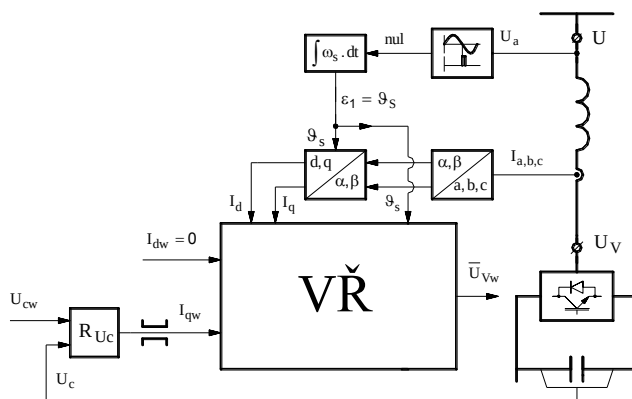
8 Závěr

Vektorové řízení pulsního usměrňovače pracuje na stejném principu jako řízení střídače. Pokud se souřadný systém (d, q) potočí tak, aby prostorový vektor napětí ležel v ose q, lze zadáním $I_{dW} = 0$ dosáhnout shodné polohy vektorů napětí a proudu. Velikost I_{qW} zadává regulátor napětí ve stejnosměrném obvodu.

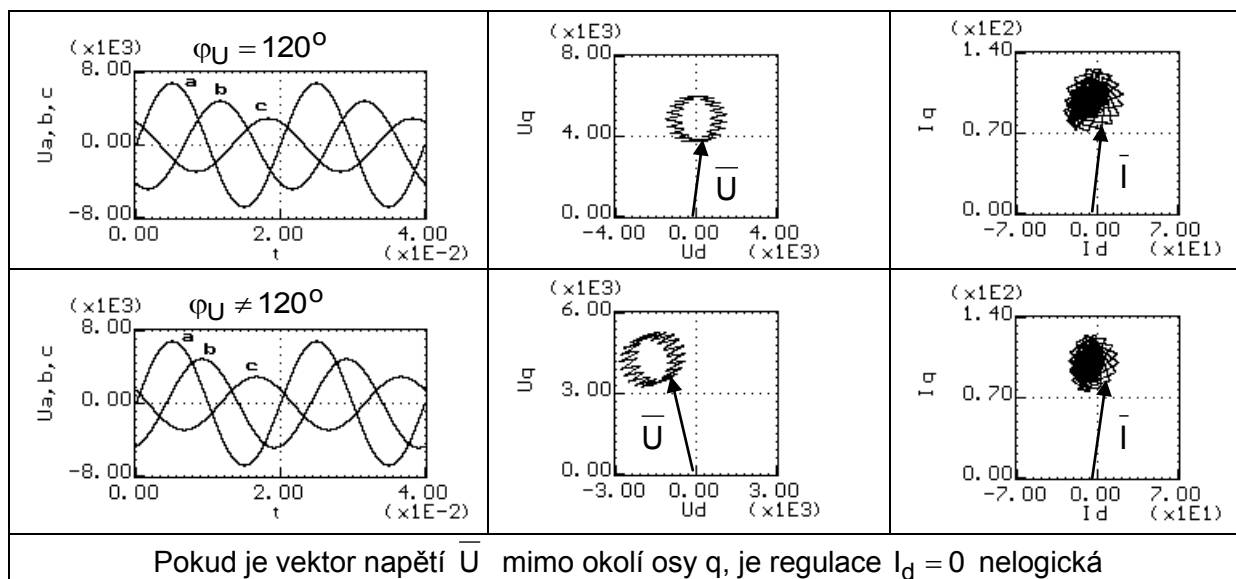
8.1 Problematika polohy souřadného systému (d,q) při nesymetrickém napětí sítě

Polohu souřadného systému (d, q) ...

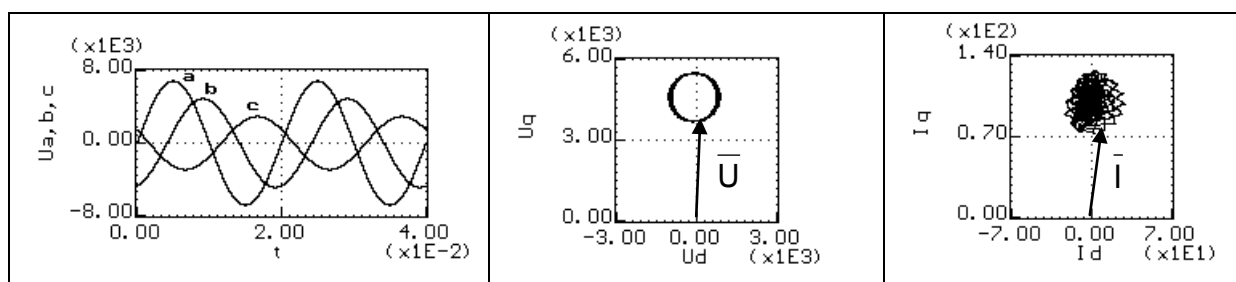
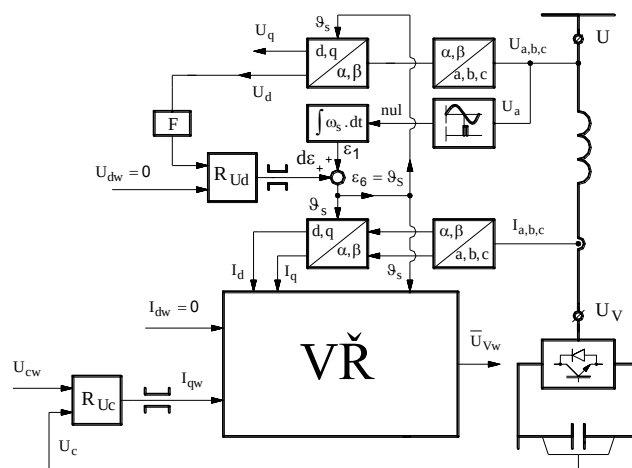
$\mathcal{G}_S$ lze nejsnáze odvozovat od napětí fáze „a“ síťového napětí (varianta 1).



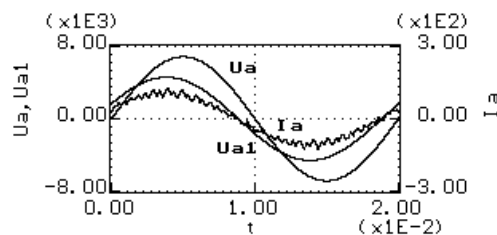
Synchronizace souřadného systému (d, q) s fázovým napětím U_a je vhodná při fázovém posunu mezi jednotlivými fázemi $\varphi_U = 120^\circ$. Při $\varphi_U \neq 120^\circ$ není vektor napětí v okolí osy q.



Pootočení systému (d, q) tak, aby vektor napětí byl vždy v okolí osy q, mohou realizovat algoritmy varianty 6.



Pokud jsou oba vektory $\bar{U}$, $\bar{I}$ v okolí osy q, dosáhne se nulového fázového posunu mezi souslednou složkou napětí sítě U_{a1} a 1. harmonickou proudů.

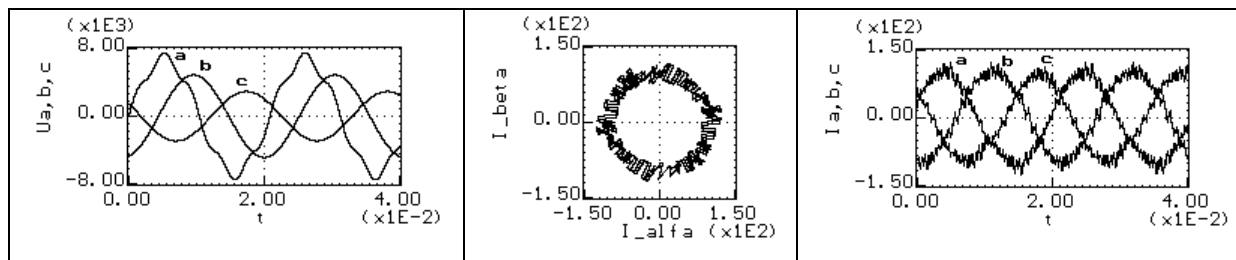


8.2 Problematika harmonických proudů při zdeformovaném napětí sítě

Vektorové řízení řeší tuto problematiku automaticky.

Ideální PU s nekonečně velkým modulačním kmitočtem zajistí vektor proudu $I_d = 0$, $I_q = \text{konst}$. Ve stojicím souřadném systému (α, β) rotuje tento vektor po kruhové trajektorii. Odpovídající fázové proudy jsou harmonické.

Skutečný PU plní popsanou funkci pouze přibližně.



8.3 Problematika činnosti PU při kmitočtu sítě různém od 50 Hz

Pokud se vyhodnocený kmitočet zavádí do řídicích algoritmů problematika neexistuje.

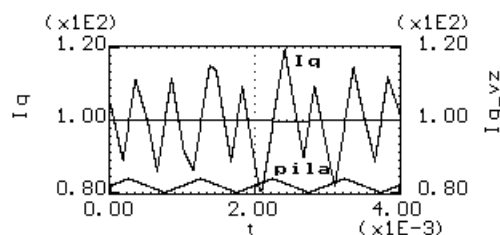
Pokud se kmitočet nevyhodnocuje, pracují algoritmy s určitou chybou. Tato chyba však neovlivňuje podstatněji činnost pohonu.

V kap. 8.2 uvedený graf ... napětí sítě 48 Hz.

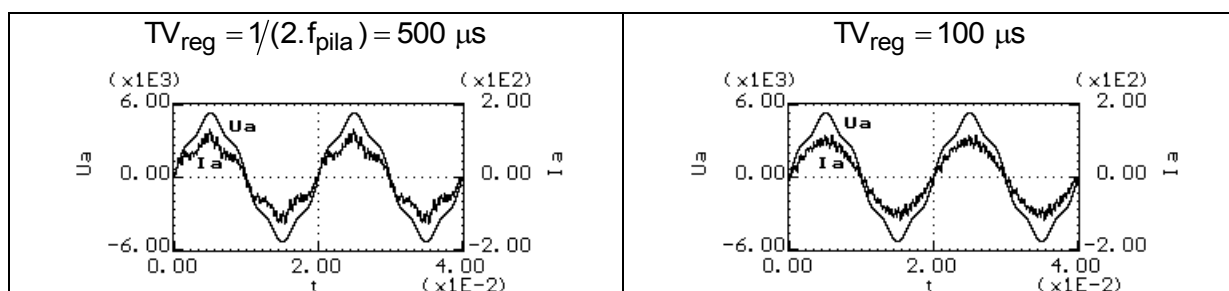
8.4 Problematika vzorkování výpočtů

Střídavá složka regulovaných složek proudů je synchronizována s řídicí pilou PU. Proto je vhodné nastavit periodu vzorkování $TV_{reg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$.

V příp. symetrické sítě pak v ustáleném stavu vzorkované proudy I_{d_vz} a I_{q_vz} nemají střídavou složku.

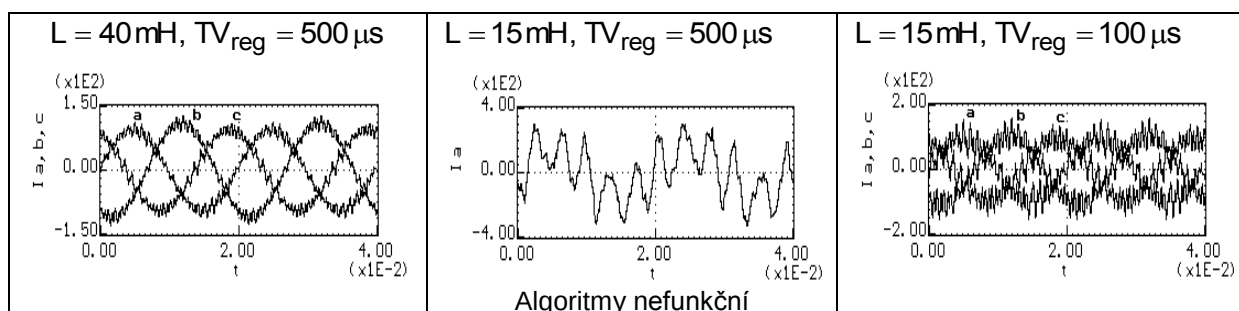


Perioda vzorkování $TV_{reg} = 1/(2 \cdot f_{pila})$ však vnáší do regulačních obvodů velké „dopravní zpoždění“. Proto je při zdeformovaném napětí sítě apod. vhodné periodu vzorkování zkrátit. Dynamické vlastnosti pohonu se zlepší a ostatní vlastnosti se příliš nezhorší.



8.5 Malá tlumivka ve st obvodu PU

Při malé tlumivce L je činnost regulačních algoritmů obtížnější. Je nutno navrhnout algoritmy s lepšími dynamickými vlastnostmi.



Literatura

- [1] Janda P., Zeman K.: Pulsní usměrňovač pro trakční pohon Škoda
Celostátní konference o elektrických pohonech, Plzeň 1999
- [2] Zeman K., Peroutka Z., Janda M.: Automatická regulace pohonů s asynchronními motory,
ZČU 2004
- [3] Zeman K., Peroutka Z., Uzel D.: Regulovaný pohon se synchronním motorem, výzkumná
zpráva RICE 2010

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.