



Usměrňovače

Přednáška – výkonová elektronika



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

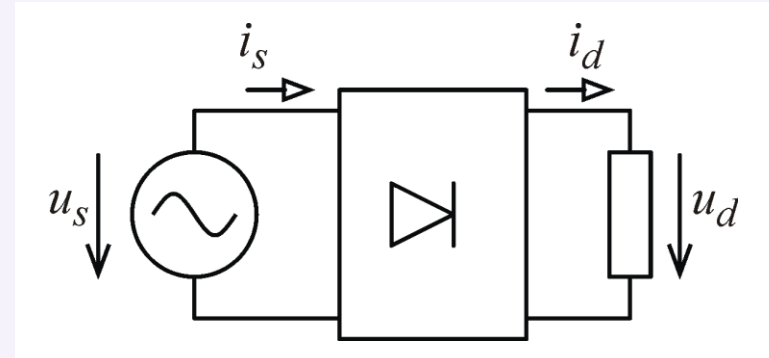


OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



- Základní vlastnosti usměrňovače
 - nejčastější obvod výkonové elektroniky
 - převádí střídavý proud na stejnosměrný
 - neřízené usměrňovače
 - parametry výstupního napětí závisí na parametrech vstupního napětí
- analýza usměrňovačů
 - vstupní napětí – harmonické, bez stejnosměrné složky
 - vstupní proud – obecně periodický, neharmonický
 - výstupní proud, napětí - reálně obsahuje vlnění o stejné frekvenci jako vstupní střídané napětí nebo její celistvý násobek, vztah mezi napětím a proudem dán impedancí zátěže





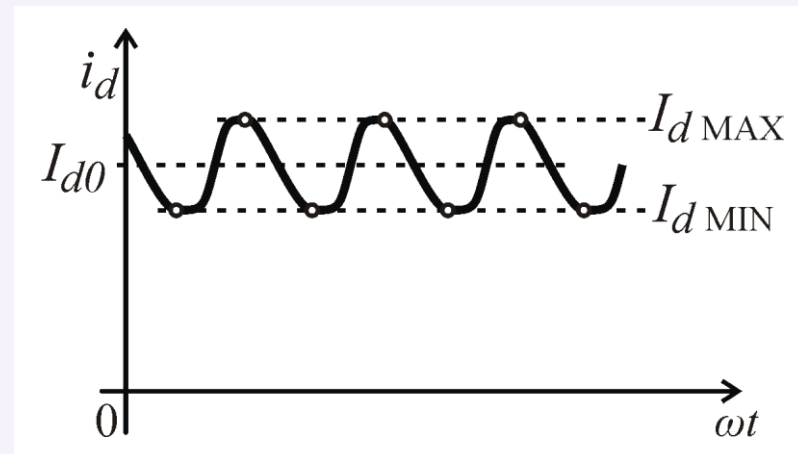
- definice zvlnění

- efektivní (podíl efektivních hodnot střídavých a stejnosměrné složky)

$$\sigma_{Ief} = \frac{I_{\sigma}}{I_{d0}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}{I_{d0}}$$

- relativní (obrázek)

$$\sigma_{Irel} = \frac{I_{dMAX} - I_{dMIN}}{I_{dMAX} + I_{dMIN}} = \frac{\Delta I_d}{2I_{d0}}$$





- Účinník (Power Factor, PF)

- definice

$$\Lambda = PF = \frac{P_{AV}}{U_{(RMS)} \cdot I_{(RMS)}}$$

- činný výkon na vstupu do usměrňovače

- vstupní napětí – pro analýzu harmonické

$$u_S = U_{SM} \sin \omega t$$

- vstupní odebíraný proud – obecně neharmonický

$$i_S = \sum_{n=0}^{\infty} I_{SMn} \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

- výpočet výkonu:

$$P_{AV} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_S(t) i_S(t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} U_{SM} I_{SMn} \int_0^{2\pi} \sin(\omega t) \sin(n\omega t + \varphi_n) d\omega t$$

- kde na základě ortogonality je střední výkon $n = 2, 3, 4$ harmonické roven 0

- činný výkon jen z 1. harm

$$P_{AV} = \frac{U_M I_{M1}}{2} \cos \varphi_1 = UI_1 \cos \varphi_1$$



- Celkové harmonické zkreslení proudu THD:

- definice

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \sqrt{\frac{I^2 - I_1^2}{I_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1}$$

- proto platí

$$\frac{I_1}{I} = \sqrt{\frac{1}{1 + (THD)^2}}$$

- Celkový účinník usměrňovače

$$\Lambda = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \sqrt{\frac{1}{1 + (THD)^2}} \cos \varphi_1$$

- podíl vyšších harmonických účinník snižuje

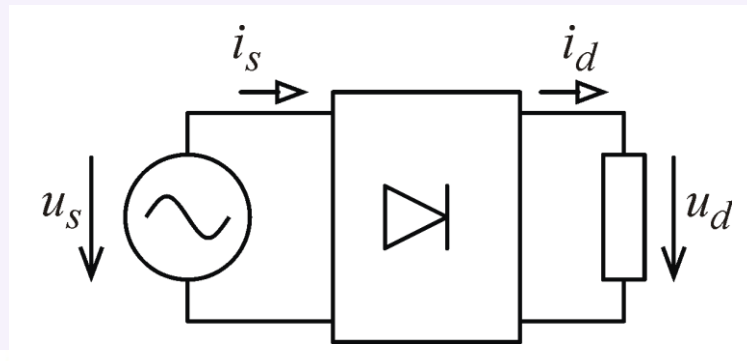


- Rozdělení usměrňovačů
 - komutované ze sítě
 - neřízené – obsahují jen diody
 - fázově řízené – tyristory, diody, popř. triaky,
 - násobiče – poskytují vyšší napětí, než je U_{sM}
 - s PFC obvodem – omezení harmonických v napájecím proudu
 - pulzní (spínané, aktivní) – s tranzistory nebo vypínatelnými tyristory,
 - spínání určuje řídicí obvod podle stavu veličiny sítě a požadovaných parametrů



- Pulznost usměrňovače
 - podíl frekvence první harmonické zvlnění proti frekvenci napájecího napětí
 - závisí na dostupnosti fází v napájecím napětí
 - jedno nebo dvojnásobek počtu přivedených fází do usměrňovače
 - jednofázové – jedno nebo dvoupulzní
 - trofázové tři nebo šestipulzní
 - vícefázové - zvláštní vinutí transformátorů – posunutí fáze
- Amplitudový zákon
 - v napájecím proudu i'_s jsou přítomny harmonické řádu h :
kde k je celé číslo, p je pulznost usměrňovače

$$h = kp \pm 1$$





- Jednofázový, jednopulzní usměrňovač

- nejjednodušší obvod

- dioda sepnutá

$$u_s = U_{SM} \sin(\omega t) > 0$$

$$u_d = U_{SM} \sin(\omega t)$$

- dioda vypnutá

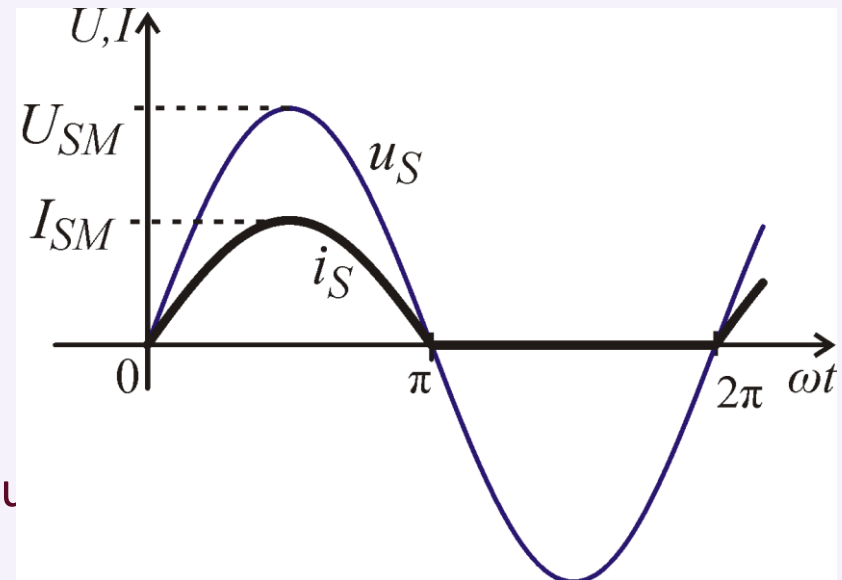
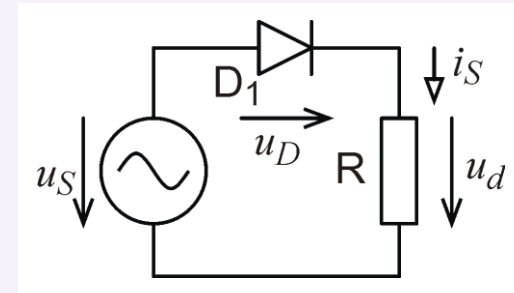
$$u_s = U_{SM} \sin(\omega t) < 0$$

$$u_d = 0$$

- střední výstupní napětí

$$U_{dAV} = U_{d0} = \frac{U_{SM}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_{SM}}{\pi}$$

- zvlnění – vysoké, odběr ss. složky proudu ze střídavého napájení





Usměrňovače



• Jednofázový, jednopulsní, zátěž LR

– musí platit II. KZ

$$U_{sM} \sin(\omega t) - u_D - u_{dL} - u_{dR} = 0$$

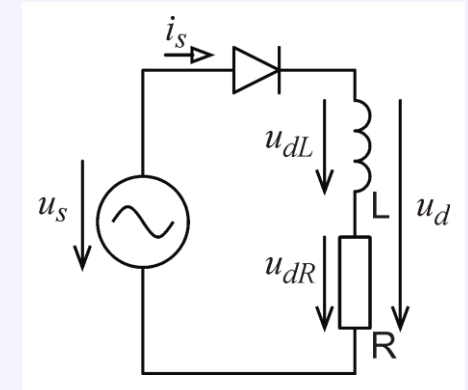
– kde

- napětí na diodě
- napětí na induktoru
- napětí na rezistoru

$$u_D \doteq 0.8 \Rightarrow 0$$

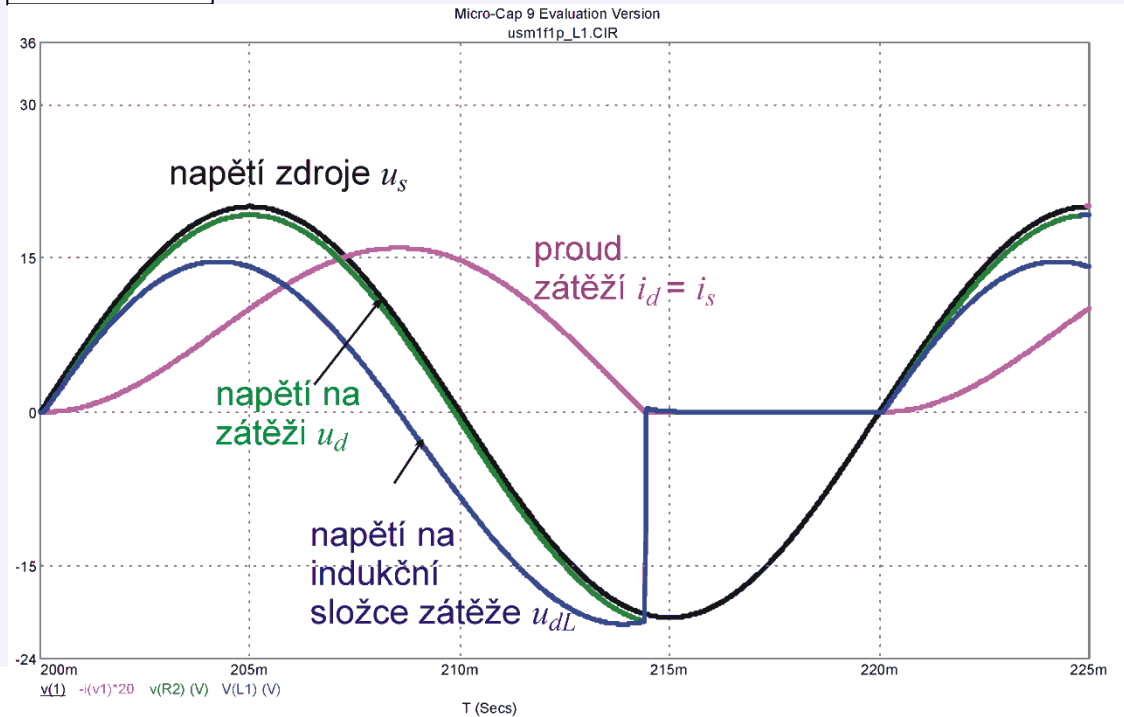
$$u_{dL} = L \frac{di_S}{dt}$$

$$u_{dR} = Ri_S$$



• časový průběh –

- $f = 50 \text{ Hz}$, $U_{sM} = 20 \text{ V}$,
- $R = 10 \Omega$, $L = 0,1 \text{ H}$
- kvůli přerušení proudu diodou při záporné půlvlně se zvlnění nesníží





Usměrňovače

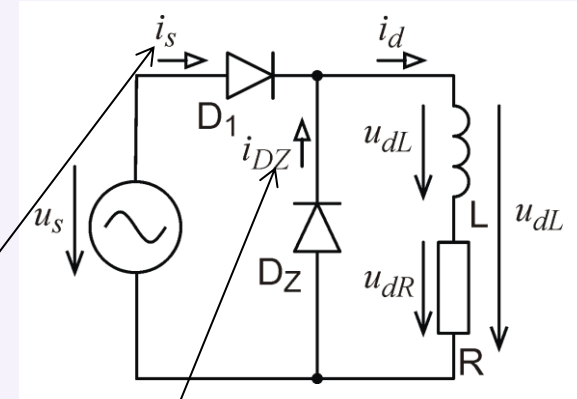


- Jednofázový, jednopulzní, zátěž LR, nulová dioda

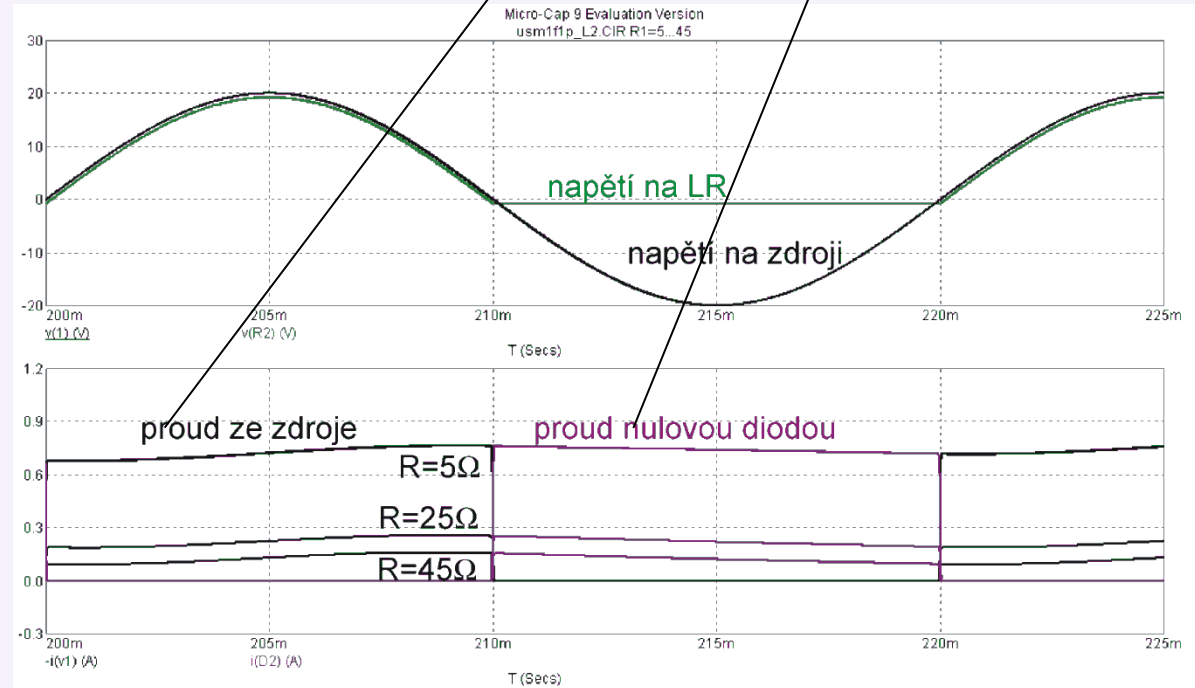
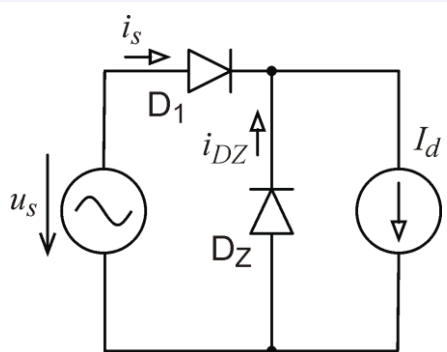
- podstatné snížení zvlnění
- výstupní napětí proud
- pro $\frac{L}{R} \gg \frac{2\pi}{\omega}$

$$U_d = \frac{U_{sM}}{\pi}$$

$$I_d = \frac{U_{sM}}{\pi \cdot R}$$

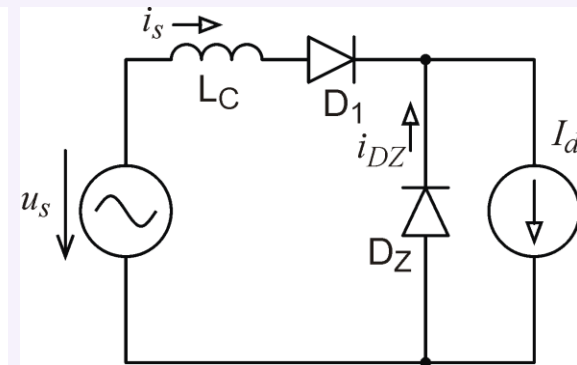
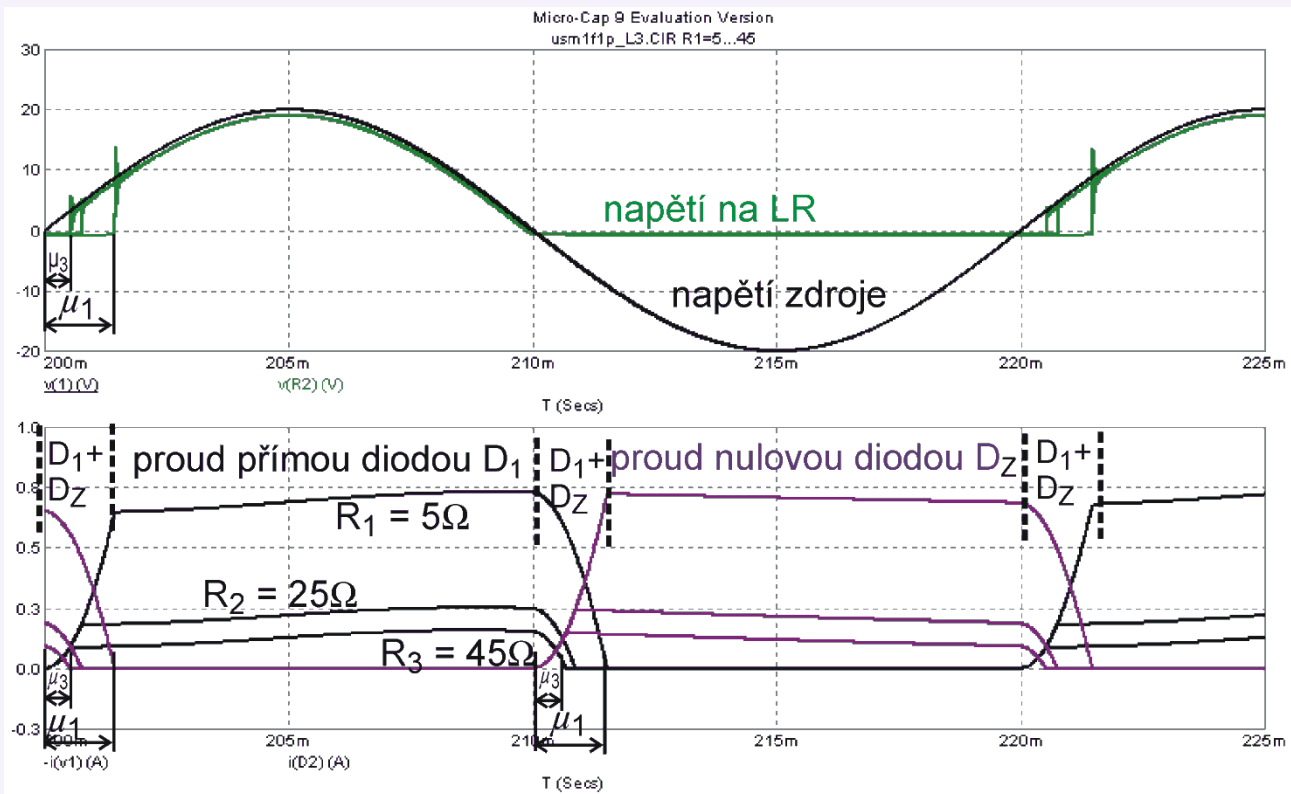


náhr. schéma
pro usměrňovače
s tlumivkou
a nulovou
diodou





- Vliv indukčnosti sítě na spínání usměrňovače
 - parazitní indukčnost sítě (chová se jako lineární harmonický zdroj s vnitřní indukčností) způsobuje pomalejší náběh proudu ze zdroje, fázový úhel μ vedou obě diody



$$\cos \mu = 1 - \frac{\omega L_C I_d}{U_{sM}}$$

$$U_d = \frac{U_{sM}}{\pi} \left(1 - \frac{\omega L_C I_d}{U_{sM}} \right)$$



• jednofázový jednopulzní usměrňovač s RC zátěží

- levné, běžně používané zapojení, kondenzátor na výstupu – tvrdý zdroj napětí, pokrývá odběrové špičky
- odběr velkých hodnot proudu při dobíjení kondenzátoru
- průběh

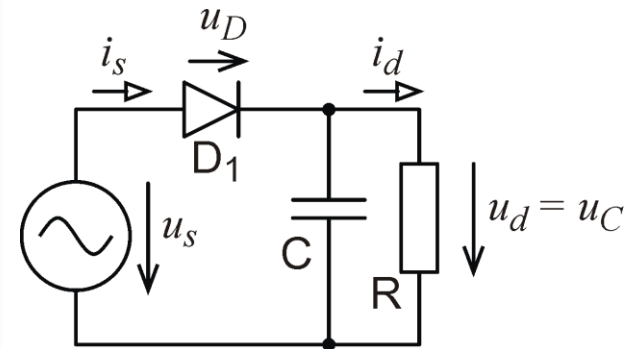
- dioda otevřena, čas t_1 $U_{SM} \sin(\omega t) > u_C + u_D$

$$i_S = \frac{U_{SM} \sin(\omega t) - u_C - u_D}{R_D + ESR} + \frac{U_{SM} \sin(\omega t) - u_D}{R_L}$$

- dioda uzavřena, čas t_2

$$U_{SM} \sin(\omega t) < u_C + u_Q$$

$$i_S = \frac{U_{SM}}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$



- střední hodnota napětí závisí na velikosti R

- bez zátěže dosahuje U_{SM}

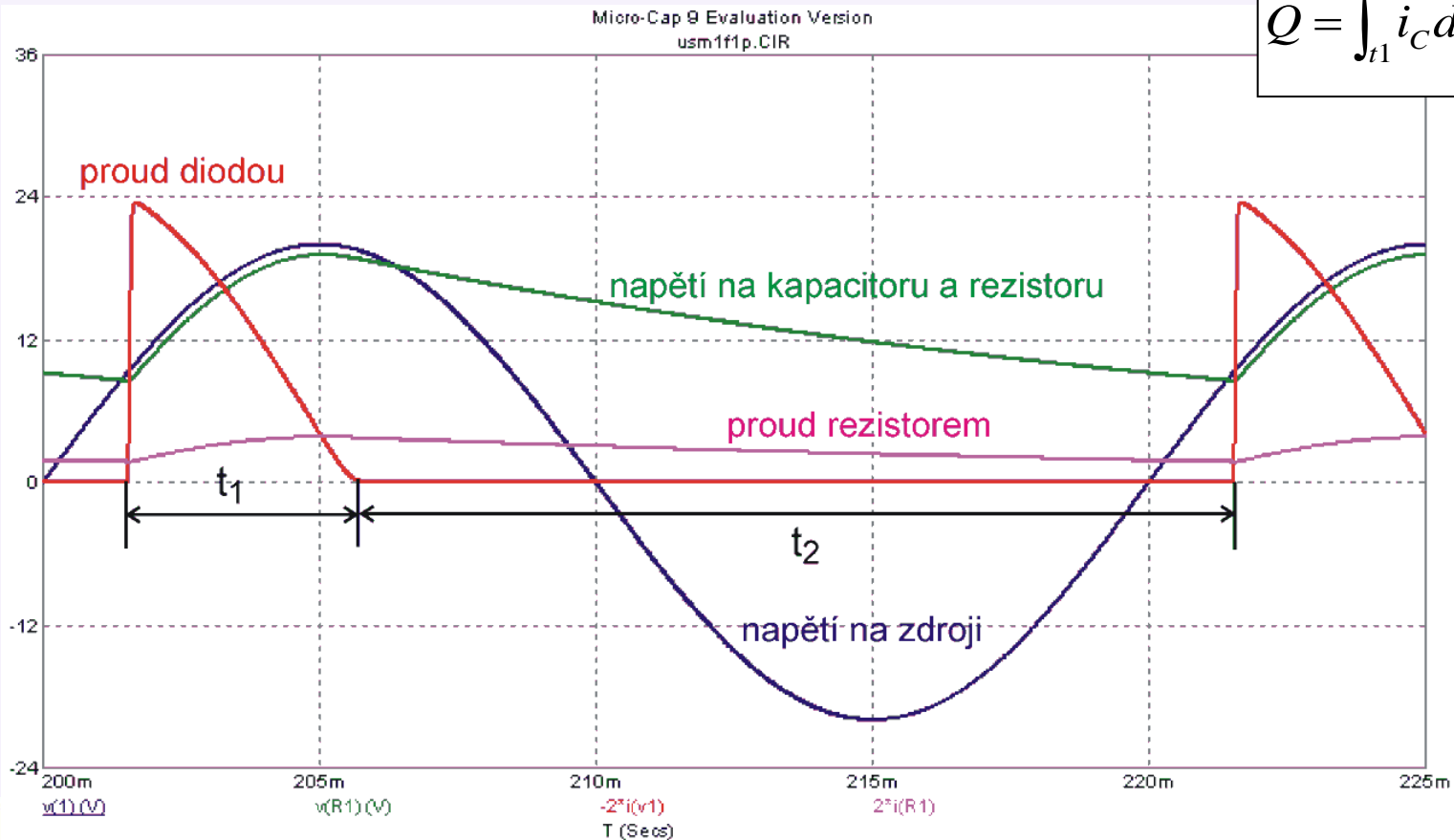
$$U_{AV} \leq U_{SM}$$

- se zátěží pokles až na U_{AV} , snížení vlivu kapacity kondenzátoru



- jednofázový jednopulzní usměrňovač s RC zátěží - časový průběh
 - analyticky nelze určit
 - náboj Q , který se vybil během t_2 se musí do kondenzátoru během t_1 nabít.

$$Q = \int_{t_1} i_C dt = \frac{U_L}{R_L} t_2$$





Usměrňovače



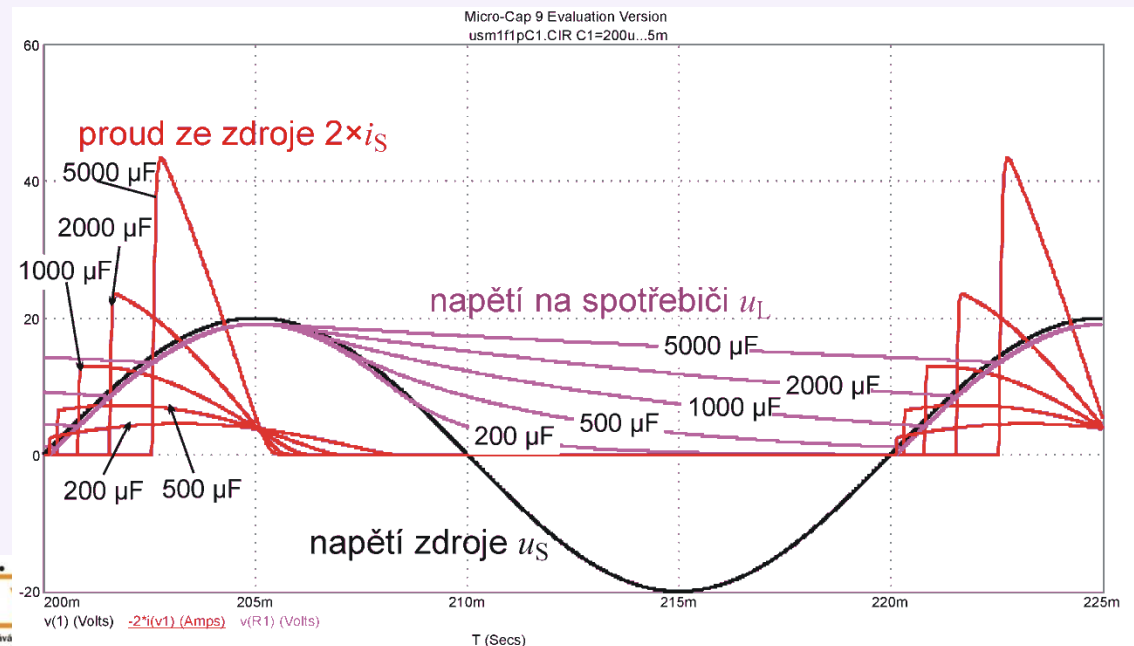
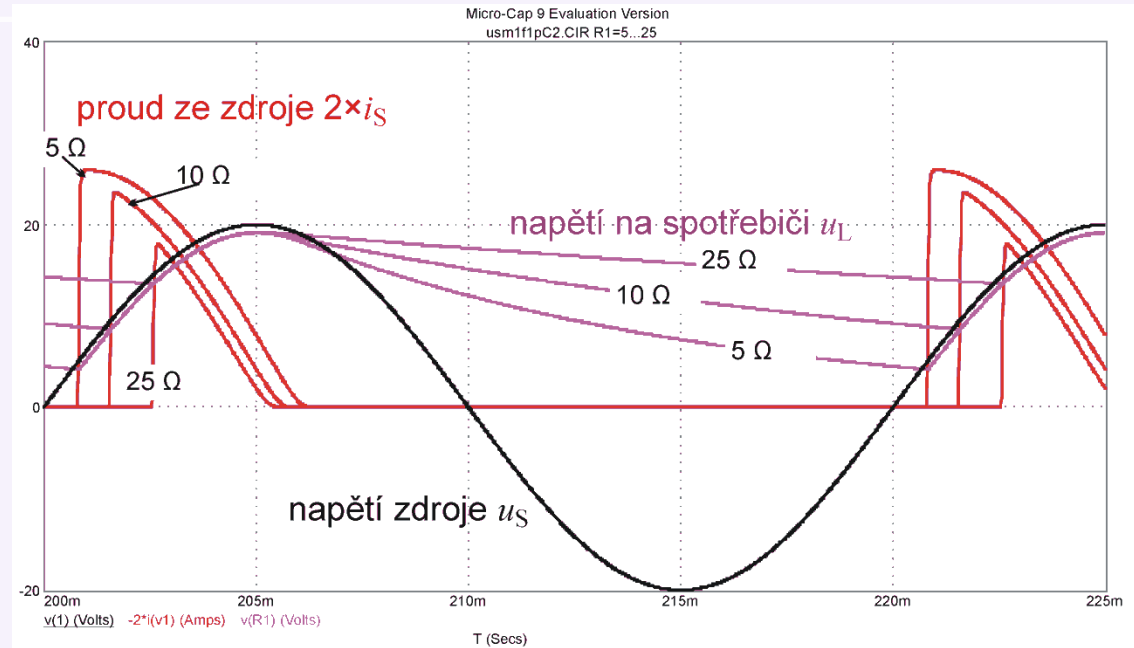
- vliv parametrů R a C na časový průběh napájecího proudu usměrňovače

– změna R

- velký vliv na zvlnění
- malý vliv na maximální hodnotu odebíraného proudu

– změna C

- velký vliv na zvlnění i maximální hodnotu odebíraného proudu

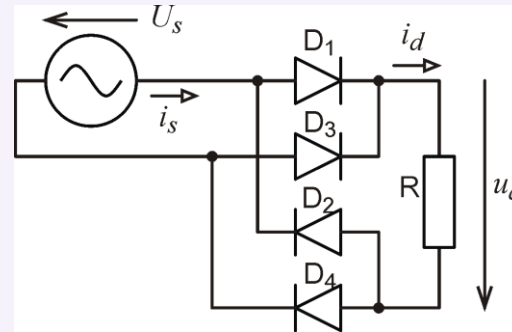
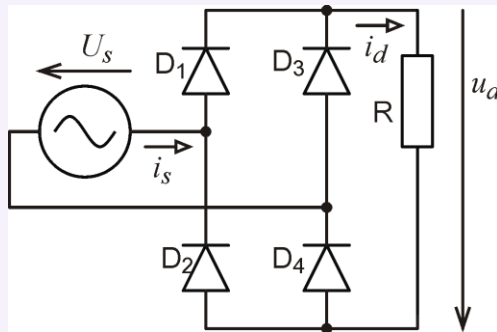




• Jednofázové dvoupulzní zapojení usměrňovače

- využívá se záporná půlvlna střídavého napájení, u jednopulzního nevyužitá, eliminace ss. složky a sudých harmonických napájecího proudu

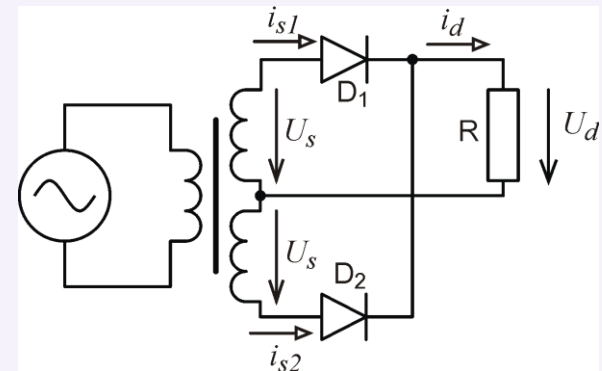
- můstkové zapojení, úbytek napětí na 2 diodách v sérii



- uzlové zapojení (př.), zvláštní transformátor, úbytek napětí na jedné diodě v sérii (uzlové zapojení vhodná pro menší napětí a větší proud)

- Velikost ss. složky napětí na výstupu
(bez kapacitoru na výstupu)

$$U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_s = 0,900U_s$$

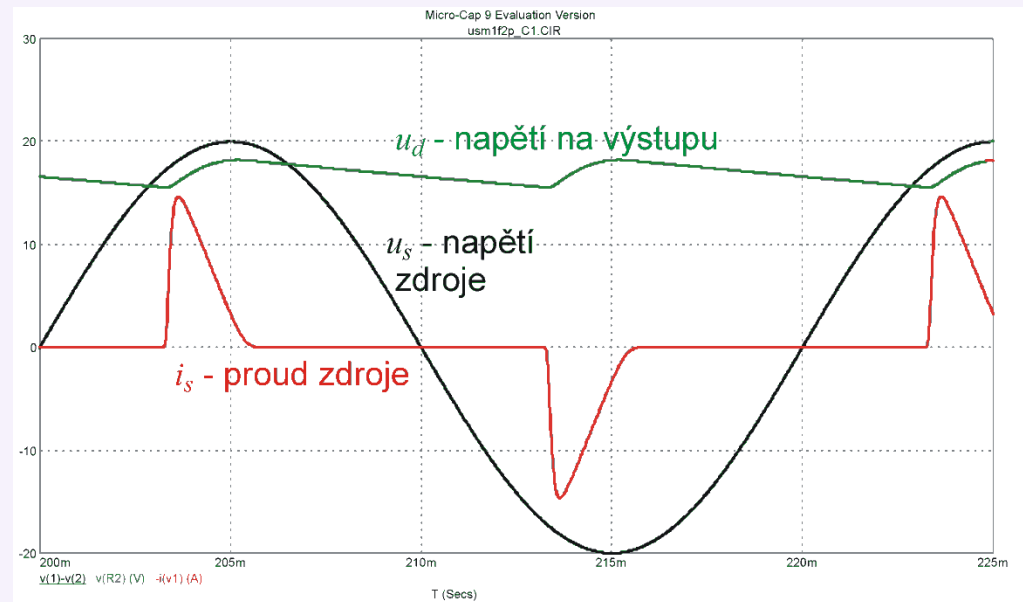
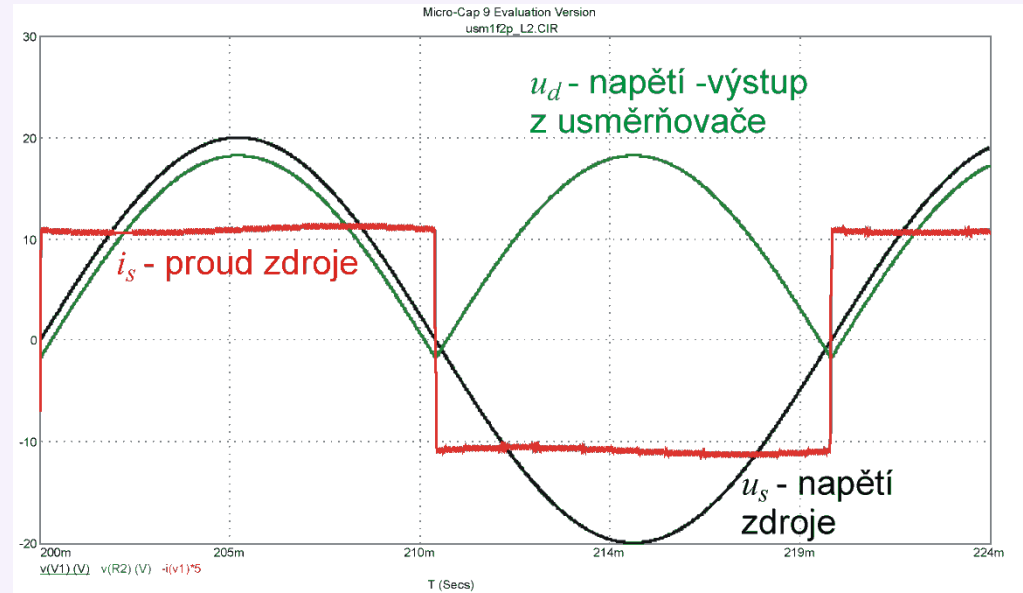
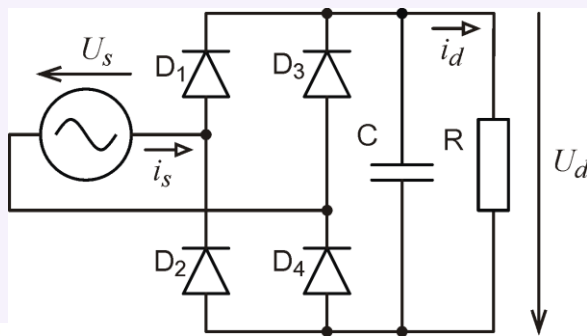
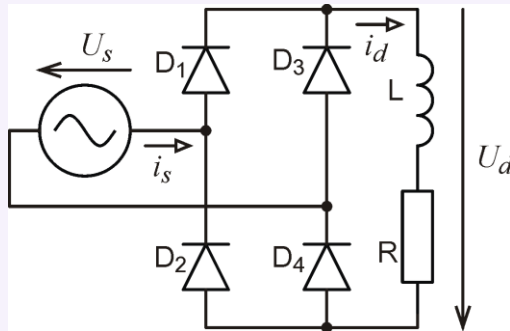




Usměrňovače



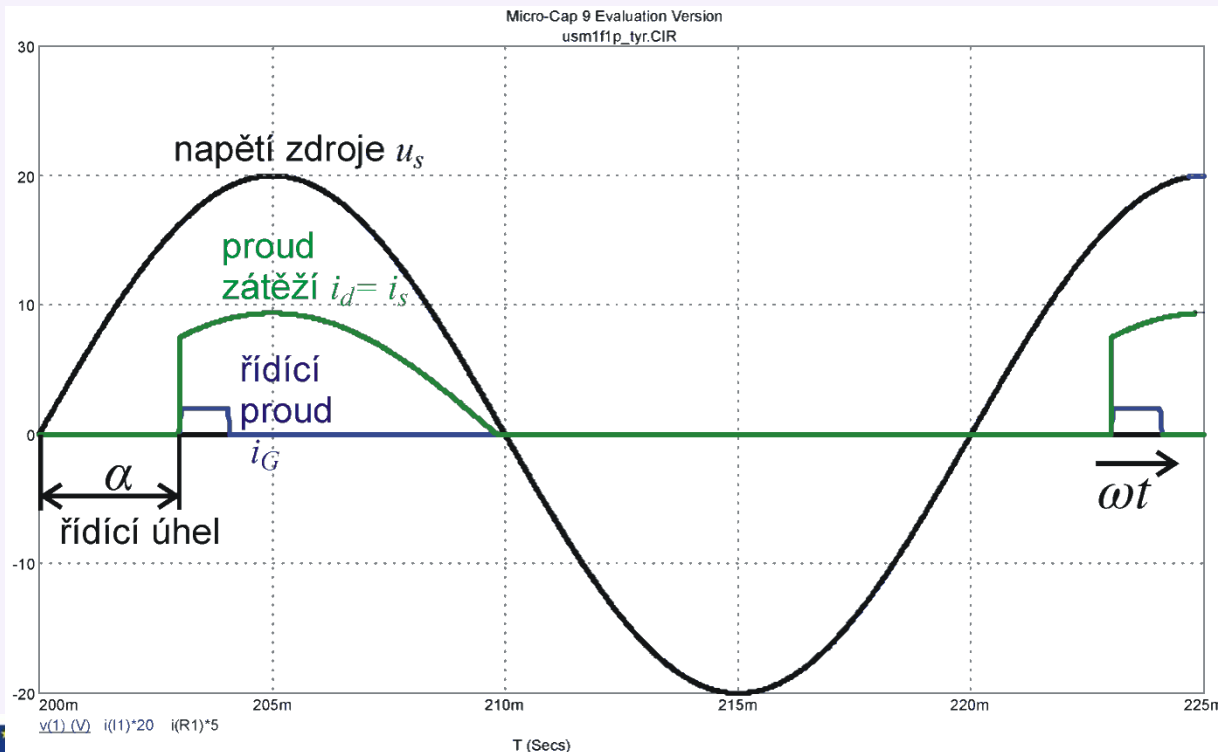
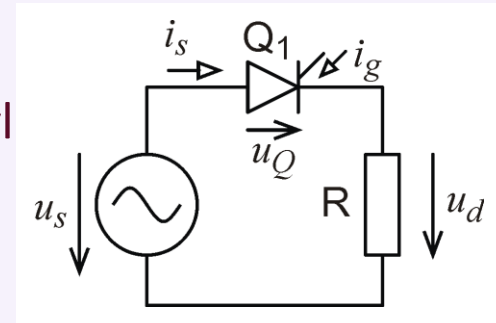
- Jednofázové dvoupulzní usměrňovače s L a C vyhlazením
 - nulová dioda není při LC zátěži nutná





- Řízené usměrňovače - 1fázový, jednopulzní
 - řídicí prvek – tyristory komutované ze sítě
 - závěrný přechod tyristoru nepropouští opačnou půlvi
 - střední výstupní napětí
 - řídicí úhel – viz průběh

$$U_{AV} = \frac{U_{SM}}{2\pi} (\cos \alpha + 1)$$

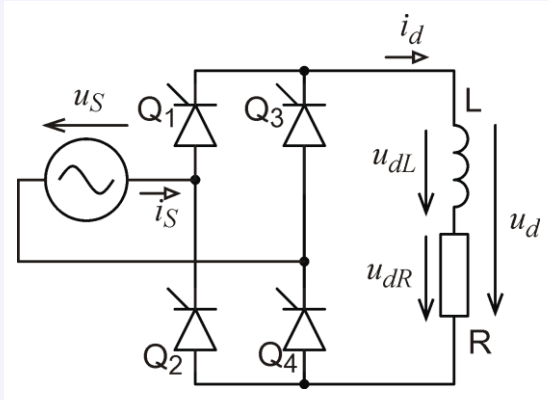




• Řízené dvoupulzní usměrňovače - vliv nulové diody na výstupní napětí

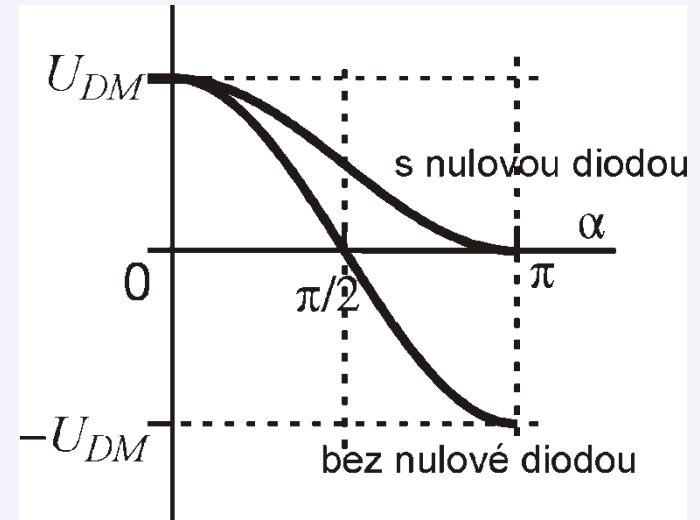
– bez nulové diody

- energie oběma směry, možnost invertorového chodu podle řídicího úhlu



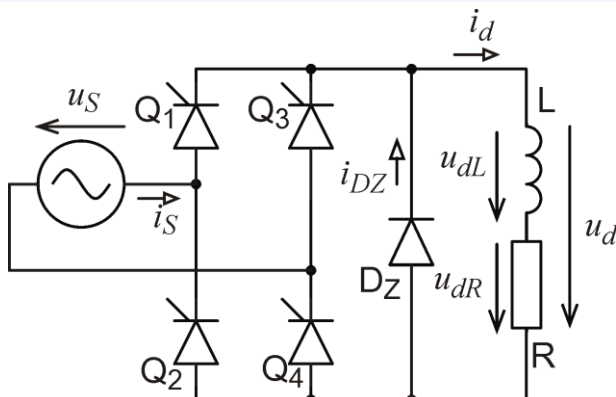
$$U_D = \frac{2U_{SM}}{\pi} \cos \alpha$$

při invertorovém chodu musí být na výstupu vyšší napětí než na vstupu



– s nulovou diodou

- energie proudí jen do zdroje

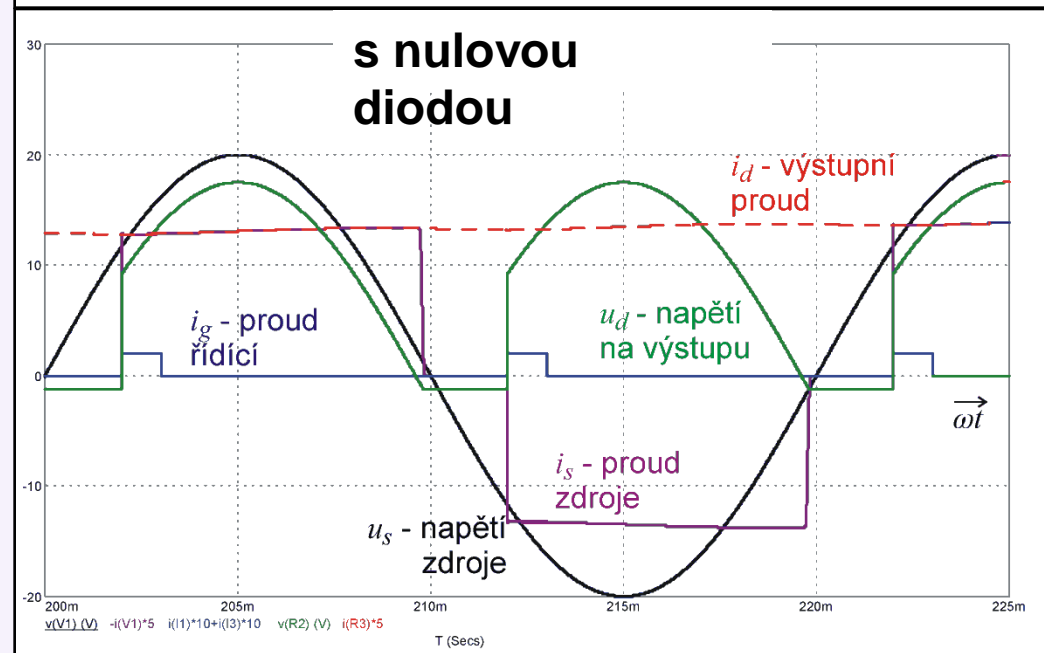
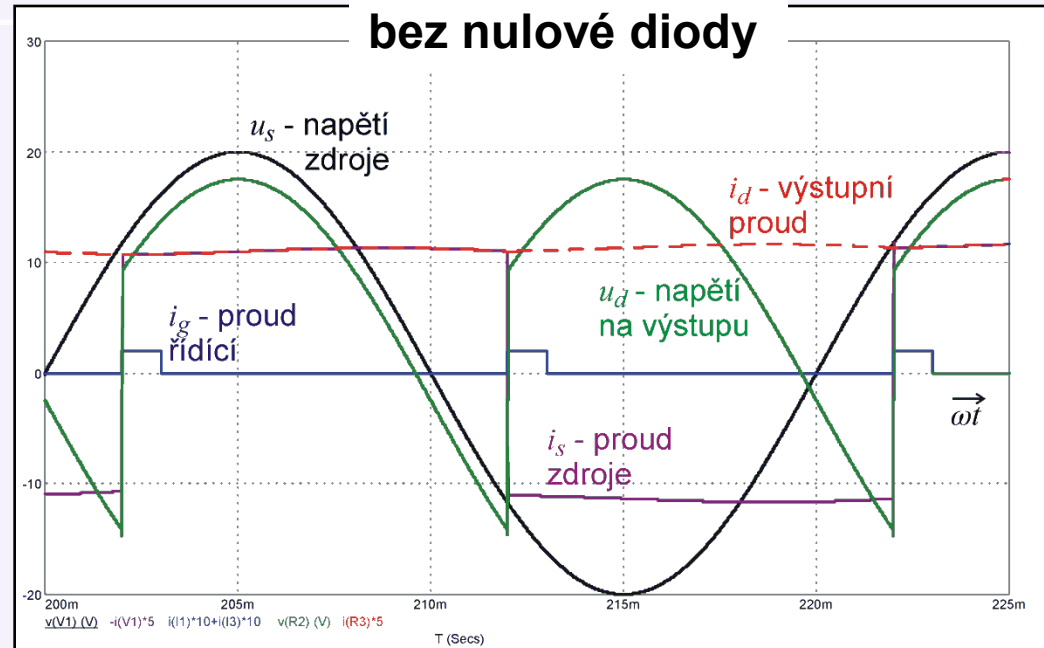


$$U_D = \frac{U_{SM}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$



Usměrňovače

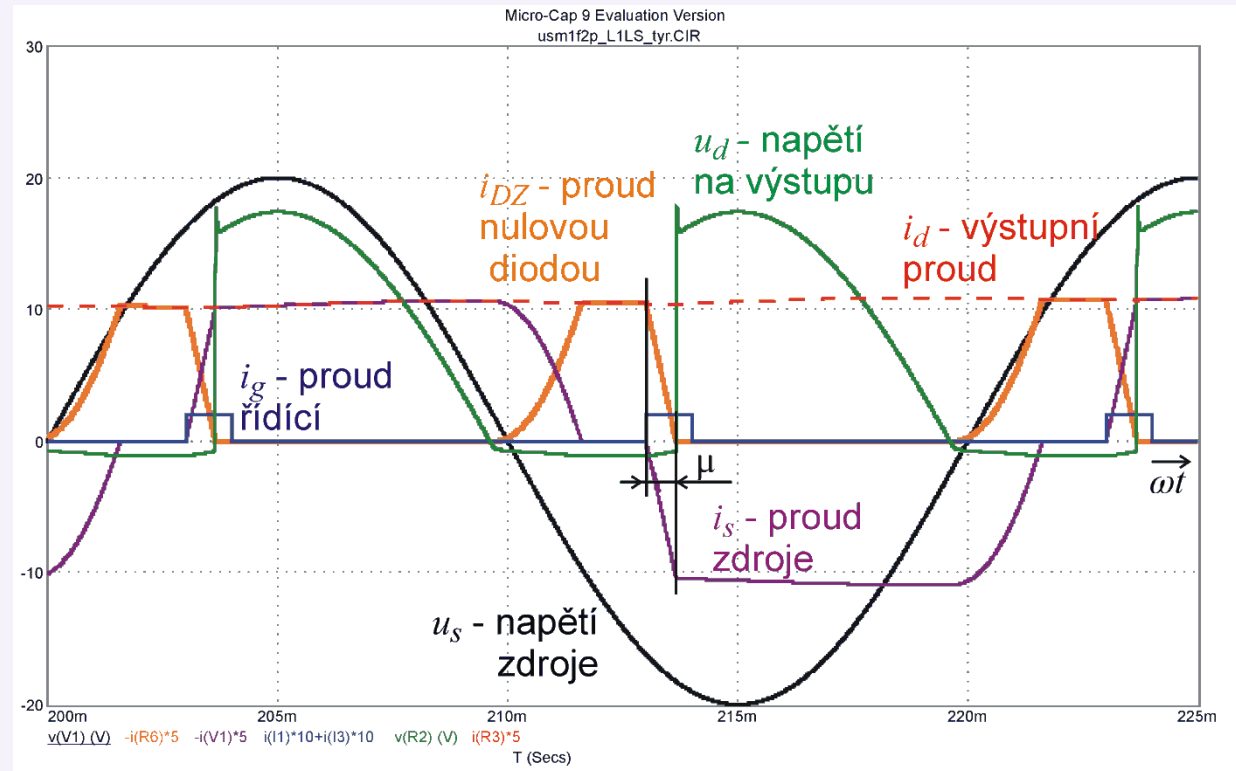
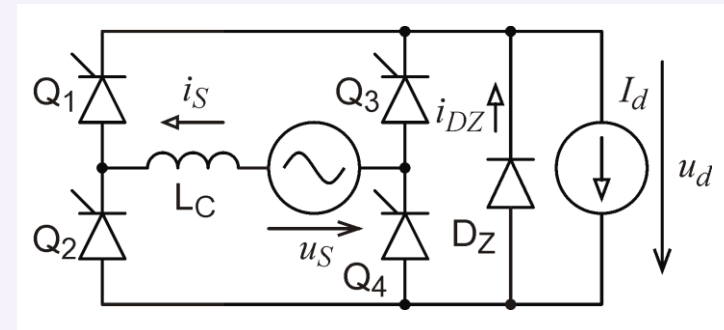
- Řízené usměrňovače s induktivní zátěží – dvoupulzní – časové průběhy
 - některé tyristory je možné nahradit diodami





- Vliv indukčnosti sítě na řízený dvoupulzní usměrňovač

- zpoždění napětí na výstupu, zvyšuje se s odebíraným proudem
- způsobuje snížení výstupního napětí



$$\cos \mu = 1 - \frac{\omega L_C I_D}{U_{SM}}$$

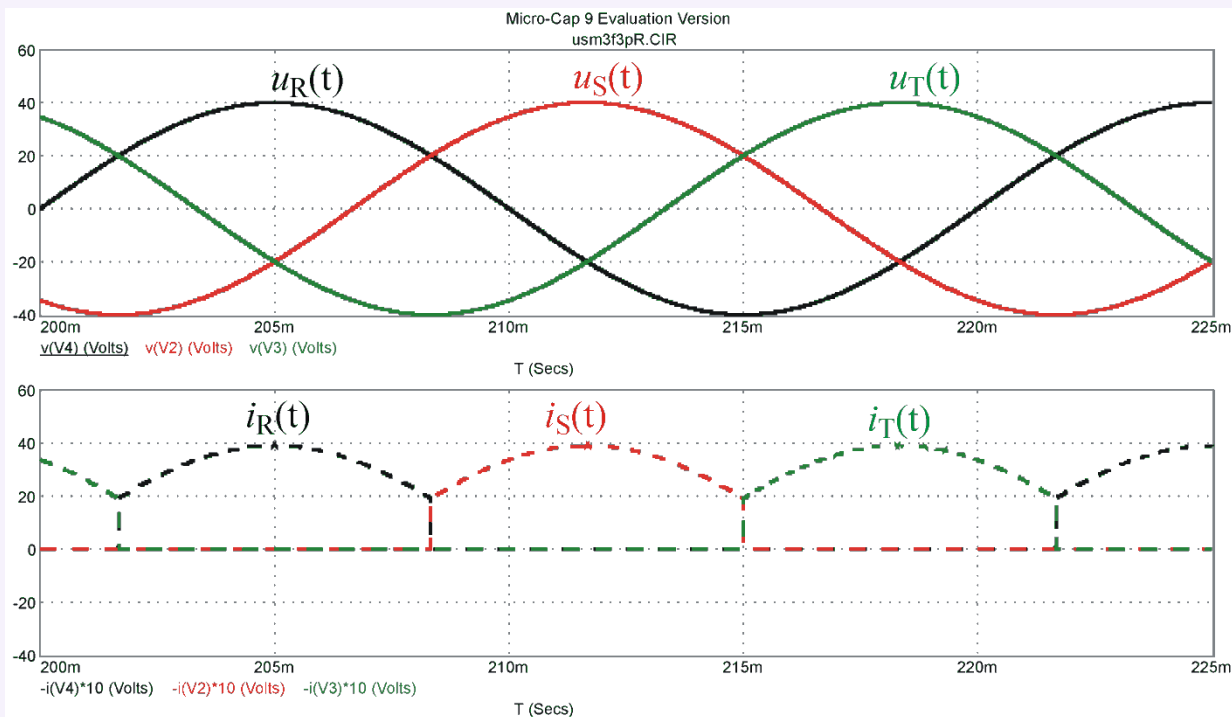
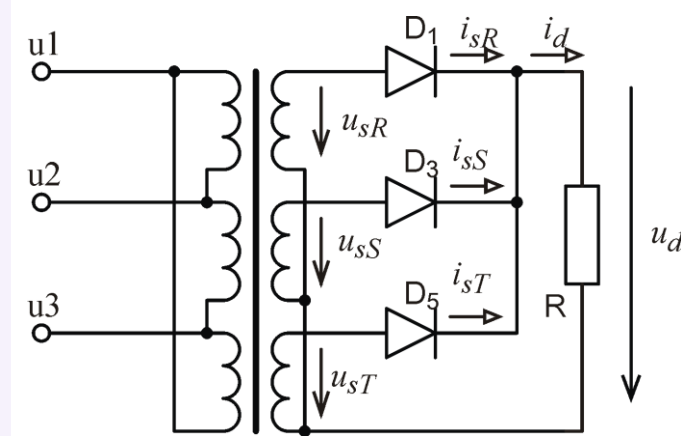
$$U_D = \frac{2U_{SM}}{\pi} \left(\cos \alpha - \frac{\omega L_C I_D}{U_{SM}} \right)$$



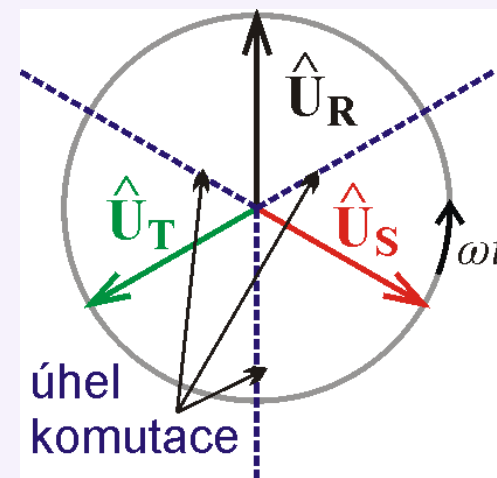
Usměrňovače



- trojfázové usměrňovače – 3pulzní, uzlové zapojení
 - větší zvlnění, transformátor je zatěžován ss složkou
 - každá dioda otevřena 120°
 - napětí ss složky na výst.:



$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{2\pi} U_s = 1,170 U_s$$

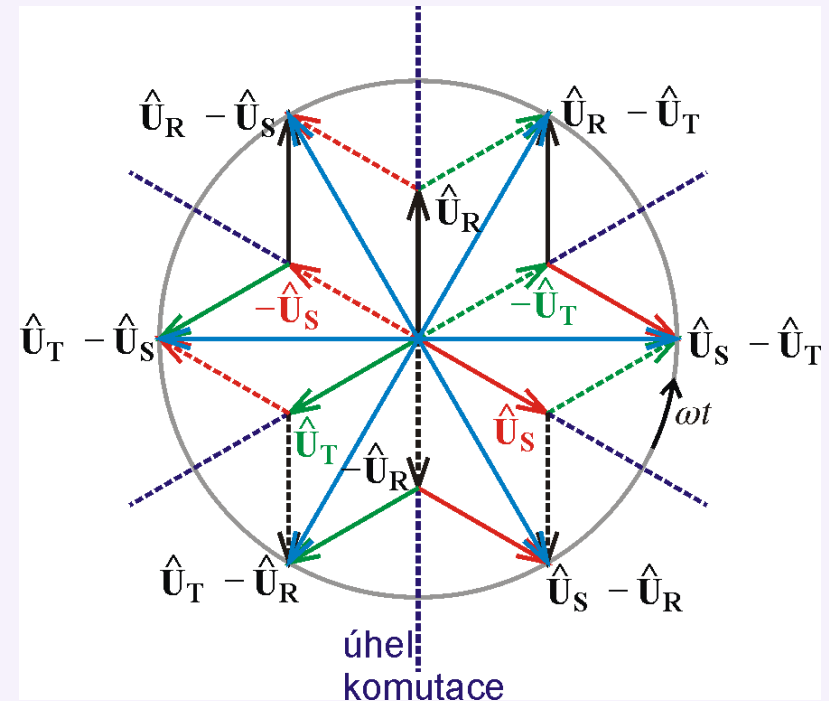
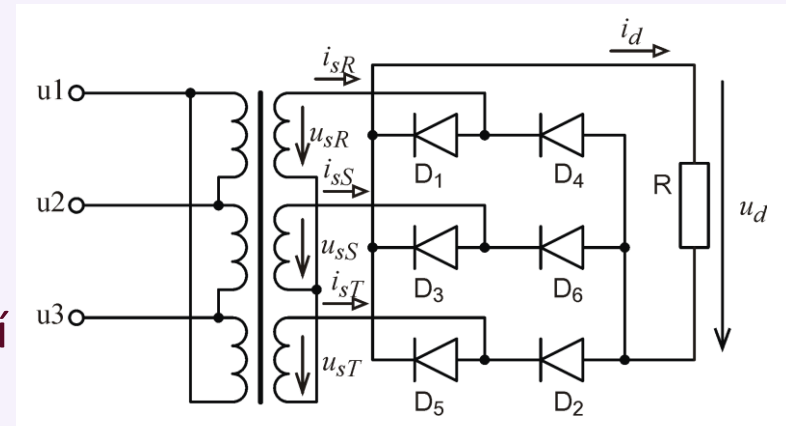




• třífázové šestipulzní můstkové zapojení

- v každé fázi prochází proud dvěma diodami, úbytek napětí, teplotní ztráty na diodách (proud prochází zároveň dvěma diodami), vhodné pro vyšší napětí a menší proudy
- úhel otevření diod -120°
- velikost ss složky napětí

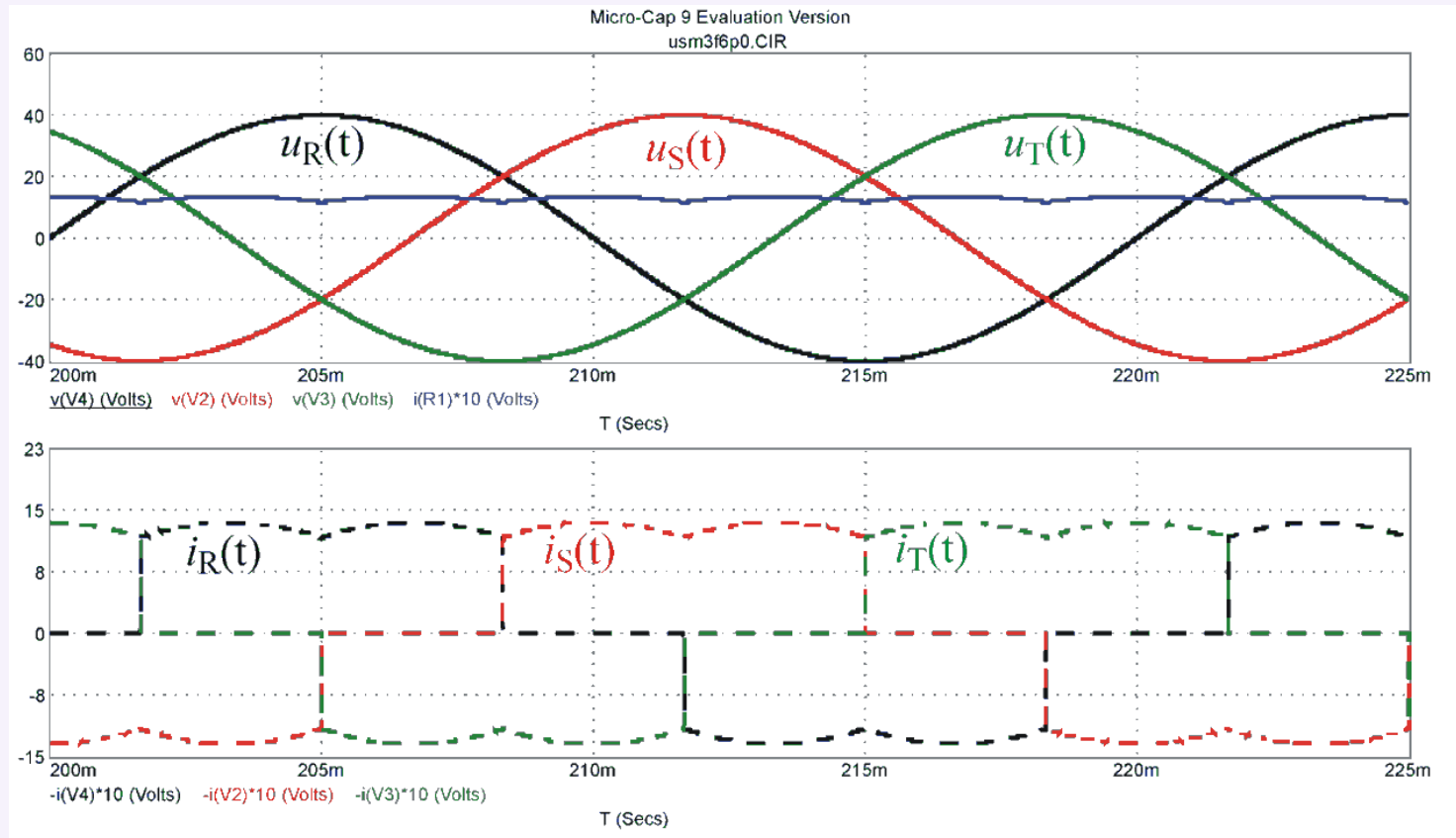
$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} U_s = 2,34U_s$$



fáz. úhel	otevřená dioda č
$0^\circ - 60^\circ$	1, 6
$60^\circ - 120^\circ$	1, 2
$120^\circ - 180^\circ$	3, 2
$180^\circ - 240^\circ$	3, 4
$240^\circ - 300^\circ$	5, 4
$300^\circ - 360^\circ$	5, 6



- třífázové šestipulzní můstkové zapojení – časový průběh





Usměrňovače



• třífázové uzlové šestipulzní zapojení

- uzlové zapojení (hvězdicové)
 - pro větší proudy a menší napětí
 - horší využití diod a vinutí transformátoru (otevřeno jen 60°)

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_s = 1,35U_s$$

- uzlové zapojení s nulovou tlumivkou

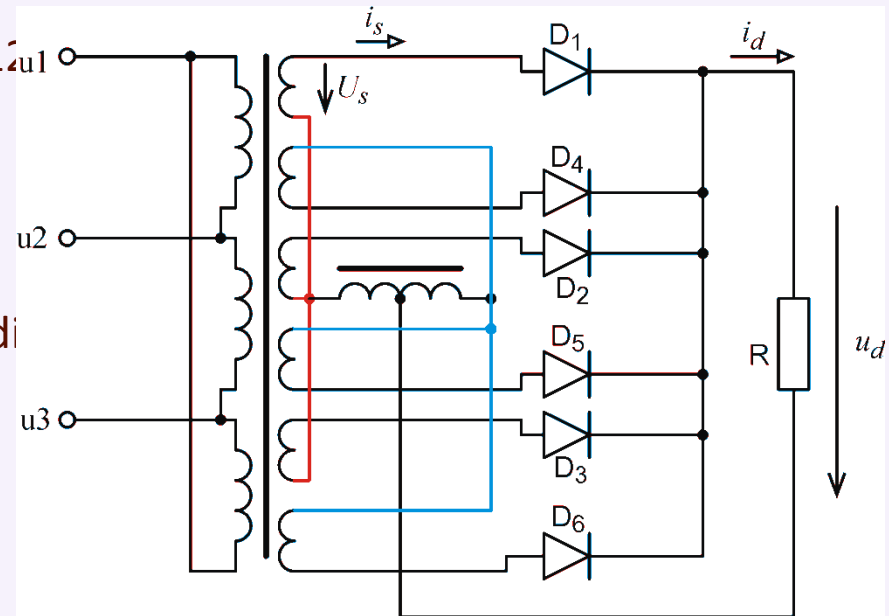
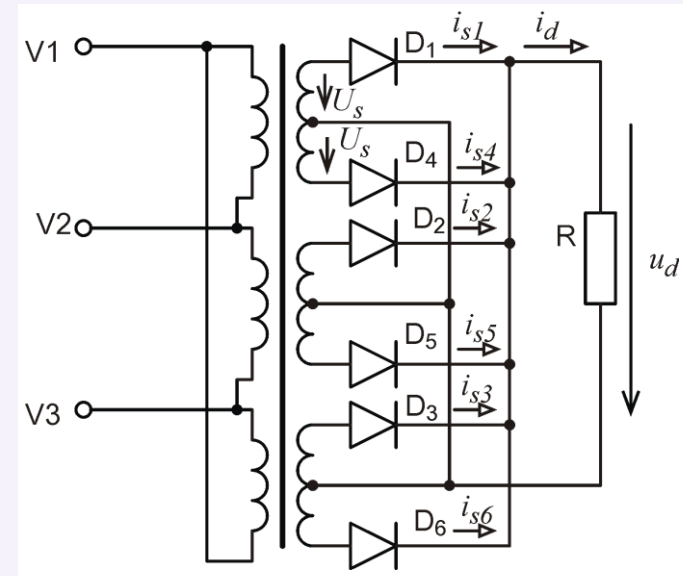
- pro menší napětí a větší proudy
- lepší využití diod a transformátoru (120°)
- pro

$$R/6\omega L < 1$$

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{2\pi} U_s = 1,170U_s$$

- pro hvězdicové zapojení

$$U_{d0} = 1,35U_s$$





- Řízené třífázové usměrňovače

- náhrada diod za tyristory

- řízení - $0 < \alpha < \frac{2\pi}{3}$

- třípulzní uzlový – výstupní stejnosměrné napětí

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) \right]$$

- šestipulzní můstkový

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{6} \right) \right]$$

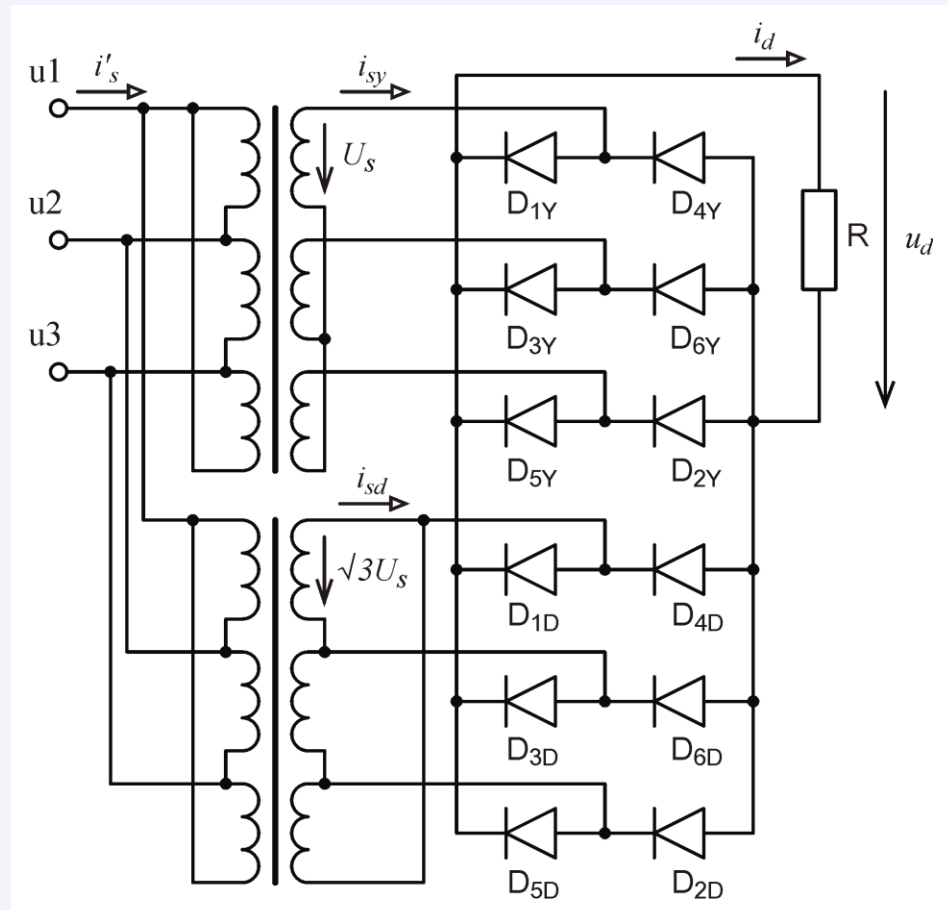
- invertorový chod usměrňovače

- aktivní zátěž (brzděný motor)

- tok energie do sítě

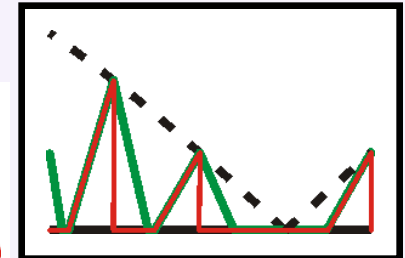
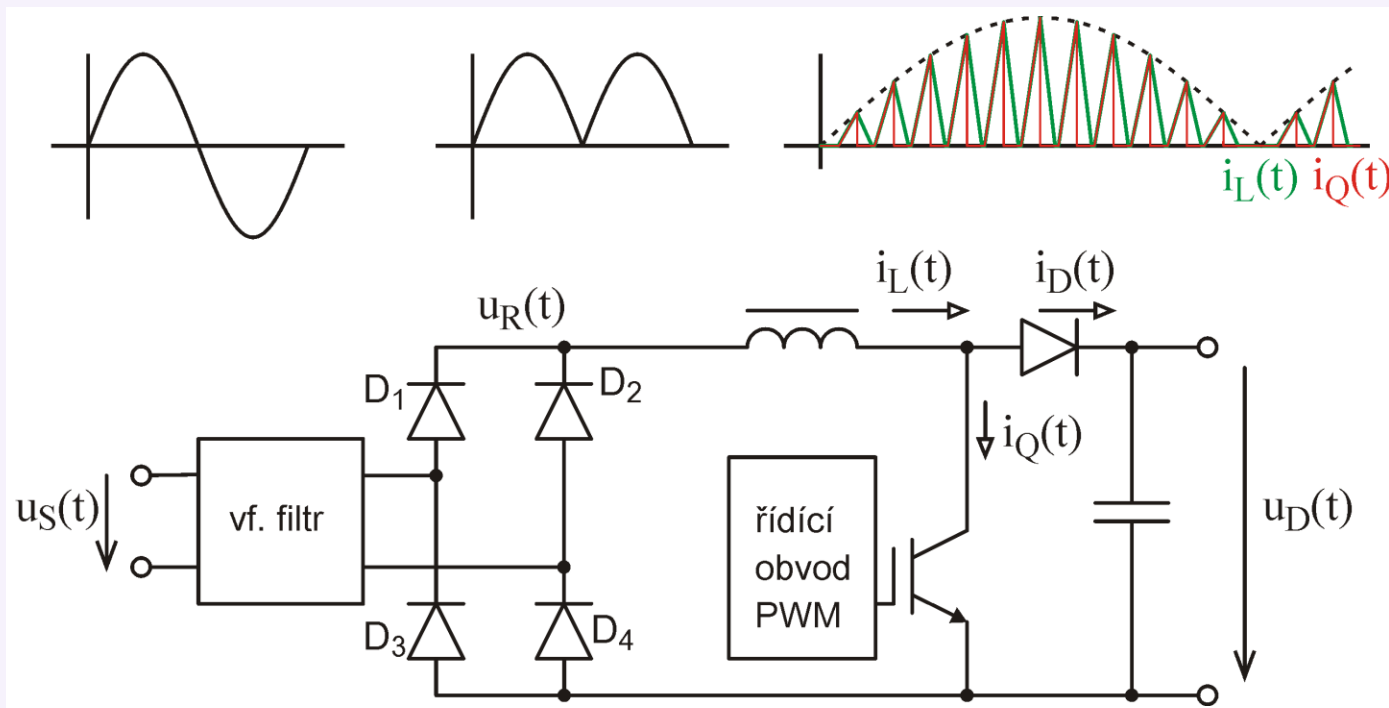


- třífázové dvanáctipulzní můstkové zapojení
 - vynechání mnoha harmonických – důsledek Amplitudového zákona
 - úhel otevření 60°
 - speciálně řešený transformátor
 - napájení trakčních soustav velkého výkonu (dražní trakce)





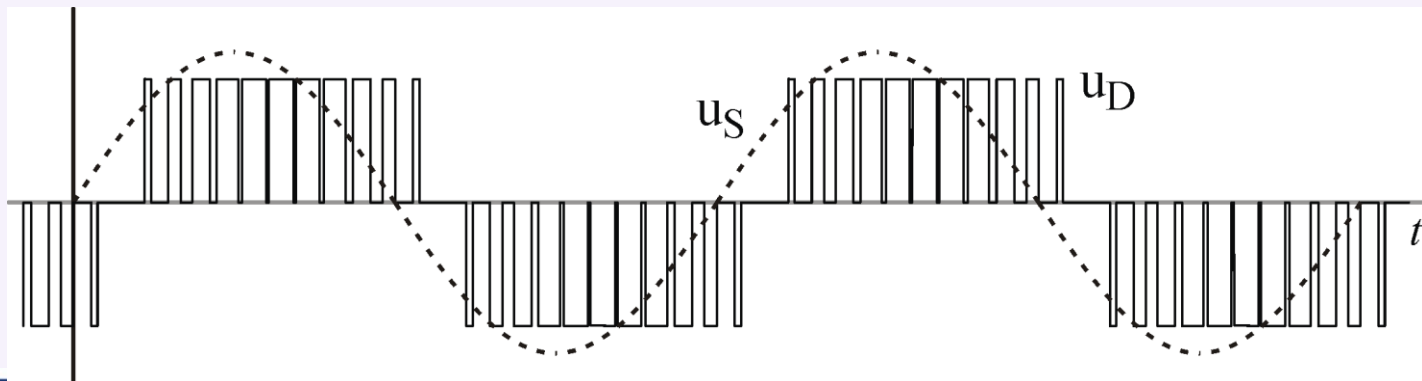
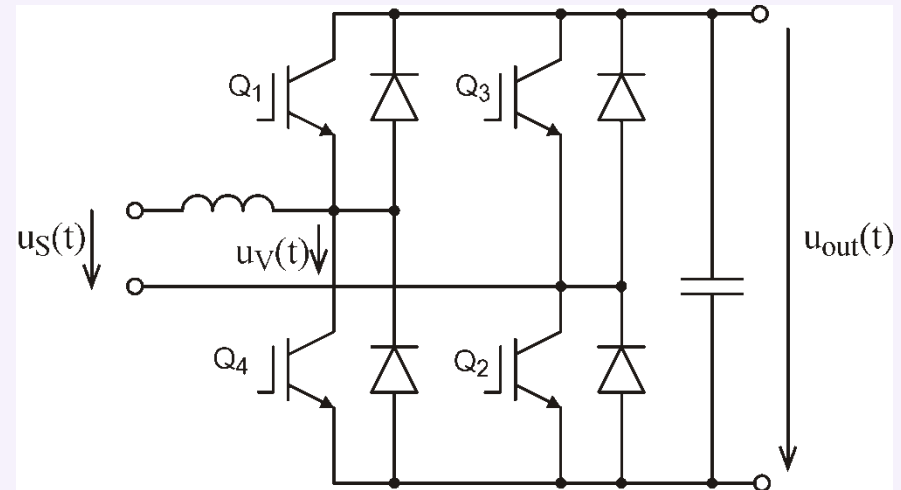
- Usměrňovače komutované ze sítě s obvodem PFC (Power Factor Corrector)
 - pro dvoupulzní jednofázové usměrňovače
 - doplněn ss měnič s pulsusosovým odběrem středního proudu
 - odrušovací filtr na vstupu
 - účinně potlačené harmonické nižšího řádu
 - zdroje pro nepřímé měniče





- Spínané (pulzní) usměrňovače

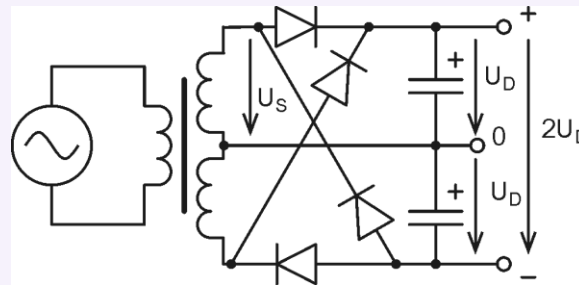
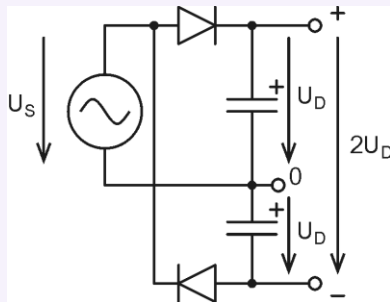
- místo diod/tyristorů - plně celořízené prvky (s řízeným vypnutím)
- komutace – vlastní
- při PWM režimu – odběr jen první harmonické proudu (s použitým vstupním filtrem)
- oba směry vedení energie (rekuperace)



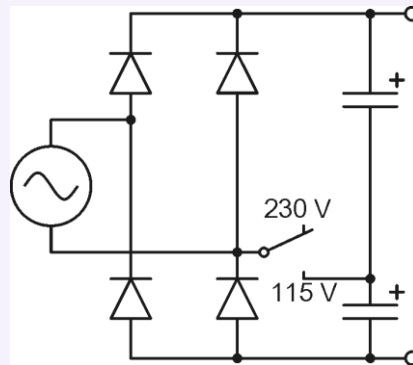


- Násobiče

- poskytují vyšší ss napětí, než je U_{SM}
- upravený 1 fázový 2 pulzní usměrňovač



- příklad použití násobiče ve zdroji pro PC, dvě napěťové úrovně napájení



- kaskádní násobič, řazení pro zvýšení napětí

- Villardův zdvojovač

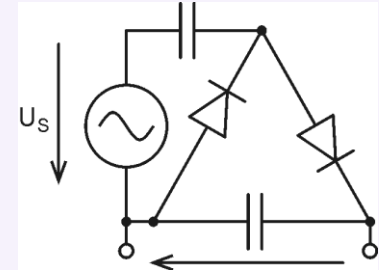
- výstupní napětí (bez úbytku napětí na diodách)

$$U_{out} = 2U_{sM} = U_{spp}$$

- zatížený:

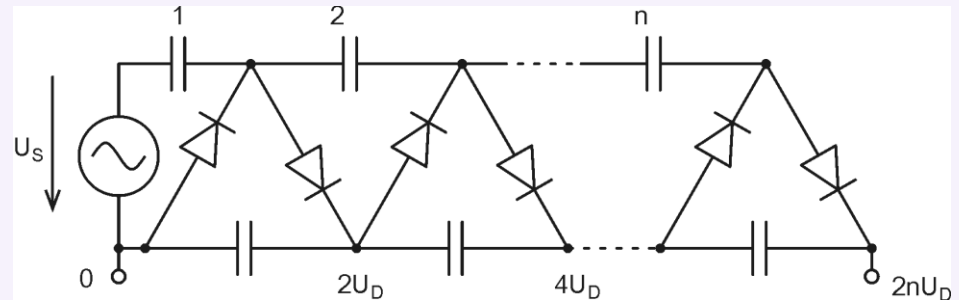
$$U_{out} = 2U_{sM} - \Delta U$$

$$\Delta U = \frac{I_{out}}{f \cdot C}$$



- úprava do kaskády

- možnost optimalizace :
větší hodnoty kapacit
na straně zdroje



- výstupní napětí bez zátěže

$$U_{out} = 2nU_{sM} - \Delta U$$

$$\Delta U = \frac{I_{out}}{f \cdot C} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right)$$



- Villardův zdvojovač – napětí na uzlech násobiče
 - na sudých uzlech minimální zvlnění, na lichých vysoké
 - průběhy napětí při: $U_{SM} = 20 \text{ V}$ ($U_{S(ef)} = 14,14 \text{ V}$)
 - $U_{out} > 38 \text{ V}$ (podle zátěže, napětí snižuje také úbytek U_F na diodách)

