

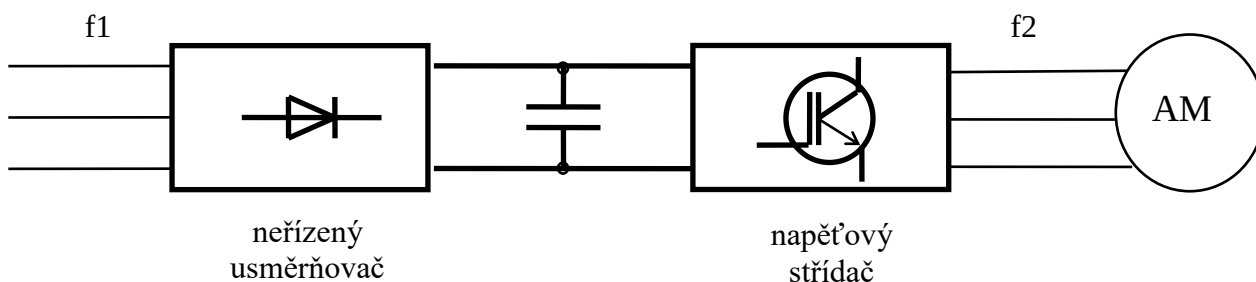


ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

3 Harmonické proudy nepřímých měničů kmitočtu s napět'ovým střídačem

V současné době se používají nejvíce měniče v uspořádání, které je znázorněno na obr. 1. Na vstupu měniče je neřízený usměrňovač, což je konstrukčně i ekonomicky nejvýhodnější. Ve stejnosměrném meziobvodu je velký kondenzátor. Ten lze považovat za zátěž pro usměrňovač a současně jako zdroj energie pro napět'ový střídač. Jak bude dále v této kapitole ukázáno, toto zapojení vede na vysoké hodnoty harmonických proudů, odebíraných měničem z napájecí sítě. Proto jsou dnes obvody doplňovány indukčnostmi, které mají za úkol snížit hodnoty harmonických proudů. Při zjišťování průběhu proudu, který je měničem odebírán ze sítě, si můžeme obvod představit jako usměrňovač, pracující do kapacitní zátěže. Přestože použití usměrňovače, pracujícího do kapacitní zátěže je velmi dlouho používané, nebyla tomuto problému věnována dostatečná pozornost. Je to způsobeno patrně tím, že se jednalo o velmi malé výkony při napájení slaboproudých zařízení. Teprve s nárůstem využití měničů kmitočtu s napět'ovým meziobvodem se tato problematika "zvýrazňuje", neboť se zvyšují jednotlivé výkony těchto měničů a jejich počty v provozech.



obr. 1– Struktura nepřímého měniče kmitočtu s napět'ovým střídačem

Harmonické proudy měniče kmitočtu s napětovým střídačem při zjednodušených podmínkách

Zjistit analyticky velikost vyšších harmonických ze skutečného průběhu proudu, který je měničem odebírán ze sítě, je poměrně obtížné, zejména pokud žádáme odvození “použitelného” vzorce nebo dokonce analogii s amplitudovým zákonem. Proto provedeme nejprve zjednodušení odebíraného průběhu proudu dle obr.1 pro jednofázový usměrňovač nebo dle obr 3 pro trojfázové spojení.

Harmonická analýza proudu jednofázového můstku

Proud sítě i_s definujeme na intervalu $T/2$ následovně:

$$i_s(\omega t) = 0 \quad \text{pro} \quad \omega t \in (0, \varphi)$$

$$i_s(\omega t) = 0 \quad \text{pro} \quad \omega t \in (\varphi + d, \pi)$$

$$i_s(\omega t) = I_{Sm} \quad \text{pro} \quad \omega t \in (\varphi, \varphi + d)$$

Protože je funkce lichá, stačí počítat pouze koeficienty s funkcí sinus. Platí:

$$b_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_s(\omega t) \cdot \sin(h\omega t) d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+d} I_{Sm} \cdot \sin(h\omega t) d\omega t = -\frac{2I_{Sm}}{\pi h} \cos(h\omega t)_{\varphi}^{\varphi+d}$$

Úpravou dostaneme:

$$b_h = \frac{4I_{Sm}}{\pi h} \cos(h\varphi) \quad h \dots \text{liché}$$

Dosazením za $\varphi = \frac{d - \pi}{2}$ se upraví vztah na:

$$b_h = \frac{4I_{Sm}}{\pi h} \sin \frac{hd}{2} \cdot \sin \frac{h\pi}{2}$$

Vyjádření proudu Fourierovou řadou je pak:

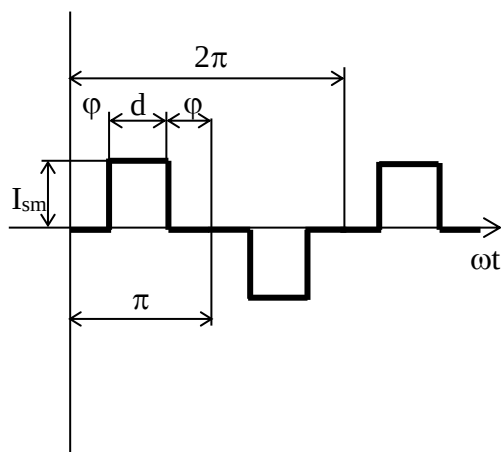
$$i_s(\omega t) = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{4I_{Sm}}{\pi h} \sin \frac{hd}{2} \cdot \sin \frac{h\pi}{2} \cdot \sin(h\omega t)$$

Pro první, základní harmonickou tohoto proudu pak platí:

$$I_1 = \frac{4I_{Sm}}{\pi} \sin \frac{d}{2} = 1,273 \cdot I_{Sm} \cdot \sin \frac{d}{2}$$

a h-tá harmonická

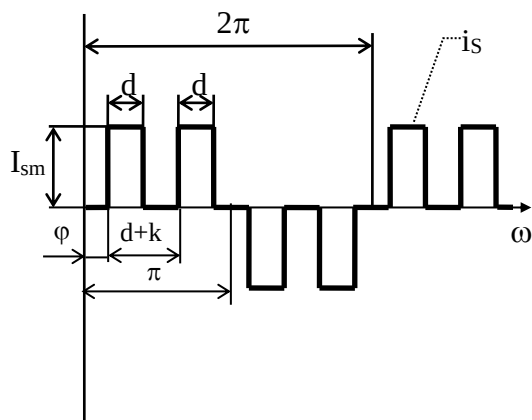
$$I_h = \frac{1}{h} I_1 \cdot \frac{\sin \frac{hd}{2}}{\sin \frac{d}{2}}$$



obr. 2- Zjednodušený průběh proudu odebíraného jednofázovým usměrňovačem ze sítě.

Harmonická analýza proudu trojfázového můstku

Provedeme nyní podobnou analýzu jako v případě jednofázového usměrňovače. Zjednodušený průběh proudu, který je odebíráván měničem ze sítě, je naznačen na obr. 3.3.



obr. 3. – Zjednodušený průběh proudu odebíraného trojfázovým usměrňovačem ze sítě.

Proud sítě definujeme opět podobným způsobem jako v předchozí kapitole.

$$i_s(\omega t) = 0 \quad \text{pro} \quad \omega t \in (0, \varphi) \quad \text{a} \quad \omega t \in (\varphi + d, \varphi + d + k) \quad \text{a} \quad \omega t \in (\varphi + 2d + k, \pi)$$

$$i_s(\omega t) = I_{sm} \quad \text{pro} \quad \omega t \in (\varphi, \varphi + d) \quad \text{a} \quad \omega t \in (\varphi + d + k, \varphi + 2d + k)$$

Funkce je lichá, Fourierovy koeficienty stačí počítat pro funkci sinus:

$$b_h = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i_s(\omega t) \sin(h\omega t) d\omega t = \frac{2I_{sm}}{\pi} \left[\int_{\frac{\pi}{2} - \frac{k}{2}}^{\frac{\pi}{2} - \frac{k}{2} + d} \sin(h\omega t) d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2} + \frac{k}{2}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{k}{2} + d} \sin(h\omega t) d\omega t \right] =$$

$$= -\frac{2I_{sm}}{h\pi} \left[\cos(h\omega t) \Big|_{\frac{\pi}{2} - \frac{k}{2}}^{\frac{\pi}{2} - \frac{k}{2} + d} + \cos(h\omega t) \Big|_{\frac{\pi}{2} + \frac{k}{2}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{k}{2} + d} \right]$$

Dalšími úpravami dostaneme:

$$b_h = -\frac{4I_{Sm}}{h\pi} \left[\sin\left(\frac{hk}{2}\right) - \sin\left(\frac{hk}{2} + hd\right) \right] \cdot \sin \frac{h\pi}{2}$$

Protože můžeme předpokládat symetrickou síť, je u 3 fázového můstku $d + k = 60^\circ$ a platí:

$$b_h = \frac{8I_{Sm}}{\pi h} \cdot \sin \frac{hd}{2} \cdot \cos \frac{h\pi}{6} \cdot \sin \frac{h\pi}{2}$$

Vyjádření proudu Fourierovou řadou je pak:

$$i_S(\omega t) = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{8I_{Sm}}{\pi h} \sin \frac{hd}{2} \cdot \sin \frac{h\pi}{2} \cdot \cos \frac{h\pi}{6} \cdot \sin(h\omega t)$$

Pro první, základní harmonickou tohoto proudu pak platí:

$$I_1 = \frac{8I_{Sm}}{\pi} \sin \frac{d}{2} \cdot \cos \frac{\pi}{6} = 2,205 \cdot I_{Sm} \cdot \sin \frac{d}{2}$$

$$\text{a pro } h\text{-tou harmonickou: } I_h = \frac{1}{h} I_1 \cdot \frac{\sin \frac{hd}{2}}{\sin \frac{d}{2}}$$

Pozn.: ve výrazech není vyčíslena parita, která vznikne vyčíslením výrazu $\sin \frac{h\pi}{2}$ za h -liché. Tyto

výrazy nabývají hodnoty ± 1 . Obdobně dosazením za $\cos \frac{h\pi}{6}$ dostaneme $\pm \frac{\sqrt{3}}{2}$ pro $h = kp \pm 1$.

Zobecněný amplitudový zákon

Základní proměnnou, která ovlivňuje velikost sledované h -té harmonické je úhel vedení diody¹ usměrňovače, v obrázcích označený písmenem d . Tento úhel je závislý na schopnosti kondenzátoru pojmout a vydat energii, tj. na velikosti jeho kapacity a na množství odebírané energie. Předpokládejme nyní, že dioda bude otevřena co nejdéle, tj.

- u jednofázového můstku 2. $d = 180^\circ$
- u trojfázového můstku 2. $d = 120^\circ$.

Pak dosazením za d do vztahů a vyčíslením pro charakteristické harmonické je hodnota zlomku rovna jedné a dostáváme vzorec $I_h = \frac{1}{h} I_1$. Tento vztah je totožný se vztahem, který byl odvozen pro velikost proudu h -té harmonické odebíraného usměrňovačem pracujícím do stejnosměrného motoru. Ve všech odvozeních se jednalo o výpočet amplitudy příslušné harmonické a vzniklý

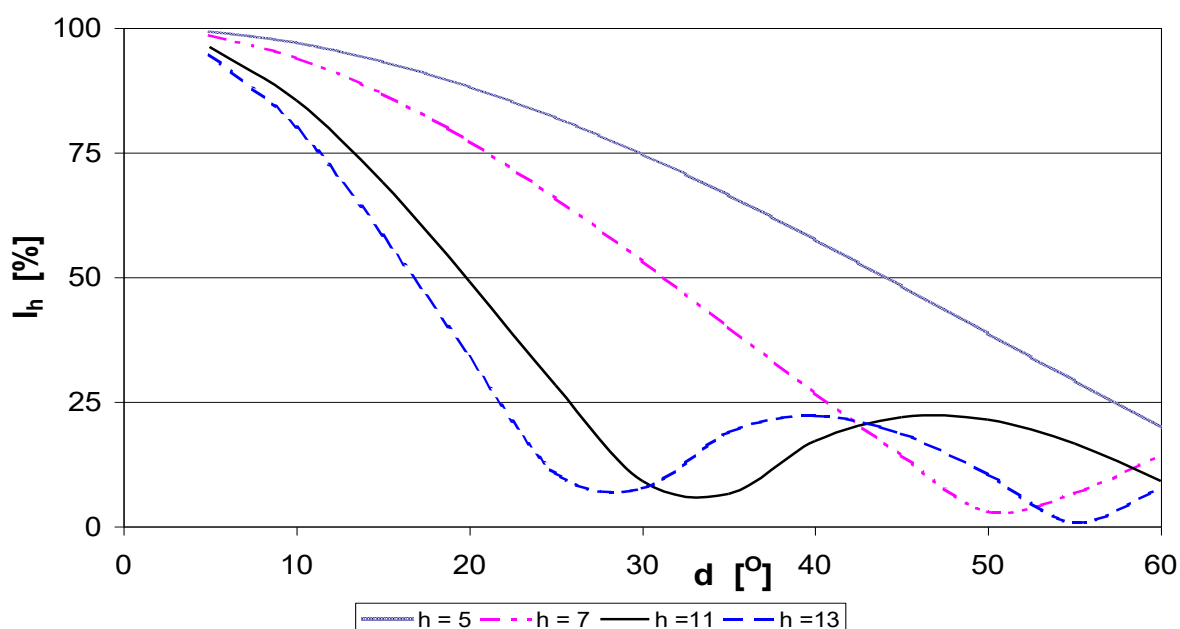
¹ Pokud použijeme jako nezávisle proměnnou časovou jednotku, je vhodnější nazývat parametr d jako *doba vedení diody*.

vzorec byl nazván jako amplitudový zákon. Protože vztah odvozený pro přerušované proudy (di-oda nevede maximální možný interval) je univerzální, můžeme vzorec

$$I_h = \frac{1}{h} I_1 \cdot \frac{\sin \frac{hd}{2}}{\sin \frac{d}{2}}$$

nazvat jako **zobecněný amplitudový zákon**.

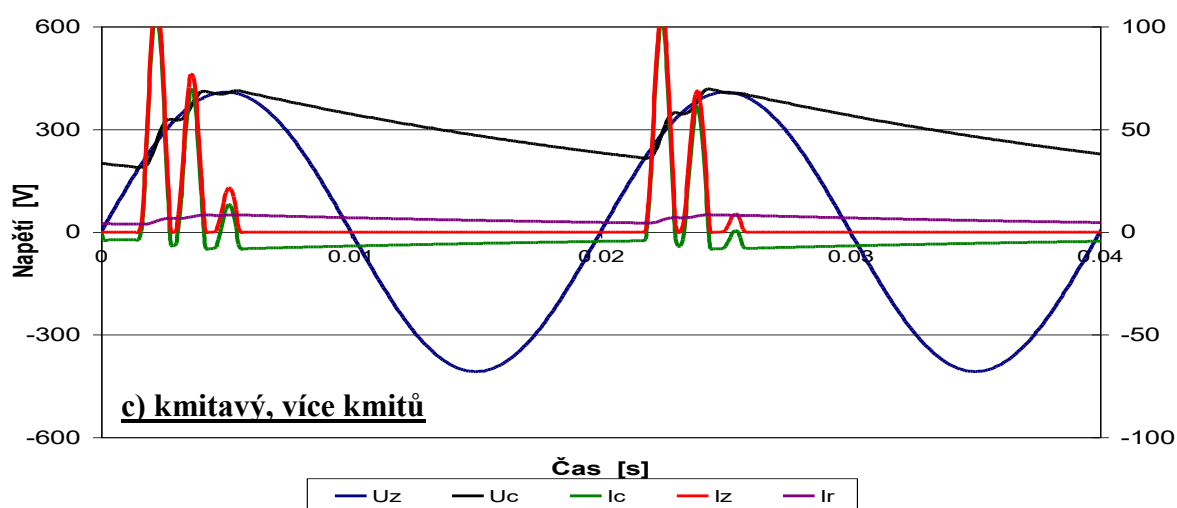
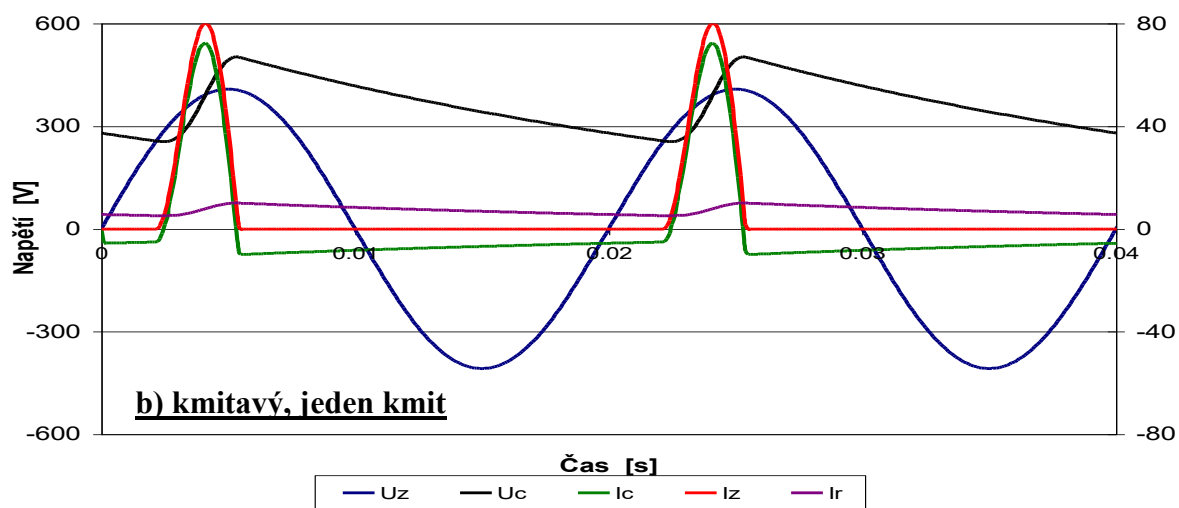
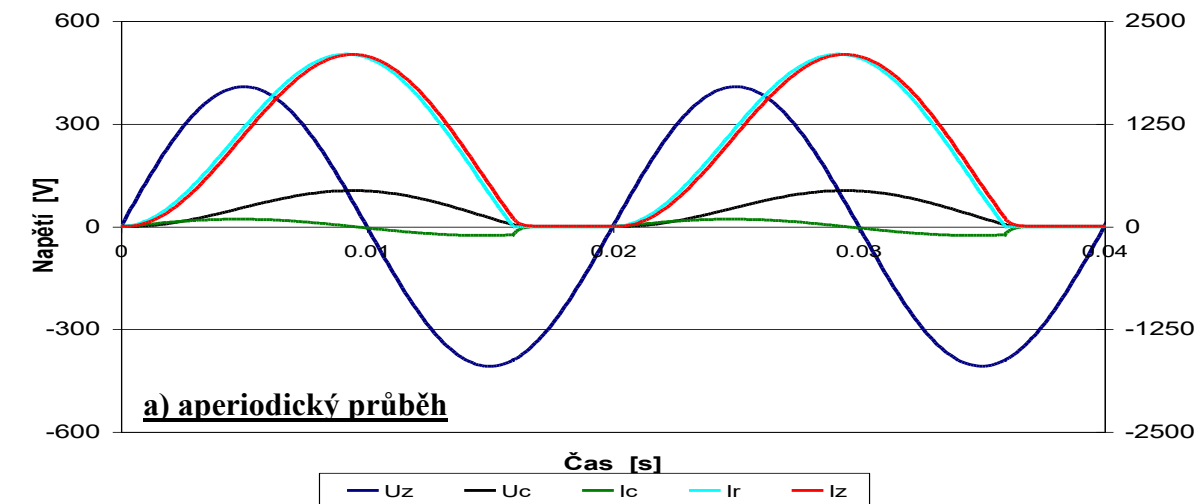
Z uvedeného výrazu dostáváme, že je velmi důležité, aby z hlediska velikosti harmonických proudů vedla dioda v můstku usměrňovače co nejdéle. To lze nejnázat dosáhnout použitím nízké kapacity kondenzátoru. Požadavek na nízkou hodnotu kapacity je ale v přímém rozporu s požadavky na nízké zvlnění a nízké kolísání střední hodnoty napětí stejnosměrném meziobvodu měniče.



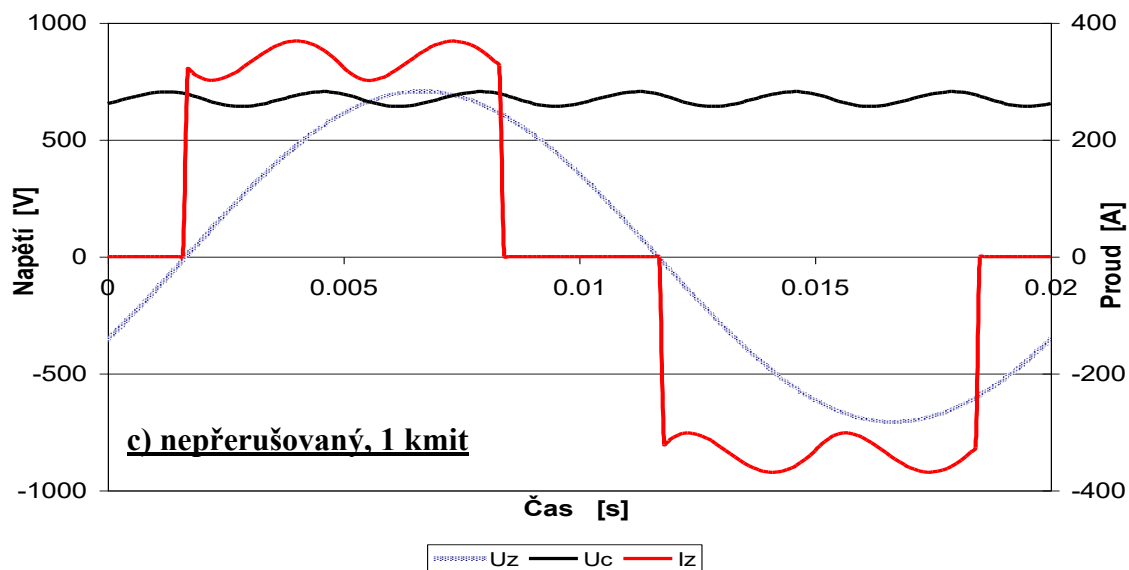
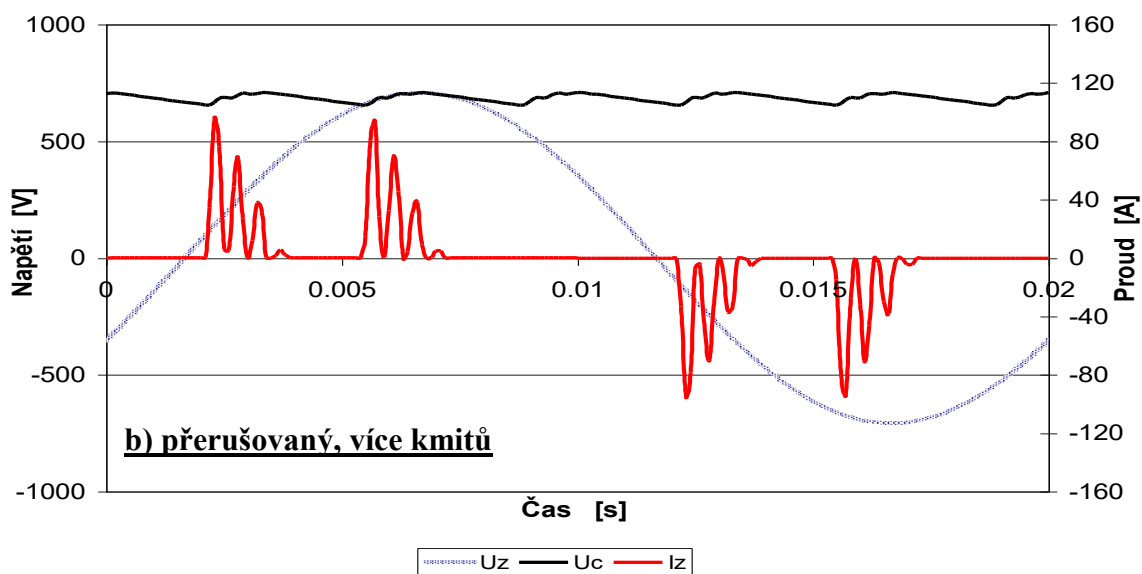
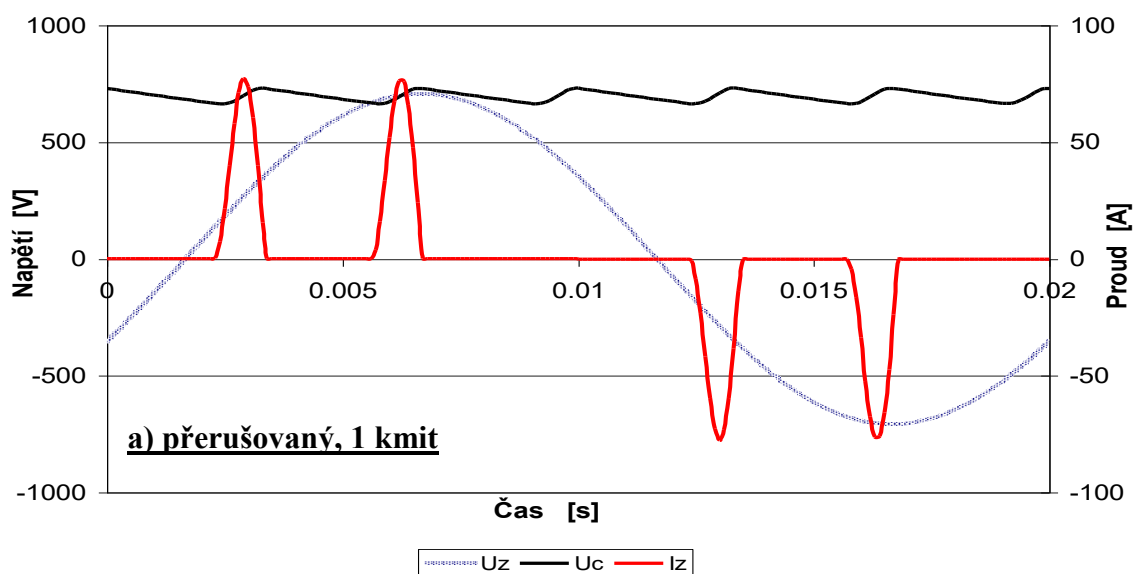
obr. 4 – Hodnoty charakteristických harmonických – zobecněný amplitudový zákon

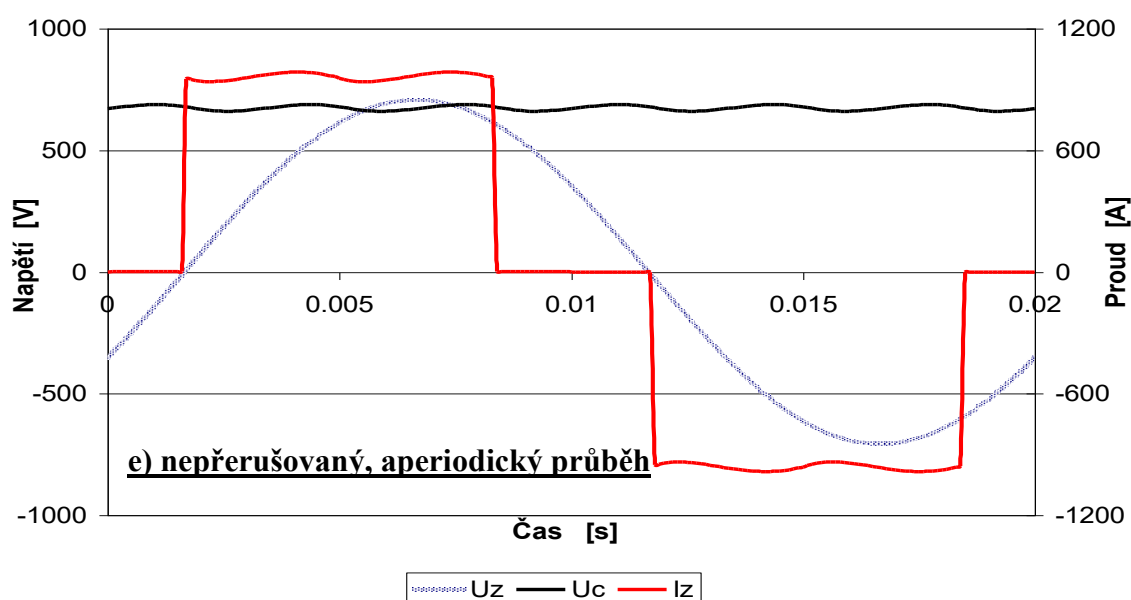
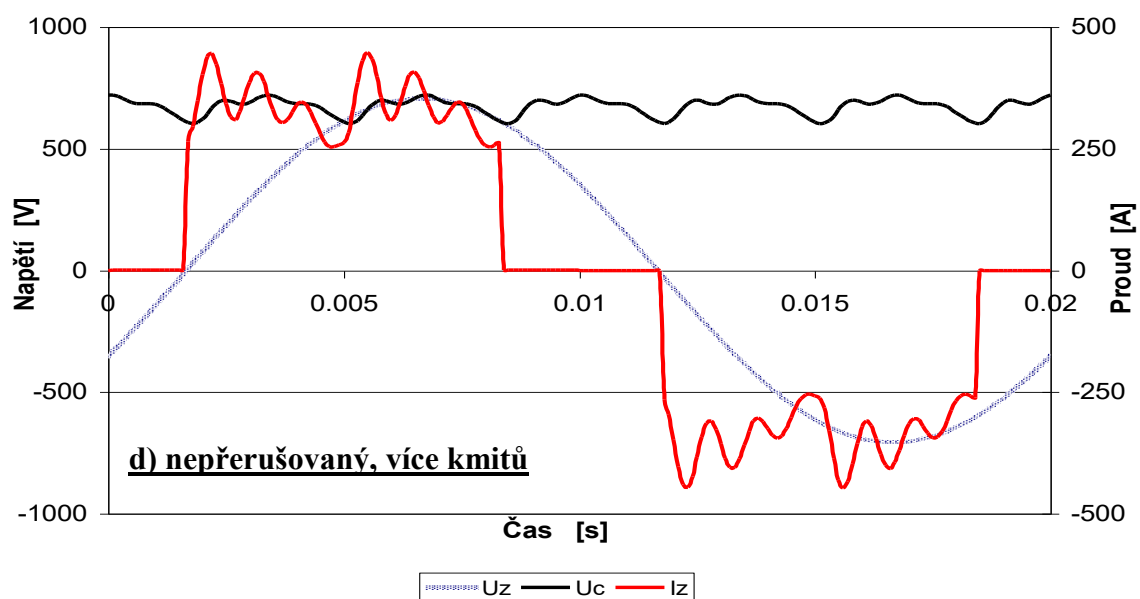
Proudy odebírané měničem ze sítě ale mohou mít různý tvar. Podrobným rozbořem lze kvalifikovat až 5 možných typických průběhů. Pozn.: aperiodický průběh je spíše teoretický – pro tento průběh je nutné taková hodnota kapacity a indukčnosti, která není v praxi realizovatelná.

Bez zásadních úprav mají měniče obvykle charakter jednoho kmitu během vedení diody. To ale vede na nejvyšší deformaci proudu. Vhodným nastavením poměru velikosti kapacity a indukčnosti lze docílit meze přerušovaných proudů nebo ještě lépe nepřerušovaného nekmitavého průběhu proudu s nejnižším zkreslením.



obr. 5 – Možnosti průběhů napětí a proudů 1 fázového usměrňovače





obr. 6 – Možné průběhy napětí a proudů trojfázového můstku