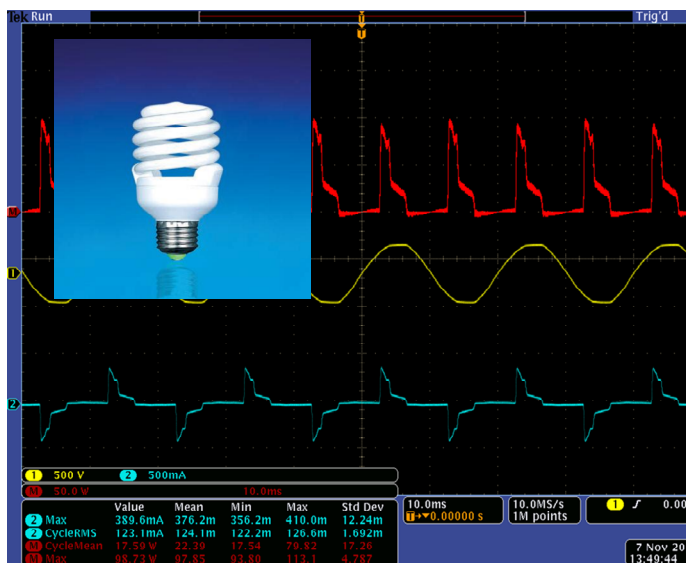


3. VLIV TVARU KŘIVKY A KMITOČTU NA ÚDAJ MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE

V2021REMOTE

Úvod

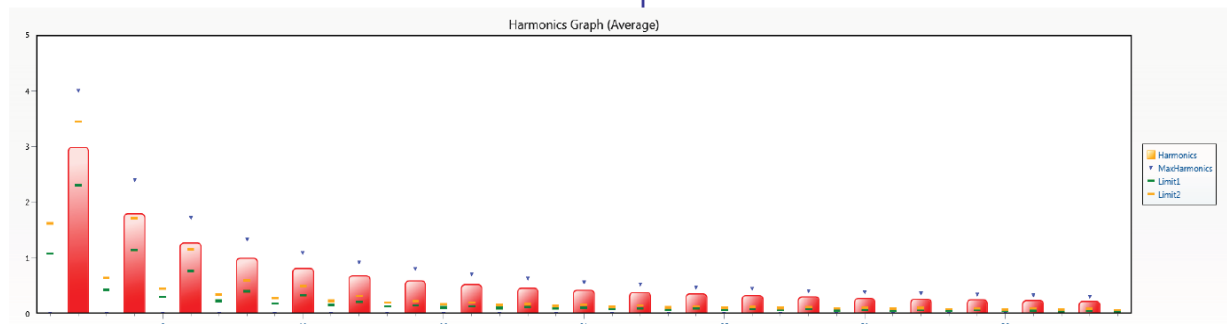
S nástupem spínaných prvků v oblasti napájení se stala problematika měření aktivních elektrických veličin nesinusového průběhu velmi aktuálním tématem. V případě napájení ze sítě je průběh napětí na měřeném objektu obvykle harmonický (viz obrázek, žlutý průběh), zatímco průběh proudu (viz modrý průběh) je silně neharmonický. Je tedy zřejmé, že spektrum proudu obsahuje řadu vyšších kmitočtů. Ještě komplikovanější je pak například měření na UPS, za spínanými zdroji, či měření na tyristory/triaky řízenými spotřebiči vysokých odběrů (typicky regulace střídavých motorů nebo topných zátěží). U všech těchto měření jsou obě veličiny (U, I) silně neharmonické a obsahují vysokou míru vyšších harmonických nemalé amplitudy.



Pro taková měření je zapotřebí použít přístroje, které měří správnou efektivní hodnotu a zároveň jsou konstruovány pro dostatečně široké kmitočtové pásmo. Proč je toto třeba vzít v úvahu? Příkladem může být otázka „Co uvidíte na obrazovce osciloskopu se šířkou pásma 100 MHz, pokud na jeho vstup připojíte obdélníkový (např. hodinový) signál 100 MHz?“. Správná odpověď je „Uvidíme sinusovku o kmitočtu 100 MHz.“ Vstupní obvody odfiltrují vyšší harmonické složky a zobrazena je v podstatě jen první harmonická. S podobnými efekty musíme počítat i u multimetrů při měření střídavých veličin – jejich frekvenční charakteristika způsobí to, že vyšší harmonické složky jsou buď částečně, nebo úplně potlačeny. Může však nastat i opačný extrém, kdy „překompenzovaný“ zesilovač amplitudu některé z vyšších harmonických naopak zvýší. Obojí

samozřejmě ovlivní přesnost výsledku. Analýza harmonických složek odebíraného proudu hraje též významnou roli i v certifikačních procesech běžných spotřebičů dle norem IEC61000-3-2 Ed. 4.0 2014 a IEC61000-4-7 Ed. 2.1 2009, kde se provádí porovnání s limity až do 35. Harmonické.

Harmonic Graph



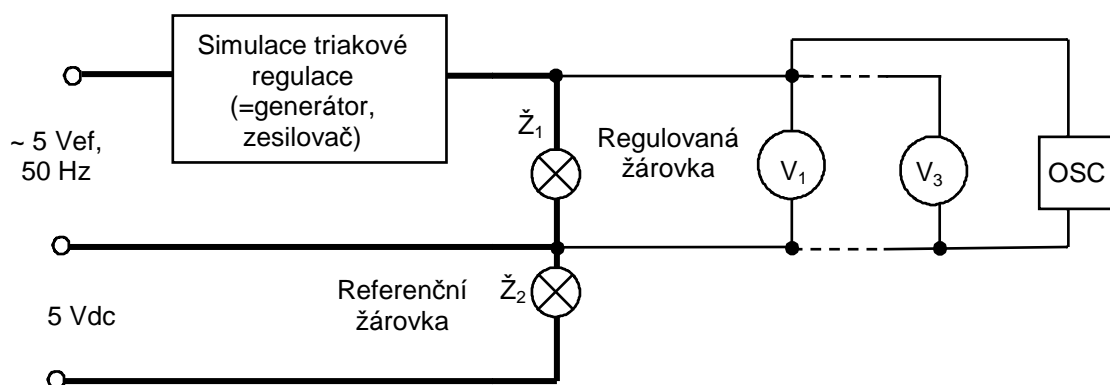
Otázky k úloze (domácí příprava)

- Co znamená zkratka RMS (popř. True RMS) u funkce střídavých měření napětí a proudu?
- Jakou hodnotu měří většina číslicových multimetrů, které tuto zkratku u funkce střídavých měření napětí a proudu **nemají**?
- Lze těmito multimetry měřit efektivní hodnotu při nesinusovém průběhu napětí popř. proudu? Lze v tomto případě určit střední hodnotu? Pokud ano, jak?

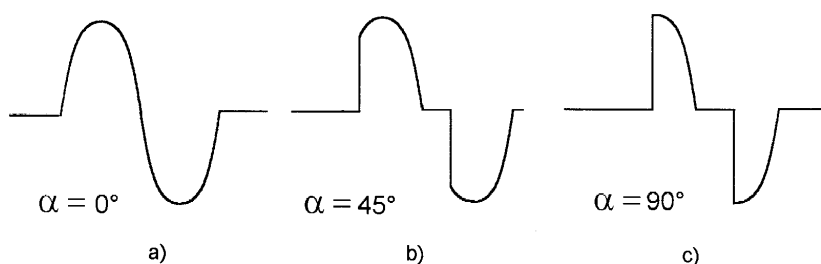
Úkoly měření

1. Vypočtete, jakou amplitudu střídavého napětí musíte nastavit, aby jas žárovky (~výkon) byl stejný, jako u referenční žárovky napájené 5V stejnosměrných. Tuto amplitudu nastavte na emulátoru triakové regulace (=ověřte že obě žárovky mají stejný jas při úhlu sepnutí 0°).
2. Výkon zátěže, napájené 5V ef./50 Hz, je regulován obvodem emulujícím triakové spínání (generátor programovatelných průběhů, úhel sepnutí α přibližně 0° , 45° a 90°). Viz obr. 1 a 2. Změřte napětí na zátěži předloženými číslicovými multimetry V1 a V3 a osciloskopem pro všechny tři případy (efektivní a střední aritmetickou hodnotu SAR).
3. Určete, který z multimetrů měří správně efektivní hodnotu, a určete relativní chybu metody měření efektivní hodnoty druhého DMM (vůči “správnému” multimetru).
4. Z údaje multimetru, který to umožní, určete též střední aritmetickou hodnotu měřeného průběhu.
5. *Doma: Pro úhel sepnutí $\alpha = 90^\circ$ určete aritmetickou střední hodnotu a efektivní hodnotu napětí výpočtem z definic (maximální hodnotu určete z údaje nejpřesnějšího z multimetrů při $\alpha = 0^\circ$). Vypočtené hodnoty porovnejte s naměřenými a v případě rozdílu analyzujte možné příčiny.*
6. Proved'te měření kmitočtové závislosti obou voltmetrů při měření sinusového napětí. Triakový emulátor vypněte, spusťte frekvenčním generátor (“fgen”), nastavte napětí o efektivní hodnotě 0,7 V. Měřte při frekvencích 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 5, 10, 20, 50, a 100 kHz.
7. *Doma: Z naměřeného průběhu (interpolací) zjistěte šířku pásma (f-3db) horšího multimetru.*
8. Měření s FFT na osciloskopu. Na generátoru nastavte postupně průběh obdélníkový (50% střída), sinusový a trojúhelníkový, frekvence 50 Hz, rozkmit 1 V_š. Na osciloskopu pomocí matematické funkce FFT změřte a poznamenejte spektra pro jednotlivé funkce (orientační údaje o frekvenci harmonických a jejich amplitudě).
9. Generátor vypněte a opět spusťte triakový emulátor. Vyberte “fourier”. Zde je možné simulovat skládání jednotlivých lichých harmonických obdélníkového průběhu a zobrazit průběh jak v čase, tak ve frekvenční oblasti.

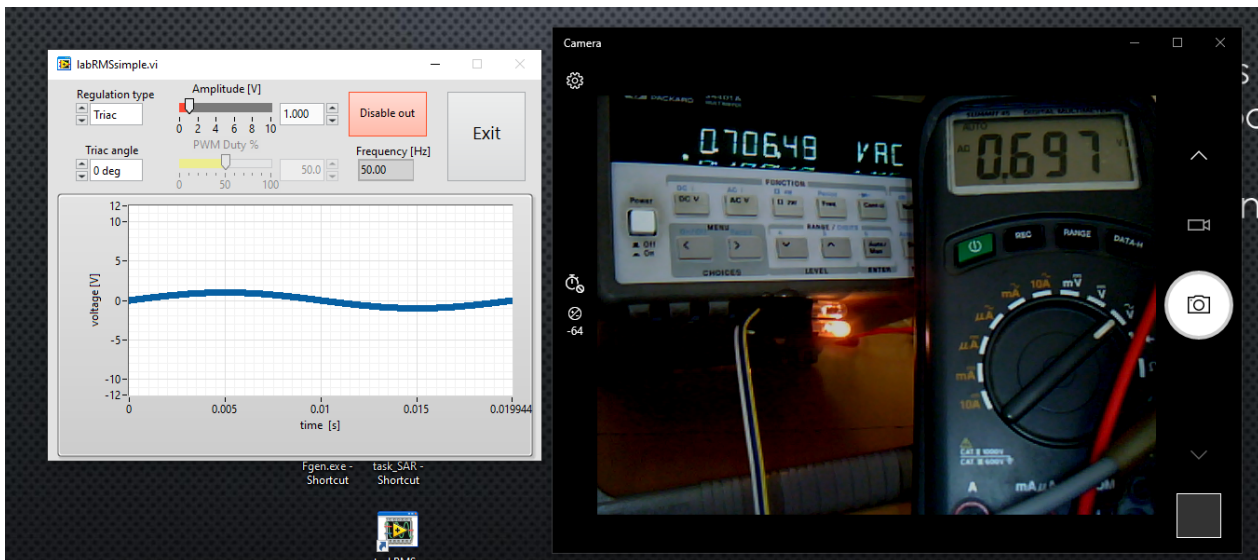
Poznámky k měření



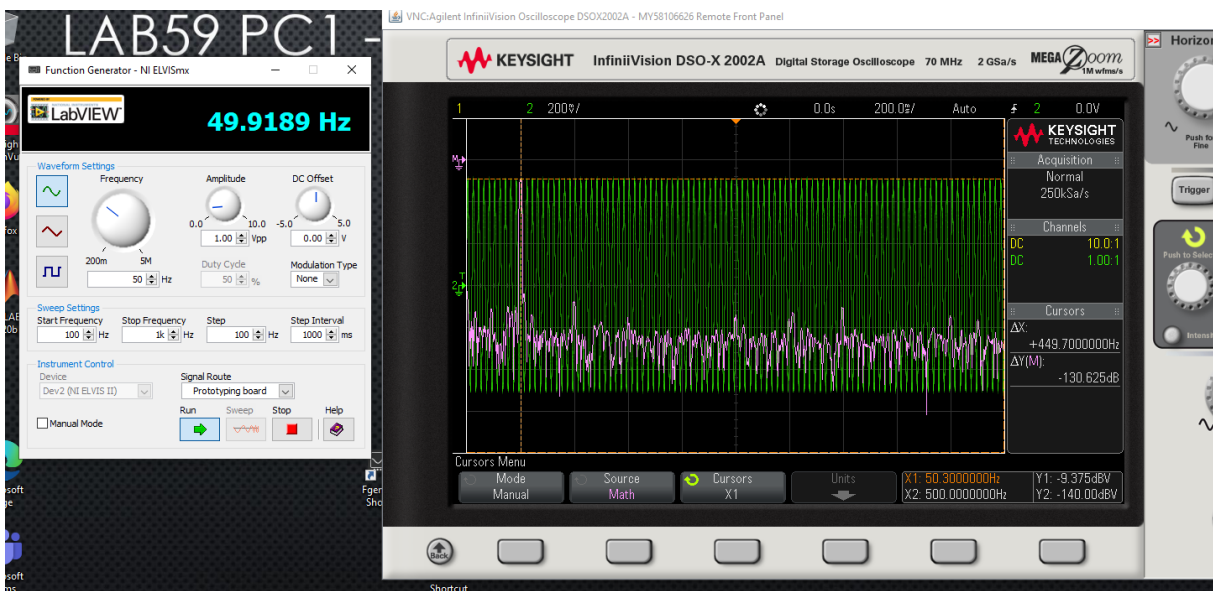
Obr. 1 Zapojení měřicího obvodu – bod 1 až 4



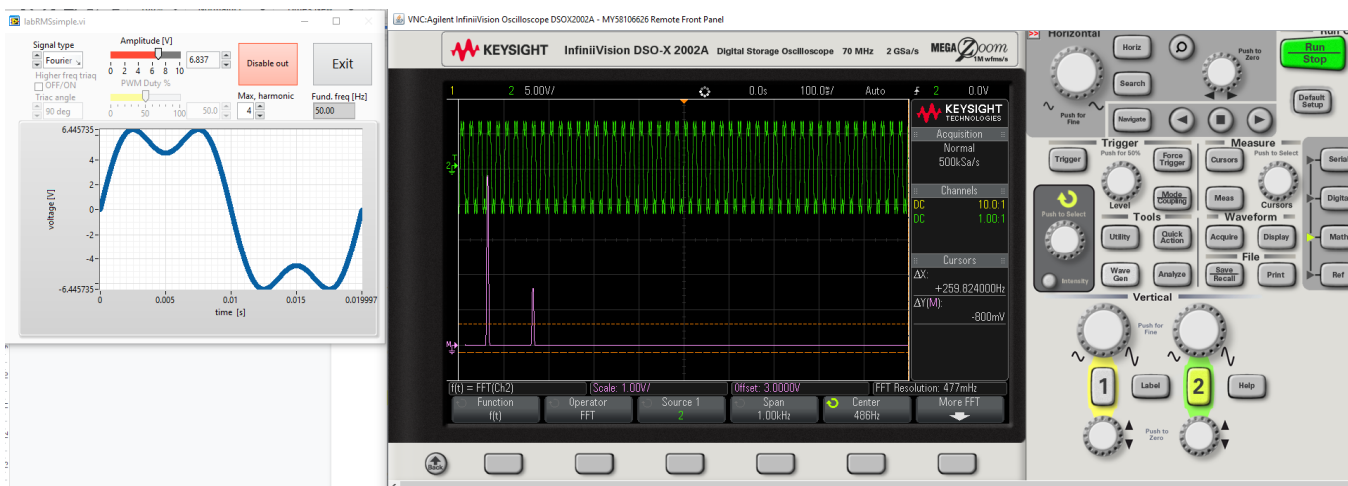
Obr. 2 Průběhy měřených napětí – triaková regulace při 0, 45 a 90st. sepnutí



Obr. 3 - Měření na triaku (zde 0 stupňů, tj. sinus)



Obr. 4 - Měření na frekvenčním generátoru. Osciloskop nastaven do režimu FFT ("MATH")

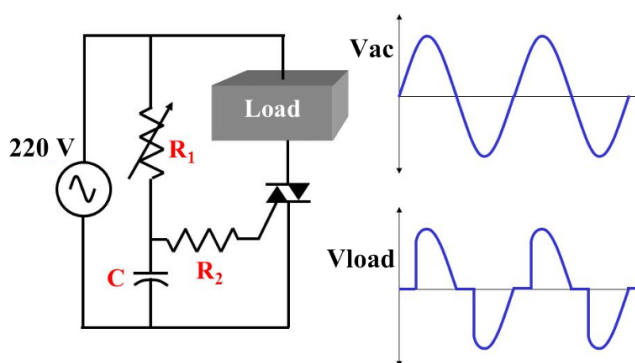


Obr. 5 - Skládání harmonických obdélníkového signálu (liché násobky, amplituda 1/n)

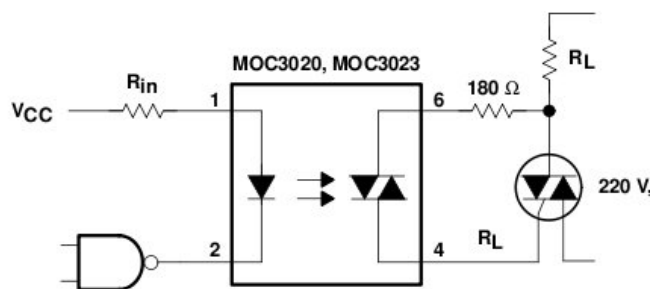
Triaková regulace

Pro regulaci střídavé zátěže (teplo, světlo, otáčky) se často používá triaková regulace. Od doby, kdy je triak sepnut, až do průchodu nulou (nezávisle na polaritě - nejedná se o tyristor), je zátěž napájena střídavým proudem. Dojde efektivně k "ořezávání" sinusovky a tím snižování výkonu (plocha pod křivkou). Typické zapojení triakové regulace s RC článkem a mikrokontrolérem je níže: s RC článkem je zpoždění definováno RC konstantou (regulační potenciometr), mikrokontrolér naproti tomu otevře triak krátkým pulzem (většinou je realizováno přes "optotriak" kvůli galvanickému oddělení. Výhodou triakové regulace střídavého napájení je jednoduchá realizace, nevýhodou je nezanedbatelné rušení - viz vámi naměřené harmonické složky. Taktéž u některých zátěžích (indukční zátěže, motory) je regulace obtížná z hlediska zpětně indukovaných napětí, resp. rozběhových parametrů motorů.

(V našem případě kvůli nutnosti vzdálené výuky triakový průběh generujeme DAQ kartou v NI-Elvis a zesílujeme (proudově) operačním zesilovačem LT1010.)



RC regulace



Regulace pulsem z oddělené logiky (MCU)

Teoretický výklad:

U střídavých voltmetrů se pro převod střídavého napětí na stejnosměrné používají převodníky střední nebo efektivní hodnoty.

U levnějších číslicových multimetrů se používají převodníky střední hodnoty využívající operační usměrňovač. Tyto přístroje měří aritmetickou střední hodnotu podle definičního vztahu, ale jsou vesměs cejchovány v efektivní hodnotě pro sinusový průběh, pro nějž má koeficient tvaru hodnotu přibližně 1,11. Při měření efektivní hodnoty neharmonických napětí popř. proudů tak mohou vzniknout značné chyby metody vzhledem k tomu, že činitel tvaru je v těchto případech odlišný od hodnoty 1,11. Střední hodnotu měřené veličiny lze vypočítat vydělením údaje přístroje koeficientem tvaru pro sinusový průběh.

V kvalitnějších multimetrech se používají převodníky efektivní hodnoty. Tato skutečnost je obvykle vyznačena buď na přepínači funkcí multimetru, či v návodu k přístroji zkratkou RMS (Root Mean Square = odmocnina ze střední hodnoty kvadrátu - viz definiční vztah, popř. True RMS). V tomto případě měří multimetr správně efektivní hodnotu napětí popř. proudu i v případě neharmonických průběhů.

U většiny multimetrů je při přepnutí přístroje do režimu měření střídavých napětí nebo proudů převodník střední popř. efektivní hodnoty oddělen od vstupních obvodů multimetru kondenzátorem, takže je měřena pouze střídavá složka měřené veličiny.

K bodu 5:

Efektivní hodnota střídavého napětí je definována vztahem

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

a jeho aritmetická střední hodnota vztahem

$$U_{sar} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u(t) dt$$

Z těchto definičních vztahů je třeba vycházet při výpočtu střední a efektivní hodnoty napětí na zátěži pro úhel sepnutí α . Pro sinusový průběh napětí platí

$$u(t) = U_m \sin \omega t, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

kde hodnotu U_m lze určit z efektivní hodnoty, změřené pro sinusový průběh nejpřesnějším z voltmetrů, činitelem $\sqrt{2}$.

Pro aritmetickou střední hodnotu při úhlu sepnutí α pak platí (při řešení integrálu použijeme substituci $x = \omega t$, dále označme $t_1 = \frac{T}{2} \frac{\alpha}{\pi}$)

$$U_{sar,\alpha} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{T/2} U_m \sin \omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin x dx = \frac{U_m}{\pi} [-\cos x]_{\alpha}^{\pi}$$

a pro efektivní hodnotu platí

$$U_{ef,\alpha} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_1}^{T/2} U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m^2 \sin^2 x dx} = \frac{U_m}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2x}{2} dx}$$

Po dosazení $\alpha = \pi/2$ lze odvodit, že pro aritmetickou střední hodnotu platí

$$U_{sar,90} = \frac{U_m}{\pi} = \frac{U_{sar,0}}{2}$$

a pro efektivní hodnotu platí

$$U_{ef,90} = \frac{U_m}{2} = \frac{U_{ef,0}}{\sqrt{2}}$$

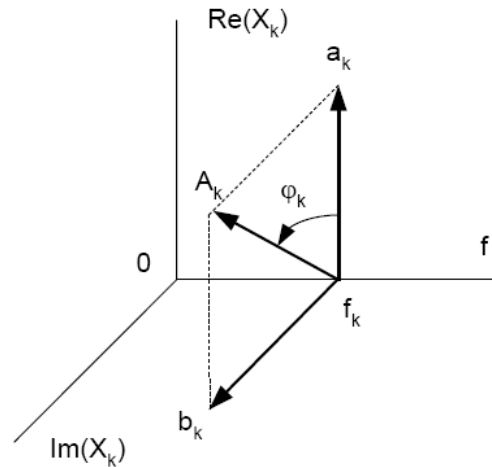
K bodu 8: FFT (Fast Fourier Transform - Rychlá Fourierova transformace)

Jakoukoli periodickou funkci můžeme zapsat jako součet jednotlivých harmonických složek:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (b_k \sin k\omega t + a_k \cos k\omega t)$$

nebo jako

$$x(t) = \sum_{k=1}^n X_k \sin(k\omega t + \varphi_k)$$



Obr.3. Zobrazení složky X_k v komplexní rovině

Rychlá Fourierova transformace je algoritmem diskrétní Fourierovy transformace (DFT) umožňující určit jednotlivé koeficienty funkce. FFT je v osciloskopu implementována v matematických funkcích (červené tlačítko MATH). Nad výpočtem lze pracovat s lupou, s kurzory, je možné měnit šířku zobrazení v menu FFT. Pro DFT platí předpoklady, které u osciloskopu nelze splnit (ten hlavní je celistvý počet period v 2^n vzorků). Použití oken a správného nastavení je tedy nezbytné. Protože A/D převodník u osciloskopu je pouze 8-bitový, je dobré nastavit režim osciloskopu tak, aby kvantovací šum byl minimalizován.

U sinusového průběhu má být v ideálním případě jediná harmonická složka, případné další složky mohou pocházet z generátoru (14 bitový převodník D/A plus filtr), kvantováním a vlivem omezení FFT.

Pro obdélníkový průběh s nulovou stejnosměrnou složkou, 50:50 a amplitudou U_m platí

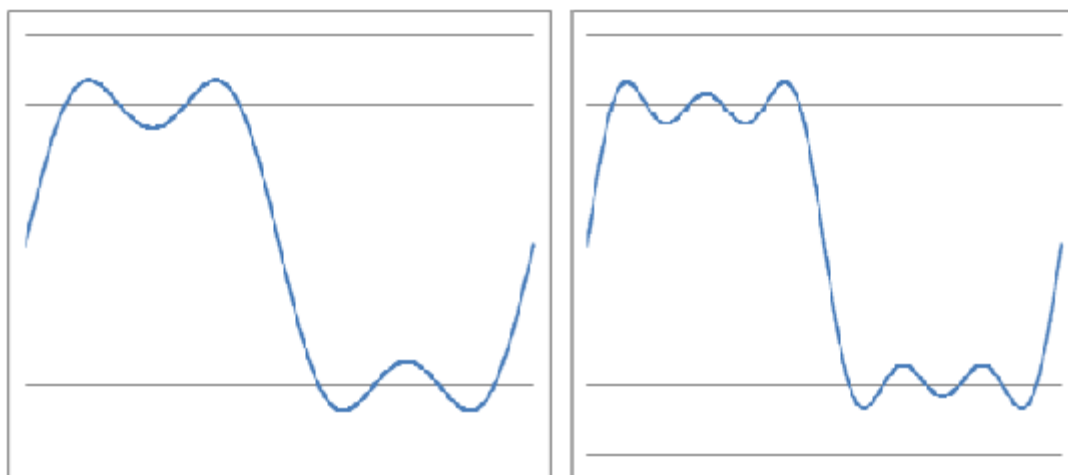
$$x(t) = \sum_{k=1}^n \frac{4U_m}{\pi k} \sin kt \quad \text{pro } k = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Pro trojúhelníkový průběh s nulovou stejnosměrnou složkou, 50:50 a amplitudou U_m platí

$$x(t) = \sum_{k=1}^n \frac{8U_m}{\pi^2 k^2} \sin kt \quad \text{pro } k = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Problém signálů složených z mnoha harmonických složek nezanedbatelné velikosti se projevuje u multimetrů, kde složky přesahující šířku pásma multimetru, mohou mít vliv na měřenou hodnotu. Frekvenční charakteristika je zpravidla výrazně ovlivněna rozsahem.

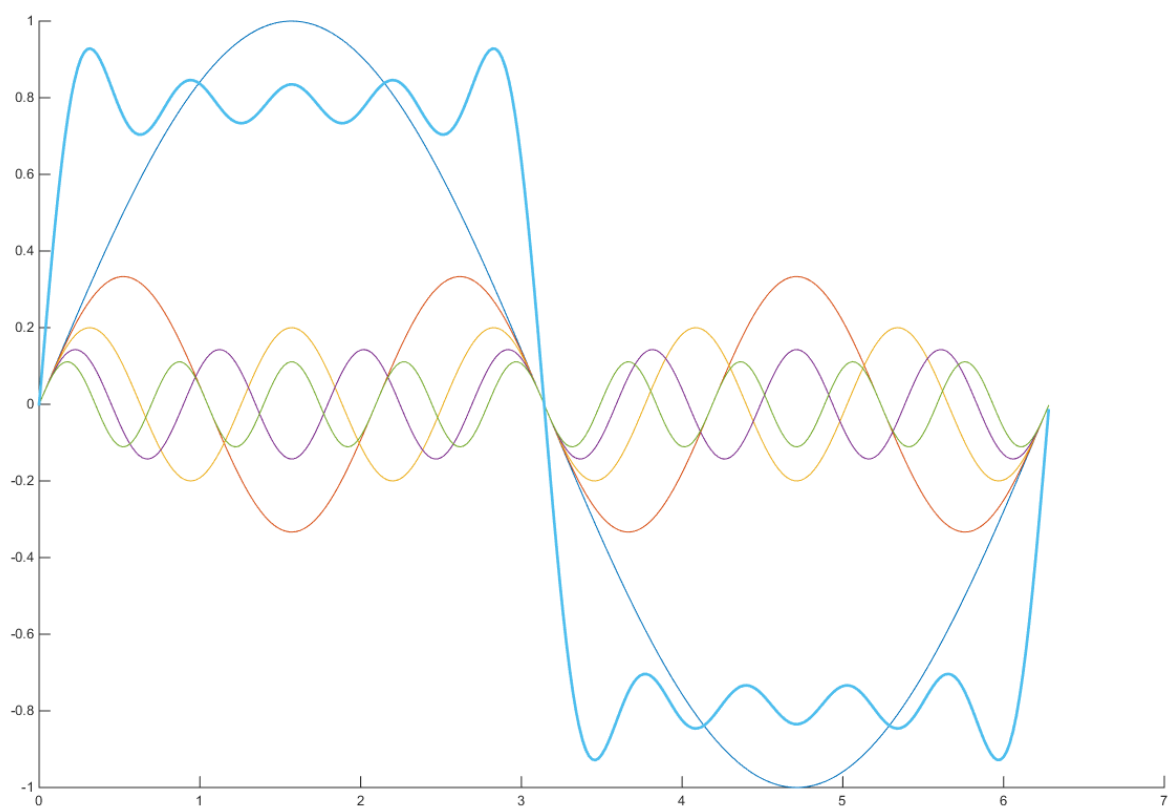
U osciloskopů dochází k podobnému jevu. Pokud budeme uvažovat ideální přenosovou charakteristiku vstupních obvodů, složky blízko a za šířkou pásma jsou v podstatě filtrovány až odfiltrovány. Pokud na osciloskop přivedeme obdélník s frekvencí shodnou s deklarovanou šířkou pásma osciloskopu, na obrazovce uvidíme sinus – přes obvody projde pouze první harmonická složka. Pokud šířka pásma nelimituje ještě třetí, respektive pátou harmonickou obdélníkového signálu, získáme zobrazení dle obr. 4.



Obr. 4. Zobrazení obdélníku při frekvenčním omezení

K bodu 9

Stejný průběh však získáme i sečtením 2 sinusových průběhů s frekvencí f a $3f$ s amplitudou U a $U/3$ popř. 3 sinusových průběhů s frekvencí f , $3f$ a $5f$ s amplitudou U , $U/3$ a $U/5$.



Obdélníkový signál složený z 1, 3, 5, 7 a 9-té harmonické