

Senzory a Měření - protokol 2 - měření střídavého napětí

Vypracoval **Vojtěch Michal** 15. března 2021, měření provedeno na dálku dne 11. 3. 2021.

Průběh všech měření byl dokumentován screenshoty vzdálené plochy s měřicími přístroji, všechny obrázky jsou k nalezení ve složce `.images`. Díky kamerám natočeným na měřicí přístroje lze ze screenshotů odečíst i měřené hodnoty.

Triaková regulace

Triak je v principu zapojení dvou antiparalelních tyristorů se společnou řídicí elektrodou. Triak brání průchodu elektrického proudu až do přivedení proudového pulsu na řídicí elektrodě. Tehdy se součástka otevře a propouští až do průchodu proudu nulou. Proto je vhodný na regulaci výkonu střídavého proudu, protože uřezává kousek z každé půlvlny (mezi nulou a čtvrtperiodou) a tím snižuje dobu, po kterou se odebírá výkon.

Úkoly měření

Cílem je srovnat výsledky měření osciloskopem, trueRMS voltmetrem a levným handheld multimetrem, který RMS dopočítává jako $1.11 \cdot \text{SAR}$ (rectified mean).

1) Vypočtete, jakou amplitudu musíte nastavit pro dosažení stejného výkonu jako při napájení z DC

Efektivní hodnota střídavého průběhu je číselně rovna hodnotě stejnosměrného průběhu, která má na rezistivní zátěži stejné tepelné účinky. Protože pro harmonický průběh $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ platí

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) dt} = U_m \cdot \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T 1 - \underbrace{\cos(2\omega t)}_{=0 \text{ přes periodu}} dt} = U_m \cdot \sqrt{\frac{1}{2T} \cdot T} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_m,$$

musíme pro AC nastavit amplitudu 7.07 V pro dosažení stejného výkonu jako 5V DC.

2) Výkon zátěže, napájené 5V ef./50 Hz, je regulován obvodem emulujícím triakové spínání

Pro fázový posun 0° je triak otevřen pro celou půlvlnu, napájení je tedy harmonické. Fázový posun $\varphi = 90^\circ$ znamená otevření jen pro polovinu každé půlvlny. Levný handheld multimetr měří jen střední aritmetickou hodnotu, násobí ji konstantním form factorem 1.11 a tváří se, že to je RMS; pro deformované průběhy to samozřejmě neplatí, alespoň se to však dá použít pro měření SAR. TrueRMS multimetr měří jen RMS napětí, nelze z něj odečíst SAR. Osciloskop má pokročilejší matematické funkce, lze v něm nechat vypočítat obě hodnoty.

```
rows = {'fáze = 0°'; 'fáze = 45°'; 'fáze = 90°'};
%Naměřená napětí ve voltech
RMS_cheapDMM = [4.910; 4.230; 2.576];
RMS_trueRMS = [5.008; 4.775; 3.5460];
RMS_oscilloscope = [4.9919; 4.7784; 3.5464];

disp('Měřené efektivní hodnoty pro odlišné fáze triakové regulace [V]')
```

Měřené efektivní hodnoty pro odlišné fáze triakové regulace [V]

```
table(RMS_cheapDMM, RMS_trueRMS, RMS_oscilloscope, 'RowNames', rows)
```

ans = 3x3 table

	RMS_cheapDMM	RMS_trueRMS	RMS_oscilloscope
1 fáze = 0°	4.9100	5.0080	4.9919
2 fáze = 45°	4.2300	4.7750	4.7784
3 fáze = 90°	2.5760	3.5460	3.5464

```
% Vydělením form factorem získáme SAR napětí na vstupu
SAR_cheapDMM = RMS_cheapDMM / 1.11;
SAR_trueRMS = ['N/A'; 'N/A'; 'N/A']; % Přístroj SAR neměří
SAR_oscilloscope = [4.4810; 3.8664; 2.2858]; % Počítáno jako avg(abs(u))
disp('Tabulka středních aritmetických hodnot pro odlišné fáze triakové regulace [V]')
```

Tabulka středních aritmetických hodnot pro odlišné fáze triakové regulace [V]

```
table(SAR_cheapDMM, SAR_trueRMS, SAR_oscilloscope, 'RowNames', rows)
```

ans = 3x3 table

	SAR_cheapDMM	SAR_trueRMS	SAR_oscilloscope
1 fáze = 0°	4.4234	N/A	4.4810
2 fáze = 45°	3.8108	N/A	3.8664
3 fáze = 90°	2.3207	N/A	2.2858

Stojí za povšimnutí, že SAR vypočtená z měření handheld multimetru skutečně odpovídá hodnotě vypočtené osciloskopem s přesností na cca 50mV.

3) Který z multimetrů měří RMS správně?

Stejně hodnoty dává měření trueRMS multimetrem i osciloskopem. Druhý multimetr není schopen přesně měřit průběhy deformované triakovou regulací. Jak ukazuje následující tabulka, relativní chyba roste prudce spolu s mírou deformace signálu.

```
relErr = (RMS_trueRMS - RMS_cheapDMM) ./ RMS_trueRMS * 100;
disp('Relativní chyba odhadu RMS pomocí SAR vůči trueRMS měření [%]')
```

Relativní chyba odhadu RMS pomocí SAR vůči trueRMS měření [%]

```
table(relErr, 'RowNames', rows)
```

ans = 3x1 table

	relErr
1 fáze = 0°	1.9569
2 fáze = 45°	11.4136
3 fáze = 90°	27.3548

4) Určete střední aritmetickou hodnotu průběhu (SAR)

Viz tabulka v úloze 2. Určení SAR umožňuje levnější multimetr, protože známe jeho princip funkce: měří SAR a násobí ji konstantním form factorem 1.11. Vydelíme-li jím zobrazenou hodnotu, získáme skutečnou hodnotu SAR.

5) Pro úhel $\varphi = 90^\circ$ určete ručně SAR a RMS

Z definice: $U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$ a $U_{sar} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$, kde T je perioda funkce

$u(t)$. Studujeme harmonický průběh, kde z každé půlperrody dlouhé π je oříznutá první čtvrtperioda, obecně nějaké α . Po úpravách definičních vztahů vyjde

$$U_{ef,\alpha} = \frac{U_m}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_\alpha^\pi \frac{1 - \cos 2x}{2} dx} = \frac{U_m}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{1}{2}(\pi - \alpha) - \int_\alpha^\pi \frac{\cos 2x}{2} dx} = \frac{U_m}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{1}{2}(\pi - \alpha) + \left[\frac{\sin(2x)}{2 \cdot 2}\right]_\alpha^\pi} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}},$$

po dosažení $\alpha = \pi/2$ se výraz redukuje na $U_{ef,\frac{\pi}{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \pi/2 + \underbrace{\frac{\sin(2\alpha)}{2}}_{=0}} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} = \frac{U_m}{2} = \frac{U_{ef,0}}{\sqrt{2}}.$

Pro Střední aritmetickou hodnotu je odvození trošku přímočařejší a - jak řekl klasik - is left as an exercise to the reader.

6) Změřte frekvenční závislost obou multimetrů

K dispozici je frekvenční generátor; pro dosažení $U_{ef} = 0.7V$ je potřeba nastavit napětí $U_{pp} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 1.98V$ špička-špička. Následně procházením spektra frekvencí a odečítáním hodnot zobrazovaných na měřicích přístrojích nadbíráme dostatek dat pro načrtnutí asymptotické amplitudové frekvenční charakteristiky. S rostoucí frekvencí v určitý okamžik začne multimetr ztrácet přenos. Důvodů může být více, například narazíme na zlomovou frekvenci antialiasingových filtrů před ADC, které začnou zeslabovat vyšší generované frekvence.

```
rows = {'f = 10Hz'; 'f = 100Hz'; 'f = 1kHz'; 'f = 5kHz'; 'f = 10kHz'; 'f = 20kHz';  
        'f = 50kHz'; 'f = 100kHz'; 'f = 200kHz'; 'f = 500kHz'; 'f = 1MHz'};
```

```
%osa frekvencí potřebná pro úlohu (7)
```

```
frequencies = [10 100 1000 5000 10^4 2*10^4 5*10^4 10^5 2*10^5 5*10^5 10^6];
```

```
% Naměřená napětí odečtená z multimetrů a osciloskopu
```

```
cheapDMM = [0.697; 0.691; 0.679; 0.525; 0.342; 0.164;
```

```
            0.011; 0.001; 0.000; 0.000; 0.000];
```

```
trueRMS = [0.6924; 0.6996; 0.6995; 0.6978; 0.6965; 0.6947;
```

```
            0.6929; 0.6880; 0.6641; 0.2595; 0.0845];
```

```
oscilloscope = [0.6856; 0.6959; 0.6966; 0.6951; 0.6937; 0.6926;
```

```
                0.6914; 0.6904; 0.6859; 0.6599; 0.5932];
```

```
disp('Měřená hodnota RMS [V] při různých frekvencích')
```

```
Měřená hodnota RMS [V] při různých frekvencích
```

```
table(cheapDMM, trueRMS, oscilloscope, 'RowNames', rows)
```

```
ans = 11x3 table
```

	cheapDMM	trueRMS	oscilloscope
1 f = 10Hz	0.6970	0.6924	0.6856

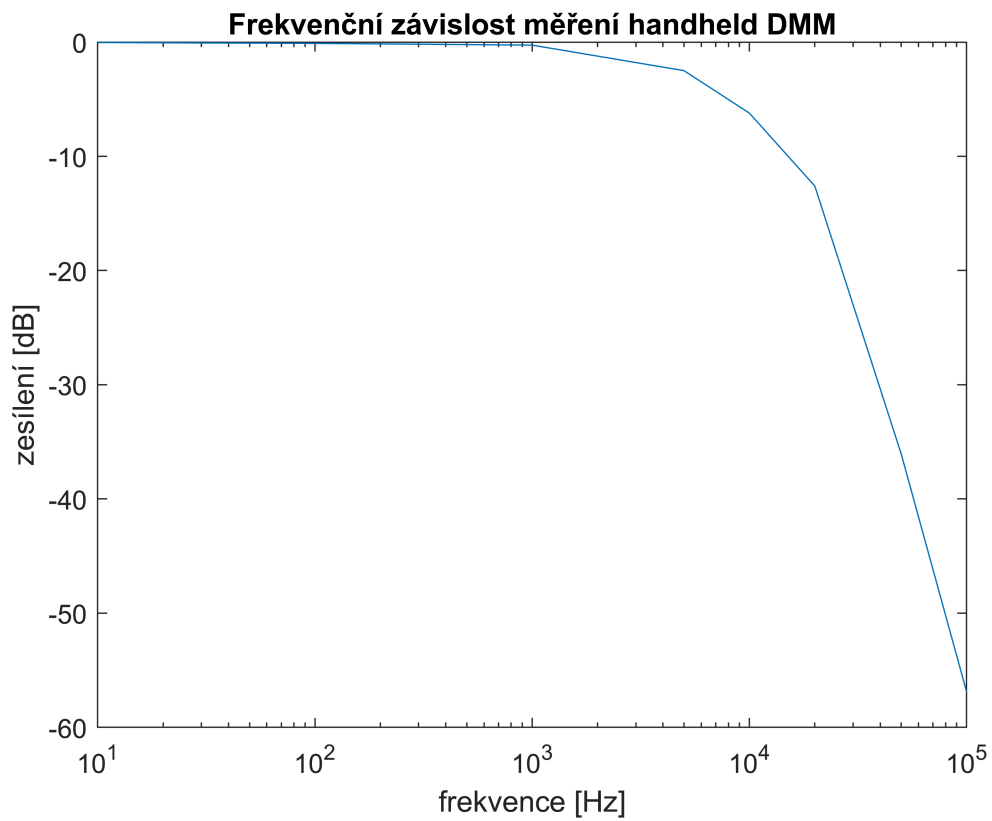
	cheapDMM	trueRMS	oscilloscope
2 f = 100Hz	0.6910	0.6996	0.6959
3 f = 1kHz	0.6790	0.6995	0.6966
4 f = 5kHz	0.5250	0.6978	0.6951
5 f = 10kHz	0.3420	0.6965	0.6937
6 f = 20kHz	0.1640	0.6947	0.6926
7 f = 50kHz	0.0110	0.6929	0.6914
8 f = 100kHz	0.0010	0.6880	0.6904
9 f = 200kHz	0	0.6641	0.6859
10 f = 500kHz	0	0.2595	0.6599
11 f = 1MHz	0	0.0845	0.5932

Experiment potvrzuje, že všechna tři měřicí zařízení jsou frekvenčně závislá. Při měření hodnoty RMS osciloskopem nastala u frekvencí 10, 100 a 1000 Hz hrubá lidská chyba. Osciloskop a multimetr mají odlišné "priority": osciloskop má poměrně málo bitů v AD převodníku, cílí na rychlost a přesnost získává průměrováním. Naopak specializovaný multimetr má přesnější AD převodník pracující na nižší vzorkovací frekvenci. Kvůli relativně nižšímu rozlišení je osciloskop náchylnější na nesprávné nastavení vertikálního měřítka. Vertikálně připadá na celou obrazovku jen například 2^8 dílků, proto - nastavíme-li měřítko tak, že se signál nalézá jen v jednom z osmi vertikálních dílků - na signál samotný může připadat třeba pouhých 2^5 vertikálních dílků, což vede na velkou chybu měření. Není možné vyloučit, že se nesprávně nastavené měřítko neprojeví i u dalších frekvencí, proto nejsou data pro osciloskop směrodatná; lze na nich sledovat jen všeobecný trend (výpočet RMS osciloskopem je - celkem očekávatelně - obecně málo frekvenčně závislý. Na frekvenci 1MHz však začne být utlumován též).

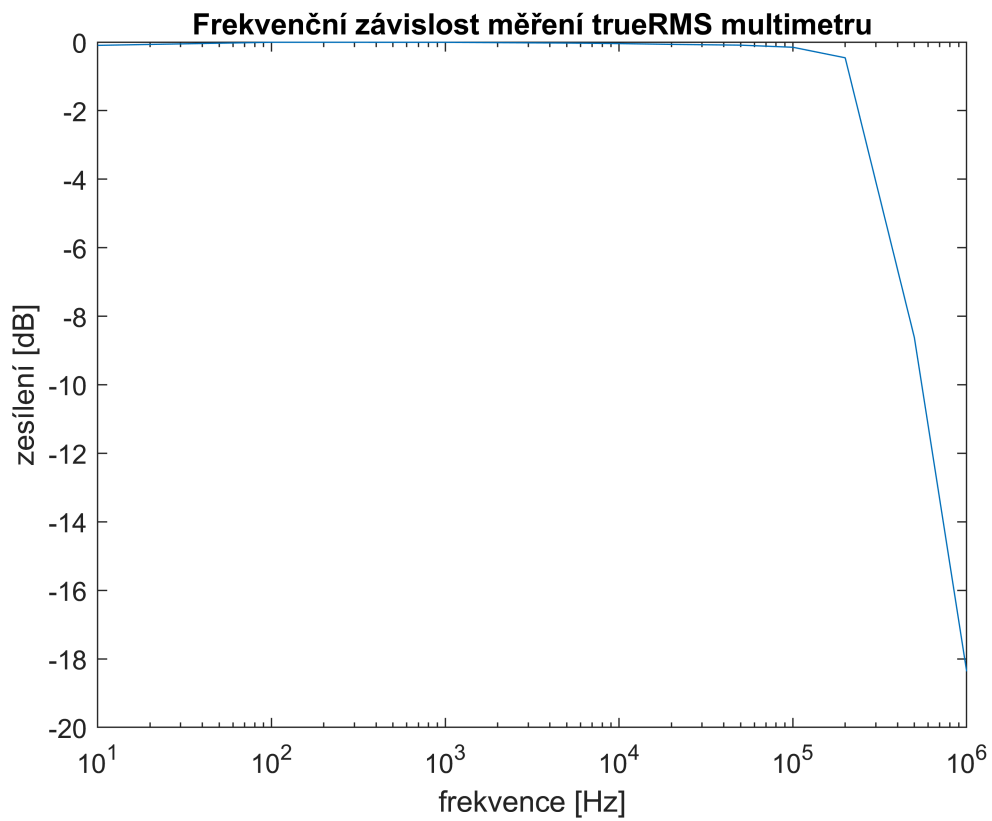
7) Určete šířku pásma obou multimetrů

Změřená data převedeme na tvar podobný Bodeho asymptotické frekvenční charakteristice. Horizontální osu frekvencí je vhodné kvůli rozsahu 5 řádů vykreslovat logaritmicky. Data na vertikální ose normujeme na rozsah [0, 1] vydělením očekávanou hodnotou (na vstup měřících přístrojů je přivedena efektivní hodnota 0.7V) a dále logaritmováním převedeme na decibely. Šířka pásma bude frekvence, na které přístroj bude měřit o 3 dB méně, než by měl.

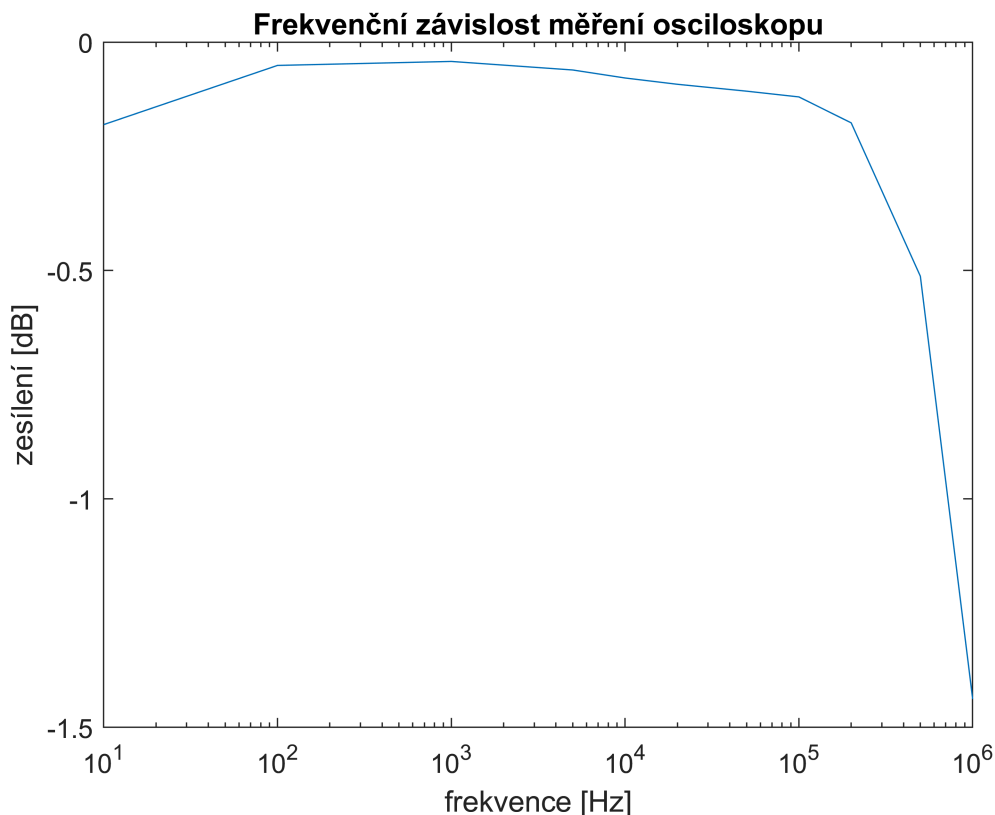
```
semilogx(frequencies, 20*log10(cheapDMM / 0.7));
xlabel('frekvence [Hz]');
ylabel('zesílení [dB]');
title('Frekvenční závislost měření handheld DMM');
```



```
figure;  
semilogx(frequencies, 20*log10(trueRMS / 0.7));  
xlabel('frekvence [Hz]');  
ylabel('zesílení [dB]');  
title('Frekvenční závislost měření trueRMS multimetru');
```



```
figure;  
semilogx(frequencies, 20*log10(oscilloscope / 0.7));  
xlabel('frekvence [Hz]');  
ylabel('zesílení [dB]');  
title('Frekvenční závislost měření osciloskopu');
```



Z vykreslených závislostí lze odhadnout šířku pásma. TrueRMS multimetr má takřka perfektní převodovou charakteristiku: pro nízké frekvence se drží zesílení 0dB, na 200kHz má zesílení -0.4dB, na 500kHz zesílení -8.6dB. Šířka pásma tak bude cca 300kHz.

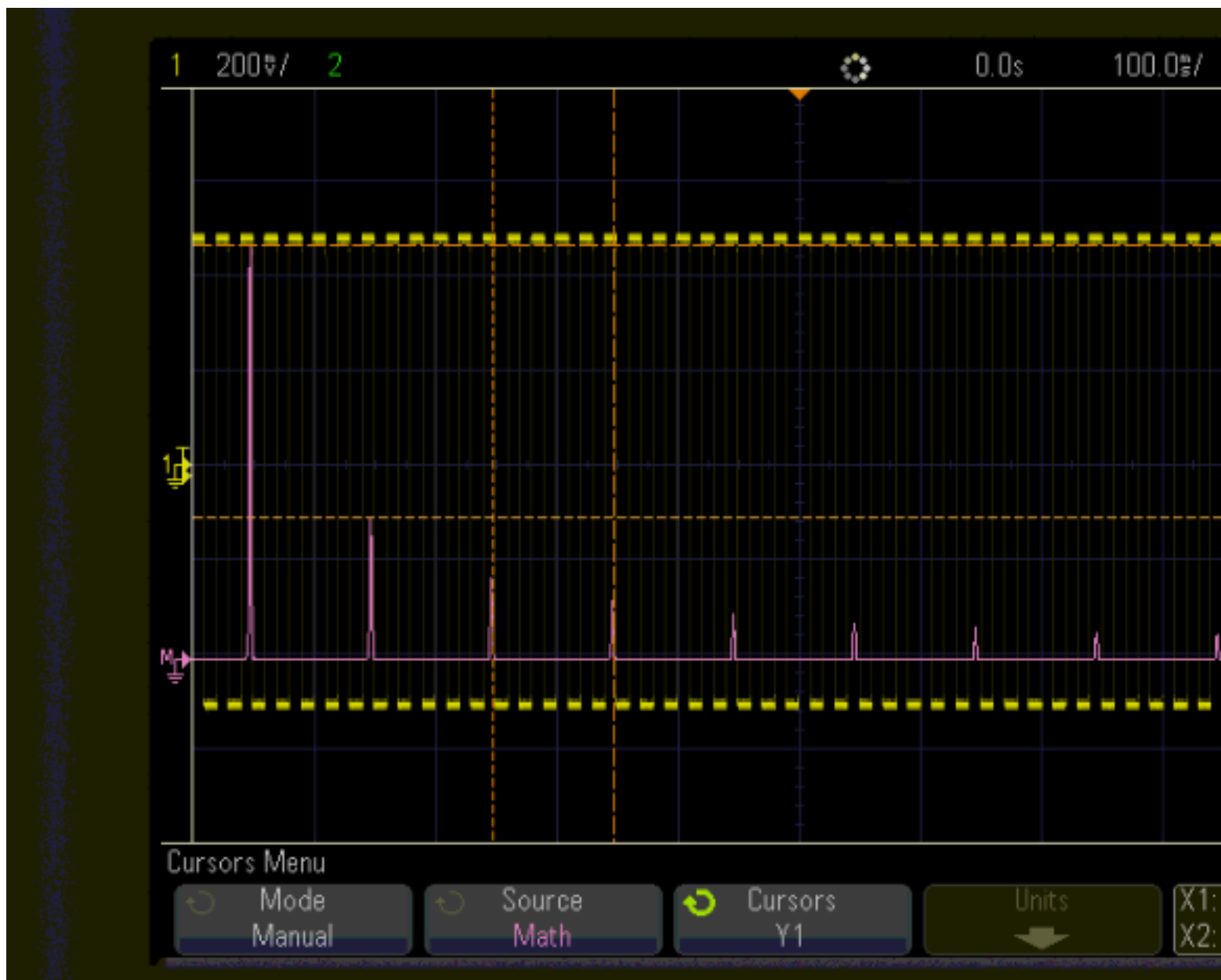
Handheld má - poměrně očekávaně - nejhorší výsledek. Zesílení -2.5dB na 5kHz, -6.2dB na 10kHz. Šířka pásma se dá očekávat někde kolem 6kHz, což je padesátkrát horší jak trueRMS multimetr.

I kdybychom se (přes dříve zmíněné nedostatky) pokusili odhadnout šířku pásma osciloskopu na základě dat z měření, neuspěli bychom. Na frekvenci $f = 10^6$ Hz poklesnul osciloskop o 1.4dB, takže ještě zdaleka nemusí být poblíž své zlomové frekvence. Ta může být třeba na 3MHz, každopádně výrazně dál než oba multimetry. Osciloskop je na vzorkování vysokými frekvencemi stavěn a tak i jeho filtry budou nastaveny na vyšší zlomové frekvence.

8) Pomocí funkce FFT v osciloskopu studujte spektra základních funkcí

Dostupný byl funkční generátor s harmonickým průběhem, obdélníkem a trojúhelníkem. Vše studováno na 50Hz. Tomu se muselo podřídit nastavení FFT ... span = 1kHz, aby bylo vidět prvních 20 harmonických. Toto nastavení nabízí základní frekvenci Fourierky výrazně menší jak 1Hz, takže bylo možné velice ostře odlišit peaky příslušné k přítomným harmonickým.

Následující obrázek je screenshot z osciloskopu s obdélníkovým vstupním signálem. Obdélníkový průběh obsahuje pouze liché harmonické (tedy 1., 3., 5....) s amplitudami nepřímo úměrnými indexu harmonické. Oba fakty potvrzuje výsledek FFT z osciloskopu a měření pomocí kurzorů: mezi dvěma po sobě jdoucími peaky je rozestup 100Hz. Amplitudy první a třetí harmonické jsou cca. 450mV a 150mV, což souhlasí s očekávanou nepřímou závislostí na indexu harmonické.



Následuje obrázek trojúhelníkového průběhu. Trojúhelník rovněž obsahuje jen liché periodické, jejich amplituda je nepřímo úměrná čtverci pořadového čísla harmonické. Z tohoto důvodu jsou harmonické velmi rychle zatlumeny a nejsou pozorovatelné v lineárním měřítku. Logaritmické měřítko ukazuje, že význam mají harmonické první, třetí, ... až asi třináctá, další jsou beznadějně ztraceny v šumu. Již třetí harmonická je oproti první zatlumená skoro o 20 dB, jedenáctá potom o víc jak 40 dB.

