

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM Ústav fyziky FEKT VUT BRNO		Jméno Matyáš Peroutík			Kód 256371
		Ročník 2023/2024	Obor AMT	Skupina	Lab. skup. B
Spolupracoval Štěpán Pavlica		Měřeno dne 28. 2. 2024		Odevzdáno dne 13. 2. 2024	
Příprava	Opravy	Učitel		Hodnocení	
Název úlohy Vlastnosti ručkových měřicích přístrojů					Č. úlohy 17

## Úkol měření

Zobrazte na osciloskopu a změřte zadané hodnoty napětí s harmonickým průběhem, a to neusměrněné a jednocestně i dvoucestně usměrněné. Využijte podle možnosti všechny voltmetry u úlohy.

## Teoretický rozbor

### Efektivní hodnota elektrických veličin

Efektivní hodnota elektrické veličiny je hodnota stejnosměrné stálé veličiny, která by za dobu jedné periody signálu na stejném ideálním rezistoru vyzářila stejné teplo. Z této definice vyplývají následující vztahy:

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

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \tag{2}$$

kde  $u(t)$  je okamžitá hodnota napětí a  $i(t)$  je okamžitá hodnota proudu.

### Střední hodnota elektrických veličin

Efektivní hodnota elektrické veličiny je hodnota stejnosměrné stálé veličiny, která by za dobu jedné periody signálu umožnila přenos stejně velkého náboje. Taký se jí občasně říká stejnosměrná složka signálu. Z definice vyplývají následující vztahy:

$$U_s = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \tag{3}$$

$$I_s = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \tag{4}$$

kde  $u(t)$  je okamžitá hodnota napětí a  $i(t)$  je okamžitá hodnota proudu.

## Střídavé napětí

Tímto termínem se většinou myslí střídavé napětí harmonického sinusového průběhu. V laboratořích se používá zmenšené napětí sítě, které je transformováno v přípravku s transformátorem. Průběh tohoto napětí je popsán vzorcem:

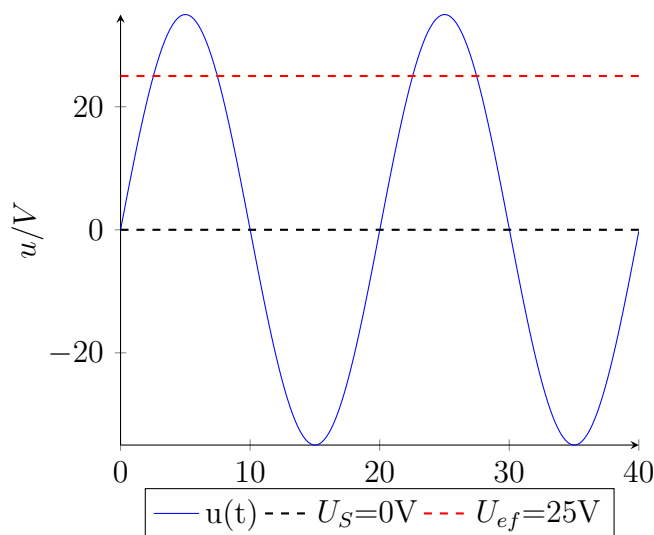
$$u(t) = U_M \cdot \sin(\omega t) = U_M \cdot \sin(2\pi f t) \quad (5)$$

kde  $u(t)$  je okamžitá hodnota napětí v čase  $t$ ,  $U_M$  je amplituda,  $\omega$  je úhlová rychlost dána vztahem:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

kde  $f$  je frekvence signálu a  $T$  je perioda signálu. Stejně vztahy platí pro proud.

Průběh střídavého harmonického napětí v čase



Pro tento průběh je možno použít zjednodušené verze vzorců (1) a (2). Jejich tvar poté bude následující:

$$U_{ef} = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

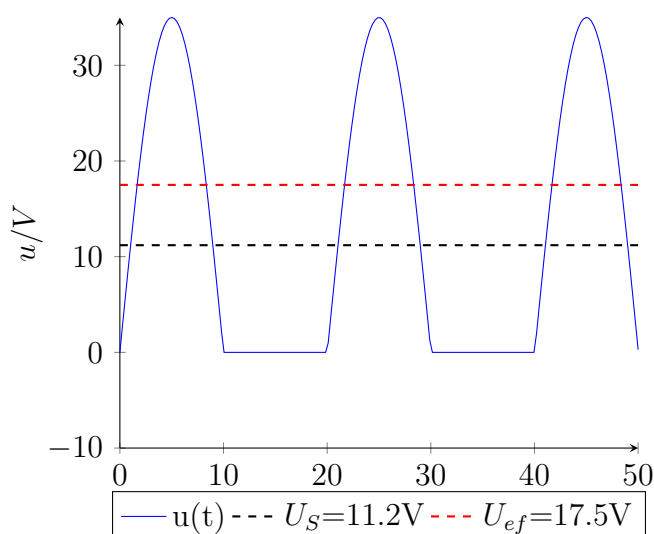
$$I_{ef} = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

Střední hodnoty proudů (4) a napětí (3) jsou u harmonického signálu rovny nule.

## Jednocestně usměrněné střídavé napětí

Pokud pustíme výše definovaný signál střídavého harmonického napětí přes jednocestný usměrňovač (obvykle tvořen polovodičovou diodou) dostaneme nový signál, který nazýváme jednocestně usměrněné střídavé napětí (proud). Tento průběh bude mít následující průběh:

Průběh jednocestně usměrněného střídavého harmonického napětí v čase



Po jednocestném usměrnění můžeme signál popsat následujícím vztahem

$$\begin{aligned} u(t) &= U_M \sin(2\pi ft) \dots \text{pro } \sin(2\pi ft) > 0 \\ u(t) &= 0 \dots \text{pro } \sin(2\pi ft) < 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Po dosazení průběhu (9) do rovnic (1) (2) (3) a (4) dostaneme následující vztahy pro proudy a napětí tohoto signálu.

$$U_{ef} = \frac{U_M}{2} \quad U_S = \frac{U_M}{\pi} \quad (10)$$

$$I_{ef} = \frac{I_M}{2} \quad I_S = \frac{I_M}{\pi} \quad (11)$$

## Dvoucestně usměrněné střídavé napětí

Pokud bychom na signál místo jednocestného usměrňovače, jak tomu bylo v minulé sekci, použili dvojcestný usměrňovač (obvykle realizován pomocí Gretzova oboucestného usměrňovače, resp. Gretzova můstku) dostaneme signál, který oproti jednocestně usměrněnému nemá nulovou hodnotu signálu po dobu půlky periody. Signál, který je na výstupu tohoto můstku je tedy absolutní hodnotou vstupního signálu, tudíž můžeme napsat následující vztah:

$$u(t) = U_M \cdot |\sin(2\pi ft)| \quad (12)$$

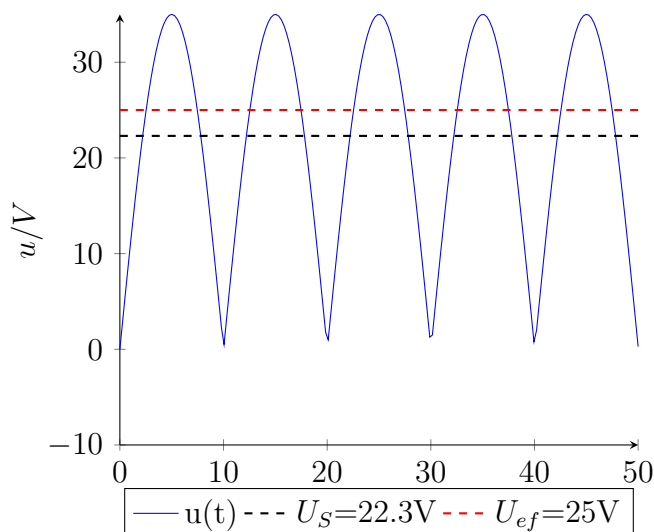
Tento signál bude mít podle vztahů (1) (2) (3) a (4) vyšší efektivní, i střední hodnoty. Po dosazení vztahu (12) a jeho proudovou verzí do zmíněných vztahů dostaneme následující vztahy popisující efektivní a střední hodnoty těchto veličin:

$$U_{ef} = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \quad U_S = \frac{2 \cdot U_M}{\pi} \quad (13)$$

$$I_{ef} = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \quad I_S = \frac{2 \cdot I_M}{\pi} \quad (14)$$

U těchto vztahů si můžeme všimnout, že vztahy pro efektivní hodnoty jsou stejné jako u střídavého harmonického signálu, a že střední hodnoty jsou dvojnásobkem jednosměrně usměrněného harmonického signálu. Toto je taky patrné z definic středních a efektivních hodnot. Průběh tohoto signálu je vidět na následujícím grafu.

Průběh dvojcestně usměrněného střídavého harmonického napětí v čase



## Měřicí soustavy elektrických analogových přístrojů a měření osciloskopem

Analogové měřicí přístroje měří základní elektrické veličiny (proud, napětí, odpor, činný výkon). Tyto přístroje jsou většinou konstruovány tak, že měří na principu vychýlení ručičky ciferníku působením magnetických silových polí. Tyto pole jsou většinou generovány přímo procházejícím proudem, nebo proudem, které v přístroji vytvoří měřené napětí. Pokud se jedná o stejnosměrný měřicí přístroj, nesmí se zanedbat polarita. Analogové měřicí přístroje mají většinou vnitřní odpor, který oproti digitálním měřicím přístrojům nemůžeme zanedbat.

### Třída přesnosti

Třída přesnosti je parametr, který udává maximální chybu analogových přístrojů. Třída přesnosti se vyjadřuje v procentech a má označení  $T_P$ . Pro určení mezní absolutní chyby platí následující vztah:

$$\delta(U) = \frac{T_P}{100} \cdot U_R \quad (15)$$

kde  $U_R$  je zvolený rozsah voltmetru

Tato chyba je na celém zvoleném rozsahu stejná. Pokud chceme vypočítat relativní chybu, což je v procentech vyjádřený poměr absolutní chyby a naměřené hodnoty napětí, můžeme použít následující vztah.

$$\delta_r(U) = \frac{\delta(U)}{U_M} \cdot 100 \quad (16)$$

Z tohoto plyne, že chyba měření je výrazně nižší při měření ke konci stupnice. Proto se většinou snažíme docílit toho, aby se naměřená hodnota pohybovala v horní třetině rozsahu.

### Měřicí přístroje s jedním rozsahem

U tohoto typu měřících přístrojů ukazuje ručička na stupnici přímo hodnotu měřené veličiny. Tyto stupnice mohou být lineární, logaritmické či jinak nelineární, a také mohou mít potlačenou nulu, nebo prodlouženou stupnici. Pokud má přístroj prodlouženou stupnici, tak od místa označeným tečkou jsou hodnoty orientační - neodpovídají  $T_p$  přístroje.

### Měřicí přístroje s více rozsahy

Tyto měřicí přístroje mají jednu stupnici, ale více možných rozsahů. Ručička tudíž nedává přímo hodnotu měřené veličiny. Pro to, abychom získali skutečnou hodnotu měřené veličiny můžeme využít následující vztah. V tomto vztahu pro demonstraci použijí napětí.

$$U = k \cdot \alpha; \quad k = \frac{U_R}{\alpha_{max}} \quad (17)$$

kde  $\alpha$  je naměřený počet dílků stupnice,  $\alpha_{max}$  je maximální počet dílků na stupnici a  $U_R$  je zvolený rozsah napětí. Obdobně se počítají hodnoty libovoné měřené veličiny.

### Měřicí soustavy

Analogové měřicí přístroje mají různé principy měření. Na základě toho, co potřebujeme měřit je tedy nutné si vybrat příslušný typ měřícího přístroje.

### Přístroje magnetoelektrické

Výchylka ručičky těchto přístrojů je přímo úměrná střední hodnotě měřené veličiny. Tyto přístroje reagují pouze na stejnosměrné proudy, a proto je nutné dbát na polaritu. Připojíme-li tento měřicí přístroj na střídavý proud nízké frekvence, ručička se bude snažit sledovat změnu polarity proudu. Pokud zvýšíme dostatečně frekvenci, ručička již stíhat nebude a ustálí se na nule. Pokud se takto stane, a měřená veličina je dostatečně vysoká, může dojít ke zničení měřícího přístroje, nebo k ohrožení obsluhy tohoto přístroje.

### Přístroje magnetoelektrické s usměrňovačem

Tato soustava má velmi podobnou konstrukci jako mají přístroje magnetoelektrické, akorát mají předřazený usměrňovač, což jim umožňuje měřit i střídavé veličiny. Výchylka ručičky tohoto přístroje je [měrná střední hodnotě usměrněného průběhu měřené veličiny. Nevýhodou tohoto měřícího přístroje je to, že nemá lineární propustnost, což znamená že při jiných parametrech vstupního signálu, než na který byl konstruován, změřené hodnoty nemusí vypovídat skutečné hodnoty. Většina těchto přístrojů je konstruována pro harmonický průběh při frekvenci 50Hz. Stupnice těchto přístrojů bývá cejchována v efektivních hodnotách, tudíž tato soustava měří efektivní hodnotu daného průběhu. Tudíž pokud chceme zjistit střední hodnotu průběhu, musíme měřenou hodnotu vydělit činitelem tvaru.

## Přístroje ferromagnetické (elektromagnetické)

U těchto přístrojů je výchylka ručičky přímo [měrná efektivní hodnotě měřené veličiny, a stejně tak je i cejchována stupnice. Elektromagnetické přístroje jsou na výrobu nejjednodušší, ale jsou méně citlivé a mohou zanechávat zkreslenější signál kvůli přechodným dějům než například přístroje magnetoelektrické.

## Osciloskop jako univerzální měřicí přístroj

Osciloskop je univerzální měřicí přístroj, který na svém displeji ukazuje časové průběhy signálů, které jsou přivedeny na jeho kanály. Osciloskopy se dělí na digitální a analogové, dvoukanálové a vícekanálové. V této úloze využijeme digitální dvoukanálový osciloskop. Nastavení tohoto osciloskopu je oproti analogovému jednoduché, jelikož digitální osciloskopy bývají vybaveny tlačítkem autoscale.

## Princip metody měření

Pro měření této úlohy jsme měli k dispozici přípravku, jehož zapojení je zobrazeno níže, dva uzly o 5-ti možných připojených zařízeních, digitální osciloskop a 3 analogové měřicí přístroje (magnetoelektrický, magnetoelektrický s usměrňovačem a ferromagnetický).

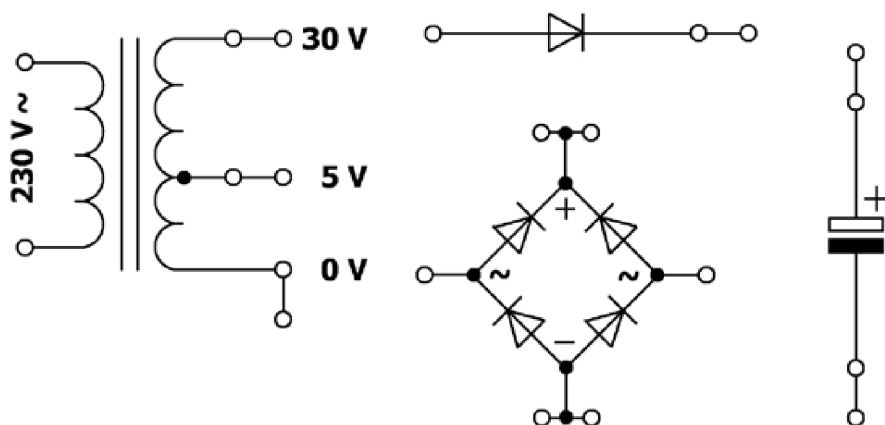


Schéma uspořádání prvku

Z tohoto přípravku jsme během měření využili napětí 25V (mezi svorkami 30V a 5V), které jsme nejprve připojili na všechny měřicí přístroje, až na magnetoelektrický. Dále jsme jeden přívodní vodič připojili přes jednocestný usměrňovač realizovaný jednou diodou na všechny měřicí přístroje. Nakonec jsme připojili všechny měřicí přístroje na dvojcenný usměrňovač realizovaný Gretzovým můstkem napájeným transformátorem. Osciloskop jsme připojovali přes dělič 1:10.

# Naměřené hodnoty

Jmenovitá hodnota napětí na výstupu transformátoru 25V	Orientační měření osciloskopem		V1			V2			V3		
			Magnetoelektrický voltmetr TP 0.5%			Magnetoelektrický voltmetr s usměrňovačem TP 0.5%			Ferromagnetický voltmetr TP 0.5%		
			$U_s$			$U_{ef}$			$U_{ef}$		
Měřený průběh	u [V]	u [V]	$\alpha$ [dílek]	k [V/dílek]	$U_{mer} = \alpha \cdot k$ [V]	$\alpha$ [dílek]	k [V/dílek]	$U_{mer} = \alpha \cdot k$ [V]	$\alpha$ [dílek]	k [V/dílek]	$U_{mer} = \alpha \cdot k$ [V]
Harmonický neusměrněný	64.3	32.15	-	-	-	49	60/120	24.5	117	26/130	23.4
Jednocestně usměrněný	31.8	31.1	53	24/120	10.6	62	24/120	12.4	82.5	26/130	16.5
Dvoucestně usměrněný	31.0	30.5	105	24/120	21	114	24/120	22.8	113	26/130	22.6

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

## Zpracování hodnot

### Harmonický neusměrněný průběh

Měřidlo	$U_{mer}$ [V]	$\delta(U_{mer})$ [V]	$U_{ef}$ [V]	$U_s$ [V]	$U_M$ [V]	$\delta(U_M)$ [V]	$\delta_r(U_M)$ [V]	pozn.
Magnetoelektrický Voltmetr	-	-	-	-	-	-	-	Rozsah: -V TP: 0.5%
Magnetoelektrický voltmetr s usměrňovačem	24.5	0.9	24.5	0	34.6	1.3	3.8	Rozsah: 60V TP: 1.5%
Elektromagnetický (ferromagnetický) voltmetr	23.4	0.13	23.4	0	33.1	0.18	0.5	Rozsah: 26V TP: 0.5%

Průběh napětí: harmonický

### Ukázka výpočtů pro magnetoelektrický voltmetr s usměrňovačem

Mezní absolutní chyba

$$\delta(U) = \frac{T_p}{100} \cdot U_R = \frac{1.5}{100} \cdot 60 = 0.9V \quad (18)$$

Amplituda vstupního signálu

$$U_M = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 24.5 \cdot \sqrt{2} = 34.6V \quad (19)$$

Absolutní chyba měření amplitudy

$$\delta(U_M) = \delta(U_{mer}) \cdot \sqrt{2} = 0.9 \cdot \sqrt{2} = 1.3V \quad (20)$$

Relativní chyba měření amplitudy

$$\delta_r(U_M) = \frac{\delta(U_M)}{U_M} \cdot 100 = \frac{1.3}{34.6} \cdot 100 = 3.8\% \quad (21)$$

## Jednocestně usměrněný harmonický průběh

Měřidlo	$U_{mer}$ [V]	$\delta(U_{mer})$ [V]	$U_{ef}$ [V]	$U_s$ [V]	$U_M$ [V]	$\delta(U_M)$ [V]	$\delta_r(U_M)$ [V]	pozn.
Magnetoelektrický Voltmetr	10.6	0.12	-	10.6	33.3	0.4	1.2	Rozsah: 24V TP: 0.5%
Magnetoelektrický voltmetr s usměřňovačem	12.4	0.4	17.5	-	35.1	1.13	3.2	Rozsah: 24V TP: 1.5%
Elektromagnetický (ferromagnetický) voltmetr	16.5	0.13	16.5	-	33.0	0.26	0.8	Rozsah: 26V TP: 0.5%

Průběh napětí: jednocestně usměrněný

### Ukázka výpočtů pro magnetoelektrický voltmetr s usměřňovačem

Mezní absolutní chyba

$$\delta(U) = \frac{T_p}{100} \cdot U_R = \frac{1.5}{100} \cdot 24 = 0.4V \quad (22)$$

Efektivní hodnota napětí

$$U_{ef} = U_{mer} \cdot \sqrt{2} = 12.4 \cdot \sqrt{2} = 17.5V \quad (23)$$

Amplituda vstupního signálu

$$U_M = U_{mer} \cdot 2\sqrt{2} = 12.4 \cdot 2\sqrt{2} = 35.1V \quad (24)$$

Absolutní chyba měření amplitudy

$$\delta(U_M) = \delta(U_{mer}) \cdot 2\sqrt{2} = 0.4 \cdot 2\sqrt{2} = 1.13V \quad (25)$$

Relativní chyba měření amplitudy

$$\delta_r(U_M) = \frac{\delta(U_M)}{U_M} \cdot 100 = \frac{1.13}{35.1} \cdot 100 = 3.8\% \quad (26)$$

## Dvojcestně usměrněný harmonický průběh

Měřidlo	$U_{mer}$ [V]	$\delta(U_{mer})$ [V]	$U_{ef}$ [V]	$U_s$ [V]	$U_M$ [V]	$\delta(U_M)$ [V]	$\delta_r(U_M)$ [V]	pozn.
Magnetoelektrický Voltmetr	21	0.12	-	21	33.0	0.19	0.6	Rozsah: 24V TP: 0.5%
Magnetoelektrický voltmetr s usměřňovačem	22.8	0.4	22.8	-	32.2	0.6	1.8	Rozsah: 24V TP: 1.5%
Elektromagnetický (ferromagnetický) voltmetr	22.6	0.13	22.6	-	32.0	0.18	0.6	Rozsah: 26V TP: 0.5%

Průběh napětí: dvojcestně usměrněný

### Ukázka výpočtů pro elektromagnetický (ferromagnetický) voltmetr

Mezní absolutní chyba

$$\delta(U) = \frac{T_p}{100} \cdot U_R = \frac{0.5}{100} \cdot 26 = 0.13V \quad (27)$$



Amplituda vstupního signálu

$$U_M = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 22.6 \cdot \sqrt{2} = 32.0V \quad (28)$$

Absolutní chyba měření amplitudy

$$\delta(U_M) = \delta(U_{mer}) \cdot \sqrt{2} = 0.13 \cdot \sqrt{2} = 0.18V \quad (29)$$

Relativní chyba měření amplitudy

$$\delta_r(U_M) = \frac{\delta(U_M)}{U_M} \cdot 100 = \frac{0.18}{32.0} \cdot 100 = 0.6\% \quad (30)$$

## Shrnutí vypočtených hodnot

Jmenovitý výstup transformátoru	Osciloskop orientačně	Magnetoelektrický voltmetr TP 0.5%			Magnetoelektrický voltmetr s usměrňovačem TP 1.5%			Elektromagnetický voltmetr (ferromagnetický) TP 0.5%		
<b>25V</b>	$U_M$	$U_M$	$\delta(U_M)$	$\delta(U_M)$	$U_M$	$\delta(U_M)$	$\delta(U_M)$	$U_M$	$\delta(U_M)$	$\delta(U_M)$
Měřený průběh	[V]	[V]	[V]	[%]	[V]	[V]	[%]	[V]	[V]	[%]
Harmonické (neusměrněné)	32.15	-	-	-	34.6	1.3	3.8	33.1	0.18	0.5
Jednocestně usměrněné	31.1	33.3	0.4	1.2	35.1	1.13	3.2	33.0	0.26	0.8
Dvoucestně usměrněné	30.5	33.0	0.19	0.6	32.2	0.6	1.8	32.0	0.18	0.6

Přehledná tabulka velikostí amplitud a jejich absolutních a relativních chyb

## Použité přístroje

Označení ve schématu	Název	Identifikace (výrobní číslo)	Doplňkové údaje
V1	DKP661	1000004877	TP 0,5% DC, ELP2, horizont. poloha
V2	DKP850	1060005264	TP 1,5% AC, ELP2, horizont. poloha
V3	DKP536	1000004433	TP 0,5% AC, ELP2, horizont. poloha
Osciloskop	Keysight EDUX 1002 A	CN57350373	50 MHz, 16 GSa/s

Tabulka použitých přístrojů

## Závěr

Z naměřených hodnot amplitud napětí (viz. sekce Shrnutí vypočtených hodnot) lze vypočítat na základě porovnání vypočtených amplitud ve všech měřených průbězích na jednotlivých voltmetrech, že nejméně kolísala hodnota napětí u elektromagnetického voltmetru. Pokud bychom se omezili pouze na usměrněné průběhy, lepší výsledky by měl magnetoelektrický voltmetr bez usměrňovače. Vyšší odchylky magnetoelektrického voltmetru s usměrňovačem mohly být zapříčiněny úbytkem napětí na diodách.

Hodnoty měřené osciloskopem mají výrazně vyšší odchylku, než hodnoty měřené analogovými přístroji. Tato chyba mohla být hlavně způsobena nepřesnou děličkou 1:10, která nebyla proměřována. Další chyba mohla být způsobena vlivem ostatních měřících přístrojů.