4.1. Úvod

Frekvenční závislost použitých multimetrů je třeba vzít v úvahu nejen v případě měření napětí a proudu na zařízeních typu akustické zesilovače apod. (sinusové průběhy), ale např. i v případě měření na pulzních zdrojích počítačů (pulzní průběhy). Zde je díky širokému frekvenčnímu spektru těchto průběhů (viz Fourierův rozvoj symetrického obdélníkového průběhu) tato závislost ještěvý znamnější. V obou případech však může díky tomu (zejména u levnějších multimetrů) docházet k významným chybám měření.

Kmitočtová závislost je zpravidla způsobena poklesem přenosu operačního zesilovače v převodníku střídavého napětí na stejnosměrné. Výrobce často tento jev částečně kompenzuje korekční kapacitou vhodně zařazenou např. do obvodu tohoto zesilovače. Je-li ale tato kapacita příliš velká, dochází k překompenzování a údaj od jistého kmitočtu roste s následným prudkým poklesem.

4.2. Domácí příprava

4.2.1. Proč může záviset kmitočtová závislost multimetrů i na použitém rozsahu?

Kmitočtová závislost *přístroje s usměrňovačem* je způsobena poklesem přenosu zesilovače, ten bývá kompenzován paralelně zařazenou kapacitou k přadřednému odporu, tudíž použití RC článku pro který pokud je kapacita příliž velká dochází k překompenzování a údaj roste (a posléze zase klesá), stejný efekt má parazitní kapacita rezistoru v předřadníku (výchylka je úměrná kmitočtu), pro vzšší kmitočty dochází k poklesu střední hodnoty napětí za usměrňovačem, který kvůli dlouhé době zotavení začíná vést i v závěrném směru, při použití Ge nebo Si diod jako dvoucesný usměrňovač lze dosáhnout kmitočtových rozsahů v řádu desítek kHz.

Elektromagnetický voltmetr má úzký kmitočtový rozsah (do 100 Hz), z důvodu induktivní reaktance cívky měřícího ústrojí, vířivých proudů indukovaných střídavým EMP cívky

4.2.2. Jaké jednotlivé harmonické složky obsahuje signál v případě symetrického obdélníkového průběhu a jakou mají amplitudu v poměru k základní harmonické?

$$U(t) = U_m \sum_{k=1}^{K} \frac{1}{2k-1} \sin((2k-1)f_0 t) = \sum_{n=1,3,\dots,K} \frac{U_m}{n} \sin(nf_0 t)$$

4.2.3. Proč v případě obdélníkových průběhů bude při nízkých kmitočtech (např. 50 Hz) údaj levných multimetrů zhruba 1,11 krát větší než u těch kvalitnějších měřicích správně efektivní hodnotu?

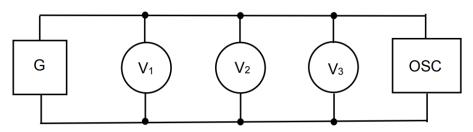
$$\bar{U}_{\rm rec} = U_{ef,\rm rec}$$
 $\bar{U}_{\rm sin} = \frac{2U_m}{\pi} \wedge U_{ef,\rm sin} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_{ef,\rm sin} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \bar{U}_{\rm sin} \approx 1.11 \cdot \bar{U}_{\rm sin}$

Levné multimetry předpokládají sinusový průběh střídavého napětí a měří střední aritmetickou hodnotu napětí \bar{U} , které posléze přenásobí konstantou 1.11, aby odvodili efektivní hodnotu napětí U_{ef} , zatímco dražší multimetry měří přímo U_{ef} , která je v případě obdelníkového signálu rovna \bar{U} .

4.3. Úkol měření

- **4.3.1.** V rozsahu kmitočtů 70 Hz až 300 kHz (od 100 Hz pro kmitočty v řadě 1, 3, 10) změřte kmitočtovou závislost předložených číslicových multimetrů. Za kmitočtově nezávislý považujte v tomto frekvenčním rozsahu číslicový voltmetr HP/Agilent 34401A. Měření proveďte na příslušných rozsazích při hodnotách napětí a) 1 V, b) 7 V. Zapojení přístrojů je na obr. 4.1.
- **4.3.2.** Totéž měření proveď te pro symetrický obdélníkový signál pro efektivní hodnotu 1 V.
- 4.3.3. Změřené závislosti vyneste do grafů a teoreticky zdůvodněte.

4.4. Schéma zapojení



Obr. 4.1. Zapojení pro měření frekvenční závislosti multimetrů

4.5. Poznámky k měření

Protože střídavé voltmetry jsou kalibrovány pro sinusový průběh napětí při frekvenci řádově desítek až stovek Hz, jako první krok nastavíme pomocí generátoru napětí tak, aby při frekvenci 70 Hz ukazoval nejpřesnější voltmetr a) 1 V, b) 7 V (volíme frekvenci odlišnou od 50 Hz, rušení síťovým kmitočtem může při 50 Hz způsobit zázněje znemožňující nastavení stabilního údaje).

Při kmitočtu 70 Hz zkontrolujeme údaje ostatních voltmetrů, zda odpovídají tolerancím zaručovaným výrobcem (rozdíl údajů zkoumaného a referenčního voltmetru nesmí přesáhnout součet zaručených absolutních hodnot tolerancí).

V daném rozsahu kmitočtů do 300 kHz je podle údajů výrobce nejpřesnější číslicový voltmetr HP 34401A, takže napětí budeme nastavovat podle jeho údajů na hodnotu a) 1 V, b) 7 V při všech kmitočtech – tento číslicový voltmetr bude referenčním přístrojem. Pro zadané kmitočty zaznamenáme údaje ostatních přístrojů a do grafu vyneseme závislosti

$$\alpha_{f_n} = f_n(f)$$

kde α_{f_n} je údaj přístroje V_n při kmitočtu f.

V grafu je vhodné použít pro osu x (kmitočet) logaritmické měřítko.

Z tabulky nebo grafů lze zjistit kmitočet, kdy přestává pro daný typ voltmetru platit jeho přesnost udaná výrobcem.

4.3.1

T. 4.1. Měření sinusového napětí $U~(\approx 1)~[{\rm V}]$ pro frekvence 70 Hz $-~300~{\rm kHz}$

f [Hz]	70	200	500	1k	3k	10k	20k	50k	100k	200k	300k
V1	1.001	1.028	1.023	1.023	1.023	1.013	1.012	1.007	1.020	1.008	1.016
V2	1.004	1.033	1.030	1.031	1.032	0.998	0.941	0.739	0.340	0.006	0.009
V3	0.994	1.021	1.012	1.000	0.906	0.497	0.243	0.029	0.001	0.000	0.000
V4	1.009	1.039	1.032	1.032	1.033	1.016	1.019	1.014	1.027	1.013	1.019

T. 4.2. Relativní odchylka od sinusového napětí $U(V1) (\approx 1 \text{ V})$ [%]

								() (/ L	J	
f [Hz]	70	200	500	1k	3k	10k	20k	50k	100k	200k	300k
V2	0.30	0.49	0.68	0.78	0.88	1.48	7.02	26.61	66.67	99.40	99.11
V3	0.70	0.68	1.08	2.25	11.44	50.94	75.99	97.12	99.90	100	100
V4	0.80	1.07	0.88	0.88	0.98	0.30	0.69	0.70	0.69	0.50	0.30

T. 4.3. Měření sinusového napětí $U \approx 7$ [V] pro frekvence 70 Hz -300 kHz

f [Hz]	70	200	500	1k	3k	10k	20k	50k	100k	200k	300k
V1	7.015	7.030	7.013	7.004	7.001	7.003	7.005	7.042	7.002	7.017	7.007
V2	6.95	6.96	6.93	6.91	6.84	6.57	6.16	4.94	2.96	0.33	0.07
V3	7.04	7.05	7.02	7.02	7.15	8.85	13.39	15.31	17.34	4.17	0.53
V4	7.074	7.080	7.073	7.071	7.070	7.070	7.071	7.097	7.031	7.023	7.001

T. 4.4. Relativní odchylka od sinusového napětí $U(V1) (\approx 7 \text{ V})$ [%]

							. I	- (·) (· · / L′	~]	
f [Hz]	70	200	500	1k	3k	10k	20k	50k	100k	200k	300k
V2	0.36	0.28	0.10	0.23	2.13	26.37	91.15	117.41	147.64	40.57	92.44
V3	0.93	0.99	1.18	1.34	2.30	6.18	12.06	29.85	57.73	95.30	99.00
V4	0.84	0.71	0.86	0.96	0.99	0.96	0.94	0.78	0.41	0.09	0.09

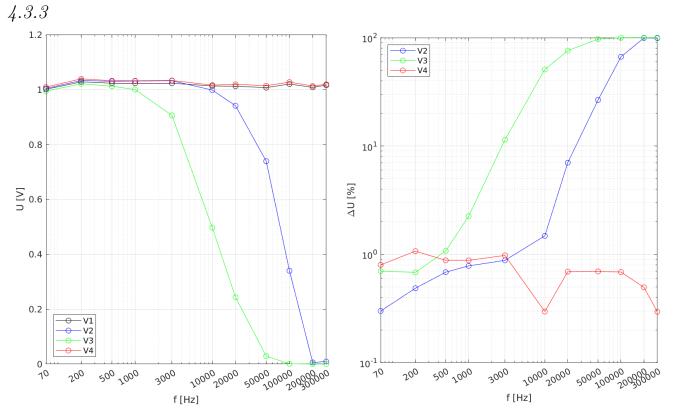
4.3.2

T. 4.5. Měření obdelníkového napětí $U \approx 1$ [V] pro frekvence 70 Hz -300 kHz

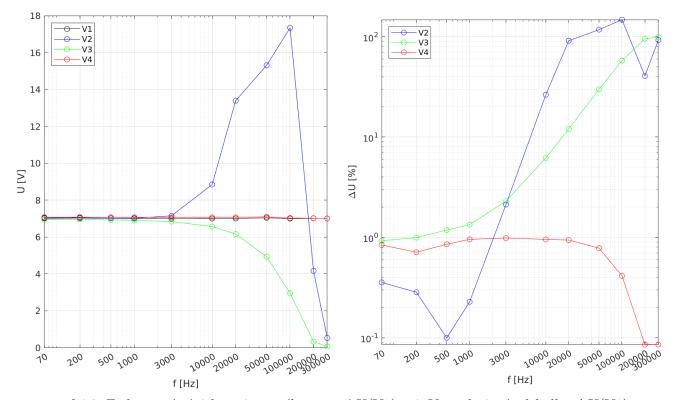
f [Hz]	70	200	500	1k	3k	10k	20k	50k	100k	200k	300k
V1	1.003	1.004	1.004	1.005	1.004	1.002	1.001	1.001	1.015	1.013	1.011
V2	1.102	1.106	1.106	1.105	1.096	1.062	1.026	0.769	0.319	0.024	0.009
V3	1.06	1.05	1.05	1.03	0.97	0.77	0.52	0.05	0.004	0.001	0.000
V4	1.010	1.012	1.013	1.014	1.013	1.010	1.008	1.010	1.021	1.020	1.017

T. 4.6. Relativní odchylka od obdelníkového napětí $U(V1) (\approx 1 \text{ V})$ [%]

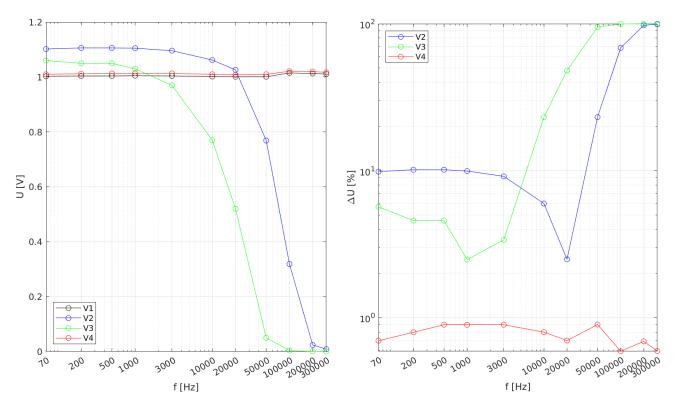
			0 020	,			I	~ (. –)	(/ [, ~]	
f [Hz]	70	200	500	1k	3k	10k	20k	50k	100k	200k	300k
V2	9.87	10.16	10.16	9.95	9.16	5.99	2.50	23.18	68.57	97.63	99.11
V3	5.68	4.58	4.58	2.49	3.39	23.15	48.05	95.00	99.61	99.90	100
V4	0.70	0.80	0.90	0.90	0.90	0.80	0.70	0.90	0.59	0.69	0.59



graf 4.1. Frekvenční závislost sinusového napětí $U\approx 1$ V a relativní odchylky $\Delta U(\mathrm{V1})$



graf 4.2. Frekvenční závislost sinusového napětí $U(\mathrm{V1}) \approx 7~\mathrm{V}$ a relativní odchylky $\Delta U(\mathrm{V1})$



graf 4.1. Frekvenční závislost obdelníkového napětí $U(V1) \approx 1$ V a relativní odchylky $\Delta U(V1)$

voltmetr V1 jsme použili jako referenci, neboť byl z použitých měřících přístrojů nejpřesnější, a zároveň námi použité frekvence 70 Hz – 300 kHz vyhovovali jeho rozsahu;

podíváme-li se na relativní odchylky od referenčního napětí měřeného voltmetrem V1:

voltmetr V2 přesáhne rozdíl 10% při frekvenci 50 kHz pro $U \approx 1 \text{ V} \text{ (M} = 2 \text{ V)}$

a pro $U \approx 7 \text{ V} \text{ (M} = 20 \text{ V)}$ přesahuje tuto hranici při frekvenci 10 kHz,

frekvenční rozsah udaný výrobcem je zde 400 Hz, v tomto rozsahu je odchylka $\Delta U(V1) < 1\%$, zároveň je při měření obdelníkového signálu $U \approx 1$ patrné, že přístroj vypočítává efektivní hodnotu ze střední hodnoty napětí, protože pro frekvence pod 10 kHz je měřené napětí $U(V2) \approx 1.1 \approx 1 \text{ V} \cdot 1.11$, kde 1.11 je převod pro sinusové napětí;

voltmetr V3 přesáhne rozdíl 10% při frekvenci 3 kHz pro $U \approx 1 \text{ V (M} = 4 \text{ V)}$

a pro $U \approx 7 \text{ V} \text{ (M} = 40 \text{ V)}$ přesahuje tuto hranici při frekvenci 20 kHz,

frekvenční rozsah udaný výrobcem je zde 450 Hz, v tomto rozsahu je odchylka $\Delta U(V1) \approx 1\%$, tento voltmetr nemá parametr TrueRMS,

tudíž by měl pro převod stejně jako voltmetr V2 používat konstantu 1.11,

což ale na první pohled z grafu měření obdelníkového napětí vidět není;

osciloskop použitý jako voltmetr V4 má pro všechny grafy konstantní hodnotu odchchylky $\Delta U(V1) \lesssim 1\%$, tudíž je pro náš rozsah 70 Hz – 300 kHz frekvenčně nezávislý, to je způsobeno jeho vysokou vzorkovací frekvencí 70 MHz;

frekvenční závislosti voltmetrů V2 a V3 jsou způsobeny použitím RC článku v AC/DC převodníku použitých multimetrů viz 4.2.1.

4.6. Seznam použitých přístrojů a obvodvých prvků

zn.	přístroj/prvek	specifikace
V1	multimetr	HP 34401A: $M(U \le 750 \text{ V}, f) = 3 \text{ Hz} - 300 \text{ kHz}$
V2	multimetr	MASTECH MY-64: $M(U \le 700 \text{ V}, f) = 40 \text{ Hz} - 400 \text{ Hz}$
V3	multimetr	SUMMIT 45: $M(U \le 750 \text{ V}, f) = 45 \text{ Hz} - 450 \text{ Hz}$
V4	osciloskop	Keysight DSOX2002A 70 MHz

4.7. Závěrečné vyhodnocení

při měření obvodu v HUS (nebo PNUS) je třeba brát v potaz frekvenční rozsah měřících přístrojů, ten může být omezen vlastnosmi RC článku usměrňovače u magnetoelektrických přístrojů, nebo parazitní kapacitou cívky elektromagnetických přístrojů, případně vzorkovací frekvencí přístrojů se vzorkovačem; měříme-li obvod v PNUS, není vhodné použití magnetoelektrických přístrojů, neboť používají převodník AC/DC a efektivní hodnotu získávají přenásobením sřední hodnoty konstantou 1.11, která se vztahuje pouze k harmonickému průběhu