

# 1. FREKVENČNÍ ZÁVISLOST MULTIMETRŮ A MĚŘENÍ NESINUSOVÝCH NAPĚTÍ

## 1.1. Úvod

### Měření frekvenční závislosti multimetrů

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 ještě významnější. 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. Výrobce často tento jev částečně kompenzuje korekční kapacitou vhodně zařazenou buď do obvodu tohoto zesilovače, popř. vstupního děliče. Je-li ale tato kapacita příliš velká, dochází k překompenzování a údaj od jistého kmitočtu roste s následným prudkým poklesem.

### Měření nesinusových napětí

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, 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 v případě měření takovýmto přístrojem 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) popř. True RMS. V tomto případě měří multimetr správně efektivní hodnotu napětí, popř. proudu i v případě neharmonických průběhů.

V případě číslicových osciloskopů, které jsou schopny měřit parametry zobrazených průběhů, je efektivní hodnota vypočtena z jednotlivých vzorků dle diskretizovaného definičního integrálu, tedy

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2} \quad \text{kde } N \text{ je počet vzorků na periodu.}$$

*Poznámka:*

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.

### Výpočet efektivní a střední hodnoty střídavého napětí definovaného průběhu

Efektivní hodnota střídavého napětí je definována vztahem

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

a jeho aritmetická střední hodnota usměrněného průběhu (tzv. aritmetická) vztahem

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

Z těchto definičních vztahů je třeba vycházet při výpočtu střední a efektivní hodnoty napětí harmonického průběhu na zátěži pro úhel sepnutí  $\alpha$ . Pro sinusový průběh napětí dle obr. 2.3a) platí

$$u(t) = U_m \sin \omega t, \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3)$$

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  $\alpha$  pak platí (při řešení integrálu použijeme substituci  $x = \omega t$ , dále označme  $t_1 = \frac{T}{2} \frac{\alpha}{\pi}$ )

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

a pro efektivní hodnotu platí

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

## 1.2. Domácí příprava

- 1.2.1. Prostudujte si teoretický úvod
- 1.2.2. Proč může záviset kmitočtová závislost multimetrů i na použitém rozsahu?
- 1.2.3. Pro úhel sepnutí  $\alpha = 90^\circ$  určete aritmetickou střední hodnotu a efektivní hodnotu napětí výpočtem z definic, je-li efektivní hodnota při sinusovém průběhu  $U_{\text{ef}}$ .

## 1.3. Úkol měření

- 1.3.1. Zapojte první část úlohy dle obr. 1.1.
- 1.3.2. 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.

- 1.3.3. Frekvenční závislosti změřené dle bodu 1.3.2 vynesete do grafů, pro osu  $x$  (kmitočty) **použijte logaritmické měřítko**.
- 1.3.4. Zapojte druhou část úlohy dle obr. 1.2.
- 1.3.5. Změřte napětí na zátěži, jejíž výkon je regulován obvodem s triakem, pro úhel sepnutí  $\alpha$  přibližně  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  předloženými číslicovými multimetry  $V_1$  až  $V_4$  a číslicovým osciloskopem v režimu „Meas“.
- 1.3.6. Z údajů multimetrů naměřených v bodě 1.3.4 určete, které z multimetrů měří správně efektivní hodnotu, a určete relativní chybu metody měření efektivní hodnoty u ostatních.
- 1.3.7. Z údaje multimetrů, které to umožňují, určete aritmetickou střední hodnotu měřeného průběhu.
- 1.3.8. Pro úhel sepnutí  $\alpha = 90^\circ$  určete aritmetickou střední hodnotu a efektivní hodnotu napětí rovněž výpočtem z definic (viz příprava, bod 1.2.3,  $U_{ef}$  = hodnota naměřená pro sinusový průběh nejpřesnějším z multimetrů). Vypočtené hodnoty srovnajte s naměřenými a v případě jejich rozdílu analyzujte možné příčiny.

#### *Poznámky k měření:*

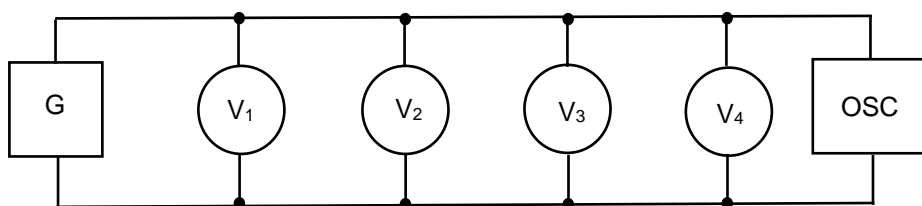
Protože střídavé voltmetry jsou kalibrovány pro sinusový průběh napětí při frekvenci řádově desítek až stovek Hz, jako první krok nastavíme pomocí generátoru napětí tak, aby při frekvenci 70 Hz ukazoval nejpřesnější voltmetr a) 1 V, b) 7 V (volíme frekvenci odlišnou od 50 Hz, rušení síťovým kmitočtem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

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

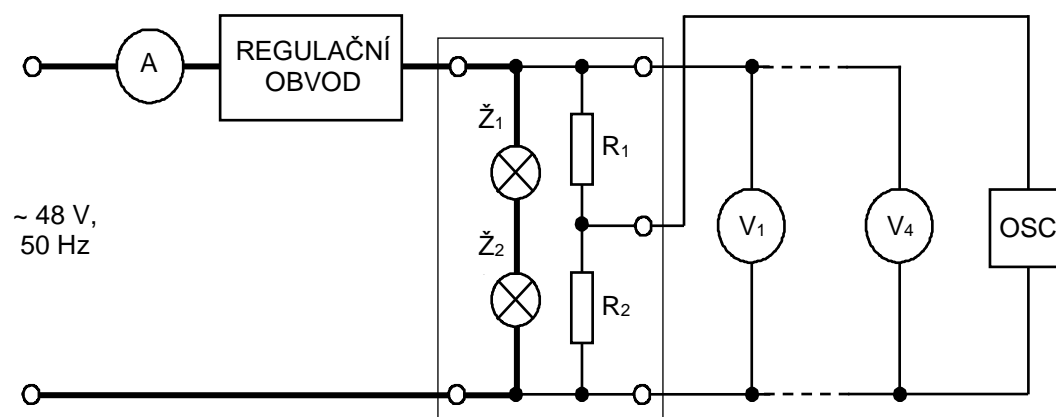
kde  $\alpha_{fn}$  je údaj přístroje  $V_n$  při kmitočtu  $f$ .

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

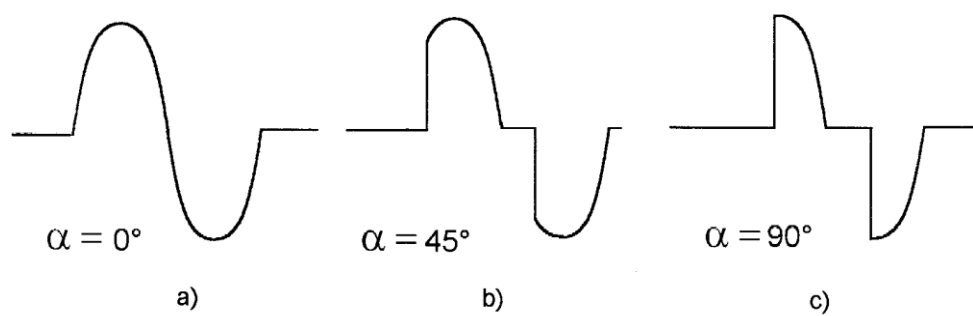
## 1.4. Schéma zapojení



Obr. 1.1. Zapojení pro měření frekvenční závislosti



Obr. 1.2. Zapojení měřicího obvodu



Obr. 1.3. Průběhy měřených napětí