

MĚŘENÍ V ELEKTROTECHNICE

TEMATICKÉ OKRUHY

1. Přesnost měření. Chyby analogových a číslicových měřicích přístrojů. Chyby nepřímých a opakovaných měření.

Primární etalon napětí. Zdroje referenčních napětí. Primární etalon odporu. Sekundární etalon odporu. Místa a příčiny vzniku chyb při měření. Chyby analogových měřicích přístrojů – třída přesnost, chyby údajů v absolutní a relativní míře. Chyby číslicových měřicích přístrojů – způsob vyjádření, chyby údajů v absolutní a relativní míře. Chyby nepřímých měření.

2. Principy, vlastnosti a použití analogových měřicích přístrojů.

Statické charakteristiky analogových měřicích přístrojů. Momenty působící v elektromechanickém měřicím ústrojí. Magnetoelektrické měřicí ústrojí. Stejnoseměrné magnetoelektrické voltmetry, základní vlastnosti, změna rozsahu. Stejnoseměrné magnetoelektrické ampérmetry, základní vlastnosti, změna rozsahu. Magnetoelektrický přístroj s usměrňovačem, problém cejchování stupnice. Ferromagnetické měřicí ústrojí, princip, obrázek, pohybový moment, vlastnosti, použití. Elektrodynamické měřicí ústrojí, princip, pohybový moment, vlastnosti, použití. Ferrodynamické měřicí ústrojí, princip, pohybový moment, vlastnosti, použití. Indukční měřicí ústrojí, princip, pohybový moment, vlastnosti, použití.

3. Pasivní a aktivní měřicí převodníky.

Měřicí transformátor proudu, zapojení do obvodu, převod, výpočet jmenovité sekundární impedance. Měřicí transformátor napětí, zapojení do obvodu, převod, výpočet jmenovité sekundární impedance. Usměrňovače pro střídavé voltmetry. Převodníky k realizaci součtu, rozdílu a podílu. Převodníky k realizaci součinu - násobička s Hallovým článkem, princip logaritmicko-exponenciální násobičky, násobička s amplitudově šířkovou modulací, násobička s kvadrátory. Měřicí zesilovač. Modulační zesilovač. Převodníky pro časovou integraci napětí a proudu.

4. A/D převodníky. Principy vzorkování.

Blokové schéma přístroje využívajícího číslicové zpracování signálu. A/Č převodníky, základní rozdělení a typické vlastnosti obou skupin (porovnávací, integrační). A/Č převodník napětí na kmitočty. (schéma, popis funkce, vlastnosti). A/Č převod metodou dvojí integrace. (schéma, popis funkce, vlastnosti). A/Č převod s postupnou aproximací. (schéma, popis funkce, vlastnosti). A/Č převod metodou paralelního porovnávání. (schéma, popis funkce, vlastnosti). Princip vzorkování, vzorkovací teorém, jednoduchý vzorkovací obvod.

5. Analogové a číslicové osciloskopy, zapisovače.

Hlavní parametry udávané u vertikálního kanálu analogového osciloskopu. Zapojení pasivní sondy k osciloskopu. Analogový osciloskop, blokové schéma, vlastnosti. Osciloskop s dvojitou časovou základnou. Dvoukanalový analogový osciloskop. Blokové schéma. Měření fázového posunu osciloskopem.

6. Měření napětí a proudu.

Elektromechanická měřicí ústrojí V-metrů pro měření stejnosměrných a střídavých napětí, základní vlastnosti, změna rozsahů. Vznik chyby metody při měření napětí. Základní části číslicového voltmetru (uspořádání vstupních svorek, blokové schéma). Definice střední a efektivní hodnoty napětí, činitel tvaru, činitel výkyvu. Střídavé voltmetry pro měření efektivní hodnoty napětí. Nulové metody měření napětí. Vhodná elektromechanická měřicí ústrojí A-metrů pro měření stejnosměrných a střídavých proudů, základní vlastnost, změna měřicích rozsahů. Vznik chyby metody při měření proudu. Převodníky pro měření malých proudů s operačním zesilovačem. Proudový komparátor.

7. Měření výkonu.

Schéma zapojení pro měření činného výkonu jednofázového proudu (obě zapojení včetně ampérmetru a voltmetru). Vztahy pro chyby metody v absolutní i poměrné míře a skutečný výkon pro obě zapojení. Měření malých výkonů – metoda tří voltmetrů, fázorový diagram a výsledný vztah pro určení činného výkonu. Měření malých výkonů – metoda tří ampérmetrů, fázorový diagram, výsledný vztah pro určení činného výkonu. Měření činného a jalového výkonu v trojfázových soustavách, zapojení, celkový výkon, chyby metod. Blondelův teorém. Blokové schéma analogového elektronického průchozího W-metru. Princip kvadrátorové násobičky pro elektronické W-metry. Princip logaritmicko-exponenciální násobičky pro elektronické W-metry. Princip impulsové násobičky s amplitudově-šířkovou modulací pro elektronické W-metry.

8. Měření časového intervalu, kmitočtu a fázového rozdílu.

Přístroje pro měření časového intervalu. Přístroje pro měření kmitočtu – analogové metody měření kmitočtu, číslicové metody měření kmitočtu. Čítač, blokové schéma, vlastnosti, použití. Přístroje pro měření fázového rozdílu. Měření kmitočtu, časového intervalu a fázového rozdílu osciloskopem.

9. Měření pasivních elektrických veličin.

Ohmova metoda měření odporů (zapojení a chyby metody). Srovnávací metoda měření odporů. Převodník odpor-napětí R/U . Wheatstoneův můstek, schéma, podmínky rovnováhy. Linearizace nevyváženého Wheatstoneova můstku. Měření malých a velkých odporů. Měřiče imitancí. Základní zapojení střídavých můstků Wheatstoneova typu, podmínky rovnováhy. Transformátorové můstky pro měření imitancí.

10. Měření magnetických veličin.

Magnetické převodníky a jejich vlastnosti. Měřicí cívka, vysvětlit princip. Postup při měření stejnosměrných magnetických polí. Rogowského potenciometr, použití v oblasti magnetických měření. Princip Hallovy sondy pro měření magnetické indukce. Feromagnetická sonda, princip činnosti, vlastnosti a použití. Měření magnetického pole (magnetické indukce B) převodníkem na principu NMR. Princip měření koercitivity (koercitivní síly) feromagnetických vzorků pomocí koercimetru. Měření statické a dynamické hysterezní smyčky. Základní principy měření teploty, dráhy, otáček a mechanického napětí.

T1 Vzorový příklad:

Změřte stejnosměrné napětí 15 V. K dispozici máte:

a) multimetr PU 510 - rozsah 20 V, $\delta = \pm (0,5 + 0,5)$,

b) analogový voltmetr s rozsahem 24 V a třídou přesnosti $\delta_{TP} = 0,5 \%$.

Který z uvedených přístrojů bude pro měření zadaného napětí z hlediska přesnosti vhodnější?

Řešení

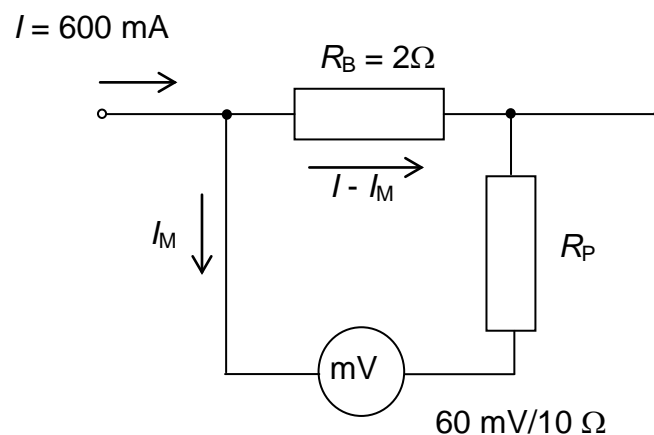
$$|\delta_{\text{CMP}}| = \left| \frac{\Delta_{\text{CMP}}}{X_M} \right| = |\delta_M| + \left| \delta_R \cdot \frac{X_R}{X_M} \right| = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{20}{15} = 1,16 \%$$

$$|\delta_{\text{AMP}}| = \left| \delta_{\text{TP}} \frac{X_R}{X_M} \right| = 0,5 \cdot \frac{24}{15} = 0,8 \%$$

Pro měření v našem případě je vhodnější analogový přístroj

T2 Vzorový příklad:

Určete hodnotu předřadného odporu R_P v obvodu bočnicku podle obrázku pro rozsah 600 mA.



Řešení

Proud pro plnou výchylku měřidla:

$$I_M = \frac{U_M}{R_M} = \frac{0,06}{10} = 0,006 \text{ A}$$

Odpor R_P vypočteme pomocí rozdělení proudu v paralelních větvích v nepřímém poměru odporů těchto větví:

$$\frac{I - I_M}{I_M} = \frac{R_P + R_M}{R_B} \Rightarrow R_P = R_B \cdot \left(\frac{I - I_M}{I_M} \right) - R_M = 2 \cdot \left(\frac{0,6 - 0,006}{0,006} \right) - 10 = 188 \Omega$$

T3 Vzorový příklad:

Určete maximální zatěžovací odpor měřicího transformátoru proudu o převodu $p = 60$, nominálním vstupním proudem 300 A a výkonu 10 VA.

Řešení

$$I_{2n} = \frac{I_{n1}}{p}$$

$$Z_{2\max} = \frac{P_2}{I_{2n}^2}$$

Po dosazení

$$Z_{2\max} = \frac{10}{5^2} = 0,4 \Omega$$

T4 Vzorový příklad:

Určete hodnotu napětí na výstupu integrátoru v A/Č převodníku s dvojitou integrací na konci první fáze měřicího cyklu, pokud je na vstupu převodníku napětí $u = U_0 + U_1 \sin(\omega t)$.

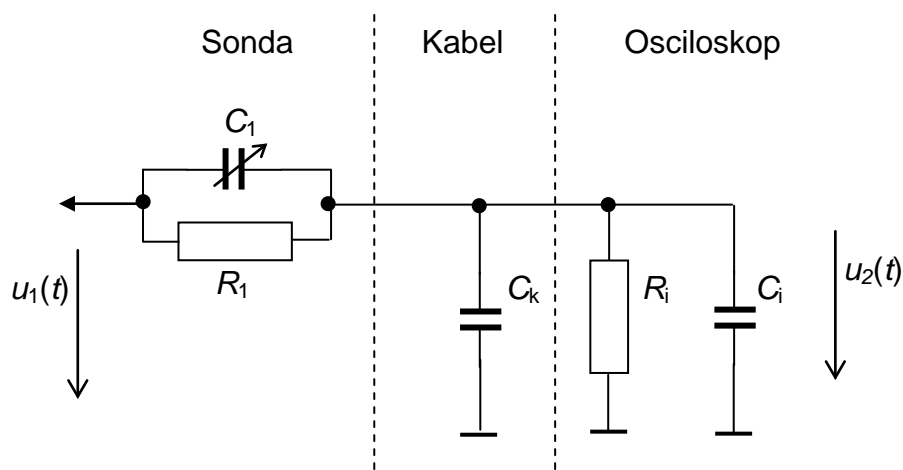
$U_0 = -1,2 \text{ V}$, $U_1 = 2,7 \text{ V}$, $\omega = 2\pi f$ a $f = 60 \text{ Hz}$, doba integrace je $T_i = 0,167 \text{ s}$. Integrační konstanta K_i je 3 V/s.

Řešení

$$U_{\text{int}} = K_i \int_0^{T_i} (U_0 + U_1 \sin(\omega t)) dt = K_i \int_0^{T_i} U_0 dt + K_i \int_0^{T_i} U_1 \sin(\omega t) dt = K_i U_0 T_i + K_i U_1 \int_0^{T_i} \sin(\omega t) dt = 0,60 \text{ V}$$

T5 Vzorový příklad:

Určete absolutní hodnotu vstupní impedance na vstupu osciloskopické pasivní sondy s dělicím poměrem 1:10 na frekvenci $f = 10 \text{ MHz}$. Víte, že vstupní impedance osciloskopu je udána ve tvaru $1 \text{ M}\Omega \parallel 20 \text{ pF}$, kapacita kabelu je 50 pF. Předpokládejte, že sonda je správně nastavená.



Řešení

Náhradní zapojení z hlediska vstupu představuje paralelní zapojení ekvivalentní kapacity dané sériovým zapojením C_1 a $C_k \parallel C_1$ a sériovým propojením R_1 a R_i . Pro absolutní hodnotu impedance paralelního zapojení R a C platí

$$|Z| = \sqrt{\left(\frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2}\right)^2 + \left(\frac{-\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2}\right)^2}$$

Pro správné nastavení sondy platí:

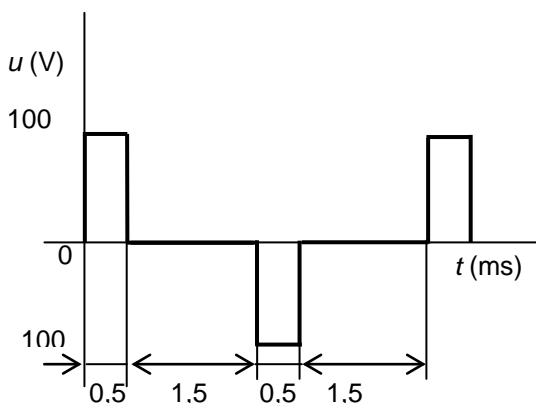
$$R_1 \cdot C_1 = R_i \cdot (C_1 + C_k)$$

$$C_1 = R_i \frac{(C_1 + C_k)}{9R_1}$$

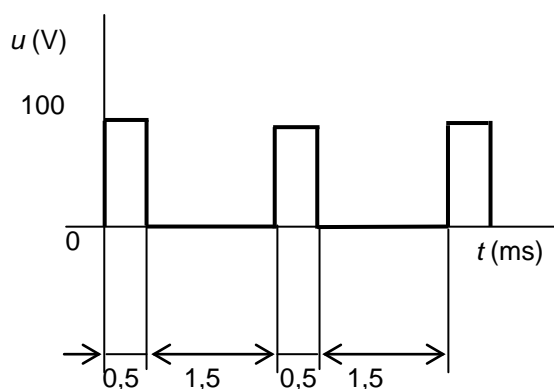
Po dosažení je $|Z| = 2275 \Omega$. Hlavní složkou je tedy kapacita.

T6 Vzorový příklad:

Stanovte chybu při měření napětí střídavým magnetoelektrickým voltmetrem s dvou-cestným měřicím usměrňovačem. Průběh měřeného napětí je na obrázku.



Průběh měřeného napětí



Usměrněné napětí

Řešení

Efektivní hodnota měřeného napětí:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{U_M^2 \cdot \frac{t}{T}} = \sqrt{100^2 \cdot \frac{(0,5+0,5) \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}}} = 50 \text{ V}.$$

Střední hodnota usměrněného napětí:

$$U_S = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = U_M \cdot \frac{t}{T} = 100 \cdot \frac{(0,5+0,5) \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 25 \text{ V}.$$

Voltmetr kalibrovaný pro měření efektivní hodnoty sinusového signálu udává hodnotu:

$$U_V = U_S \cdot 1,11 = 25 \cdot 1,11 = 27,75 \text{ V}$$

Absolutní chyba měření (přídavná – přístroj je použit za jiných podmínek než vztahných):

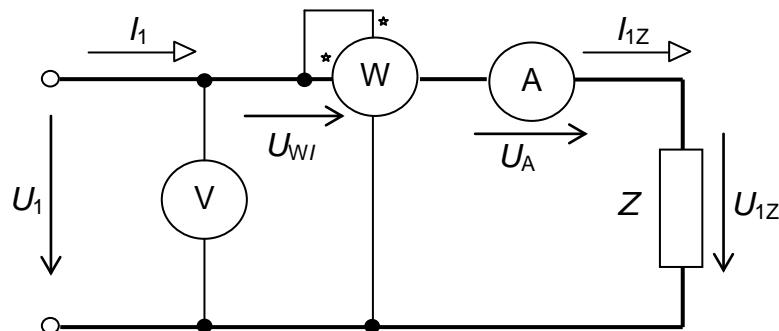
$$\Delta_V = U_V - U = 27,75 - 50 = -22,25 \text{ V}$$

Relativní chyba měření (přidavná):

$$\delta_V = \frac{\Delta_V}{U} = \frac{-22,25}{50} \cdot 100 = -44,5 \%$$

T7 Vzorový příklad:

Uveďte schéma zapojení pro měření činného jednofázového výkonu (obě zapojení včetně ampérmetru a voltmetru). Napište vztahy pro chyby metody v absolutní i poměrné míře a skutečný výkon pro obě zapojení



Řešení

Činný výkon určený z výchylky wattmetru je tedy:

$$P_1 = P_{1Z} + P_{W1} + P_A \quad (\text{W})$$

Výkon spotřebovaný proudovou cívkou wattmetru:

$$P_{W1} = R_{W1} \cdot I_{1Z}^2, \quad (\text{W})$$

Výkon spotřebovaný ampérmetrem:

$$P_A = R_A \cdot I_{1Z}^2, \quad (\text{W})$$

Činný výkon zátěže je:

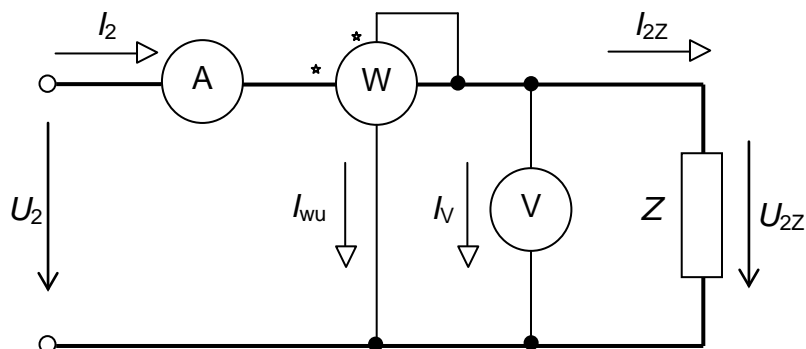
$$P_{1Z} = P_1 - P_{W1} - P_A \quad (\text{W})$$

Absolutní chyba metody:

$$\Delta_{1M} = P_1 - P_{1Z} = P_{W1} + P_A \quad (\text{W})$$

Relativní chyba metody:

$$\delta_{1M} = \frac{\Delta_{1M}}{P_{1Z}} \cdot 100 = \frac{P_{W1} + P_A}{P_{1Z}} \cdot 100 \quad (\%)$$



Wattmetr tedy udává hodnotu:

$$P_2 = P_{2Z} + P_{WU} + P_V, \text{ (W)}$$

Výkon spotřebovaný napětíovou cívkou wattmetru:

$$P_{WU} = \frac{U_{2Z}^2}{R_{WU}}, \text{ (W)}$$

Výkon spotřebovaný voltmetrem:

$$P_V = \frac{U_{2Z}^2}{R_V}, \text{ (W)},$$

Absolutní chyba metody:

$$\Delta_{2M} = P_2 - P_{2Z} = P_{WU} + P_V. \text{ (W)}$$

Relativní chyba:

$$\delta_{2M} = \frac{\Delta_{2M}}{P_{2Z}} \cdot 100 = \frac{P_{WU} + P_V}{P_{2Z}} \cdot 100 \text{ (%)}$$

T8 Vzorový příklad:

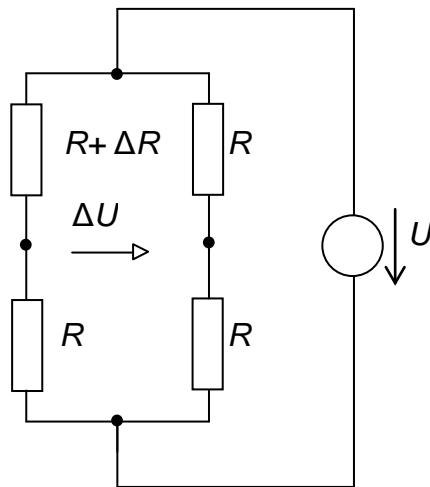
Při měření kmitočtu o frekvenci 560Hz přímou číslicovou metodou byl zvolen měřicí interval $T=0,3\text{s}$. Jaký bude počet napočítaných impulsů ve čítači přístroje a nejistota měření? Nejistotu frekvenčního normálu neuvažujte.

Řešení

Čítač napočítá za 0,3 s $N = 0,3 \cdot 560 = 168$ impulsů. Z principu plyne možnost nejistoty 1 impuls, tedy i 169, tomu odpovídá údaj $169/0,3 = 563,3$ Hz. Nejistota je tedy 3,3 Hz, údaj přístroje může být 560,0 až 563,3 Hz.

T9 Vzorový příklad:

Určete změnu napětí ΔU v diagonále vyváženého Wheatstoneova můstku, pokud se změní hodnota odporu $R = 120 \Omega$ o $\Delta R = 2 \Omega$. Napájecí napětí můstku je 5 V.



Řešení

$$\Delta U = U \cdot \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{R}{2R} \right) = \frac{U}{4R} \cdot \frac{\Delta R}{1 + \frac{\Delta R}{2R}}$$

Po dosazení $\Delta U = 0,0207V$

T10 Vzorový příklad:

Při měření magnetické indukce B ve stejnosměrném magnetickém poli pomocí rotující měřicí cívky byla naměřena efektivní hodnota napětí 2 V. Plocha cívky je 1 cm^2 , počet závitů 100. Cívka má 1500 otáček za minutu. Určete velikost B .

Řešení

$$B = \frac{60 \cdot U}{4,44 \cdot n \cdot N \cdot S} = \frac{60 \cdot 2}{4,44 \cdot 1500 \cdot 100 \cdot 10^{-4}} = 1,8 \text{ T}$$