

4. MĚŘENÍ MALÝCH ODPORŮ

Pracovní úkol

1. Změřte odpor vzorků drátů Wheatstoneovým a Thomsonovým můstkem. Vysvětlete rozdíly ve výsledcích měření.
2. Vypočítejte měrný odpor jednotlivých vzorků i s příslušnou chybou výsledku. Stanovené hodnoty porovnejte s hodnotami uváděnými v tabulkách.

Úvod

S můstkovým obvodem jste se seznámili již u úlohy 3. Předchozí úloha však byla zaměřena především na problematiku citlivosti obvodu a její závislosti na velikosti odporů ve větvích můstku. V této úloze použijeme můstkové obvody k měření odporů.

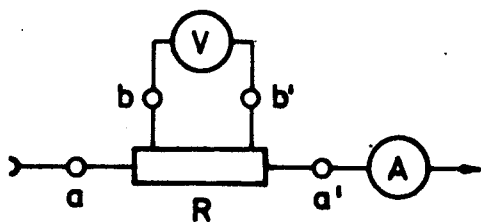
Jednoduchý můstkový obvod s odpory ve větvích (Wheatstoneův můstek) je vhodný pro měření odporů v rozmezí asi od $1\ \Omega$ do $10^7\ \Omega$. Při větších hodnotách odporů teče větvemi můstku relativně malý proud, což klade velké nároky na citlivost indikátoru. Velké odpory se proto měří jinými metodami (viz [1]).

V této úloze se zaměříme na měření malých odporů, menších než $1\ \Omega$. Odpory přívodních vodičů a přechodové odpory kontaktů pak nemusí mít vždy zanedbatelnou hodnotu vůči měřenému odporu. Měření s Wheatstoneovým můstkem může být zatíženo systematickou chybou, která způsobí, že změříme hodnotu odporu zvětšenou o odpor přívodů.

Odstranit tuto systematickou chybu lze tehdy, použijeme-li čtyřbodové zapojení měřeného rezistoru. Seznámení se s tímto čtyřbodovým zapojením, které se používá i u jiných úloh (viz např. úloha Hallův jev), je hlavním cílem této úlohy.

Čtyřbodové zapojení rezistoru

Při čtyřbodovém zapojení musí být rezistor (nebo jiný prvek) opatřen čtyřmi kontakty (svorkami). Vnější kontakty a , a' nazývané proudové, se připojí sériově do obvodu se zdrojem napětí. Mezi vnitřními kontakty b , b' měříme napětí. Schematicky je čtyřbodové zapojení rezistoru R zakresleno na obr.1. V tomto uspořádání změříme odpor mezi napěťovými kontakty b , b' , odpor přívodů k proudovým kontaktům ani jejich přechodový odpor se neuplatní. Pokud je odpor voltmetru podstatně větší než odpor R , což je podmínka, kterou pro malé odpory R není obtížné splnit, teče voltmetrem zanedbatelný proud vůči proudu odporem R a odpory přívodů k voltmetru a kontaktům b , b' se neuplatní.



Obr. 1

V zapojení na obr.1 bychom měřili odpor přímou metodou. Chceme-li ve čtyřbodovém zapojení měřit odpor můstkovou metodou, musíme použít dvojité (Thomsonův) můstek, který popíšeme dále. Místo přímého měření napětí na měřeném odporu se to-

to napětí porovnává s napětím na odporovém normálu, kterým protéká stejný proud jako měřeným odporem.

Wheatstoneův můstek

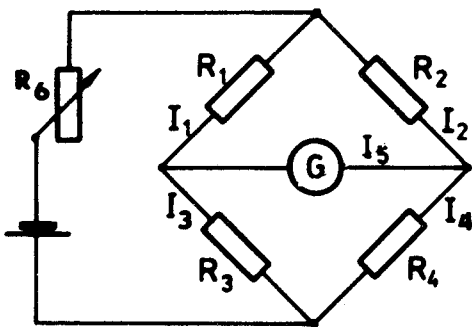
Můstkové metody jsou jedny z nejpřesnějších a proto i nejpoužívanějších měřících metod. Jednoduchý můstkový obvod, složený ze čtyř odporů (Wheatstoneův můstek) je zakreslen na obr.1. Teče-li indikátorem G nulový proud, tj. $I_5=0$, platí rovnice

$$\begin{aligned} I_1 &= I_3 & , & & I_2 &= I_4 \\ I_1 R_1 &= I_2 R_2 & , & & I_3 R_3 &= I_4 R_4 \end{aligned} \quad (1)$$

Ze série rovnic (1) plyne vztah platný pro můstek v rovnováze.

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4 \quad (2)$$

Vztah (2) umožňuje určit pomocí tří známých odporů, např. R_2, R_3, R_4 čtvrtý neznámý odpor R_1 . Odpor R_6 na obr. 1 slouží k nastavení velikosti proudu můstkem a tím i k regulaci citlivosti.



Obr. 2

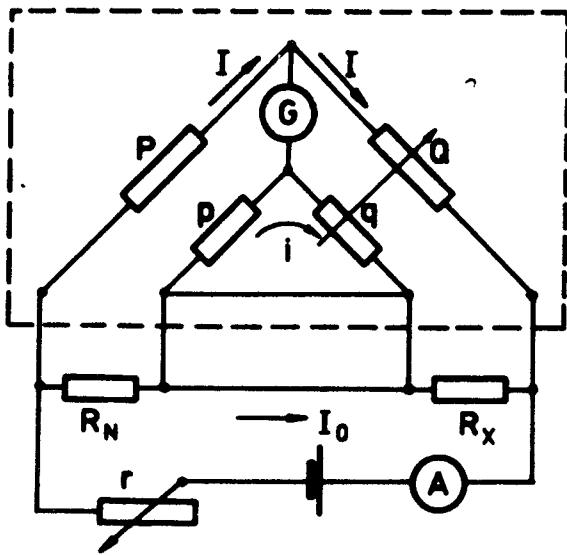
Měrné můstky jsou sestaveny z dekadických odporů. U laboratorního Thomsonova - Wheatstoneova můstku je jeden z odporů, např. R_2 , tvořen pětímístným dekadickým odporem. Jako odpory R_3 nebo R_4 můžeme zařadit libovolnou z hodnot 1, 10, 100 a 1000 Ω . Poměr $R_3 : R_4$ můžeme tedy měnit po dekadických hodnotách od 10^{-n} do 10^n , přičemž $n = 0, 1, 2, 3$.

$$R_1 = 10^{\pm n} R_2 \quad (3)$$

Největší citlivosti můstku dosáhneme, jsou-li ve všech větvích zařazeny stejné hodnoty odporů. Je-li indikátor schopen zaznamenat změny řádu 10^{-5} proudu tekoucího větvemi můstku, můžeme měřit na 5 platných míst. Při měření odporů menších než 1 Ω se však nepříznivě uplatňuje vliv spojovacích vodičů. U této úlohy chceme při měření malých odporů Wheatstoneovým můstkem demonstrovat vliv odporu přívodů na přesnost měření. Relativní systematická chyba bude tím větší, čím menší odpor měříme.

Thomsonův můstek

Při měření malých odporů získáme správné výsledky, použijeme-li Thomsonův můstek, jehož schéma je zakresleno na obr. 3 .



Obr. 3

Je-li můstek vyrovnán, je mezi body, ve kterých je připojen indikátor G, nulový rozdíl potenciálů. Odporů p, q pak teče stejný proud i. Napětí na odporu P musí být rovno napětí na odporech R_N a p a proto platí

$$I P = I_0 R_N + i p \quad (4)$$

Pro druhou polovinu můstku obdobně

$$I Q = I_0 R_X + i q \quad (5)$$

Z posledních dvou rovnic můžeme získat vztah

$$\frac{R_N}{R_X} = \frac{P}{Q} \cdot \frac{I - \frac{pi}{P}}{I - \frac{qi}{Q}} \quad (6)$$

Zvolí-li se odpory P, p, Q, q tak, aby platilo

$$p : P = q : Q \quad (7)$$

zjednoduší se rovnice (6) na tvar

$$R_X = \frac{Q}{P} R_N \quad (8)$$

Celý můstkový obvod se skládá ze dvou částí. Odporů P, p, Q, q jsou součástí komerčně vyráběného můstku. Na schématu na obr. 3 jsou tyto obvody zakresleny uvnitř čárkovane vyznačeného obdélníku. Výrobce je zajištěno splnění podmínky (7).

Můstek je určen pro měření odporů menších než 1Ω . Přesné měření vyžaduje čtyřbodové zapojení měřeného odporu R_X i odporového normálu R_N . Jsou-li odpory R_N a R_X menší než 1Ω lze dosáhnout toho, že odpory P, p, Q, q budou alespoň tisíckrát větší než R_N či R_X , což znamená, že proudy i a I budou nejméně tisíckrát menší než I_0 . Spád napětí na přívodních vodičích k můstku a na svorkách neovlivní proto podstatněji výsledek měření.

Měrný odpor

Je definován vztahem

$$\rho = R S / l \quad , \quad (9)$$

v němž R je odpor homogenního vodiče délky l a průřezu S . Jednotkou měrného odporu je ohmmetr ($1 \Omega \cdot m$). Ohmmetr je měrný elektrický odpor takového materiálu, z něhož zhotovená krychle o hraně 1 metru má odpor 1 ohm, protéká-li elektrický proud mezi protilehlými stěnami krychle. V elektrotechnické praxi se často používá dočasná jednotka $1 \Omega \cdot mm^2 m^{-1}$, což je měrný odpor takového materiálu, který má při délce 1 metru a průřezu 1 čtverečný milimetr odpor 1 ohm.

Platí převodní vztah

$$1 \cdot \Omega \cdot mm^2 m^{-1} = 10^{-6} \Omega m$$

Abychom určili měrný odpor, musíme kromě velikosti odporu R definované délky l drátu, změřit ještě jeho průměr d . Pak s uvažováním toho, že $S = \pi d^2 / 4$ vypočítáme z rovnice (9) měrný odpor. Délku drátu l určujeme jako vzdálenost mezi ryskami u napěťových svorek držáku vzorku. Velmi pečlivě na několika místech měříme průměr drátu. Stanovení této veličiny je zpravidla zatíženo největší chybou. Tato chyba se zdůrazní tím, že měrný odpor závisí na druhé mocnině d .

Postup při měření s Wheatstoneovým můstkem

Zapojení můstku, se kterým měříme, je uvedeno na štítku přístroje. Od principiálního zapojení znázorněného na obr. 2 se liší zařazením dvoupolohového spínače, kterým zároveň připojujeme zdroj a indikátor a kromě toho jím můžeme měnit velikost proudu zařazeného do serie s indikátorem. Tím se mění citlivost můstku.

Ve schématech jsou jinak pojmenovány odpory, platí

$$R_1 = X, R_2 = R, R_3 = a, R_4 = b, \text{ takže}$$

$$X = R \frac{a}{b} \quad (10)$$

Odpor R nastavujeme na pětimístné dekádě, hodnoty odporů a a b nastavujeme v dekadických násobcích kolíkovým přepínačem.

Před započítím měření zasuneme kolík do zdíčky označené W a nastavíme hodnotu poměru $a : b$ tak, abychom mohli využít všech míst na dekádě R . Dále připojíme galvanometr na svorky G , akumulátor na svorky B a ke svorkám X připojíme měřený odpor. Most pak vyrovnáme změnou velikosti odporu R nejprve při poloze "hrubě" přepínače. Po předběžném vyrovnání pak nastavíme rovnováhu při poloze "jemně" přepínače. Wheatstoneův můstek v dané úpravě je určen pro měření odporů v rozsahu $1 \cdot 10^0$ až $1 \cdot 10^7 \Omega$, maximálně na pět platných míst.

Postup při měření s Thomsonovým můstkem

Na Thomsonovo zapojení upravíme můstek tím, že kuželový kolík zapojíme na svorku T. Na svorky R_N připojíme napěťové (vnitřní) svorky normálu, na svorky R_X napěťové svorky z držáku měřených drátů. Proudové svorky odporu R_N a R_X zapojíme do série se zdrojem, ampérmetrem a regulačním odporem. Při zapojování musíme dodržovat polaritu napětí vyznačenou na můstku. Na svorky G připojíme galvanometr. Kolíky odporů a, b zasunujeme vždy do souhlasně označených zdívek ($a=b$). Ve schématu na obr. 3 reprezentují odpory P a p, odpory Q, q vytváří zdvojená pětimístná dekáda R. Velikost odporového normálu R_N a poměrových odporů a, b volíme podle následující tabulky.

R_X ohmů		R_N ohmů	R_p (a = b)	Vzorec pro výsledný odpor	Poznámka
od	do				
1	1.10^{-1}	1.10^{-1}	1 000	$R_X = R_N \frac{R}{R_p}$	
1.10^{-1}	1.10^{-2}	1.10^{-2}	1 000		
1.10^{-2}	1.10^{-3}	1.10^{-3}	1 000		
1.10^{-3}	1.10^{-4}	1.10^{-4}	1 000		
1.10^{-4}	1.10^{-5}	1.10^{-4}	1 000	$R_X = R_N \frac{R_p}{R}$	Nutno připojit měř. odpor na R_N a odporový normál na R_X
1.10^{-5}	1.10^{-6}	1.10^{-4}	100		

Ve vnějším obvodu nastavíme vhodný proud tekoucí odpory R_N a R_X tak, aby se měřené odpory ztelně neohřívaly. Při měření postupujeme pak stejně jako u Wheatstoneova můstku.

Možnost měření na Thomsonově mostě je $1 - 1.10^{-6}$ ohmů za pomoci odporových normálů pro vyšší proudová zatížení, jako např. R_N/I 0,1 - 0,01 - 0,001 - 0,0001 ohmů abs. Se sníženou přesností lze měřit i menší odpory až asi do 1.10^{-8} ohmů; při použití odporového normálu 0,00001 ohmu až do 1.10^{-9} ohmů. Propojení odporového normálu s měřeným odporem je pak nutno provést pomocí měděného pásku. Ohmický odpor spojky nemá při přesnějších měřeních překročit součet hodnot odporu měřeného a použitého normálu. Na připojení potenciálů odporu k mostu je nutno používat co nejkratších přívodů.

V případě, že měříme menší hodnotu odporu, než je hodnota odporového normálu, je vhodné připojit měřený odpor na svorky R_N a odporový normál na R_X . Zároveň s touto změnou nutno upravit i výsledný vzorec pro výpočet, a to tak, že pro R_X menší než R_N až $R_X = R_N$ platí $R_X = R_N \cdot R / R_p$. Svorky B a X zůstávají prázdné, nezapojené.

Literatura

- [1] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983
čl. 4.3.5.5
- [2] Brož J., Roskovec V., Valouch M. : Fyzikální a matematické tabulky,
SNTL, Praha 1980

5. MĚŘENÍ NAPĚTÍ OSCILOSKOPEM

Pracovní úkol

- Pomocí osciloskopu změřte špičkovou hodnotu napětí na sekundáru převodního transformátoru a srovnajte ji s hodnotou naměřenou voltmetrem.
- Studujte činnost jednocestného usměrňovače v zapojení podle obr. 5 .
 - při maximální hodnotě zatěžovacího odporu $R_z = 10 \text{ k}\Omega$ sledujte závislost stejnosměrného napětí (měřeného elektronickým voltmetrem) na filtrační kapacitě C v intervalu $0 - 10 \mu\text{F}$. Hodnotu usměrněného napětí při $C = 0 \mu\text{F}$ srovnajte se špičkovou hodnotou pulsního průběhu změřenou osciloskopem ;
 - změřte závislost filtrační kapacity C , potřebné k tomu, aby střídává složka usměrněného napětí činila 10 % špičkové hodnoty (tj. asi 1 V) na odebíraném proudu. Měření provádějte do proudu 0,6 mA ;
 - naměřené závislosti zpracujte graficky. Do grafu uyádějícího závislost filtrační kapacity C na proudu vynesete také závislost časové konstanty $\tau = R_z C$ na proudu.
- Studujte činnost dvojcestného usměrňovače napětí v zapojení podle obr.6 . Na dvojcestném usměrňovači proveďte všechna měření jako na usměrňovači jednocestném. Výsledky porovnejte.
 - Měření provádějte opět pro $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 1 - 10 \mu\text{F}$;
 - měření provádějte do proudu 1,2 mA .

Úvod

Osciloskop je jedním z nejčastěji používaných přístrojů ve fyzikální laboratoři. Při měření této úlohy se máte především seznámit s obsluhou tohoto přístroje. Typ Tesla BM 510 , který budete používat je jedním z nejjednodušších osciloskopů. Jeho podrobnější popis je uveden v 7. kapitole II.části skript.

Ručkovými nebo digitálními přístroji měříme zpravidla střední nebo efektivní hodnotu napětí. Na osciloskopu si můžeme prohlédnout časově rozvinutý průběh napětí. Přesnost odečítání napětí je sice menší než na voltmetru, ale můžeme odečíst výšky a šířky pulzu, zvlnění stejnosměrného napětí apod.

U této úlohy měříme napětí po jednocestném nebo dvojcestném usměrňování a po filtraci tohoto napětí jednoduchým RC filtrem. Seznámíte se tím s činností usměrňovačů a filtru a se vztahy mezi střední, efektivní a špičkovou hodnotou napětí.