

Štefan Veis

Meranie tlakov odporovými manometrami

Matematicko-fyzikálny časopis, Vol. 10 (1960), No. 1, 42--56

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/126928>

Terms of use:

© Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences, 1960

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

MERANIE TLAKOV ODPOROVÝMI MANOMETRAMI

ŠTEFAN VEIS, Bratislava

V práci sa poukazuje na možnosť použitia voltmetra s veľmi veľkým vnútorným odporom na meranie tlakov pomocou odporových (Piraniho) manometrov vo Wheatstonovom mostíku. Týmto sa dosiahne podstatné zjednodušenie výrazu pre potenciálny rozdiel E_{12} . Súčasne sa poukazuje na možnosť zvýšenia citlivosti Piraniho manometra vhodnejšou voľbou pomeru odporov vo Wheatstonovom mostíku.

1. Úvod

Na meranie tlakov od 1 mm Hg až do 10^{-3} mm Hg sa používajú Piraniho odporové manometre [1, 2, 3], využívajúce zmenu tepelnej vodivosti plynu s tlakom. Piraniho manometer tvorí tenký kovový drôtik alebo polovodič, ktorý je vo vákuu elektricky vyhrievaný. Teplota takéhoto elementu a tak aj jeho odpor sa mení s tlakom v dôsledku zmeny tepelnej vodivosti plynu. Zmenu odporu možno merať Wheatstonovým mostíkom, ktorý je na obr. 1. Jeho ramená tvoria Piraniho element R_2 , regulačný odpor R_4 a dva rovnako veľké konštantné odpory R_1 a R_3 . Mostík je napájaný zo zdroja o napätí E , ktorého vnútorný odpor je R_i . Mostík možno vyvážiť pri atmosferickom tlaku, alebo veľmi vysokom vákuu, vtedy citlivým galvanometrom neprechádza prúd. Pri zmene tlaku zmení sa odpor Piraniho elementu, rovnováha mostíka sa poruší a prúd I_m , ktorý indikuje prístroj M , je mierou tlaku. Tento prúd, ak vnútorný odpor prístroja je R_m , možno vyjadriť nasledujúcim vzťahom [4]

$$I_m = E \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_i R_m (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + R_i (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_m (R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_4} \quad (1)$$

Pretože sa v praxi vyžaduje čo najväčšia citlivosť Piraniho manometra, volí sa obyčajne galvanometer s malým vnútorným odporom R_m a tak jednotlivé členy v menovateli výrazu (1) sú približne rovnako veľké a nemožno ani jeden z nich zanedbať. Z tohto dôvodu je závislosť prúdu I_m od odporu Piraniho elementu (napr. R_2) dosť složitá.

Predmetom predkladanej práce je pokus zjednodušiť vhodnou voľbou

odporov vo Wheatstonovom mostíku výraz (1) a tak získať jednoduchší vzťah medzi tlakom p a veličinou, pomocou ktorej meriame tlak.

2. Všeobecná časť

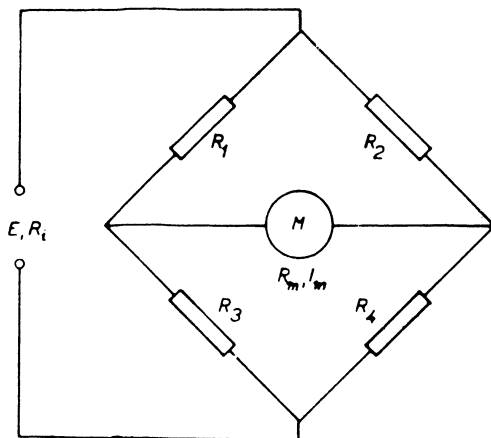
Výraz (1) pre prúd I_m , ktorý je mierou tlaku, možno zjednodušiť, a to vhodnou voľbou zdroja, ktorý volíme tak, aby jeho vnútorný odpor R_i bol zanedbateľne malý v porovnaní s celkovým odporom Wheatstonovho mostíka. Túto požiadavku možno splniť použitím akumulátorovej batérie, ktorá má veľmi malý vnútorný odpor, alebo stabilizáciou použitého napätia. Ak je R_i malé v porovnaní s celkovým odporom mostíka, prejde rovnica (1) do tvaru

$$I_m = E \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_m (R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4}. \quad (2)$$

Miesto prúdu I_m možno však merať potenciálny rozdiel E_{12} , pre ktorý z rovnice (2) plynie

$$E_{12} = I_m R_m = E \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + \frac{1}{R_m} (R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4)}. \quad (3)$$

Ak by sme na meranie E_{12} použili voltmetr s veľkým odporom ako napríklad elektrónkový voltmeter, ktorého vnútorný odpor je $50 - 100\text{M}\Omega$,



Obr. 1. Mostíkové zapojenie odporového manometra.

alebo tiež deprezsky ručičkový voltmeter, ktoré sa v súčasnej dobe vyrábajú s veľmi veľkým vnútorným odporom až $1\text{M}\Omega/\text{V}$ [5], dosiahli by sme ďalšie zjednodušenie výrazu (1)

$$E_{12} = E \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right). \quad (4)$$

V prípade použitia Piraniho elementu vo tvare tenkého kovového drôtika, ktorého odpor je do 50Ω , je úplne postačujúce použiť deprézsky voltmeter s vnútorným odporom $5000 \Omega/V$.

Ako vidieť z rovnice (4), prináša použitie voltmetra s veľmi veľkým vnútorným odporom podstatné zjednodušenie vzťahu (1) a jednoduchú závislosť potenciálneho rozdielu E_{12} , ktorý je mierou tlaku, od odporu Piraniho elementu.

V ďalšom vyšetříme bližšie niektoré prípady zapojenia jedného alebo viac Piraniho odporových elementov vo Wheatstonovom mostíku.

3. Jeden Piraniho element s kovovým drôtikom vo Wheatstonovom mostíku

V tomto prípade vo Wheatstonovom mostíku je R_4 regulačný odpor, pomocou ktorého mostík vyvažujeme, R_2 Piraniho element s kovovým drôtikom, R_3 a R_1 sú konštantné odpory. Kovový drôtik Piraniho elementu mení svoj odpor v dôsledku zmeny tepelnej vodivosti plynu s tlakom podľa vzťahu

$$R_2 = R_2''(1 + \alpha_2 \Delta T_2), \quad (5)$$

kde R_2'' je odpor kovového drôtika Piraniho elementu pri atmosferickom tlaku, α_2 teplotný odporový koeficient a ΔT_2 rozdiel teplôt odpovedajúci rozdielu atmosferického tlaku a tlaku p vo vákuovom systéme. Tento vzťah vyjadruje zmenu odporu Piraniho elementu v prípade vyváženia mostíka pri atmosferickom tlaku. V prípade vyváženia mostíka za vysokého vákuua bolo by možno vyjadriť odpor Piraniho elementu analogickým výrazom len s tým rozdielom, že odpor R_2 by s rastúcim tlakom klesal. Po dosadení za R_2 do rovnice (4) dostaneme pre E_{12} výraz

$$E_{12} = E \left[\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_4 + R_2''(1 + \alpha_2 \Delta T_2)} \right]. \quad (6)$$

Obyčajne pri vyvážení mostíka za atmosferického tlaku sa volí $R_1 = R_3$ a $R_2'' = R_4$ a vtedy prejde výraz pre E_{12} do obzvlášť jednoduchého tvaru

$$E_{12}^1 = \frac{E}{2} \frac{\alpha_2 \Delta T_2}{2 + \alpha_2 \Delta T_2}. \quad (7)$$

Výhodnejšie však je voliť $R_1 \neq R_3$ a $R_2'' \neq R_4$. Označme pomer

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2''}{R_4} = k \quad (8)$$

a po dosadení do rovnice (6) dostaneme

$$E_{12}^k = E \left[\frac{1}{1 + k} - \frac{1}{1 + k(1 + \alpha_2 \Delta T_2)} \right]. \quad (9)$$

Z tohto vzťahu vidieť, že maximálna hodnota E_{12}^k pre dané E závisí od pomeru odporov k . Maximálne E_{12}^k dosiahneme pri pomere

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha_2 \Delta T_2}}. \quad (10)$$

Pre tento pomer prejde výraz (9) do

$$E_{12}^k = \frac{1 + \alpha_2 \Delta T_2 - 1}{1 + \alpha_2 \Delta T_2 + 1}. \quad (11)$$

Tento prípad sa však nedá realizovať, pretože pri zmene tlaku by sa musel zmeniť aj pomer odporov k , čo je prakticky neuskutočniteľné.

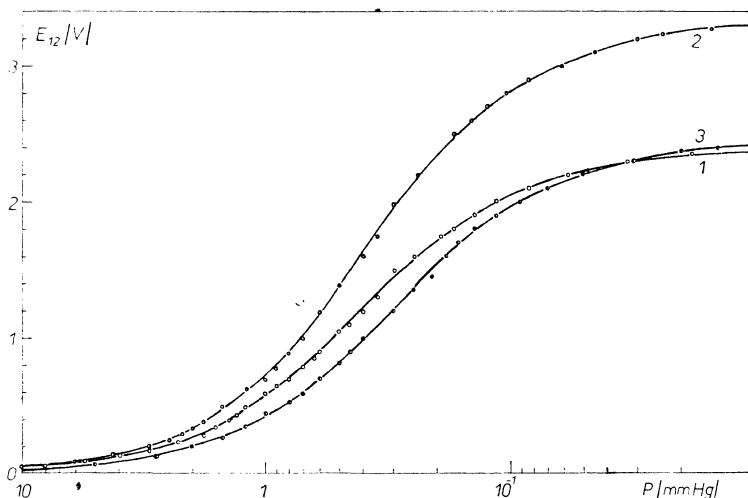
Z porovnania rovníc (7) a (9) vyplýva, že $E_{12}^k \geq E_{12}^1$ pre rovnaké $\alpha_2 \Delta T_2$, čiže pre rovnaký tlak. To však znamená, že vhodnou voľbou pomeru odporov k možno dosiahnuť väčšiu citlivosť Piraniho manometra. Tento pomer je určený rovnicou (10) a je menší ako 1. Obyčajne u Piraniho odporových manometrov, ktoré merajú tlaky v intervale $1-10^{-3}$ mm Hg, nepresahuje rozdiel teplôt $\Delta T_2 = 200$ °K, pretože so zväčšovaním teplotného rozdielu posúva sa kalibračná krivka smerom k vyšším tlakom. Na základe toho najvhodnejšia hodnota pomeru odporov k leží v intervale $1 > k > 0,75$. Ak však chceme merať tlaky v intervale $10-10^{-2}$ mm Hg, možno k voliť ešte nižšie.

Ako vyplýva z rovnice (9), mohli by sme kalibračnú krivku Piraniho manometra pre ľubovoľný pomer odporov k vypočítať, ak by sme mali k dispozícii experimentálne určenú kalibračnú krivku pre $k = 1$. Za tým účelom treba však urobiť v rovnici (9) určitú korekciu, pretože táto rovnica ostáva v platnosti len v tom prípade, keď elektrický prúd pretekajúci odpormi R_2^a a R_4 pri zmene ich pomeru z 1 na ľubovoľnú hodnotu k ostane konštantný. Pri zachovaní platnosti rovnice (9) by to bolo možné urobiť jedine tak, že by sa zmenšil odpor R_2^a a súčasne zväčšil R_4 , pričom by sa nesmel zmeniť ich súčet. Toto naráža na ťažkosti, pretože ak elektrický prúd má ostať konštantný aj pri $k < 1$, nemožno znižovať odpor R_2^a ináč iba ak skracovaním kovového drôtika Piraniho elementu, čo je prakticky nemožné. Z tohto dôvodu zmenu odporov k možno dosiahnuť len zväčšovaním odporu R_4 , čím sa však zväčší celkový odpor, poklesne elektrický prúd a tým sa tiež naruší platnosť rovnice (9). Ak má ostať v platnosti, treba zvýšiť napätie E na takú hodnotu, aby elektrický prúd pretekajúci Piraniho elementom bol taký ako v prípade, keď $k = 1$. Odpovedajúce napätie je $\frac{1+k}{2k} E$ a tak rovnica (9) po zavedení tejto opravy prejde do tvaru

$$E_{12}^k = E \cdot \frac{1+k}{2k} \left[\frac{1}{1+k} - \frac{1}{1+k(1+\alpha_2 \Delta T_2)} \right]. \quad (12)$$

Ak dosadíme do tejto rovnice $k = 1$, dostaneme opäť rovnicu (7), čo len potvrdzuje správnosť zavedenej opravy.

Na obr. 2 sú uvedené kalibračné krivky Piraniho manometra s jedným kovovým drôtikom vo Wheatstonovom mostíku. Krivka 1 je kalibračná krivka pre $k = 1$ a napätie 12 V. Odpor Piraniho elementu pri atmosferickom tlaku bol 114,3 Ω . Krivka 2 je kalibračná krivka pre $k = 0,6$ a napätie 16 V, pri čom $R_2^0 =$



Obr. 2. Kalibračné krivky odporového manometra s jedným kovovým drôtikom: 1 – kalibračná krivka pre $k = 1$ a $E = 12$ V, 2 – kalibračná krivka pre $k = 0,6$ a $E = 16$ V pri rovnakom vyhrievacom prúde ako pri $k = 1$, 3 – kalibračná krivka pre $k = 0,6$ a $E = 12$ V, t. j. pri nižšom vyhrievacom prúde ako pri $k = 1$.

Tabuľka 1

Tlak p (mm Hg)	E_{12}^1 V	$\alpha_2 \Delta T_2$	E_{12}^k V	
			teoret.	exp.
6	0,10	0,034	0,12	0,10
4	0,14	0,048	0,17	0,15
2	0,27	0,094	0,34	0,34
1	0,58	0,214	0,74	0,72
$9 \cdot 10^{-1}$	0,63	0,235	0,81	0,80
$8 \cdot 10^{-1}$	0,70	0,264	0,89	0,88
$7 \cdot 10^{-1}$	0,80	0,308	1,04	1,02
$6 \cdot 10^{-1}$	0,90	0,353	1,18	1,18
$5 \cdot 10^{-1}$	1,03	0,414	1,35	1,38
$4 \cdot 10^{-1}$	1,20	0,500	1,58	1,60
$3 \cdot 10^{-1}$	1,45	0,637	1,94	1,97
$2 \cdot 10^{-1}$	1,72	0,804	2,32	2,35
$1 \cdot 10^{-1}$	2,05	1,038	2,80	2,82
$8 \cdot 10^{-2}$	2,10	1,077	2,88	2,92
$6 \cdot 10^{-2}$	2,18	1,141	2,99	3,02
$4 \cdot 10^{-2}$	2,27	1,217	3,13	3,12
$2 \cdot 10^{-2}$	2,35	1,288	3,26	3,25
$1 \cdot 10^{-2}$	2,37	1,306	3,30	3,30

$= 114,3 \Omega$ a $R_4 = 190,5 \Omega$. Krivka 3 je kalibračná krivka pre $k = 0,6$ a napätie 12 V, ale $R_2^a = 103,5 \Omega$ a $R_4 = 172,4 \Omega$. Ako vidieť z obr. 2, kalibračná krivka 2 leží nad kalibračnou krivkou 1, čo svedčí o tom, že vhodnou voľbou pomeru odporov R_2^a a R_4 sa dá dosiahnuť vyššia citlivosť Piraniho manometra, pri nezmenení vyhrievacieho prúdu pretekajúceho Piraniho elementom. Dokonca aj kalibračná krivka 3 Piraniho manometra pre $k = 0,6$ pri menšom vyhrievacom prúde javí sa výhodnejšou, pretože pri zmene pomeru odporov k z 1 na 0,6 pri tom istom napätí sa síce citlivosť manometra prakticky nezmení, ale kalibračná krivka sa posunie smerom k nižším tlakom a v intervale nižších tlakov má strmší priebeh, čo je najmä z hľadiska merania nižších tlakov výhodnejšie.

Kalibračnú krivku 2 možno vypočítať na základe rovnice (12), ak poznáme kalibračnú krivku 1. Pre porovnanie sú v tabuľke 1 uvedené teoretické a experimentálne hodnoty bodov kalibračnej krivky 2 pre rôzne tlaky. Hodnoty $\alpha_2 \Delta T_2$ sme vypočítali z rovnice (7) pre príslušné hodnoty E_{12}^1 . Ako vidieť z tabuľky, súlad medzi teoretickými a experimentálnymi hodnotami bodov kalibračnej krivky 2 je veľmi dobrý.

4. Dva Piraniho elementy s kovovými drôťkami v proti sebe ležiacich ramenách Wheatstonovho mostíka

Veľmi často sa za účelom zväčšenia citlivosti Piraniho manometra používajú dva kovové drôťky, ktoré sú umiestnené vo vákuovom systéme. Tieto drôťky tvoria dve proti sebe ležiace ramená Wheatstonovho mostíka. V našom prípade sú to odpory R_2 a R_3 . S klesajúcim tlakom odpor R_2 sa mení podľa vzťahu (5) a odpor R_3 podľa analogického vzťahu

$$R_3 = R_3^a(1 + \alpha_3 \Delta T_3), \quad (13)$$

kde R_3^a je hodnota odporu R_3 pri atmosferickom tlaku, α_3 teplotný odporový koeficient a ΔT_3 rozdiel teplôt odpovedajúci rozdielu atmosferického tlaku a tlaku p vo vákuovom systéme.

Ak dosadíme z rovníc (5) a (13) za R_2 a R_3 do rovnice (4), dostaneme pre E_{12} v prípade dvoch Piraniho elementov vzťah

$$E_{12} = E \left[\frac{R_3^a(1 + \alpha_3 \Delta T_3)}{R_1 + R_3^a(1 + \alpha_3 \Delta T_3)} - \frac{R_4}{R_4 + R_2^a(1 + \alpha_2 \Delta T_2)} \right]. \quad (14)$$

V prípade, že mostík je v rovnováhe pri atmosferickom tlaku, musí platiť vzťah

$$\frac{R_1}{R_3^a} = \frac{R_2^a}{R_4} = k. \quad (15)$$

Po dosadení za pomer odporov z rovnice (15) a po jednoduchéj úprave prejde rovnica (14) do tvaru

$$E_{12}^k = E \left[\frac{1}{1 + k(1 + \alpha_3 \Delta T_3)^{-1}} - \frac{1}{1 + k(1 + \alpha_2 \Delta T_2)} \right]. \quad (16)$$

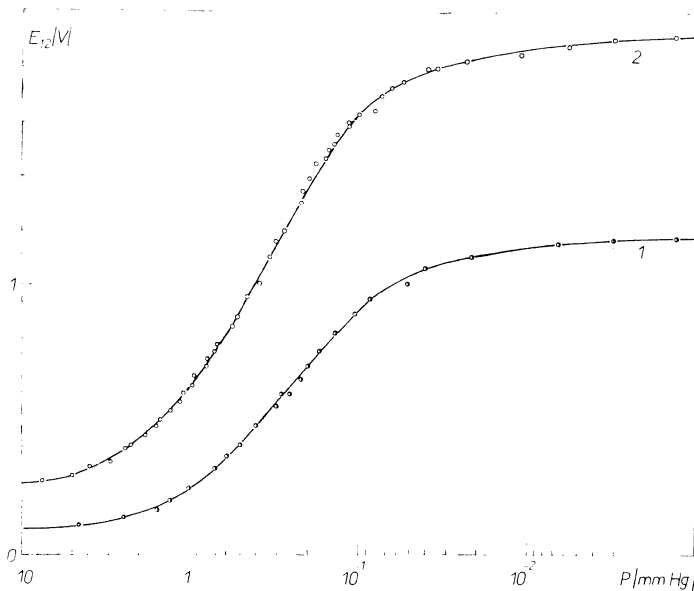
Piraniho manometer s dvoma kovovými drôťikmi má maximálnu citlivosť pre pomer odporov daný vzťahom

$$k = \sqrt{\frac{1 + \alpha_3 \Delta T_3}{1 + \alpha_2 \Delta T_2}}. \quad (17)$$

Z výrazu (17) plynie, že pomer odporov $k \doteq 1$. V prípade že obidva Piraniho elementy sú rovnaké, t. j. $\alpha_2 = \alpha_3$, $\Delta T_2 = \Delta T_3$ a $k = 1$, prejde rovnica (16) do obzvlášť jednoduchého tvaru

$$E_{12}^1 \doteq E \frac{\alpha_2 \Delta T_2}{2 + \alpha_2 \Delta T_2}. \quad (18)$$

Pre porovnanie sú na obr. 3 uvedené kalibračné krivky Piraniho manometrov s jedným a dvoma kovovými drôťikmi. Krivka 1 pre jeden Piraniho



Obr. 3. Kalibračné krivky odporového manometra: 1 – kalibračná krivka odporového manometra s jedným kovovým drôťikom, 2 – kalibračná krivka odporového manometra s dvoma kovovými drôťikmi.

element pri $E = 4 \text{ V}$ a $k = 1$ a krivka 2 pre dva Piraniho elementy pri tých istých hodnotách E a k . Z obrázku vidieť, že nie je splnený vzťah (18), čo sa dalo očakávať, pretože dosiahnuť rovnosť teplotných rozdielov pre obidva Piraniho elementy je veľmi ťažké.

5. Jeden Piraniho polovodičový element vo Wheatstonovom mostíku

V poslednom čase zásluhou prudkého rozvoja polovodičovej techniky začínajú sa používať na meranie tlakov polovodiče [6, 7, 8]. Polovodiče majú teplotný odporový koeficient záporný a asi 5-krát väčší než volfrám (napríklad u bežných termistorov je teplotný odporový koeficient asi $4 \cdot 10^{-2} (\text{°C})^{-1}$). Z tohto hľadiska má použitie polovodičov na meranie tlakov veľký význam a určité prednosti.

Pretože polovodičový element má asi 5-krát väčší teplotný odporový koeficient, bude mať správna voľba pomeru odporov k vo Wheatstonovom mostíku ešte väčší význam ako u Piraniho manometrov s kovovým drôtikom. Vyšetříme preto vplyv pomeru k na citlivosť polovodičového odporového manometra.

Nech odpor R_1 vo Wheatstonovom mostíku je polovodič, ktorého odpor s klesajúcim tlakom bude klesať. Zmenu odporu polovodiča R_1 s tlakom možno vyjadriť vzťahom

$$R_1 = R_1^a e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a} \right)}, \quad (19)$$

kde R_1^a je odpor a T_1^a teplota polovodiča pri atmosferickom tlaku, T_1 teplota polovodiča pri tlaku p a B_1 konštanta, ktorá vyjadruje závislosť odporu polovodiča od teploty a závisí od použitého materiálu a jeho tepelného spracovania. Na meranie tlakov sa najlepšie hodí polovodič s čo najväčšou hodnotou konštanty B_1 , ktorú možno určiť na základe vzťahu

$$B_1 = -\alpha T_1^2. \quad (20)$$

Ak za R_1 , dané rovnicou (19), dosadíme do rovnice (4), dostaneme

$$E_{12} = E \left[\frac{R_3}{R_3 + R_1^a e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a} \right)}} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right]. \quad (21)$$

Podmienkou rovnováhy mostíka pri atmosferickom tlaku je

$$k = \frac{R_1^a}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}, \quad (22)$$

čo po dosadení do rovnice (21) vedie k nasledujúcemu výrazu pre E_{12}^k

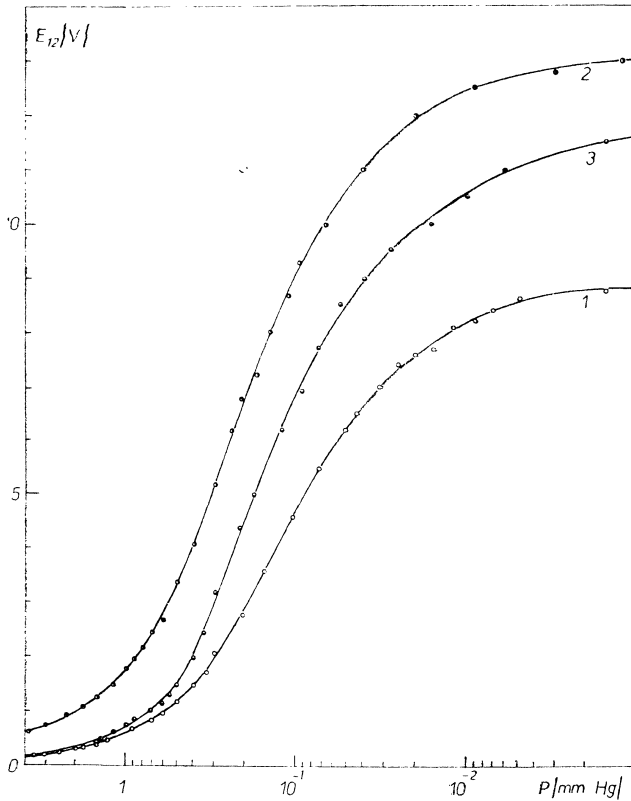
$$E_{12}^k = E \frac{k}{1+k} \frac{1 - e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a} \right)}}{1 + k e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a} \right)}}. \quad (23)$$

Z tejto rovnice bezprostredne vyplýva, že k sa nemôže rovnať 1, ak sa majú dosiahnuť najoptimálnejšie podmienky činnosti Piraniho manometra s polo-

vodičom. Z podmienky maximálnej citlivosti manometra a z rovnice (23) plynie pre pomer odporov k nasledujúci výraz

$$k = \sqrt{e^{-B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^0} \right)}}. \quad (24)$$

Z tohto vzťahu ihneď vidieť, že pomer $k > 1$ a môže nadobudnúť pre rozdiel teplôt ($T_1 - T_1^0$), ktorý prichádza do úvahy u polovodičových manometrov, dosť veľké hodnoty. Ak porovnáme vplyv vhodnej voľby pomeru k u polo-



Obr. 4. Kalibračné krivky polovodičového odporového manometra: 1 – kalibračná krivka pre $k = 1$ a $E = 23,2$ V, 2 – kalibračná krivka pre $k = 2,04$ a $E = 23,2$ V, 3 – kalibračná krivka pre $k = 2,04$ a $E = 20,75$ V.

vodičového manometra s obyčajným kovovým Piraniho manometrom, musí byť tento omnoho výraznejší práve v dôsledku väčšieho teplotného odporového koeficienta polovodičov.

Výraz (23) pre E_{12}^k v prípade $k = 1$ prejde do jednoduchého tvaru

$$E_{12}^1 = \frac{E}{2} \cdot \frac{1 - e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^0} \right)}}{1 + e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^0} \right)}}. \quad (25)$$

Porovnaním rovníc (23) a (25), ak uvážime, že pre polovodičový Piraniho manometer je $k > 1$, vyplýva, že

$$E_{12}^k \geq E_{12}^1$$

pre ľubovoľný tlak p .

Experimentálne výsledky sú na obr. 4. Krivka 1 je kalibračná krivka Piraniho manometra s polovodičom pri napätí 23,2 V a $k = 1$, krivka 2 kalibračná krivka toho istého manometra, ale pri $k = 2,04$. Zväčšenie pomeru odporov k sa dosiahlo zmenšením odporu R_3 , v dôsledku čoho vzrástol vyhrievací prúd polovodičového elementu. Aby sme získali správny obraz o vplyve pomeru odporov k na citlivosť polovodičového manometra, treba porovnať kalibračné krivky pri rôznom pomere odporov k , ale pri tom istom vyhrievacom prúde, ktorý preteká cez polovodičový element. Krivka 3 je kalibračná krivka pre ten istý polovodičový manometer pri $k = 2,04$, ale pri tom istom vyhrievacom prúde (0,19 mA) ako krivka 1, čo sa dosiahlo znížením napätia na 20,75 V. Z obrázku vyplýva, že aj v tomto prípade je citlivosť polovodičového manometra väčšia a že voľbe vhodného pomeru odporov, najmä u Piraniho manometrov s polovodičom, treba venovať väčšiu pozornosť.

6. Dva Piraniho polovodičové elementy v proti sebe ležiacich ramenách Wheatstonovho mostíka

Citlivosť Piraniho manometra s polovodičom možno ešte zvýšiť tým, že sa použijú dva polovodičové elementy, ktoré tvoria dve proti sebe ležiace ramená Wheatstonovho mostíka. Označme ich odpory R_1 a R_4 . Tieto odpory sa budú s klesajúcim tlakom vo vákuovom systéme zmenšovať, a to R_1 podľa vzťahu (19) a R_4 podľa analogického vzťahu

$$R_4 = R_4^a e^{B_4 \left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_4^a} \right)}. \quad (26)$$

Ak dosadíme za R_1 a R_4 z rovníc (19) a (26) do rovnice (4), dostaneme pre E_{12} nasledujúci výraz

$$E_{12} = E \left[\frac{R_3}{R_3 + R_1^a e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a} \right)}} - \frac{R_4^a}{R_4^a + R_2 e^{-B_4 \left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_4^a} \right)}} \right]. \quad (27)$$

Požiadavka rovnováhy pri atmosférickom tlaku vedie pre pomer odporov vo Wheatstonovom mostíku k vzťahu

$$k = \frac{R_1^a}{R_3} = \frac{R_2}{R_4^a}. \quad (28)$$

Po zavedení tohto pomeru prejde rovnica (27) do konečného tvaru

$$E_{12}^k = E \left[\frac{1}{1 + k e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a} \right)}} - \frac{1}{1 + k e^{-B_4 \left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_4^a} \right)}} \right]. \quad (29)$$

Maximálna citlivosť Piraniho manometra s dvoma polovodičovými elementami sa dosiahne vtedy, ak volíme k vo tvare

$$k = \sqrt{e^{-B_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a}\right)} e^{B_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a}\right)}} \quad (30)$$

Tento pomer v prípade rovnakých polovodičových elementov by sa rovnal 1. Avšak nemožno prakticky vyrobiť dva polovodiče s rovnakými vlastnosťami, tak že $k \neq 1$. Nedopustíme sa však veľkej chyby, keď budeme voliť $k = 1$. Pre $k = 1$ prejde rovnica (29) do tvaru

$$E_{12}^1 = E \frac{e^{-B_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a}\right)} - e^{B_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a}\right)}}{\left[1 + e^{B_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a}\right)}\right] \left[1 + e^{-B_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a}\right)}\right]} \quad (31)$$

Posledný vzťah pre E_{12}^1 v prípade dvoch približne rovnakých polovodičových elementov možno ešte zjednodušiť. V tomto prípade $B_4 \doteq B_1$, $T_4 \doteq T_1$ a $T_4^a \doteq T_1^a$, ďalej druhý člen v čitateli rovnice (31) možno v porovnaní s prvým zanedbať, pretože je omnoho menší. Napríklad, ak by $T_1^a = 300 \text{ °K}$ a $T_1 = 360 \text{ °K}$, teda rozdiel 60 °K , je druhý člen v čitateli asi $1/8$, zatiaľ čo prvý je omnoho väčší ako 1. Ak uvážime tieto zjednodušenia, dostaneme pre E_{12}^1 nasledujúci približný výraz

$$E_{12}^1 = \frac{E}{\left[1 + e^{B_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a}\right)}\right]^2} \quad (32)$$

Tento približný výraz však platí len pri nižších tlakoch. Pri vyšších tlakoch nemožno zanedbať druhý člen v čitateli rovnice (31).

7. Piraniho manometer s jedným polovodičom a jedným kovovým drôtikom v susedných ramenách Wheatstonovho mostíka

Veľmi výhodne možno kombinovať polovodičový element a kovový drôtik, ktoré tvoria dve susedné ramená Wheatstonovho mostíka. Takýto Piraniho manometer je veľmi výhodný. S klesajúcim tlakom odpory týchto dvoch elementov sa budú meniť, a to R_1 podľa vzťahu (19) a R_2 podľa vzťahu (5). Po dosadení za R_1 a R_2 z rovníc (19) a (5) do rovnice (4), dostaneme pre E_{12} výraz

$$E_{12} = E \left[\frac{R_3}{R_3 + R_1^a e^{B_1\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^a}\right)}} - R_y + \frac{R_4}{R_2^a(1 + \alpha_2 \Delta T_2)} \right] \quad (33)$$

Tento výraz možno prepísať zavedením pomeru odporov vo Wheatstonovom mostíku, ktorý plynie z požiadavky rovnovážneho stavu mostíka pri atmosférickom tlaku

$$k = \frac{R_1^a}{R_3} = \frac{R_2^a}{R_4} \quad (34)$$

Po dosadení dostaneme

$$E_{12}^k = Ek \frac{1 + \alpha_2 \Delta T_2 - e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^0} \right)}}{[1 + k(1 + \alpha_2 \Delta T_2)] \left[1 + k e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^0} \right)} \right]} \quad (35)$$

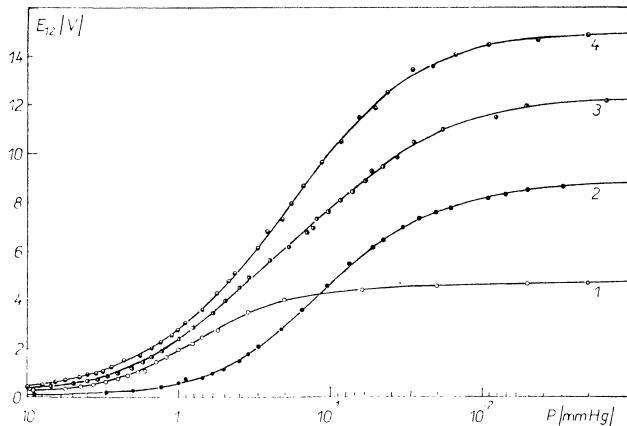
Z tejto rovnice vidieť, že takýto odporový manometer skladajúci sa z polovodiča a kovového drôtika musí mať väčšiu citlivosť ako odporový manometer s jedným polovodičom. Porovnaním rovnice (35) s rovnicou (23) vidíme, že v rovnici (35) je v čitateli navyše výraz $\alpha_2 \Delta T_2$, ktorý s klesajúcim tlakom vzrastá a tak čitateľ (35) je pre každý tlak väčší ako čitateľ (23). Hoci menovateľ rovnice (35) je pre každý tlak p väčší ako menovateľ (23), predsa E_{12}^k plynúce z rovnice (35) je väčšie pre každú hodnotu tlaku ako E_{12}^k vyjadrené rovnicou (23), pretože menovateľ rovnice (35) rastie síce, ale pomalšie ako čitateľ.

Najvhodnejší pomer odporov k plynie z podmienky maximálnej citlivosti Piraniho manometra a je rovný

$$k = \sqrt{\frac{e^{-B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^0} \right)}}{1 + \alpha_2 \Delta T_2}} \quad (36)$$

Pre $k = 1$ prejde rovnica (35) do tvaru

$$E_{12}^1 = E \frac{1 + \alpha_2 \Delta T_2 - e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^0} \right)}}{(2 + \alpha_2 \Delta T_2) \left[1 + e^{B_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1^0} \right)} \right]} \quad (37)$$



Obr. 5. Kalibračné krivky odporového manometra s jedným polovodičom a jedným kovovým drôtikom. 1 — kalibračná krivka odporového manometra s kovovým drôtikom pre $k = 1$ a $E = 21,5$ V, 2 — kalibračná krivka odporového manometra s polovodičom pre $k = 1$ a $E = 21,5$ V, 3 — kalibračná krivka odporového manometra s polovodičom a kovovým drôtikom pre $k = 1,8$ a $E = 21,5$ V.

Pre porovnanie citlivosti takéhoto odporového manometra sú na obr. 5 uvedené niektoré kalibračné krivky: Krivka 1 je kalibračná krivka odporového manometra s jedným kovovým drôtikom pri napätí 21,5 V, $k = 1$ a vyhrievacom prúde 79 mA. Krivka 2 je kalibračná krivka odporového manometra s jedným polovodičovým elementom pri napätí 21,5 V, $k = 1$ a vyhrievacom prúde 100 μ A. Krivka 3 je kalibračná krivka odporového manometra s polovodičovým elementom a kovovým drôtikom pri napätí 21,5 V a $k = 1$. Posledná krivka 4 je kalibračná krivka toho istého manometra ako u kalibračnej krivky 3, ale pri $k = 1.8$. Z obrázku vidieť, že Piraniho manometer složený z polovodiča a kovového drôtika má podstatne vyššiu citlivosť ako citlivejší polovodičový odporový manometer (krivka 2) a súčasne potvrdzuje teoreticky predpokladané ďalšie zvýšenie citlivosti vhodnou voľbou pomeru odporov k .

8. Záver

V práci sa ukázalo, že bežné zapojenie odporového manometra vo Wheatstonovom mostíku vedie k veľmi složitej závislosti prúdu, ktorý je mierou tlaku, od odporov vystupujúcich v mostíku. Vhodnou voľbou meracieho prístroja s ohľadom na jeho vnútorný odpor dá sa dosiahnuť to, že táto závislosť sa podstatne zjednoduší.

Na základe rozboru tejto zjednodušenej závislosti (4) sa ukázala možnosť ďalšieho zvýšenia citlivosti Piraniho manometra vhodnou voľbou odporov vo Wheatstonovom mostíku, čo bolo pre jednotlivé druhy Piraniho manometrov aj experimentálne potvrdené.

V práci sa urobil rozbor niektorých odporových manometrov, ktoré by prichádzali najviac do úvahy pre praktické využitie. Je to predovšetkým Piraniho manometer s jedným a dvoma kovovými drôtikmi, ďalej s jedným a dvoma polovodičmi a aj odporový manometer s jedným polovodičom a jedným kovovým drôtikom. Experimentálne výsledky u všetkých ukazujú zvýšenú citlivosť v prípade použitia vhodnejšieho pomeru odporov vo Wheatstonovom mostíku.

Zjednodušený vzťah (4) pre potenciálny rozdiel E_{12} a aj výpočet kalibračnej krivky 2 z kalibračnej krivky 1 na obr. 2 na základe rovnice (12) ukazujú, že by bolo možné pre prípad odporového manometra s jedným kovovým drôtikom alebo polovodičom vypočítať kalibračné krivky manometra pri rôznom vyhrievacom prúde z jednej experimentálne získanej kalibračnej krivky. Ukazuje sa aj možnosť výpočtu kalibračných kriviek takéhoto manometra pre rôzne plyny z experimentálne získanej kalibračnej krivky pre jeden plyn.

LITERATÚRA

- [1] Dushman S., *Scientific foundations of vacuum technique*, New York 1949.
- [2] Jaeckel R., *Kleinste Drucke, ihre Messung und Erzeugung*, Berlin 1950.
- [3] Laporte H., *Vakuummessungen*, Berlin 1955.
- [4] Nesterenko A. D., *Osnovy rasčeta elektroizmeritel'nych schem uravnovesivaniju*, Kijev 1954.
- [5] Siemens Zeitschrift, čis. 10/11 (1957), 605.
- [6] Lortie Y., J. Phys. Radium 16 (1955), 317.
- [7] Varicak M., Il nuovo Cimento 6 (1957), 723.
- [8] Veis Š., Acta Facultatis rerum naturalium Universitatis Comenianae 1 (1957), 77.

Došlo 11. 7. 1958.

*Katedra fyziky Univerzity Komenského
v Bratislave*

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ МАНОМЕТРАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

ШТЕФАН ВЕЙС

Выводы

В статье показывается на возможность употребления вольтметра с очень большим сопротивлением для измерения давлений в мосте Витстона. Этим достигается существенного упрощения уравнения для напряжения E_{12} . Одновременно показывается на возможность повышения чувствительности манометра сопротивления более выгодным выбором сопротивлений в мосте Витстона.

MESSUNG DER DRÜCKE MIT DEN WIDERSTANDSMANOMETERN

ŠTEFAN VEIS

Zusammenfassung

In dieser Arbeit weißt man auf die Möglichkeit der Anwendung des Voltmeters mit dem sehr großen inneren Widerstand zu der Messung der Drücke in der Wheatstoneschen Brücke an. Mit diesem erzielt man eine wesentliche Vereinfachung der Gleichung für die Spannung E_{12} . Gleichzeitig weißt man auf die Möglichkeit der Erhöhung der Empfindlichkeit des Widerstandsmanometers mit einer entsprechenden Wahl des Verhältnisses der Widerstände in der Wheatstoneschen Brücke an.