

BRUNON SZADKOWSKI, TERESA SZADKOWSKA  
Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej

TERMoeLEKTRYCZNY MIERNIK NAPIĘCIA,  
PRĄDU I MOCY ZE SZCZEGÓLNYM PRZEZNACZENIEM  
DO POMIARÓW W ZAKRESIE 1-10 Hz

Streszczenie. W artykule przedstawiono opis zasady działania termoelektrycznego miernika napięcia, prądu i mocy oraz niektóre dane techniczne wykonanego prototypu. Przedstawiono również najistotniejsze wskazówki ułatwiające wykonanie projektu opisywanego miernika.

## 1. W S T Ę P

W wielu rozwijających się gałęziach przemysłu coraz szersze zastosowanie znajdują urządzenia pracujące w zakresie częstotliwości mniejszych od 16 Hz, tj. w zakresie częstotliwości podakustycznych. Równoległe do rozwoju tych urządzeń konieczne staje się rozwiązanie szeregu problemów pomiarowych, a m.in. zbudowanie przyrządów umożliwiających pomiary podstawowych wielkości elektrycznych tj. napięcia, natężenia prądu i mocy przy bardzo małych częstotliwościach. Seryjnie produkowane mierniki wskazówkowe mają ograniczoną wartość najmniejszej częstotliwości roboczej, wynoszącą na ogół 10 Hz. Poniżej tej wartości częstotliwości, organ ruchomy miernika wskazówkowego nadąża już za zmianami chwilowych wartości momentu napędowego, co powoduje oscylacje wskazówki na tle podziałki. Odczyty mierzonej wielkości stają się w tym przypadku niemożliwe.

Chwilowa wartość odchylenia organu ruchomego wynosi wówczas:

$$\alpha = \alpha_{=} + \alpha_{\sim} = \alpha_{=} \left(1 + \frac{\alpha_{\sim}}{\alpha_{=}}\right) \quad (1.1)$$

gdzie:

$\alpha_{=}$  - składowa stała odchylenia,

$\alpha_{\sim}$  - składowa zmienna odchylenia.

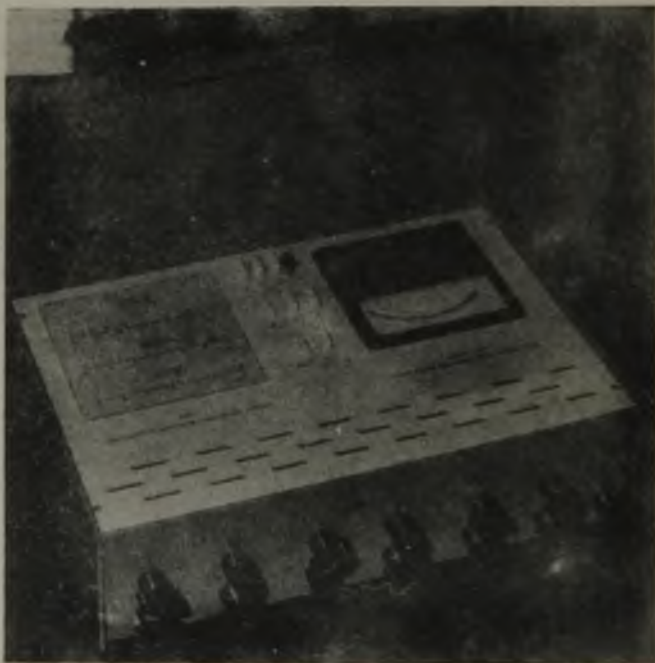
Dokonanie odczytu będzie możliwe tylko wtedy, gdy udział składowej zmiennej, określony stosunkiem:

$$K = \frac{|\alpha_{\sim}|}{|\alpha_{=}|} \quad (1.2)$$

będzie pomijalnie mały w porównaniu z jednością; np. wystarczyłoby uzyskanie  $K = 0,5 \cdot \delta / 100$ , gdzie  $\delta$  - dopuszczalna dla danego miernika klasa niedokładności (w %).

Zagadnieniu opracowania metod pomiarowych, w których wartość  $K$  byłaby wystarczająco mała, poświęcono szereg publikacji [1], [2], [3]. W pracach tych wskazuje się na szczególne zalety przetworników termoelektrycznych współpracujących z magnetoelektrycznymi miernikami wskazówkowymi.

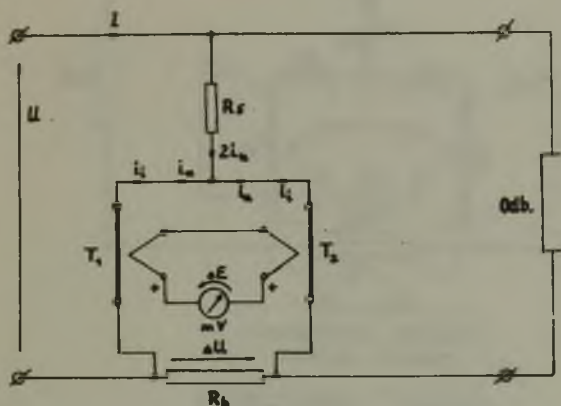
W dalszym ciągu przedstawiony będzie opis uniwersalnego miernika z termoelementami, który wykonany został jako prototyp w Katedrze Technologii i Metrologii Elektrycznej Politechniki Śląskiej dla potrzeb hutnictwa. Opisany prototyp przeznaczony jest do pomiaru napięcia, natężenia prądu i mocy w układach 3-fazowych zasilanych napięciem odkształconym o częstotliwości 1-10 Hz. Układ miernika wykonano w postaci walizki pomiarowej (fot. na rys. 1.1), która oprócz wyżej wymienionego zastosowania może być wykorzystana w układach prądu stałego i zmiennego w zakresie częstotliwości do  $10^4$  Hz, przy napięciach do 75 V i 150 V oraz prądach do 10 A, 25 A i 50 A z dokładnością  $\pm 2,5\%$ .



Rys. 1.1. Fotografia prototypu wykonanego miernika

## 2. ZASADA POMIARU, SCHEMAT IDEOWY MIERNIKA

Rozwiązanie układu pomiarowego oparto o znany w literaturze [4] schemat watomierza termoelektrycznego, przedstawiony na rys. 2.1.



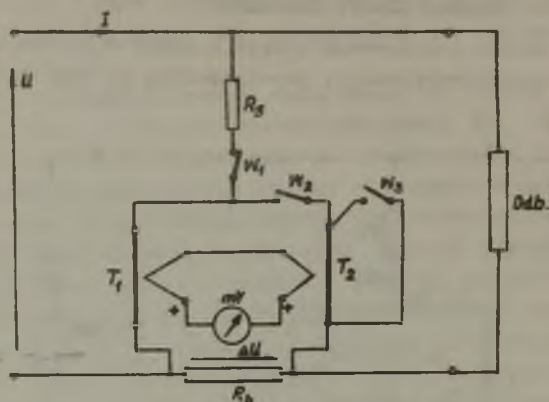
Rys. 2.1. Watomierz termoelektryczny

Warunkiem koniecznym, zapewniającym, poprawne działanie przedstawionego watomierza jest zastosowanie dwóch identycznych przetworników termoelektrycznych  $T_1$  i  $T_2$ . W praktyce warunek ten spełniany jest drogą selekcjonowania oraz stosowania dodatkowych układów wyrównujących. Ponadto niezbędne jest spełnienie warunku  $\Delta U \ll U$ , co uzyskuje się przez odpowiedni dobór termoelementów oraz oporu bocznikującego  $R_b$ . Opór  $R_s$  decyduje o zakresie napięciowym watomierza. Z tak sformułowanych warunków ogólnych wynika szereg wymagań szczegółowych, po spełnieniu których odchylenie miernika wyjściowego będzie proporcjonalne do mocy czynnej.

Schemat watomierza (rys. 2.1) można również przystosować do pomiarów napięcia i natężenia prądu, co znacznie upraszcza opracowanie konstrukcji miernika o przeznaczeniu uniwersalnym. W tym celu w układzie watomierza należy dodatkowo stworzyć warunki umożliwiające oddzielne wykorzystanie obwodu napięciowego i obwodu prądowego przy jednoczesnym zachowaniu tego samego miernika wyjściowego. Warunki takie mogą być spełnione w obwodzie jak na rys. 2.2 w którym zastosowano zespół wyłączników  $W_1; W_2; W_3$ .

Dokonyjąc odpowiednich przełączeń w zespole wyłączników (wg programu podanego w tablicy na rys. 2.2) można zrealizować pomiar mocy, napięcia oraz natężenia prądu.

Przystosowanie przedstawionego na rys. 2.2 układu pomiarowego do pomiarów w sieci 3-fazowej, 4-przewodowej wykonano w sposób przedstawiony na rys. 2.3. W fazach R, S, T znajdują się identyczne boczniki  $R_b$ , do których kolejno przyłącza się obwód z termoelementami za pomocą specjalnie zaprojektowanego przełącznika P.



Program przełączania  
rodzaju pomiaru.

Wielkość mierzona	Poloż. wył.		
	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>
moc P	Z	Z	0
napięcie U	Z	0	dom
prąd I	0	Z	Z

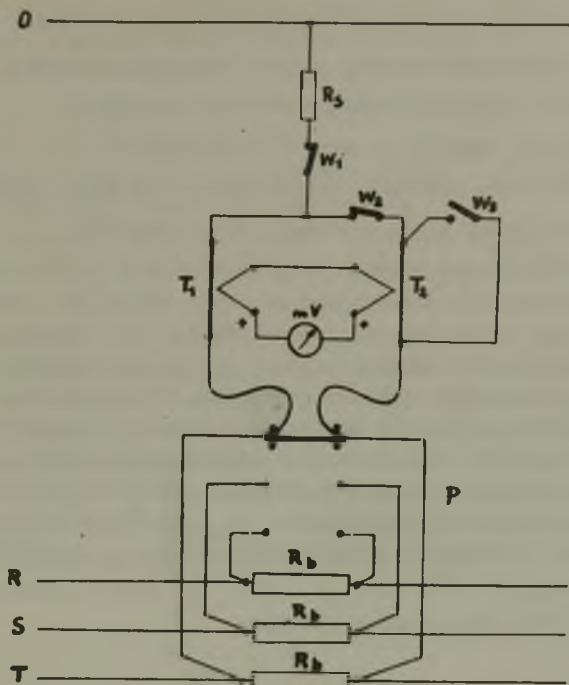
Z - wył.  
zatk.  
0 - wył.  
otw.

Rys. 2.2. Watomierz termoelektryczny z możliwością przełączania na pomiar napięcia lub natężenia prądu

W podanym układzie zastosować można wielozakresowe oporniki dodatkowe  $R_s$  oraz boczniki  $R_b$  (uniwersalne), co pozwala na dokonywanie pomiarów w kilku zakresach napięciowych i prądowych.

W przedstawionych na rysunkach 2.2 i 2.3 schematach, ze względu na zachowanie przejrzystości zawartych w nich koncepcji, nie podano szczegółów montażowych ani konstrukcyjnych poszczególnych obwodów: wyłączników  $W_{1,2,3}$ , przełącznika P, termoelementów  $T_1$  i  $T_2$  z miernikiem wyjściowym oraz oporników  $R_s$  i  $R_b$  w wykonaniu wielozakresowym.

Niektóre ważniejsze uwagi dotyczące wykonania tych obwodów przedstawione będą w dalszym ciągu, przy omówieniu wskazówek projektowych.



Rys. 2.3. Przystosowanie układu pomiarowego z ryb. 2.2 do pomiarów w sieci 3-fazowej, 4-przewodowej

### 3. WSKAZÓWKI PROJEKTOWE

Najistotniejszą częścią projektu jest optymalny dobór przetworników termoelektrycznych. Dobór taki odpowiadać musi specyficznym warunkom narzucanym przez założenie bardzo małych częstotliwości roboczych (1-10 Hz) oraz przez przyjęty schemat rozwiązania układu pomiarowego. W przypadku bardzo małych częstotliwości może wystąpić niepożądane zjawisko oscylacji organu ruchomego miernika. Oscylacje te zależą od parametrów grzejnika termoelementu, od częstotliwości prądu przezeń płynącego oraz od parametrów miernika wyjściowego. W pracach [1] i [2] wykazano, że gdy miernik wyjściowy ma ustrój magnetoelektryczny, to stosunek amplitudy składowej zmiennej do składowej stałej jego odchylenia może być obliczony z zależności:

$$K = \frac{\alpha_m}{\alpha} = \frac{1}{4\pi f \tau \sqrt{(1 - 4\rho^2)^2 + (4\rho\theta)^2}} \quad (3.1)$$

gdzie  $\rho = \frac{T_0}{T_b}$ ;  $\tau = \frac{C}{\lambda}$



- $T_0$  - okres wahań swobodnych organu ruchomego miernika,  
 $T_b$  - okres wahań wymuszonych organu ruchomego miernika,  
 $\beta$  - stopień tłumienia organu ruchomego miernika,  
 $C_g$  - pojemność cieplna grzejnika termoelementu,  
 $\lambda$  - współczynnik oddawania ciepła przez grzejnik termoelementu,  
 $f$  - częstotliwość prądu płynącego przez grzejnik.

Zależność (3.1) uzupełniona żądaniem  $K \leq 0,5 \cdot \sigma/100$  stanowi podstawową formułę projektową, pozwalającą na dobór parametrów miernika wyjściowego do zadanego termoelementu lub odwrotnie. Gdy dobierany jest termoelement konieczne jest zwrócenie uwagi na to, że nie można przyjmować dowolnie dużej pojemności cieplnej grzejnika. Przekroczenie pewnej wartości granicznej powoduje, że czas uspokojenia organu ruchomego miernika przyjmuje niedopuszczalnie dużą wartość i równocześnie maleje czułość miernika. Graniczną wartość pojemności cieplnej grzejnika określić można gdy znana jest wartość czasu uspokojenia  $t_{usp}$ , w ciągu którego odchylenie organu ruchomego osiągnie wartość ustaloną  $\alpha_{ust}$  z zadaną dokładnością  $\Delta$ , tzn.  $\alpha = \alpha_{ust}(1 - \Delta)$ .

Można wykazać [1], że zachodzi związek:

$$t_{usp} = \tau \ln \frac{1}{\Delta} \quad (3.2)$$

z którego przy znanych wartościach  $t_{usp}$  i  $\Delta$  wyznacza się największą dopuszczalną wartość  $\tau$  (proporcjonalną do pojemności cieplnej grzejnika  $C_g$  - równ. 3.1).

Dobór przetworników termoelektrycznych wymaga jeszcze uwzględnienia innych warunków, narzuconych przez zasadę działania układu pomiarowego. W tym przypadku jednym z podstawowych żądań jest to, aby oba stosowane w układzie pomiarowym przetworniki  $T_1$  i  $T_2$  miały identyczne parametry. W praktyce wystarcza, jeśli różnica wartości odpowiednich parametrów mieści się będą w tolerancjach określonych z zakładanej dokładności pomiarów. Nie wszystkie spośród branych pod uwagę parametrów mogą być dobierane drogą selekcji par przetworników z jednej serii. W odniesieniu do oporności grzejników oraz charakterystyk napięć termoelementów w funkcji prądu grzejnika selekcja jest tylko niezbędną czynnością wstępną.

Dokładniejsze wyrównanie tych wielkości wymaga zastosowania dodatkowych obwodów kompensacyjnych, złożonych np. z odpowiednio dobranych oporników, w drodze eksperymentu. Najczęściej wystarczy opornik bocznikujący jeden z termoelementów oraz opornik przyłączony szeregowo w obwodzie, jednego z grzejników. Opory grzejników nie powinny być jednak mniejsze od 20...30  $\Omega$  (dla uniknięcia wpływów oporów przejścia na stykach przełącznika P - rys. 2.3) oraz z drugiej strony nie powinny mieć

wartości większej niż wynika to z dopuszczalnego spadku napięcia na boczniku  $\Delta U$  (rys. 2.1) i prądów płynących przez grzejniki.

Kolejnym, istotnym zagadnieniem projektowym jest odpowiedni dobór wartości oporników  $R_b$  i  $R_g$  (rys. 2.1 i 2.2). W tym przypadku podstawowymi kryteriami doboru są następujące wymagania:

- nieprzekroczenie dopuszczalnych wartości prądów w grzejnikach ( $I_{gN}$ ),
- zachowanie pożądaných przekładni pomiarowych,
- jednoczesne wykorzystanie tych samych oporników  $R_b$  i  $R_g$  w każdym reżimie pracy układu pomiarowego (pomiar napięcia, pomiar prądu i pomiar mocy).

Jeśli układ pomiarowy pracuje jako watomierz (rys. 2.1), to stosownie do warunku (a) wypadkowe prądy płynące w grzejnikach termoelementów nie powinny mieć wartości większej niż znamionowa  $I_{gN}$ . Wypadkowe prądy osiągać będą wartości największe, gdy ich składowe będą zgodne lub przeciwne w fazie oraz w przypadku prądów stałych.

Dobierając zatem oporniki  $R_b$  i  $R_g$  dla stałoprądowej pracy układu, zapewnia się również spełnienie warunku (a) dla zmiennoprądowej pracy układu. Przy zasilaniu stałoprądowym odchylenie miernika wyjściowego  $\alpha$  jest proporcjonalne do iloczynu prądów  $I_1$  oraz  $I_u$ , tzn.:

$$\alpha = c I_1 I_u \quad (3.3)$$

Uwzględniając warunek (a) można napisać, że w granicznym przypadku:

$$I_1 + I_u = I_{gN} \quad (3.4)$$

Z zależności (3.3) i (3.4) otrzymuje się:

$$\alpha = \begin{cases} c I_1 (I_{gN} - I_1) \\ \text{lub} \\ c I_u (I_{gN} - I_u) \end{cases}$$

$$\frac{d\alpha}{dI_1} = c I_{gN} - 2cI_1 \quad \text{lub} \quad \frac{d\alpha}{dI_u} = c I_{gN} - 2cI_u$$

skąd wynika, że ekstremalne wartości prądów  $I_1$  oraz  $I_u$ , przy których odchylenie  $\alpha$  jest największe, wynoszą:

$$I_1 = I_u = \frac{1}{2} I_{gN} \quad (3.5)$$

Zależność (3.5) wskazuje, że oporniki  $R_b$  i  $R_g$  w układzie do pomiaru mocy powinny być obliczane tak, aby maksymalna prądy w grzejnikach, pochodzące oddzielnie od zasilania obwodu prądowego lub obwodu napięciowego watomierza, równe były połowie znamionowego prądu grzejnika  $I_{GN}$ .

Z rys. 2.2 wynika, że dobrane w ten sposób oporniki  $R_b$  i  $R_g$  będą także nadawały się do wykorzystania w układach do pomiaru prądu i do pomiaru napięcia. Możliwe to jest dzięki temu, że w układzie amperomierza lub woltomierza czynny jest tylko jeden z dwu identycznych przetworników ( $T_1$ ). Ostatecznie, dobór oporników  $R_b$  i  $R_g$  według określonych na wstępie wymagań (a), (b), (c) nie jest kłopotliwy i przeprowadzony dla dowolnego układu (watomierz, amperomierz, woltomierz) pozostaje również ważny w pozostałych układach.

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

We wskazówkach projektowych pominięto zagadnienia związane z konstrukcją obwodów z wyłącznikami i przełącznikami, bowiem są to zagadnienia zależne od indywidualnych cech zastosowanych łączników. Jedynymi z ogólnych uwag jakie tu można sformułować są: zapewnienie wystarczająco małych oporności styków oraz rozwiązanie skutecznego systemu blokad, zabezpieczających przed zniszczeniem elementów układu pomiarowego na skutek pomyłek przy manipulacji.

Wpływy temperaturowe na dokładność układu pomiarowego kompensowane są znanymi sposobami, stosowanymi w miernikach z przetwornikami termoelektrycznymi. W opisanym układzie pomiarowym szczególne znaczenie w tym względzie ma konstrukcja mechaniczna całości (walizki pomiarowej), w której konieczne jest wyodrębnienie komory z bocznikami, zapewnienie odpowiedniego systemu chłodzenia boczników i izolowanie pozostałych elementów od przenikania ciepła z komory boczników.

Odczyty wskazań miernika wyjściowego (miliwoltomierz magnetoelektryczny) mogą być realizowane w ten sposób, że wspólnej, równomiernej podziałce na skali miernika przyporządkowane są charakterystyki  $P[W] = f(\alpha)$ ,  $U[V] = f(\alpha)$  oraz  $I[A] = f(\alpha)$  wykonane na oddzielnej tablicy skalowej. Przy wielozakresowych pomiarach, każda z charakterystyk  $P$ ,  $U$ ,  $I$  zaopatrzona jest w odpowiednie mnożniki.

#### LITERATURA

- [1] Ornatskij P.P.: Primianjenje termoelektricheskich priborow na infranitskich czastotach. Izmeritel'naja Technika, nr 5, 1958.
- [2] Ornatskij P.P., Usatin P.B.: Izmerenje elektricheskich wielitszin pri infranitskich czastotach. Acta Imeko III, 1958.



- [3] Ornatskij P.P., Cywinskij W.G.: Klasyfikacja metodow izmjerzenia naprjażenij na infraniskich czastotach. Izmeritielnaja Tiekhnika, nr 9, 1968.
- [4] Łapifski M.: Miernictwo teleelektryczne. WKiŁ, t. III. Warszawa 1966.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ТОКА И МОЩНОСТИ  
С СООБЕННЫМ ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 1-10 гц

#### Резюме

В работе представили описание принципов действия термоэлектрического измерителя напряжения, тока и мощности а тоже некоторые данные технически сделанного прототипа. Представили тоже самые существенные указания облегчающие выполнение проекта описанного измерителя.

TERMO-JUNCTION METER OF VOLTAGE, CURRENT AND POWER  
WITH SPECIAL REFERENCE FOR THE MEASUREMENTS  
IN THE RANGE OF 1-10 c/s

#### Summary

In the paper the description of the operating principle of thermo-junction meter of voltage, current and power as well as some technical data of the work-out prototype is presented. The instruction to facilitate the working out of the meter design are given.