

**Andrzej RYLSKI**

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

## Przetwornik z modulacją kwadraturową do pomiaru parametrów wiatru

Dr inż. Andrzej RYLSKI

Ukończył studia w 1974r. na wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W 1986r. uzyskał stopień doktora w Instytucie Metrologii Politechniki Wrocławskiej. Od roku 1989 jest adiunktem w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Rzeszowskiej. Praca naukowa dotyczy: wyodrębnienia informacji o właściwościach obiektów technicznych i biologicznych zawartej w ich polach temperatur oraz konstrukcji sensorów wieloparametrowych.

e-mail: rylski@prz.edu.pl



### Streszczenie

W artykule opisano kształt belki przetwornika tensometrycznego charakteryzującego się stałym współczynnikiem ugięcia w funkcji zmian prędkości wiatru oraz zaproponowano mostkową modulację kwadraturową do jednoczesnego pomiaru dwóch parametrów wiatru: prędkości i kierunku. Ta konstrukcja nie posiada elementów ruchomych i jest niewrażliwa na zmiany temperatury i wilgotności powietrza.

**Słowa kluczowe:** sensory, tensometry, modulacja kwadraturowa, mostki niezrównoważone.

### Transducer with quadrature modulation for measurements of wind parameters

#### Abstract

The paper presents the shape of a strain gauge transducer beam which is characterized by a constant deflection coefficient at wind speed changes. The bridge quadrature modulation is proposed for simultaneous measurements of the wind intensity and direction. The presented construction has no movable elements and is insensitive to changes in air temperature and humidity.

**Keywords:** sensors, strain gauge, quadrature modulation, unbalanced bridge.

### 1. Wstęp

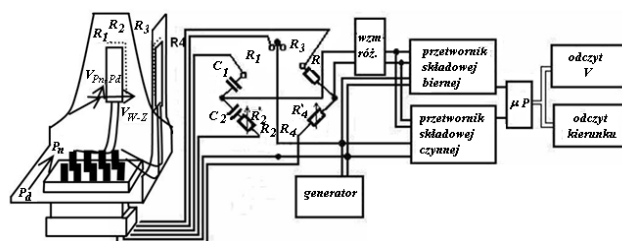
Najczęściej spotykanym przetwornikiem do pomiaru prędkości i kierunku wiatru [1] jest zestaw składający się z wiatraka oraz wiatrowskazu. Zakres mierzonych prędkości wiatru mieści się w przedziale wartości 0,5m/s do 60 m/s. Dokładność pomiaru jest rzędu kilku procent i zupełnie wystarcza w praktycznych zastosowaniach. Wpływ warunków pracy takich jak: deszcz, śnieg, mróz, pogarsza dokładność pomiaru do rzędu kilkunastu i więcej procent lub uniemożliwia pomiar - przez zablokowanie przetwornika lodem, śniegiem lub innymi zanieczyszczeniami. Produkowane są również wiatromierze z przetwornikami ultradźwiękowymi [1, 2]. Rozwiązanie to nie posiada elementów ruchomych. Podczas pracy przetworników na wolnym powietrzu ich czułość ulega zmianie wraz ze zmianą wilgotności powietrza, która zmienia się w cyklu 24 godzinnym oraz pod wpływem zmiany pogody, słońce / deszcz.

Tej wady nie będzie miał przetwornik z układem mostkowym modulatora kwadraturowego z tensometrami pod warunkiem zastosowania w czasie ich montażu klejów i farb wodoodpornych.

### 2. Wiatromierz tensometryczny z mostkowym modulatorem kwadraturowym

Na rys. 1 przedstawiono model przetwornika z tensometrami do pomiaru prędkości wiatru i jego kierunku, w zmodyfikowanym układzie mostka Wienera do jednoczesnego pomiaru dwóch rezy-

stancji [3, 4]. Jeżeli przetwornik będzie ustawiony zgodnie z zaznaczonym kierunkiem Pn-Pd, wówczas strumień wiatru o prędkości  $V$ , oddziałuje swoją energią na belkę z tensometrami  $R1, R2$  i  $R3, R4$  w taki sposób, że składowa wektora  $V_{PN-Pd}$  oddziałuje na belkę z tensometrami  $R1, R2$ , a składowa  $V_{W-Z}$  oddziałuje na belkę z tensometrami  $R3, R4$ . Kondensatory  $C1, C2$  oraz rezystor  $R$  to stałe elementy, a potencjometry  $R2'$  i  $R4'$  to elementy o regulowanej rezystancji, umożliwiające zrównoważenie układu mostka Wienera. Na polu odczytowym „odczyt  $V$ ” będzie wyświetlona wartość prędkości wiatru, a na polu „odczyt kierunku” wartość kąta wektora prędkości wiatru w stosunku do kierunku wschód - zachód przyjętego jako kierunek odniesienia.



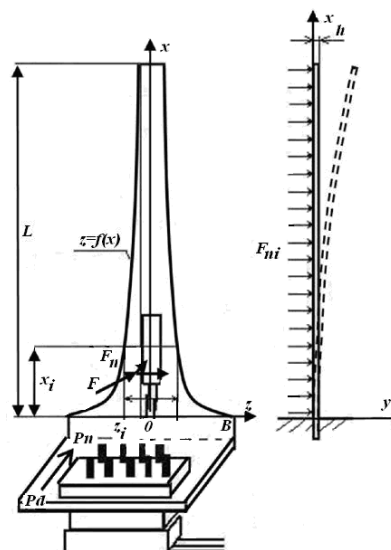
Rys. 1. Przetwornik tensometryczny w wiatromierzu  
Fig. 1. Anemometr circuit with strain gauge transducer

Dobór parametrów belki, na której zamocowane są tensometry, rodzaj materiału, grubość, kształt są bardzo istotne z uwagi na czułość przetwornika, jego liniową pracę oraz łatwość jego wykonania z punktu widzenia niezależności współczynnika przetwarzania przetwornika od miejsca zamocowania tensometru na belce. Ten ostatni parametr jest istotny w procesie produkcyjnym lub przy ewentualnej wymianie tensometru.

### 3. Belka o stałym współczynniku ugięcia

Analizę wytrzymałościową przeprowadzono w oparciu o podręcznik Jakubowicza - Orłosia i Trębackiego [5, 6].

Na rys. 2 przedstawiono jedną belkę z naklejonymi tensometrami.



Rys. 2. Model pracy jednej z belek przetwornika prędkości wiatru  
Fig. 2. Bending of cantilever beam of wind velocity transducer

Współczynnika ugięcia belki  $\varepsilon(x_i)$  opisuje wzór (1)

$$\varepsilon(x_i) = \frac{y(x_i)}{x_i} = \frac{\sigma(x_i)}{E}, \quad (1)$$

gdzie:

- $y(x_i)$  - ugięcie belki w miejscu  $x_i$
- $x_i$  - odległość miejsca ugięcia belki od jej zamocowania (od początku układu współrzędnych)
- $E$  - moduł Younga
- $\sigma(x)$  - naprężenia w przekroju  $x$  belki

Spełnienie warunku  $\varepsilon(x_i) = \text{const}$  eliminuje wpływ miejsca przyklejenia na belce tensometru na czułość przetwornika. Belka jest poddana oddziaływaniu wektora siły wiatru  $F_n$  normalnemu do powierzchni i zakładam jego równomierny rozkład na całej powierzchni. Siła ta składa się z sumy oddziaływań wektorów normalnych jednostkowych siły  $F_{ni}$  (2) na całej powierzchni belki.

$$F_{ni} = \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot dx \cdot dz, \quad (2)$$

gdzie:

- $\rho$  - masa właściwa powietrza
- $dx, dz$  - wymiary powierzchni oddziaływania strumienia powietrza w kierunku osi  $x$  i osi  $z$
- $V_y$  - prędkość strumienia powietrza (prędkość wiatru) w kierunku osi  $y$

W belce jednostronnie utwierdzonej w osi  $z$ , obciążonej siłą ciągłą na całej długości o stałej wartości jednostkowej (2), moment gnący belki  $M(x_i, z_j)$  w punkcie  $(x_i, z_j)$  gdzie  $z_j \in (z_i \dots z_L)$ , a  $z_j = f(x_j)$  jest współrzędną krawędzi belki, można obliczyć ze wzoru (3)

$$M(x_i, z_j) = \int_{x_i}^{x_j} \frac{\rho \cdot V^2}{2} (x - x_i) \cdot dz \cdot dx = \frac{\rho \cdot V^2}{4} \cdot (x_j - x_i)^2 \cdot dz \quad (3)$$

Zakładając, że grubość belki jest stała  $h = \text{const}$ , zmianę kształtu jej krawędzi opisuje funkcja (4),

$$z = f(x), \quad (4)$$

a wartość naprężeń w dowolnym przekroju ( $x_i$ ) przedstawia wzór (5)

$$\sigma(x_i) = \frac{M(x_i)}{W(x_i)} = \frac{3 \cdot \rho \cdot V^2}{h^2 \cdot f(x_i)} \cdot \int_0^{z_i} [f(z) - x_i]^2 dz = \sigma_0 (V = V_0) = \text{const} \quad (5)$$

gdzie:

- $M(x_i)$  - moment gnący dla przekroju  $x_i$ ,
- $W(x_i)$  - wskaźnik wytrzymałości na zginanie sprężyste dla przekroju  $x_i$ ,
- $L$  - długość belki.

Wielkością poszukiwaną w tym równaniu jest funkcja  $f(x_i)$ , która opisuje kształt krawędzi belki. Rozwiązanie tego równania całkowego dla stałych naprężeń wzdłuż belki jest skomplikowane. Z dużym przybliżeniem kształt belki można opisać wzorem (6),

$$z = f(x) = \frac{3 \cdot \rho \cdot V_0^2}{2 \cdot h^2 \cdot \sigma_0} (L - x)^2 = k \cdot (L - x)^2 \quad (6)$$

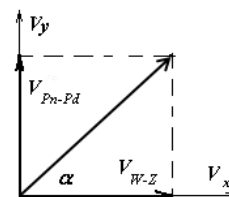
w którym  $k$  jest stałym współczynnikiem zmierzonym w procesie wzorcowania.

Równanie (5) służące do obliczenia współczynnika naprężeń w belce, zostało wyprowadzone dla przepływu laminarnego.

W warunkach rzeczywistych wynikających z wpływu otoczenia oraz samej konstrukcji przetwornika przepływ ten nie jest laminarny i przeprowadzone obliczenia są rozwiązaniem przybliżonym.

#### 4. Pomiar wartości prędkości i kierunku wiatru

Na rys. 3 przedstawiono wektor prędkości wiatru  $V$  na płaszczyźnie, którą definiują współrzędne  $V_x$  i  $V_y$ .



Rys. 3. Wektory prędkości wiatru  $V$ ,  $V_{pn-Pd}$  i  $V_{w-Z}$   
Fig. 3. Vectors of wind speed  $V$ ,  $V_{pn-Pd}$  and  $V_{w-Z}$

Składowe wektora  $V_{pn-Pd}$  i  $V_{w-Z}$ , związane z wektorem  $V$  wzorami (7), uginają jedną z belek przetwornika z tensometrami  $R_1, R_2$  lub  $R_3, R_4$  rys. 1.

$$\begin{aligned} V_{w-Z} &= V \cdot \cos \alpha \\ V_{pn-Pd} &= V \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (7)$$

Zmiany rezystancji tensometrów  $\varepsilon_{R1}, \varepsilon_{R2}$  (8) i  $\varepsilon_{R3}, \varepsilon_{R4}$  (9) [3] o współczynniku przetwarzania  $k$  [7], zostały spowodowane ugięciem tych belek

$$\varepsilon_{R3} = -\varepsilon_{R4} = \frac{k \cdot \sigma_3}{E} = \frac{k \cdot \sigma_0}{V_0^2 \cdot E} \cdot V_{w-Z}^2 = k_R \cdot V^2 \cdot \cos^2 \alpha, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{R1} = -\varepsilon_{R2} = \frac{k \cdot \sigma_1}{E} = \frac{k \cdot \sigma_0}{V_0^2 \cdot E} \cdot V_{pn-Pd}^2 = k_X \cdot V^2 \cdot \sin^2 \alpha, \quad (9)$$

gdzie:

- $k_R, k_X$  - czułość przetwarzania danej belki poddanej działaniu odpowiedniej składowej wektora prędkości  $V_{pn-Pd}$  i  $V_{w-Z}$

Wartości tych wektorów można obliczyć na podstawie pomiaru składowej biernej  $U_X$  (10) i czynnej  $U_R$  (11) napięcia nierównowagi mostka spowodowanego zmianą rezystancji tensometrów zamocowanych na belkach

$$\begin{aligned} U_x &\approx -U_z \cdot \frac{\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{\varepsilon_{R1} - \varepsilon_{R2}}{1 + 0,25 \cdot \varepsilon_{R1} \cdot (1 + 0,25 \cdot \varepsilon_{R1})} \\ U_x &\approx -U_z \cdot \frac{\sqrt{3}}{16} \cdot (\varepsilon_{R1} - \varepsilon_{R2}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} U_R &\approx U_z \cdot \frac{4 \cdot (2 \cdot \varepsilon_{R3} - 2 \cdot \varepsilon_{R4} - \varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2}) + \varepsilon_{R1} \cdot (\varepsilon_{R3} - 2 \cdot \varepsilon_{R1})}{[(2 + \varepsilon_{R1})^2 + 12] \cdot (4 + \varepsilon_{R3})} \approx \\ U_R &\approx U_z \cdot \frac{1}{8} \cdot (2 \cdot \varepsilon_{R3} - 2 \cdot \varepsilon_{R4} - \varepsilon_{R1} + \varepsilon_{R2}) \end{aligned} \quad (11)$$

Przekształcając powyższe wzory można obliczyć wartość prędkości wiatru (12), a kąt wektora prędkości  $\alpha$  względem kierunku wschód-zachód wzorem (13).

$$V = \sqrt{\frac{U_R}{k_R} - U_X \cdot \left( \frac{1}{k_X} + \frac{1}{\sqrt{3} \cdot k_R} \right)}, \quad (12)$$

$$\alpha = \arctg \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot k_R \cdot U_X}{k_X \cdot (\sqrt{3} \cdot U_R - U_X)}} \quad (13)$$

## 5. Wnioski

1. Zaprojektowano belkę z tensometrami, których zmiana rezystancji zależy liniowo od prędkości wiatru oraz nie zależy (w pewnych granicach) od miejsca mocowania tensometru na danej powierzchni belki.
2. Zastosowanie układu z modulacją kwadraturową pozwala na przesłanie w jednym sygnale dwóch informacji określających położenie wektora prędkości wiatru (wartość modułu i kąta nachylenia) w wybranej płaszczyźnie.
3. Zastosowany układ jest niewrażliwy na zmiany temperatury i wilgotności miejsca jego pracy. Ważną cechą przetwornika jest brak elementów ruchomych, co zmniejsza jego wrażliwość na uszkodzenia.

## 6. Literatura

- [1] VIGO system s.a.: [http://www.vigo.com.pl/index.php/pl/menu/produkty/aparatura\\_pomiarowa/wiatromierze\\_i\\_stacje\\_pogodowe](http://www.vigo.com.pl/index.php/pl/menu/produkty/aparatura_pomiarowa/wiatromierze_i_stacje_pogodowe).
- [2] VAISALA: Vaisala WINDCAP Ultrasonic Wind Sensor WMT50. Helsinki 2006 r.
- [3] A. Ryłski: Kompensacja wpływu zmian temperatury na pracę sensorów w mostkowym modulatorze kwadraturowym. *Pomiary Automatyka Kontrola* nr12, grudzień Warszawa 2006 r.
- [4] Z. L. Warsza: Immitancyjne układy czterobiegowe w pomiarach wieloparametrowych. PIAiP, Warszawa 2004 r.
- [5] A. Jakubowicz, Z. Orłó: Wytrzymałość materiałów. WNT, Warszawa 1972 r.
- [6] K. Trębacki: Podstawy wytrzymałości materiałów. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2000 r.
- [7] Maciej Kopkowicz: Metody doświadczalne badań konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003 r.

*Artykuł recenzowany*

## INFORMACJE

### WYDAWNICTWO

# Pomiary Automatyka Kontrola



specjalizuje się w wydawaniu czasopisma i książek popularno-naukowych w dziedzinie automatyki i pomiarów

Osoby i firmy przemysłowe zainteresowane współpracą z Wydawnictwem proszone są o kontakt bezpośredni dla uściślenia szczegółów współpracy

Wydawnictwo PAK  
00-050 Warszawa  
ul. Świętokrzyska 14A  
tel./fax 022 827 25 40

Redakcja PAK  
44-100 Gliwice  
ul. Akademicka 10, p. 30b  
tel./fax 032 237 19 45  
e-mail: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl)

[www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl)