

Zbigniew **RACZYŃSKI**  
Jacek **SPAŁEK**

## WYKORZYSTANIE AKCELEROMETRU PRZYSPIESZEŃ BEZWZGLĘDNYCH DO POMIARU PRZEMIESZCZEŃ KĄTOWYCH

**Streszczenie:** W opracowaniu scharakteryzowano półprzewodnikowe czujniki przyspieszeń bezwzględnych (akcelerometry). Przedstawiono rozwiązanie przetwornika do pomiaru małych kątów, przeznaczonego do pojazdów kołowych, wymagających poziomowania na podporach bocznych. Opiszano sposób kompensacji temperaturowej, umożliwiającej poprawną pracę przetwornika kąta w zakresie zmian temperatur występujących podczas eksploatacji pojazdów specjalnych.

### 1. WSTĘP

Obecnie w świecie wiele firm oferuje gotowe przetworniki do pomiaru przemieszczeń kątowych [1], [2], z wyjściem analogowym bądź cyfrowym. Jednak ich wspólną cechą jest z reguły wysoka cena oraz ograniczony zakres temperatury pracy. Ponadto rodzaj otrzymywanego sygnału wyjściowego (jako funkcja kąta), nie zawsze pozwala na bezpośrednie wykorzystanie tych przetworników do celów sterowniczych. Dlatego dla wielu zastosowań celowym jest opracowanie przetwornika kąta, spełniającego specyficzne wymagania pomiarowe.

W opracowaniu przedstawiono możliwości zastosowania specjalizowanego układu scalonego ADXL105 [3], który w istocie jest akcelerometrem (czujnikiem) przyspieszeń bezwzględnych. Układ ten został zaprojektowany z przeznaczeniem dla motoryzacji (poduszki powietrzne). Okazuje się jednak, że może on znaleźć zastosowanie również w innych dziedzinach współczesnej techniki pomiarowej. Z jego właściwości wynika, że można go użyć do budowy przetwornika kąta, wykorzystując możliwość pomiaru zmiany składowej siły grawitacji, będącej funkcją położenia kątowego.

### 2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA CZUJNIKÓW PRZYSPIESZENIA TYPU ADXL

Istnieje kilka typów czujników przyspieszeń, produkowanych przez amerykańską firmę Analog Devices [4]. W zależności od typu, czujniki te pozwalają na pomiar przyspieszeń w zakresie  $\pm(20 \div 1000)\text{m/s}^2$  (Tablica 1), oraz mogą posiadać wyjście analogowe bądź cyfrowe (modulacja szerokości impulsu).

#### 2.1. Zasada działania czujnika ADXL [5]

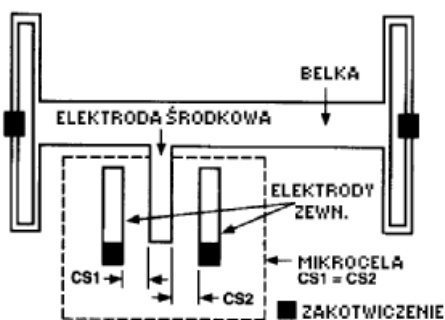
Zasada działania czujnika przyspieszenia zostanie omówiona na przykładzie układu ADXL105 (inne czujniki serii ADXL działają podobnie).

W strukturze wewnętrznej czujnika (w podłożu), występują mikrocele (Rys. 1), zawierające kondensator różnicowy CS1 i CS2. Środkowa elektroda kondensatora połączona jest mechanicznie z belką pełniącą funkcję tzw. masy sejsmicznej, mocowaną obustronnie do podłoża poprzez element sprężysty.

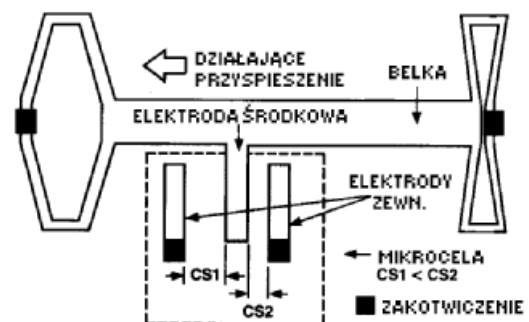
Tablica 1. Zestawienie scalonych czujników przyspieszeń firmy Analog Devices

Lp	Typ czujnika	Zakres pomiarowy	Czułość [mV/g]	Rodzaj wyjścia	Uwagi
1	ADXL 105	±5g	250	analogowe	cz. jednokierunkowy
2	ADXL 150	±50g	40	analogowe	cz. jednokierunkowy
3	ADXL 190	±100g	18	analogowe	cz. jednokierunkowy
4	ADXL 202	±2g	–	cyfrowe	cz. dwukierunkowy
5	ADXL 210	±10g	–	cyfrowe	cz. dwukierunkowy
6	ADXL 250	±50g	40	analogowe	cz. dwukierunkowy

gdzie:  $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .



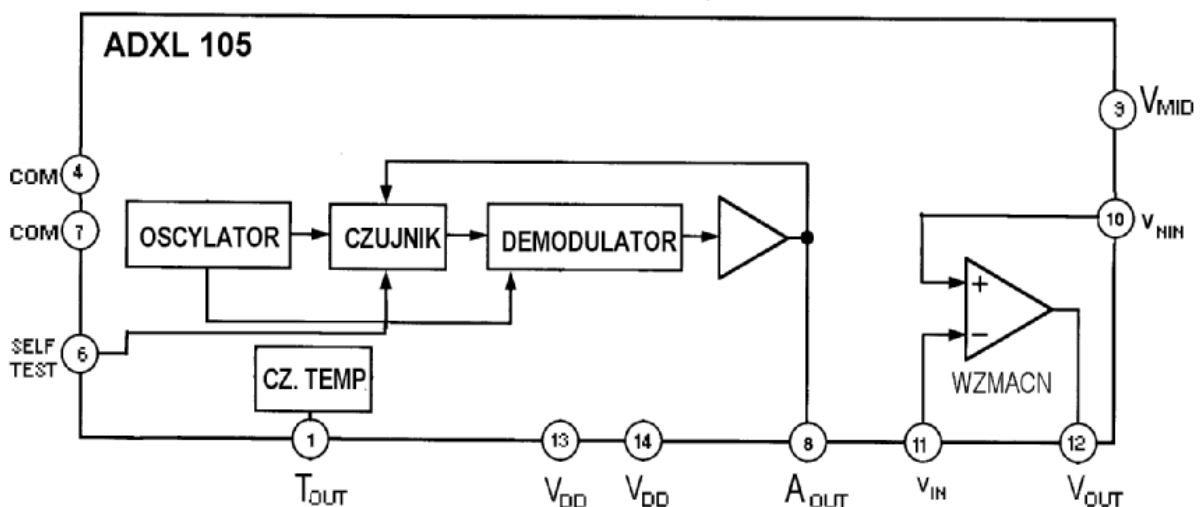
Rys. 1. Uproszczony schemat mikroceli w spoczynku.



Rys. 2. Środkowa elektroda mikroceli poddana działaniu przyspieszenia.

Pod wpływem siły wywołanej drganiami (lub siły ciężenia ziemskiego), środkowa elektroda przesuwają się (Rys. 2), w wyniku, czego zmieniają się pojemności CS1 i CS2 kondensatora różnicowego.

Na rys 3 przedstawiono schemat blokowy czujnika ADXL105 wraz z oznaczonymi wprowadzeniami nóżek.



Rys. 3. Schemat blokowy czujnika ADXL105.

Wewnętrzny generator (oscylator), zasila układ mostka pomiarowego (sensor) zawierającego kondensatory różnicowe mikrocel. Zmiany pojemności mikrocel na odpowiedni sygnał elektryczny uzyskuje się za pomocą układu elektronicznego z demodulatorem.

Równoległe podłączenie kilkudziesięciu mikrocel w strukturze układu scalonego, zapewnia dużą czułość przetwarzania czujnika.

Układ ten posiada również niezależny wzmacniacz, pozwalający wzmocnić wstępnie sygnał wyjściowy z czujnika. Wzmacniacz ten może być zastosowany również do innych celów.

Układ scalony ADXL105 oferowany jest w 14-końcówkowej obudowie do montażu powierzchniowego i reaguje na przyspieszenie o kierunku równoległym do osi wyprowadzeń nóżek.

## 2.2. Możliwości kompensacji niezerównoważenia temperaturowego czujnika ADXL105

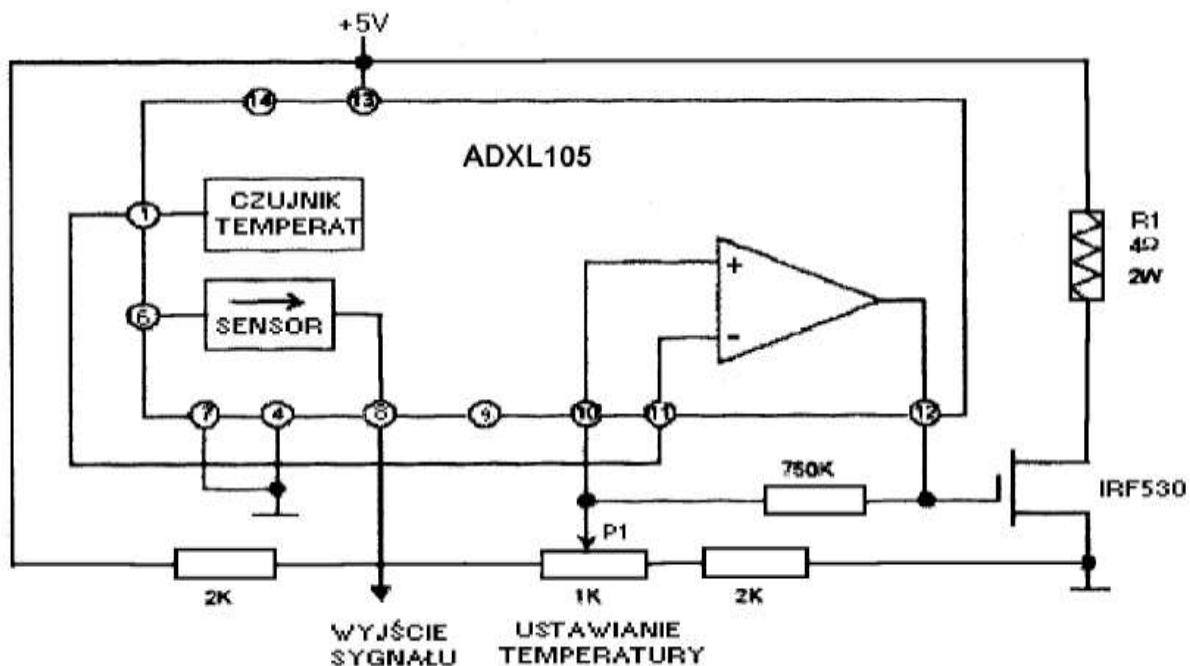
Ze zmianą temperatury otoczenia, parametry elektryczne czujnika ulegają niewielkim wahaniom, co prowadzi do powstania dodatkowych błędów przetwarzania.

Np. dla czujnika ADXL105 producent podaje następujące dane [3]:

- temperaturowy współczynnik niezerównoważenia zera (zero g offset):  $\pm 1\text{mV/deg}$ ,
- temperaturowy współczynnik czułości:  $\pm 0,03\%/deg$ .

Przy pomiarach dynamicznych przyspieszenia, zmiana tzw. offsetu na wyjściu czujnika w czasie nie ma znaczenia, ponieważ za pomocą kondensatora można oddzielić zmieniającą się składową stałą. Jednak, gdy chcemy wykorzystać czujnik do pomiaru kąta pochylenia, zmiana składowej stałej napięcia wyjściowego będzie miała decydujący wpływ na dokładność przetwarzania czujnika.

Z dostępnych czujników firmy Analog Devices (Tablica 1), jedynie dla typu ADXL105 producent przewidział wewnętrzny czujnik temperatury, którego wykorzystanie umożliwi kompensację temperaturowego niezerównoważenia zera napięcia wyjściowego czujnika.



Rys. 4. Układ czujnika ADXL105 podgrzewanego opornikiem.

Do budowy układu kompensacji można wykorzystać wewnętrzny wzmacniacz [6] (Rys. 4). W układzie tym, opornik R1 ( $4\Omega$ ) jest umieszczony nad czujnikiem. Pełni on funkcję elementu, podgrzewającego czujnik do określonej temperatury. Współpraca wewnętrznego czujnika temperatury z układem elektronicznym, umożliwia utrzymanie prawie stałej temperatury wewnątrz struktury scalonej czujnika ADXL. Potencjometrem P1 można zadawać temperaturę powstałego termostatu nieco wyższą od przewidywanej maksymalnej temperatury otoczenia.

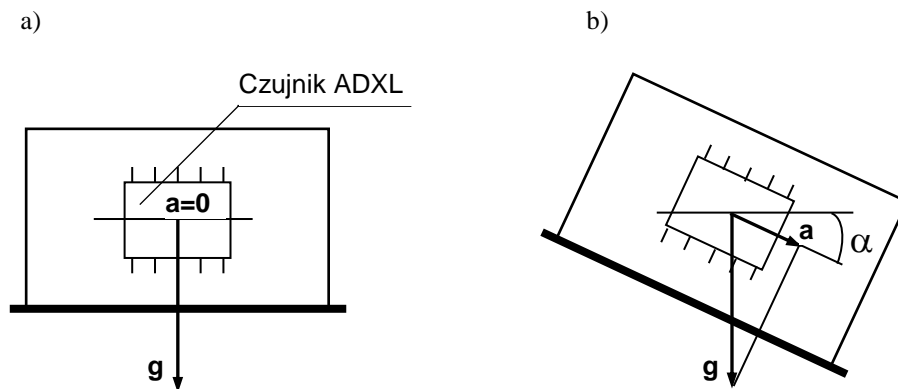
Według literatury [6], zastosowanie układu termostatu jak na Rys. 4, w zakresie zmian temperatury otoczenia ( $0 \div 70$ )°C zmniejsza niezrównoważenie zera czujnika z  $\pm 3,1 \cdot 10^{-3}$  g/deg (bez termostatu) do  $\pm 0,44 \cdot 10^{-3}$  g/deg (gdzie: g – przyspieszenie ziemskie).

### 3. KONSTRUKCJA PRZETWORNIKA KĄTA

#### 3.1. Zasada pomiaru kąta pochylenia

Właściwość pomiaru przyspieszeń bezwzględnych czujnikiem ADXL105, można wykorzystać do budowy przetwornika do pomiaru małych przemieszczeń kątowych.

Czujnik ADXL należy umieścić w obudowie w taki sposób, aby w położeniu poziomym przetwornika ( $\alpha = 0^\circ$ ), czujnik nie reagował na przyspieszenie ziemskie (Rys. 5a).



**Rys. 5. Zasada działania grawitacyjnego przetwornika kąta:**

- a) – położenie przetwornika poziome ( $\alpha = 0$ ),  
 b) – wychylenie przetwornika z poziomu ( $\alpha \neq 0$ ).

Z zasady pomiaru wynika, że jeżeli wyzerowany przetwornik kąta odchylimy od poziomu o kąt  $\alpha$  (Rys. 5), to zmierzona wartość składowej przyspieszenia ziemskiego wynosi:

$$a = g \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

gdzie:

- g - przyspieszenie ziemskie,  
 $\alpha$  - kąt odchylenia przetwornika od poziomu.

Na wyjściu przetwornika pojawi się więc napięcie o wartości:

$$U_m = U_{cz} \cdot \sin \alpha = S_{cz} \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

gdzie:

$S_{cz}$  - czułość czujnika przyspieszenia [mV/g],

$U_{cz}$  - napięcie wyjściowe przetwornika, odpowiadające mierzonemu przyspieszeniu o wartości 1g.

Ponieważ typowa wartość czułości czujnika ADXL105 wynosi 250mV/g, to przy pomiarze np. kąta  $\pm 5^\circ$ , napięcie na wyjściu przetwornika ze wzoru (2) wyniesie:  $U_m \approx \pm 22\text{mV}$ . Przy tak małej wartości otrzymywanych napięć, koniecznym staje się ograniczenie wpływu temperatury na niezrównoważenie zera napięcia wyjściowego, (dla czujnika ADXL105 przyjmuje wartość ok.  $\pm 1\text{mV/deg}$ ).

### 3.2. Sposób ograniczenia wpływu temperatury otoczenia

W rozwiązaniu układu pomiarowego jak na Rys. 4, polegającym na ogrzewaniu czujnika kąta ADXL105 opornikiem do stałej temperatury, wyższej od przewidywanej temperatury otoczenia, autor osiągnął ograniczenie temperaturowego niezrównoważenia zera do wartości ok.  $\pm 0,1\text{mV/deg}$ , co odpowiada wartości błędu kątowego ok.  $\pm 0,3'/\text{deg}$ .

W Zakładzie Badań OBRUM podjęto się opracowania przetwornika małych kątów opartego na bazie czujnika ADXL105, którego niezrównoważenie zera w zakresie zmian temperatury otoczenia od  $-40^\circ\text{C}$  do  $+50^\circ\text{C}$  nie powinien przekroczyć  $\pm 0,5^\circ$ .

Do eliminacji wpływu temperatury otoczenia na niezrównoważenie zera, również została wykorzystana metoda podgrzewania czujnika do stałej określonej temperatury.

Aby zapewnić dobrą stałość temperatury struktury półprzewodnikowej czujnika, jako element grzejny zastosowano tranzystor polowy w obudowie TO-220, którego ścisłe przyleganie do obudowy podgrzewanego czujnika pozwala na szybszą wymianę ciepła otrzymanego termostatu.

Wstępne badania kilku egzemplarzy czujników wykazały, że w zakresie bardzo niskich temperatur otoczenia ( $-40 \div -20$ ) $^\circ\text{C}$ , pomimo podgrzewania układu scalonego do określonej (stałej) temperatury dodatniej, pojawia się dodatkowe niezrównoważenie zera napięcia wyjściowego czujnika. Powoduje to konieczność dalszej rozbudowy układu kompensacji niezrównoważenia zera.

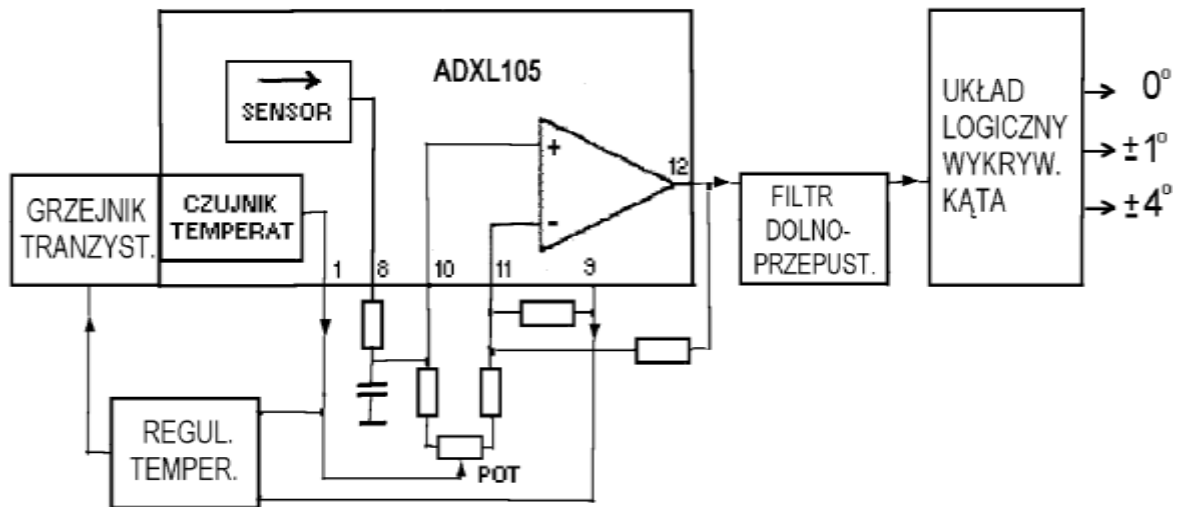
Uproszczony schemat blokowy opracowanego przetwornika kąta przedstawiono na Rys. 6.

W przedstawionym układzie, regulator temperatury został zbudowany w oparciu o scalony komparator analogowy. Temperatura, do której grzejnik (tranzystor) nagrzewa strukturę układu scalonego została dobrana na ok.  $+75^\circ\text{C}$ .

Potencjometrem „POT” ustawia się czułość kompensacji niezrównoważenia zera czujnika w stanie cieplnie nieustalonym, po włączeniu zasilania przetwornika. Do jego regulacji należy użyć oscyloskopu, kontrolując przebieg stanu nieustalonego napięcia wyjściowego czujnika.

Ponieważ zastosowany w przetworniku czujnik reaguje także na składowe zmienne przyspieszenia, zastosowany filtr dolnoprzepustowy o paśmie ok. 5Hz tłumi wszelkie zakłócenia, spowodowane drganiami przetwornika w pojeździe.

Układ logiczny wykrywania kąta został zastosowany w sterowniku wysuwu podpór pojazdu specjalnego. Sygnalizuje on przekroczenie mierzonego kąta na poziomach:  $0^\circ$ ,  $\pm 1^\circ$  i  $\pm 4^\circ$ .



Rys. 6. Uproszczony schemat blokowy opracowanego przetwornika kąta.

#### 4. PODSUMOWANIE

Opracowany nowy układ pomiaru przemieszczeń kątowych wykazuje możliwość jego zastosowania w pojazdach specjalnych.

Przeprowadzone badania prototypu przetwornika w warunkach narażeń temperaturowych wykazały spełnienie założonych wymagań [7]. W temperaturze otoczenia  $-40^\circ\text{C}$ , błąd zera badanego przetwornika nie przekroczył  $+25'$ , a w temperaturze  $+50^\circ\text{C}$ , odpowiednio  $-20'$ .

W zakresie pomiarowym przetwornika ( $0 \div \pm 4^\circ$ ), błąd przetwarzania spowodowany wpływem temperatury ( $-40^\circ\text{C}$  i  $+50^\circ\text{C}$ ) nie przekraczał  $\pm 10'$ .

Działanie innych narażeń środowiskowych (wilgotność itp.) praktycznie nie miało wpływu na błędy przetwarzania badanego przetwornika.

Aby zweryfikować otrzymane dotychczasowe wyniki, należy przeprowadzić dalsze badania losowo wybranych wyprodukowanych przetworników kąta.

#### 5. LITERATURA

- [1] Czujniki firmy Zerotronic, Szwajcaria, [http://www.wylerag.com/frames\\_e/fre\\_421.htm](http://www.wylerag.com/frames_e/fre_421.htm), August 08, 2001.
- [2] Katalog firmy IFM Electronic gmbh, 0-45127 Essen, Niemcy.
- [3] High Accuracy  $\pm 1g$  to  $\pm 5g$  Single Axis Accelerometer with Analog Input. Application Note. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood. MA 02062-9106, USA.
- [4] "ADXL105/150/190/EM", August 03, 2001, [http://www.analog.com/techsupt/eb/ADXL105\\_190EM\\_c.pdf](http://www.analog.com/techsupt/eb/ADXL105_190EM_c.pdf).
- [5] JORGE J.: Geriatric fall hip injury prevention device, Xiomara Feliciano-Diaz (Mechanical Engineering) – Turabo University, August 03, 2001, <http://www.ee.upenn.edu/~sunfest/pastProjects/Papers00/DiazXiomara.pdf>.

- [6] WEINBERG H.: Temperature Compensation Techniques for low g iMEMS Accelerometers, August 07, 2001,  
[http://www.analog.com/industry/iMEMS/markets/industrial/temp\\_compensation.html](http://www.analog.com/industry/iMEMS/markets/industrial/temp_compensation.html).
- [7] Sprawozdanie z badań nr 6/2000: Przetwornik kąta do układu poziomowania UAP.202-1. OBRUM-Gliwice, październik 2000 (praca niepublikowana).

## UTILIZATION OF THE ACCELEROMETER OF ABSOLUTE ACCELERATION TO MEASURE SMALL ANGLES

**Abstract:** The paper characterizes semiconductor sensors of absolute accelerations. A transducer design to measure small angles, intended for wheeled vehicles, requiring levelling on side-supports is presented. A method of temperature compensation enabling proper functioning of the angle transducer within the range of temperature changes occurring during exploitation of special vehicles is described.

Recenzent: dr inż. Stanisław FOBER