

Aleksander SAWICKI*

KOMPENSACJA TEMPERATUROWA WYBRANYCH AKCELEROMETRÓW ANALOGOWYCH MEMS

Wpływ temperatury na pomiary akcelerometrów analogowych opisywany jest poprzez współczynniki takie jak V_{offset} due to temperature czy *Sensitivity due to temperature*. Producenci układów scalonych podają jednak jedynie typowe wartości tych parametrów, wraz z możliwymi maksymalnymi odchyleniami. Wartości współczynników różnią się między poszczególnymi egzemplarzami elementów i powinny być wyznaczone eksperymentalnie. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu temperatury na wskazania czterech wybranych akcelerometrów. Badania przeprowadzone zostały w komorze klimatycznej dla temperatur w zakresie $0\text{ }^{\circ}\text{C} \div 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. W pracy zaprezentowano sposób wyznaczania podstawowych parametrów *Sensitivity* oraz V_{offset} jako współczynników temperaturowych.

SŁOWA KLUCZOWE: akcelerometr, MEMS, kompensacja temperaturowa

1. WSTĘP TEORETYCZNY

1.1. Pomiar przyśpieszenia

Sygnal pomiarowy akcelerometru definiowany jest jako suma rzeczywistych przyśpieszeń działających na sensor (\tilde{a}), składowej wektora grawitacji g oraz elementu w_a reprezentującego szum biały [1] (1).

$$a = \tilde{a} + g + w_a \quad (1)$$

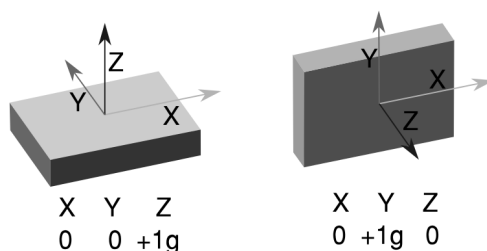
Równanie to może ulec uproszczeniu przy założeniu, iż na obiekt nie działają siły powodujące przyśpieszenie \tilde{a} oraz pomijając szum biały w_a . Wzór (1) może więc zostać zapisany w postaci (2). Przy tak dobranych założeniach wskazania sensora MEMS reprezentują siłę grawitacji:

$$a = \begin{cases} a_x = g_x \\ a_y = g_y \\ a_z = g_z \end{cases} \quad (2)$$

gdzie: a_x – odczyt osi x akcelerometru, g_x – składowa x wektora grawitacji, a_y – odczyt osi y akcelerometru, g_y – składowa y wektora grawitacji, a_z – odczyt osi z akcelerometru, g_z – składowa z wektora grawitacji.

* Politechnika Białostocka.

Należy równocześnie podkreślić, iż akcelerometr jest sensorem mierzącym nie samo przyśpieszenie lecz także siłę reakcji podłoża. W przypadku spadku swobodnego, wskazania akcelerometru są bliskie zeru [2], pomimo wciąż działającego przyśpieszenia grawitacyjnego. Rysunek 1 przedstawia przykładowe wskazania akcelerometru, przy różnych orientacjach sensora.



Rys. 1. Wskazania akcelerometru przy różnych orientacjach sensora

1.2. Charakterystyka przetwarzania akcelerometru

Akcelerometry analogowe zasilane są źródłami napięcia stałego V_{dd} najczęściej w zakresie od 2.8 V ÷ 5.0 V [8–11]. W idealnym przypadku, gdy na obiekt nie działają żadne siły wskazania akcelerometru powinny wynosić $V_{dd}/2$. W rzeczywistych warunkach jednak wartość ta nigdy nie jest stała, a co więcej może przyjmować indywidualne wartości dla poszczególnych osi akcelerometru. Napięcie to nazywane jest napięciem *Zero-g* [3] i oznaczane jest jako V_{offset} . Kolejnym parametrem charakteryzującym akcelerometr jest współczynnik czułości *Sensitivity*. Parametr ten opisuje szybkość zmiany napięcia w zależności od zmiany przyśpieszenia [3, 4–5]:

$$S = \frac{(V_2 - V_1)}{(g_2 - g_1)} \quad (3)$$

gdzie: V_1 – napięcie zarejestrowane przy przyśpieszeniu g_1 , V_2 – napięcie zarejestrowane przy przyśpieszeniu g_2 , S – parametr *Sensitivity*.

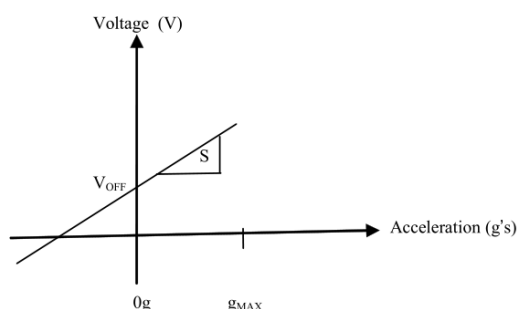
Równanie przetwarzania akcelerometru (rys. 2) jest opisywane funkcją liniową [5]:

$$V_{out} = S \cdot g + V_{offset} \quad (4)$$

gdzie: V_{out} – napięcie zarejestrowane przy działaniu przyśpieszenia g , g – wartość przyśpieszenia podczas którego rejestrowane są dane.

Podkreślić należy również, iż w większości przypadków równanie (4), przekształcane jest do postaci (5). Wzór ten umożliwia wyznaczenie aktualnie panującego przyśpieszenia na podstawie zmierzonego napięcia.

$$g = \frac{(V_{out} - V_{offset})}{S}. \quad (5)$$



Rys. 2. Charakterystyka przetwarzania akcelerometru

1.3. Wyznaczenie parametru *Sensitivity* oraz V_{offset}

Wyznaczenie podstawowych parametrów opisujących właściwości akcelerometrów analogowych wymaga dokonania sześciu pomiarów [4, 5]. Podczas każdego z nich na poszczególną oś akcelerometru działa przyspieszenie o wartości $+1\text{ g}$ oraz -1 g . Warto także nadmienić, że umiejscowienie sensora podczas badań na płaskiej powierzchni np. blacie biurka nie jest jednoznaczne z nadaniem poprawnej orientacji czujnikowi. Normalna płaszczyzna biurka może nie być skierowana zgodnie z wektorem grawitacji, co wynikać może z samej budowy mebla jak i nierówności podłoża. W związku z tym nadanie poprawnej orientacji odbywa się poprzez wykorzystanie aktualnych wskazań akcelerometru. Dane pomiarowe każdej z osi x , y oraz z zależą bezpośrednio od wartości kątów *Roll* ϕ oraz *Pitch* θ [1] (6). W przypadku braku przechyleń ($\phi = 0$ oraz $\theta = 0$) oś z akcelerometru powinna wskazywać wartość maksymalną:

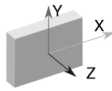

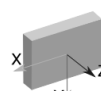

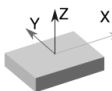
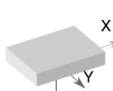
$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie: ϕ – wartość kąta obrotu wokół osi x , *Roll*, θ – wartość kąta obrotu wokół osi y , *Pitch*.

Nadawanie akcelerometrowi każdej z sześciu orientacji powinno odbywać się z jednoczesnym monitorowaniem jego wskazań. Zarejestrowanie wartości minimalnej i maksymalnej na wybranej osi może być wtedy uznane jako równoznaczne z nadaniem oczekiwanej orientacji.

W tabeli 1.1 przedstawiono zestawienie napięć zarejestrowanych dla akcelerometru ADXL327 w temperaturze $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 1.1. Wskazania akcelerometru ADXL335 przy różnych orientacjach sensora

Pozycja	1	2	3	4	5	6
Schemat						
V_x [V]	1,509	1,789	1,485	1,210	1,481	1,482
V_y [V]	1,779	1,482	1,191	1,490	1,480	1,482
V_z [V]	1,515	1,489	1,493	1,507	1,847	1,235
a_x	0	+1 g	0	-1 g	0	0
a_y	+1 g	0	-1 g	0	0	0
a_z	0	0	0	0	+1 g	-1 g

Parametry *Sensitivity* wyznaczone są niezależnie dla każdej osi akcelerometru zgodnie ze równaniami (7) [4, 5]

$$S_x = \frac{V_{x2} - V_{x4}}{2g} \quad S_y = \frac{V_{y1} - V_{y3}}{2g} \quad S_z = \frac{V_{z5} - V_{z6}}{2g} \quad (7)$$

gdzie: S_x , S_y , S_z – czułości poszczególnych osi akcelerometru, V_{x2} – pomiar napięcia na osi x akcelerometru w pozycji 2, V_{x4} – pomiar napięcia na osi x akcelerometru w pozycji 4, V_{y1} – pomiar napięcia na osi y akcelerometru w pozycji 1, V_{y3} – pomiar napięcia na osi y akcelerometru w pozycji 3.

Proces wyznaczania parametru V_{offset} może przebiegać na co najmniej jedną z dwóch metod. Pierwszy z algorytmów bazuje na charakterystyce akcelerometru (rys. 1). Wartość parametru V_{offset} jest wówczas średnią arytmetyczną wskazań akcelerometru przy działaniu siły +1 g oraz -1 g (8) [4, 5].

$$V_{offsetx} = \frac{V_{x2} + V_{x4}}{2} \quad V_{offsety} = \frac{V_{y1} + V_{y3}}{2} \quad V_{offsetz} = \frac{V_{z5} + V_{z6}}{2} \quad (8)$$

Drugi z algorytmów wykorzystuje większą liczbę pomiarów. W przypadku osi x , pomiary 1, 3, 5 oraz 6 reprezentują zerowe przyspieszenie (tabela 1). Wartość V_{offset} dla tej osi jest więc średnią arytmetyczną wspomnianych pomiarów [4, 5], kolejne parametry dla dwóch pozostałych osi wyznaczone są w sposób analogiczny:

$$\begin{aligned} V_{offset_x} &= \frac{V_{x1} + V_{x3} + V_{x5} + V_{x6}}{4} \\ V_{offset_y} &= \frac{V_{y2} + V_{y4} + V_{y5} + V_{y6}}{4} \\ V_{offset_z} &= \frac{V_{z1} + V_{z2} + V_{z3} + V_{z4}}{4} \end{aligned} \quad (9)$$

W tabeli 1.2 przedstawiono przykładowe wartości parametrów *Sensitivity* oraz V_{offset} dla dwóch wspomnianych algorytmów;

Tabela 1.2. Przykład wyznaczonych parametrów dla akcelerometru ADXL335

		oś x	oś y	oś z
<i>Sensitivity</i> [V/g]		0,290	0,294	0,306
Metoda I	V_{offset} [V]	1,499	1,485	1,541
Metoda II	V_{offset} [V]	1,489	1,483	1,501

Algorytm II wykorzystuje większą liczbę danych pomiarowych (9) niż algorytm I (8). Jeżeli jedna z orientacji, ustawiona byłaby niedokładnie, zastosowanie metody II zapewni lepsze rezultaty niż metody I. W dalszej części pracy do wyznaczania parametru V_{offset} wykorzystano, więc drugą z opisywanych metod.

Proces kalibracyjny opisywany jest dla wyżej wymienionych wartości przyspieszenia, ponieważ są one możliwe do uzyskania w przystępny sposób. Na dowolny obiekt przebywający na planecie działa przyspieszenie grawitacyjne o stałej w przybliżeniu wartości $+1g$. Nie istnieją jednak przeciwwskazania zabraniające wykorzystania pomiarów zarejestrowanych przy innej wartości przyspieszenia.

2. WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKÓW TEMPERATUROWYCH

2.1. Zmiana napięcia V_{offset} w funkcji temperatury

Wartość napięcia V_{offset} zmienia się w funkcji temperatury sensora przyspieszenia. Zależność ta przez różnych producentów nazywa jest m.in. jako „0 g Offset vs. Temperature”, „Temperature Coefficient of Offset” czy też „Zero-g level change vs. Temperature”. Najczęściej wartość ta wyrażona jest w [mg/°C].

W przypadku akcelerometru ADXL335 typowa wartość deklarowana przez producenta [8], niezależnie od osi wynosi ± 1 [mg/°C]. W związku z powyższym zmiana temperatury czujnika w zakresie od 0 °C do 40 °C spowodować powinna zmianę parametru 0 g offset o wartość 40 mg [6].

$$\begin{aligned} \Delta g_{offset} &= TCO \cdot \Delta T \\ \Delta g_{offset} &= \pm 1 \text{ mg/}^\circ\text{C} \cdot (40^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = \pm 40 \text{ mg.} \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie: TCO – współczynnik temperaturowy (ang. *Temperature coefficient of offset*) [mg/°C], ΔT – różnica temperatury [°C], Δg_{offset} – całkowita zamiana wartości stałej *Offset* [g].

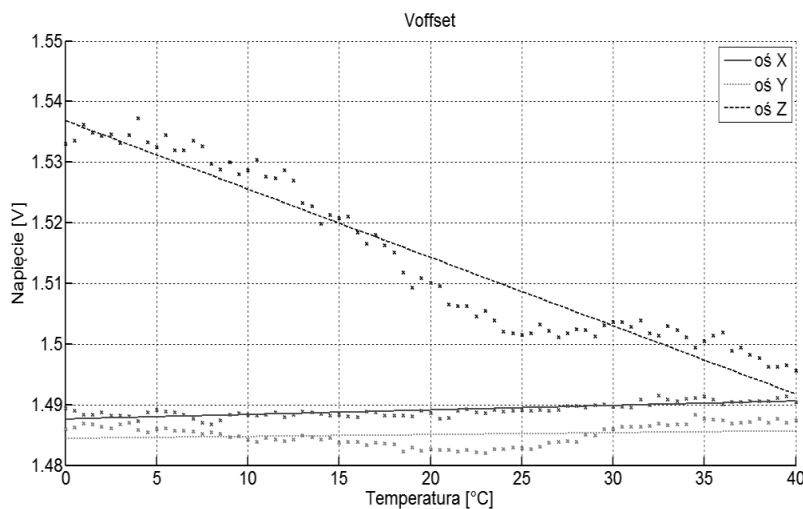
Typowa czułość tego akcelerometru wynosi około 0,3 [V/g], różnica napięć dla wskazanego zakresu temperatur zaś około 0,012 V:

$$\begin{aligned}\Delta V_{ofsset} &= \Delta g_{ofsset} \cdot S \\ \Delta V_{ofsset} &= \pm 0,040 \text{ g} \cdot 0,3 \text{ V/g} = \pm 0,012 \text{ V}\end{aligned}\quad (11)$$

gdzie: S – czułość akcelerometru [V/g], ΔV_{ofsset} – całkowita zamiana napięcia V_{ofsset} [V].

Wyznaczenie współczynnika temperaturowego odbywa się niejako w sposób odwrotny. Na podstawie zmierzonego napięcia ΔV_{ofsset} oraz wyznaczonej czułości S akcelerometru, wyznaczona jest zmiana wyrażona w jednostkach g . Ostatecznie wartość wyznaczona dla zmian temperatury całym zakresie i przeliczana jest na wartość charakterystyczną dla zmiany dla jednego stopnia Celsjusza Δg_{ofsset} . Nadmienić należy, iż wszystkie operacje dokonywane są z uwzględnieniem aproksymacji liniowej.

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe zmiany napięcia V_{ofsset} dla akcelerometru ADXL335 w zakresie temperatur od 0 °C ÷ 40 °C.



Rys. 3. Zmiana parametru V_{ofsset} w funkcji temperatury

Na podstawie napięć wyznaczonych metodą regresji liniowej, wyznaczono parametry ΔV_{ofsset} dla trzech osi akcelerometru zgodnie z równaniami:

$$\begin{aligned}\Delta V_{ofsset} &= V_{ofsset}|_{40^{\circ}\text{C}} - V_{ofsset}|_{0^{\circ}\text{C}} \\ \Delta V_{ofssetx} &= 1,4906 - 1,4876 = 0,0030 \text{ [V]} \\ \Delta V_{ofssety} &= 1,4857 - 1,4844 = 0,0013 \text{ [V]} \\ \Delta V_{ofssetz} &= 1,4918 - 1,5369 = -0,0451 \text{ [V]}\end{aligned}\quad (12)$$

W kolejnym kroku przy pomocy parametrów *Sensitivity* (tabela 2) wyznaczono zmianę wartości *Zero-g* (dla całego zakresu badanych temperatur) wyrażoną w jednostkach przyspieszenia *g*.

$$\begin{aligned}\Delta g_{ofsset} &= \Delta V_{ofsset} / Sensitivity \\ \Delta g_{ofssetx} &= 0,0030 / 0,290 = 0,0103 [g] \\ \Delta g_{ofssety} &= 0,0013 / 0,293 = 0,0044 [g] \\ \Delta g_{ofssetz} &= -0,0451 / 0,306 = -0,1474 [g]\end{aligned}\quad (13)$$

Ostatecznie wyznaczone wartości dzielone są przez zakres temperaturowy [7], w celu zyskania współczynnika *TCO*:

$$\begin{aligned}TCO &= \Delta g_{ofsset} / \Delta T \\ TCO_x &= 0,0103 / 40 = 0,26 [mg/^\circ C] \\ TCO_y &= 0,0044 / 40 = 0,11 [mg/^\circ C] \\ TCO_z &= -0,1474 / 40 = -3,69 [mg/^\circ C]\end{aligned}\quad (14)$$

2.2. Zmiana parametru *Sensitivity* w funkcji temperatury

Wartość parametru *Sensitivity* zmienia się w funkcji temperatury sensora MEMS. Zależność ta przez różnych producentów nazywa jest m.in. jako „*Sensitivity Change Due to Temperature*” czy też „*Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature*”. Najczęściej wartość ta wyrażona jest w [%/°C], gdzie temperaturą referencyjną jest 25 °C.

W przypadku akcelerometru ADXL335 typowa wartość deklarowana przez producenta [8], niezależnie od osi wynosi ±0,01 [%/°C]. Zmniejszenie temperatury czujnika w zakresie od 25 °C do 0 °C spowodować powinno maksymalną zmianę parametru *Sensitivity* o odpowiednio ±0,25 %. Ogrzanie czujnika do temperatury od 25 °C do 40°C o ±0,25 % [6]:

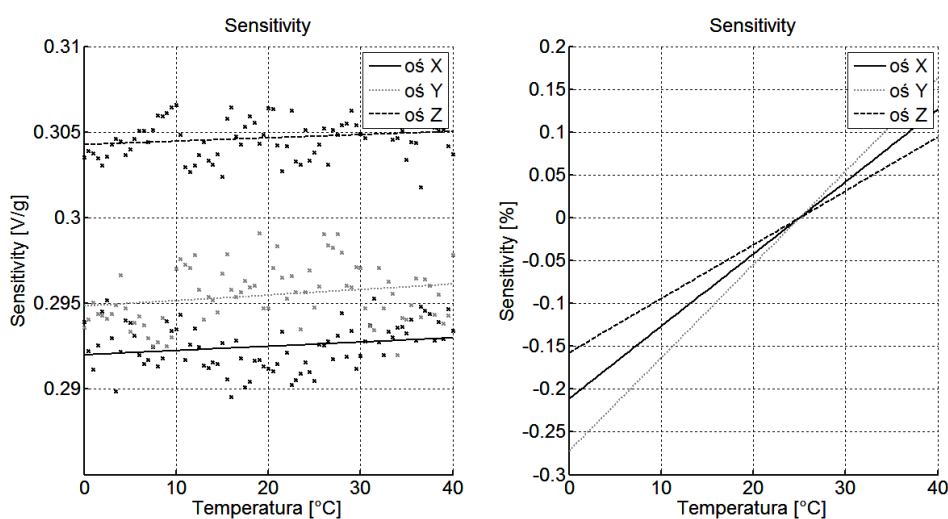
$$\begin{aligned}\Delta Sensitivity &= TCS \cdot \Delta T \\ \Delta Sensitivity_1 &= \pm 0,01 \text{ mg/}^\circ\text{C} \cdot (40^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = \pm 0,15\% \\ \Delta Sensitivity_2 &= \pm 0,01 \text{ mg/}^\circ\text{C} \cdot (0^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = \mp 0,25\%\end{aligned}\quad (15)$$

gdzie: *TCS*– współczynnik temperaturowy (ang. *Temperature coefficient of Sensitivity*) [%/°C], ΔT – różnica temperatury [°C], $\Delta Sensitivity_1$ – zmiana parametru *Sensitivity* przy ogrzewaniu do 40 °C, $\Delta Sensitivity_2$ – zmiana parametru *Sensitivity* przy chłodzeniu do 0 °C.

Wyznaczenie współczynnika temperaturowego odbywa się poprzez przeskalowanie wykresu parametru *Sensitivity*, względem wartości w temperaturze 25 °C. Współczynnik *TCS* może zostać odczytany z przetworzonego wykresu, jak tangens kąta nachylenia funkcji liniowej:

$$\begin{aligned}
 TCS &= \Delta Sensitivity / \Delta ^\circ C \\
 TCS_x &= -0,3376/40 = 0,008 [\%/^\circ C] \\
 TCS_y &= -0,4355/40 = 0,011 [\%/^\circ C] \\
 TCS_z &= -0,2515/40 = 0,006 [\%/^\circ C]
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Na rys. 4 przedstawiono wykresu parametru *Sensitivity* w formie bezwzględnej, oraz w postaci względnej.



Rys. 4. Zmiana parametru *Sensitivity* w funkcji temperatury, wykres bezwzględny i względny

3. WYNIKI DOŚWIADCZEŃ ORAZ WNIOSKI

W celu realizacji badań skonstruowano stanowisko pomiarowe składające się z komory klimatycznej KBK–150W oraz karty pomiarowej NI cDAQ–9171. Program akwizycji danych opracowany został w środowisku LabVIEW.

W tabeli 3.1 dokonano zestawienie wyznaczonych eksperymentalnie parametrów V_{offset} oraz *Sensitivity* w temperaturze 25 °C. Spośród czterech badanych akcelerometrów wyłącznie układ FQLN, posiadał napięcie V_{offset} większe od deklarowanej maksymalnej wartości (0,8848 > 0,795). Dodatkowo w nocie katalogowej brak danych dotyczących odchyłeń od typowej wartości parametru *Sensitivity*.

W tabeli 3.2 dokonano zestawienia wyznaczonych eksperymentalnie parametrów V_{offset} *due temp* oraz *Sensitivity due temp*. W przypadku pierwszego z parametrów (TCO ang. *Temperature coefficient of offset*), wartości wyznaczone podczas eksperymentu odbiegały znacznie od wartości zadeklarowanych przez pro-

ducentów (tabela 4). Wskaźniki badanego akcelerometru LIS344ALH były najbardziej zbliżone do wartości katalogowych (deklarowane $\pm 0,4$, wyznaczone – 0,60). Badany element FQLN3701 posiadał wyraźny dryf temperaturowy w każdej z osi, przekraczający wartości katalogowe. Wskaźniki użytych akcelerometrów ADXL, w osiach x oraz y posiadały wartości mieszczące się w zakresach podawanych przez wytwórcę. W przypadku osi z , zaobserwować można drastyczne zmiany napięcia w funkcji temperatury). Maksymalne wartości współczynnika TCO zaobserwowano dla osi Z akcelerometru ADXL335. Zmiana temperatury o $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ spowodować może zmianę o około 100 mg.

Tabela 3.1. Zestawienie parametrów V_{offset} oraz $Sensitivity$ [8–11]

		V_{offset} [V/g]			$Sensitivity$ [V/g]		
		oś x	oś y	oś z	oś x	oś y	oś z
ADXL335	Wartość zmierzona	1,4892	1,4835	1,5011	0,2895	0,2938	0,3061
	Nota katalogowa	min	1,35		0,270		
		typ	1,50		0,300		
		max	1,65		0,330		
FQLN3701	Wartość zmierzona	0,7800	0,7815	0,8848	0,2241	0,2280	0,2375
	Nota katalogowa	min	0,705		–		
		typ	0,750		0,229		
		max	0,795		–		
LIS344ALH	Wartość zmierzona	1,5078	1,5151	1,4573	0,5894	0,5872	0,6080
	Nota katalogowa	min	1,425		0,570		
		typ	1,500		0,600		
		max	1,575		0,630		
ADXL327	Wartość zmierzona	1,4935	1,4820	1,6227	0,4034	0,4054	0,4164
	Nota katalogowa	min	1,3		0,378		
		typ	1,5		0,420		
		max	1,7		0,462		

W przypadku drugiego z parametrów (TCS ang. *Temperature coefficient of Sensitivity*) wartości zmierzone nieznacznie różnią się od wartości deklarowanych przez producentów (tabela 3.2).

Badanie temperaturowe sensorów jest czynnością długotrwałą, wymagającą odpowiedniej infrastruktury pomiarowej w postaci m.in. komór klimatycznych oraz systemów akwizycji danych. Doświadczenia wykorzystujące tego typu

pomiary mogą więc zostać uznane za pracochłonne i kosztowne. Producenci sensorów MEMS, w kartach katalogowych podają typowe współczynniki temperaturowe, zazwyczaj o małych wartościach. Niektórzy z nich [6] wprost sugerują brak potrzeby kompensacji oraz marginalny wpływ temperatury zarówno na parametr V_{offset} jak i $Sensitivity$.

Tabela 3.2. Zestawienie parametrów V_{offset} due temp oraz $Sensitivity$ due temp [8–11]

		V_{offset} due temp [mg/°C]			$Sensitivity$ due temp [%/°C]		
		TCO			TCS		
		oś x	oś y	oś z	oś x	oś y	oś z
ADXL335	Wartość zmierzona	0,26	0,11	-3,69	0,008	0,011	0,006
	Nota katalogowa typ	±1			±0,01		
FQLN3701	Wartość zmierzona	-1,57	1,43	2,36	-0,018	-0,055	0,048
	Nota katalogowa	min			-0,07		
		max			0,07		
LIS344ALH	Wartość zmierzona	-0,60	-0,03	-0,21	0,018	0,030	0,027
	Nota katalogowa typ	±0,4			±0,01		
ADXL327	Wartość zmierzona	-0,25	0,39	-1,73	0,004	0,018	0,004
	Nota katalogowa typ	±1			±0,01		

W niniejszym artykule (tabela 3.2.) przedstawiono zestawienie parametrów temperaturowych takich V_{offset} due temperature oraz $Sensitivity$ due temperature, wyznaczonych dla wybranych akcelerometrów analogowych. Kalibracja współczynnika $Sensitivity$ nie jest konieczna. Zmiany wartości parametru wynikające ze zmienności temperatury są nieznaczne i mogą zostać pominięte. Natomiast, kompensacja temperaturowa parametru V_{offset} jest obligatoryjna. Jej zaniechanie prowadzi do rażących błędów pomiarowych.

Nadmienić należy, iż pomiary wykonane w celu wyznaczenia współczynnika kompensacyjnego V_{offset} due temperature są wystarczające do wyznaczenia współczynnika kompensacyjnego $Sensitivity$ due temperature.

Podkreślić należy również, iż prezentowane wyniki zostały opracowane na podstawie badań przeprowadzonych na pojedynczych egzemplarzach sensorów MEMS.

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy MB/WE/4/2016
i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.*

LITERATURA

- [1] Bieda R., Grygiel R., Wyznaczanie orientacji obiektu w przestrzeni z wykorzystaniem naiwnego filtru Kalmana, *Przegląd elektrotechniczny*, 34–41, ISSN 0033–2097, nr 1/2014.
- [2] Sengto A., Leauhatong T., Human Falling Detection Algorithm Using Back Propagation Neural Network, *Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*, 2012, ISBN: 978–1–4673–4892–8.
- [3] IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology, IEEE Std 528–2001.
- [4] Kionix, Nota katalogowa „Accelerometer Errors” AN 012, 7/2015, (10.12.2016), <http://kionixfs.kionix.com/en/document/AN012%20Accelerometer%20Errors.pdf>
- [5] NXP Semiconductors, Tuck, K., Nota katalogowa AN3447, Rev. 0 3/2007, (10.12.2016), www.nxp.com/files/sensors/doc/app_note/AN1636.pdf
- [6] STMicroelectronics, Nota katalogowa AN3182, Rev. 1 4/2010, (10.12.2016), www.st.com/resource/zh/application_note/cd00268887.pdf
- [7] Klusáček S., Havránek Z., Hasík S., Fialka J., Beneš P., Temperature and Sensitivity Analysis on MEMS Vibration Sensors with Different Principles of Operation, *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration*, 2015. ISBN: 978–88–88942–48–3.
- [8] Analog Devices, Nota katalogowa ADXL335, Rev. B 11/01/2016, (10.12.2016), <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>
- [9] NXP Semiconductors, Nota katalogowa FXLN83xxQ, Rev. 2 7/2014, (10.12.2016), <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/FXLN83xxQ.pdf>
- [10] STMicroelectronics, Nota katalogowa LIS344ALH, Rev. 3 4/2008, (10.12.2016), <http://www.st.com/resource/en/datasheet/lis344alh.pdf>
- [11] Analog Devices, Nota katalogowa ADXL327, Rev.0 11/01/2016, (10.12.2016), <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL327.pdf>

THE TEMPERATURE COMPENSATION OF SELECTED ANALOG MEMS ACCELEROMETERS

The influence of temperature on the measurements of analog accelerometers is described by coefficients such as V_{offset} due to temperature or Sensitivity due to temperature. However, producers of integrated circuits give only typical values of these parameters, along with maximum acceptable deviations. The values of coefficients differ in particular elements and should be assigned experimentally. The article presents the results of research on temperature effect on the measurements of four selected accelerometers. The measurements were obtained in a climatic chamber for temperature range from 0 ° C to 40 ° C. The study describes the methods of estimation of the basic parameters (*Sensitivity*, V_{offset}) and of temperature coefficients.

(Received: 27. 01. 2017, revised: 14. 02. 2017)