



**PIEZOELEKTRYCZNY CZUJNIK PRZYSPIESZEŃ (AKCELEROMETR)  
DO JEDNORAZOWYCH BADAŃ NISZCZĄCYCH**  
**DISPOSABLE PIEZOELECTRIC SENSOR OF ACCELERATIONS  
(ACCELEROMETER) FOR DESTRUCTIVE TESTS**

Andrzej FARYŃSKI, ORCID: 0000-0003-1232-2747,  
Zbigniew ZIÓŁKOWSKI, ORCID: 0000-0002-7713-0271,  
Miroslaw WIJASZK, A ORCID: 0000-0003-0074-4731,  
Roman KAMIŃSKI, ORCID: 0000-0002-8256-6010,  
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych - *Air Force Institute of Technology*  
*ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, Poland*  
*Author's e-mail: andrzej.farynski@itwl.pl;*

DOI 10.5604/01.3001.0015.8556

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono założenia konstrukcyjne i budowę opracowanych oraz wykonanych w ITWL tanich piezoelektrycznych akcelerometrów do badań niszczących na zakres do ok. 4000 g. W układach wykorzystano płytki piezoceramiczne z rezonatorów 455 kHz. Opisano sposób ich skalowania i wyznaczono czułości, zawierające się w granicach  $0,37 \div 0,72$  mV/g, przy dokładności  $< 10\%$ .

**Słowa kluczowe:** czujnik piezoelektryczny, skalowanie czujników, badania niszczące

## 1. Wstęp

W czasie badań elementów uzbrojenia niejednokrotnie zachodzi potrzeba pomiaru przyspieszeń, jakim są one poddawane, w warunkach pociągających za sobą utratę czujnika pomiarowego (akcelerometru): użycie materiałów wybuchowych, badania zapalników, rozcalanie elementów itp. Stwarza to pewne problemy, również finansowe.

Najczęściej stosowanymi czujnikami w pomiarach wysokich ciśnień dynamicznych, gwałtownych przyspieszeń i szybkozmiennych

**Abstract.** The paper presents designing specifications and structure of cheap piezoelectric accelerometers on the range up to ca. 4000g developed and made in the AFIT (Air Force Institute of Technology) for destructive tests. Piezoelectric 455 kHz resonating plates were used for the units. Their calibration was described and sensitivity determined on  $0.37 \div 0.72$  mV/g at accuracy  $< 10\%$ .

**Keywords:** piezoelectric sensor, calibration of sensors, destructive tests

## 1. Introduction

Testing of weapon system components often demands the measurement of accelerations they are subjected to, in conditions causing the loss of the measurement sensor (accelerometer) like the use of explosive materials, tests of fuses, disintegration of components, etc. It creates some problems including financial costs.

Piezoelectric sensors using properties of monocrystal materials such as quartz, tourmaline, and polycrystal ceramics e.g. PZT

sił są obecnie czujniki piezoelektryczne, wykorzystujące własności monokrystalicznych substancji takich, jak kwarc lub turmalin oraz polikrystalicznych ceramiek, np. typu PZT ( $\text{PbZrO}_3 + \text{PbTiO}_3$  z domieszkami). W substancjach tego rodzaju przykładane siły zewnętrzne powodują powstawanie ładunku elektrycznego wprost proporcjonalnego do naprężeń mechanicznych, co po raz pierwszy zaobserwowali Piotr i Jakub Curie w 1880 r.

Już w latach 1920–1930 materiały piezoelektryczne były stosowane do pomiarów ciśnień, przyspieszeń i sił dynamicznych, generowanych w trakcie detonacji materiałów wybuchowych (głównie w Niemczech i Japonii). Przykład takich zastosowań w latach późniejszych można znaleźć w [1], współczesną konstrukcję piezoelektrycznej matrycy akcelerometrów opisano w [2].

Profesjonalne czujniki ciśnień dynamicznych, które pojawiły się w 1940 r., były wytwarzane przez szwajcarską firmę Kistler. Firma ta, działająca nadal, specjalizuje się w produkcji czujników kwarcowych (z uwagi na wysoką stabilność kwarcu). Czujniki te zapewniają wysoką dokładność pomiarów (ok. 1%), jednak wymagają one współpracy z odpowiednimi wzmacniaczami ładunkowymi i specjalnymi kablami połączeniowymi, cechując się też wysoką ceną.

Wygodniejszymi w zastosowaniu, choć o nieco mniejszej dokładności (ok. 2%) są czujniki systemu Piezotronics. Czujniki te posiadają wbudowany w swoją strukturę wzmacniacz elektrometryczny. Są produkowane na określony zakres mierzonych wielkości. Zaletą tych czujników jest możliwość stosowania z typowymi koncentrycznymi kablami pomiarowymi, których długość nie musi być ściśle określona. Cena tego typu czujników jest również wysoka – porównywalna z ceną czujników firmy Kistler.

Powszechne w katalogach i praktyce ba-

type ( $\text{PbZrO}_3 + \text{PbTiO}_3$  with additives) are now the most often used sensors at the measurements of high dynamic pressures, or surging accelerations and rapidly changing forces. The materials of this kind generate an electric charge which is directly proportional to the applied mechanical external stresses what was firstly noticed by Piotr and Jakub Curie in 1880.

The piezoelectric materials were used for measurements of pressure, acceleration and dynamic forces already in 1920–1930 at detonation of explosive materials (mainly in Germany and Japan). An example of such applications in following years may be found in [1], and a present structure of piezoelectric matrix of accelerometers is described in [2].

Professional sensors of dynamic pressures were provided by Kistler company in 1940. The company still exists and specialises in production of quartz sensors (due to a high stability of quartz). These sensors provide high accuracy of measurements (ca. 1%), but they need to work together with suitable amplifiers of charges and with special connecting cables, and are expensive, as well.

The sensors of Piezotronics system are a bit more convenient in application, but with a lower accuracy (ca. 2%). The sensors have an electrometric amplifier embedded into its structure. They are produced for a specific range of measured values. These sensors can be used with typical concentric measurement cables and their length is not strictly limited. The price of such sensors is also high and is comparable with the price of Kistler's sensors.

The acceleration is commonly expressed in catalogues and testing practice by units of  $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$  as a multipli-

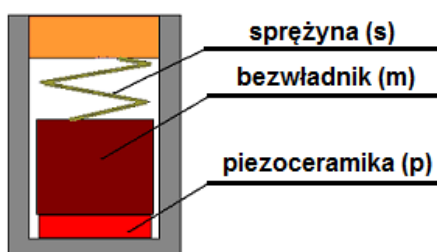
dawczej jest wyrażanie przyspieszenia w pozasystemowych jednostkach  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ , czyli w krotności średniego przyspieszenia ziemskiego. Tak wyrażone przyspieszenie nazywa się potocznie przeciążeniem.

Ostatnio dostępne są względnie tanie, miniaturowe scalone akcelerometry typu MEMS (np. firmy Motorola), ale jedynie na zakres przyspieszeń  $<1000 \text{ m/s}^2$  (ok. 100 g) przy paśmie przenoszenia do kilkunastu kHz, lub do ok. 500 g, ale o paśmie przenoszenia do ok. 1,5 kHz, co zdecydowanie nie wystarcza przy badaniu dynamicznych zjawisk związanych z techniką uzbrojenia.

Powyższe względy sprawiły, że postawiono sobie zadanie opracowania konstrukcji taniego piezoelektrycznego czujnika przyspieszeń z zakresu  $1000 \div 30000 \text{ m/s}^2$  (ok. 100 ÷ 3000 g), bazującego na dostępnych elementach ceramiki piezoelektrycznej. Z założenia czujniki te miały charakteryzować się mniejszą dokładnością (5 -10%), co jednak w badaniach niszczących w większości przypadków jest akceptowalne. Poniżej opisano budowę i sposób skalowania czujników [1].

## 2. Koncepcja budowy czujnika przyspieszeń

Zasadę działania piezoelektrycznego czujnika przyspieszeń zobrazowano na rys. 1.



W przewodzącym korpusie znajduje się płytka piezoelektryka – piezoceramika (p), dociskana do korpusu przez bezwładnik (m) i sprężynę (s). Oba elementy są odizolowane

od korpusu. The acceleration expressed in such way is commonly named as overload.

There are recently available relatively cheap and miniaturised integrated accelerometers of MEMS type (e.g. of Motorola), but only for the acceleration range  $<1000 \text{ m/s}^2$  (ca. 100 g) and at the transmission band to a dozen kHz, or for ca. 500 g, but with the transmission band to ca. 1.5 kHz, what certainly is insufficient for testing dynamical effects connected with the armament technology.

The above mentioned reasons have decided on the development of a design for a cheap piezoelectric acceleration sensor for the range  $1000 \div 30000 \text{ m/s}^2$  (ca. 100 ÷ 3000 g), basing on available components of piezoelectric ceramics. It was assumed that they could have lower accuracy (5 -10 %) what anyway is acceptable in most cases of the destructive tests. The structure and a way of calibration of the sensors is described below [1].

## 2. Concept of Acceleration Sensor Design

Principle of piezoelectric acceleration sensor operation is shown in Fig. 1.

Rys. 1. Szkic wyjaśniający zasadę działania czujnika przyspieszeń

Fig. 1. Sketch explaining the principle of acceleration sensor operation

Sprężyna – Spring  
Bezwładnik – Inertia mass  
Piezoceramika – Piezoceramics

A plate of piezoceramics (p) is placed inside the conductive body, and is pressed to the body by the inertia mass (m) and spring (s) which are electrically insulated

elektrycznie od korpusu. Zastosowanie sprężyny zapewnia dwukierunkowość wskazań (przyspieszenia dodatnie i ujemne) czujnika. Wyjście sygnału elektrycznego odpowiadającego ładunkowi wytwarzanemu w piezoceramice jest między korpusem a sprężyną.

Sprężyna wywiera na płytkę piezoceramiki siłę  $F_S$ . Ponieważ siła  $F_S$  ma charakter statyczny, wytworzony ładunek elektryczny zostaje z czasem rozładowany poprzez upływności elektryczne.

W czasie trwania przyspieszania czujnika, bezwładnik ( $m$ ) wywiera na piezoceramikę ( $p$ ) dodatkową siłę  $F$  o wartości:

$$F = m * a$$

gdzie:  $m$  – sumaryczna masa bezwładnika i sprężyny,  
 $a$  – przyspieszenie działające na czujnik.

Siła  $F$  w zależności od kierunku działania przyspieszenia zwiększa lub zmniejsza siłę działającą na piezoceramikę ze strony sprężyny. Pojawiający się ładunek elektryczny będzie proporcjonalny do zmiany siły działającej na piezoceramikę. Dla właściwej pracy czujnika (dla zachowania pełnej symetrii wskazań czujnika niezależnie od kierunku działania przyspieszenia) konieczne jest spełnienie warunku:

$$|m * a| < F_S,$$

określającego zakres pomiarowy czujnika, który wynosi:

$$|a| < F_S / m.$$

Przykładowo, dla siły nacisku sprężyny wynoszącej  $F_S = 20$  N i masy łącznej bezwładnika i sprężyny  $m = 0,002$  kg, zakres właściwego (symetrycznego) działania czujnika wyniesie:

from the body. The use of the spring makes the sensor work in two directions (positive and negative acceleration). The output of the electric signal corresponding to the charge produced in piezoceramic is placed between the body and the spring.

The spring exerts force  $F_S$  into the plate of piezoceramic. As the force  $F_S$  has a static character, the produced electric charge is discharged through the insulation after some time.

At acceleration of the sensor the inertia mass ( $m$ ) exerts onto the piezoceramic ( $p$ ) an additional force  $F$ :

where:  $m$  – aggregated masses of inertia mass and spring,  
 $a$  – acceleration acting against the sensor.

The force  $F$  increases or decreases a force acting into the piezoceramic from the side of spring depending on direction of acceleration. The produced electric charge is proportional to the change of force acting into the piezoceramic. Following condition has to be met for proper operation of the sensor (to get complete symmetry of sensor indications independently on direction of acceleration):

determining the measurement range of the sensor which equals to:

For instance, for the spring pressing force  $F_S = 20$  N and total mass of the inertia mass and the spring  $m = 0.002$  kg the range of proper (symmetric) operation of the sensor is:

$$|a| \leq 10000 \text{ m/s}^2.$$

Czułość czujnika (stosunek mierzonego przyspieszenia lub siły do generowanego napięcia) określona jest ponadto właściwościami płytki piezoceramiki zastosowanej w czujniku. Do budowy opisanego niżej czujnika wybrano płytki z ceramiki PZT (stosowane w rezonatorach ceramicznych 455 kHz). Płytki te są krążkami o średnicy 5,3 mm i grubości 0,9 mm. Rynkowa cena płytki z ceramiki PZT wynosi kilka złotych.

### 3. Opis budowy czujnika przyspieszeń

Twórcy nadali swojemu czujnikowi oznaczenie CP-117 (w rozszerzeniu części cyfrowej nazwy – numer egzemplarza).

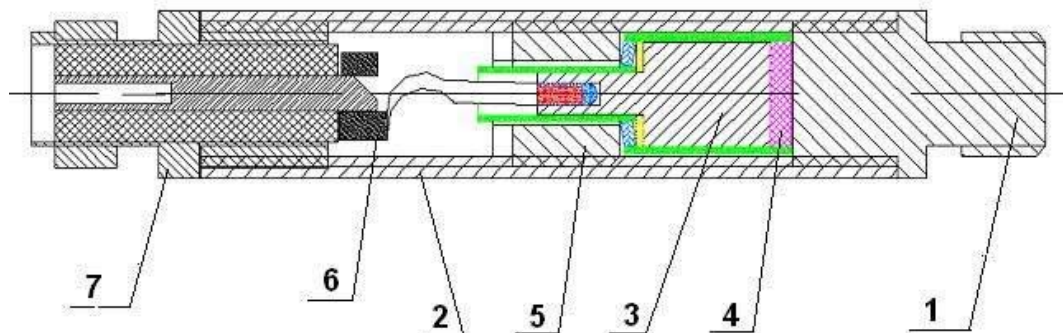
Przekrój opracowanego czujnika wyjaśniający jego budowę i zasadę działania pokazano na rys. 2, jego poszczególne elementy konstrukcyjne - na rys. 3, a widok serii wykonanych czujników – na rys. 4.

Sensitivity of the sensor (ratio between the measured acceleration or force and the produced voltage) is also determined by the properties of piezoceramic plate applied in the sensor. The plates from PZT ceramic (used in 455 kHz ceramic resonators) were used to build described sensor. The plates are round discs with diameter 5.3 mm and thickness 0.9 mm. Selling price of a plate from PZT ceramic is a few PLN.

### 3. Description of Acceleration Sensor Design

Designers have designated developed sensor by CP-117 (extension of numerical part of designation – number of the item).

Cross-section of developed sensor shows its design and principle of operation in Fig. 2, and particular components of the design in Fig. 3, and the view of a series of fabricated sensors in Fig. 4.



Rys. 2. Przekrój czujnika CP-117: 1 – podstawa, 2 – tuleja, 3 - bezwładnik, 4 - płytka z piezoceramiki PZT ( $\text{PbZrO}_3+\text{PbTiO}_3$ ), 5 – docisk, 6 - elementy elektroniczne, 7 - gniazdo SMA

Fig. 2. Cross-section of sensor CP-117: 1 – Base, 2 – Sleeve, 3 – Inertial mass, 4 – Plate of piezoceramic PZT ( $\text{PbZrO}_3+\text{PbTiO}_3$ ), 5 – Holder, 6 – Electronic components, 7 – SMA nest

Ponieważ czujniki piezoelektryczne są generatorami ładunku elektrycznego Q proporcjonalnego do siły działającej na element

Because piezoelectric sensors generate the electric charge Q proportional to the force acting against the piezoelectric ele-



piezoelektryczny, amplituda sygnału napięciowego czujnika będzie zależała od łącznej pojemności elektrycznej: samej płytki (p) (rys.1), dodatkowej pojemności kondensatora zakresu podłączonego równolegle do elementu (p), pojemności kabla łączącego czujnik z rejestratorem oraz pojemności wejściowej rejestratora (oscylloskopu).

Rejestrowane napięcie będzie wynosiło:

$$U = Q / C_{\Sigma},$$

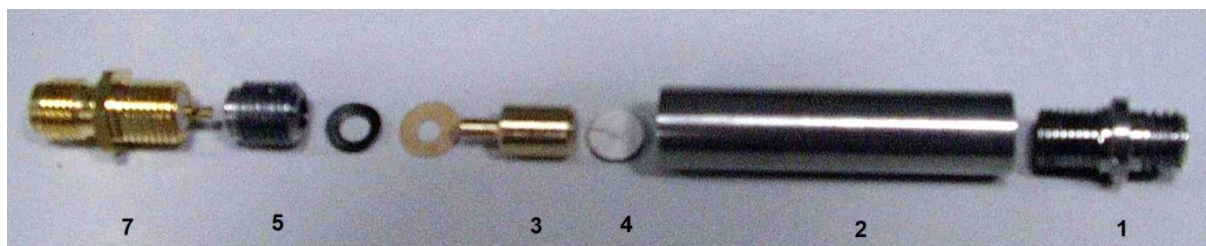
$$C_{\Sigma} = C_{cz} + C_z + C_k + C_{rej}$$

gdzie: Q – generowany ładunek elektryczny,  
 $C_{cz}$  – pojemność płytki z piezoceramiki,  
 $C_z$  – pojemność kondensatora zakresu,  
 $C_k$  – pojemność kabla łączącego czujnik z rejestratorem,  
 $C_{rej}$  – pojemność wejściowa rejestratora.

ment, the amplitude of sensor voltage signal depends on combined electric capacity of the alone plate (p) (Fig.1), added capacity of a range capacitor connected in parallel to the element (p), capacity of the cable connecting the sensor with a recorder, and the input capacity of the recorder (oscilloscope).

The recorded voltage amounts to:

where: Q – generated electric charge,  
 $C_{cz}$  – capacity of piezoceramic plate,  
 $C_z$  – capacity of the range capacitor,  
 $C_k$  – capacity of cable connecting the sensor with recorder,  
 $C_{rej}$  – input recorder capacity.



**Rys. 3. Widok elementów czujnika CP-117**

*Fig. 3. View of CP-117 sensor components*



**Rys. 4. Widok wykonanych czujników**

*Fig. 4. View of fabricated sensors*

Stosując kondensator zakresu o dobranej wartości pojemności można zmienić czułość napięciową czujnika; ograniczeniem będzie wówczas wytrzymałość mechaniczna płytki piezoceramiki.

Istotną rolę w doborze parametrów odgrywa również wartość rezystancji wejściowej  $R_{wej}$  rejestratora sygnału (np. oscyloskopu): stała czasowa  $R_{wej} C_{\Sigma}$  powinna być co najmniej o rząd wielkości większa od szerokości połówkowej rejestrowanego sygnału  $a(t)$ , co zapewni ok. 2% dokładność pomiaru napięcia sygnału.

Znacznie wygodniejsze w stosowaniu są czujniki typu produkowanego przez firmę Piezotronix, w których obudowie zintegrowano pojemność zakresu i wzmacniacz. Zintegrowany z czujnikiem wzmacniacz pracuje w układzie wspólnego drenu. Układ ten charakteryzuje się wzmocnieniem napięciowym bliskim jedności, bardzo dużą rezystancją wejściową i małą rezystancją wyjściową. Niska rezystancja wyjściowa praktycznie eliminuje wpływ parametrów kabla łączącego czujnik z rejestratorem (oscyloskopem). Takie czujniki wymagają jednak współpracy z dedykowanym zasilaczem stałoprądowym.

W czujnikach CP-117 opracowywanych w ITWL przyjęto powyższą koncepcję rozwiązania układowego. Ta koncepcja pozwala na bezpośrednie skalowanie czujnika w jednostkach  $[|U|/|a|]$  – odpowiednio  $[V/(m/s^2)]$  lub  $[V/g]$ .

Schemat ideowy zastosowanego układu elektronicznego czujnika przyspieszenia oraz zasilacza pokazano na rys. 5.

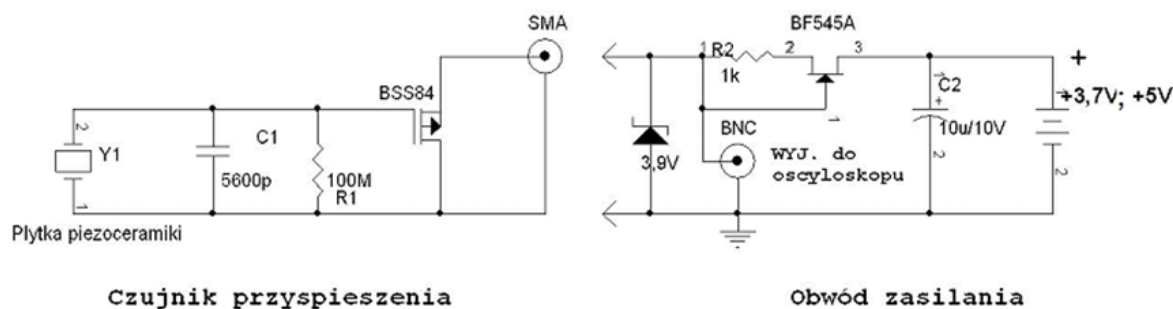
The sensor voltage sensitivity may be changed by using the range capacitor with selected capacity, and the mechanical strength of the piezoceramic plate is then a limitation.

The value of input resistance  $R_{wej}$  of signal recorder (e.g. oscilloscope) is also essential for selection of parameters as the time constant  $R_{wej} C_{\Sigma}$  has to be greater at least by one order of values than the half width of the recorded signal  $a(t)$ , what secures ca. 2% accuracy for the signal voltage measurement.

Sensors produced by Piezotronix company can be used easier as they have the range capacity and amplifier embedded inside. The amplifier integrated with the sensor operates in configuration of the common drain. The unit is characterised by voltage amplification close to oneness, and very high input resistance, and low output resistance. The low output resistance practically eliminates the influence of parameters of the cable connecting sensor and recorder (oscilloscope). But such sensors have to work together with a dedicated constant current supply.

Sensors CP-117 developed by the AFIT represent the above mentioned concept of configuration. The concept allows for a direct calibration of the sensor in units  $[|U|/|a|]$  – respectively  $[V/(m/s^2)]$  or  $[V/g]$ .

A circuit diagram of applied electronic configuration of acceleration sensor and the supply is shown in Fig. 5.



Rys. 5. Układ elektroniczny czujnika i obwodu zasilania

Fig. 5. Electronic circuit of sensor and supply unit

Czujnik przyspieszenia – Acceleration sensor

Obwód zasilania – Supply unit

Opracowany czujnik może również bezpośrednio współpracować z firmowymi zasilaczami firmy Piezotronix.

W fazie projektowania przyjęto założenie, iż opisywane czujniki w większości przypadków będą współpracować z rejestratorami mikroprocesorowymi zawierającymi w swojej strukturze przetworniki analogowo-cyfrowe. Niewielka rezystancja wyjściowa czujnika przyspieszenia (kilkadziesiąt omów) pozwala na jego bezpośrednie połączenie wraz z obwodem zasilania (por. rys. 5) do wejścia rejestratora (na ogół rezystancja wejściowa przetwornika A-C rejestratora  $R_{wej} > 10 \text{ k}\Omega$ ).

Z przyjętego założenia wynika dopuszczalny zakres zmian sygnałów na wejściu przetwornika A-C mikroprocesora, wynoszący  $0 \div 3,3 \text{ V}$ .

Opracowany czujnik CP-117 charakteryzuje się statycznym poziomem napięcia wyjściowego wynoszącym  $1,7 \text{ V} \pm 0,2 \text{ V}$  (niezależnie od wartości prądu zasilającego czujnik), co pozwala na rejestrację przyspieszeń działających w obu kierunkach osi czujnika.

#### 4. Skalowanie porównawcze wykonanych czujników przyspieszenia CP-117

Skalowanie każdego egzemplarza czujników CP-117 przeprowadzono metodą po-

Developed sensor may also work directly together with the supplies of Piezotronix company.

It was accepted at the designing phase that described sensors will work together with microprocessor recorders comprising in their structure the analogue-digital converters. Low output resistance of the acceleration sensor (a few dozen oms) allows for its direct connection, together with the supply unit (see Fig. 5), to the input of a recorder (input resistance of recorder's A-C converter is usually  $R_{wej} > 10 \text{ k}\Omega$ ).

The accepted presumption defines an admissible range for changes of signals at the input of microprocessor A-C converter to  $0 \div 3.3 \text{ V}$ .

Developed sensor CP-117 is characterised by the static level of output voltage equal to  $1.7 \text{ V} \pm 0.2 \text{ V}$  (independently on the value of current supplying the sensor) enabling the recording of accelerations acting in both directions of the sensor's axis.

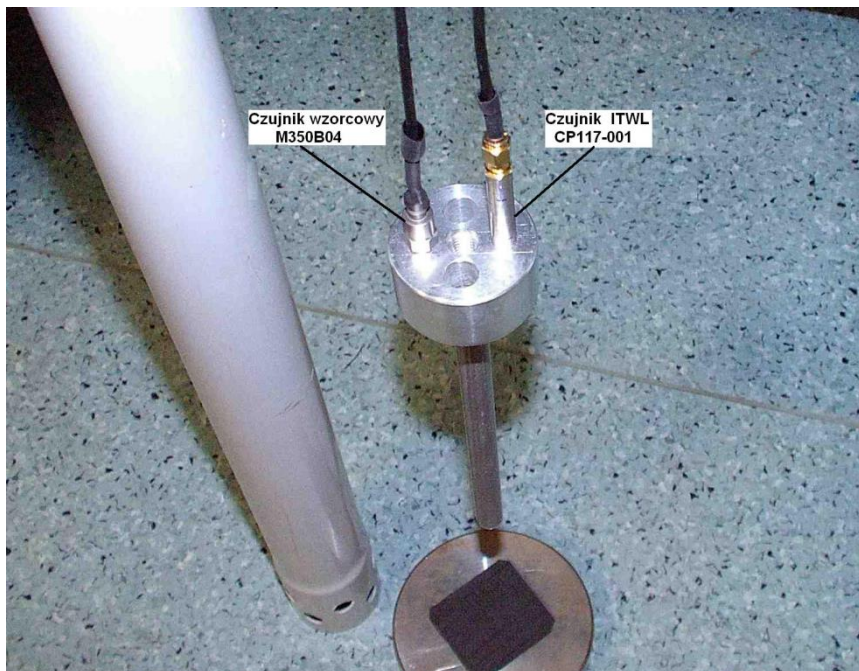
#### 4. Comparison Gauging of Fabricated Acceleration Sensors CP-117

Each item of CP-117 sensors was gauged by a method comparing the maximal module



równania maksymalnej wartości modułu jego sygnałów rejestrowanych na ekranie oscyloskopu z maksymalnymi wartościami modułu sygnałów z akcelerometru firmy PCB typu M350B04 SN4454 o czułości katalogowej 1mV/g (ok.  $100 \mu\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ ), traktowanego jako wzorcowy [2, 3]. Oba akcelerometry poddawane były jednocześnie tym samym przyspieszeniom. Zamontowano je symetrycznie na wspólnej podstawie w kształcie walca o średnicy 47 mm i długości 25 mm. Do podstawy w jej osi symetrii wkręcony był pręt duraluminiowy (o średnicy 12 mm i długości 180 mm). Widok zestawu do skalowania czujników pokazano na rys. 6.

of its signals recorded on the screen of oscilloscope with the maximal modules of signals for accelerometer produced by PCB company of M350B04 SN4454 type and catalogue sensitivity 1mV/g (ca.  $100 \mu\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ ), treated as the referential one [2, 3]. The two accelerometers were subjected concurrently to the same accelerations. They were installed symmetrically on the common base having cylindrical form with 47 mm diameter and 25 mm length. A duralumin rod (diameter 12 mm and length 180 mm) was screwed into the base at its axis of symmetry. The view of the set used for gauging the sensors is shown in Fig. 6.



**Rys. 6. Widok zestawu do skalowania czujników przyspieszenia**

**Fig. 6. View of the set for calibration of acceleration sensors**

Czujnik wzorcowy – *Referential sensor*

Czujnik ITWL – *AFIT's sensor*

Zestaw z zamontowanymi czujnikami był zrzucany z wybranej wysokości, poruszając się w rurze winidurowej będącej prowadnicą, ustawionej na płycie stalowej o grubości 30 mm, na której umieszczano różne podkładki

The set with installed sensors was dropped from a selected height and moved inside a plastic pipe used as a guide and mounted on a steel plate of 30 mm thickness on which different damping pads were

amortyzujące (blacha miedziana, papier, guma), w które uderzał duraluminiowy pręt zestawu skalowania. W zależności od wysokości rzutu i rodzaju podkładki uzyskiwano różne wartości przyspieszeń hamowania.

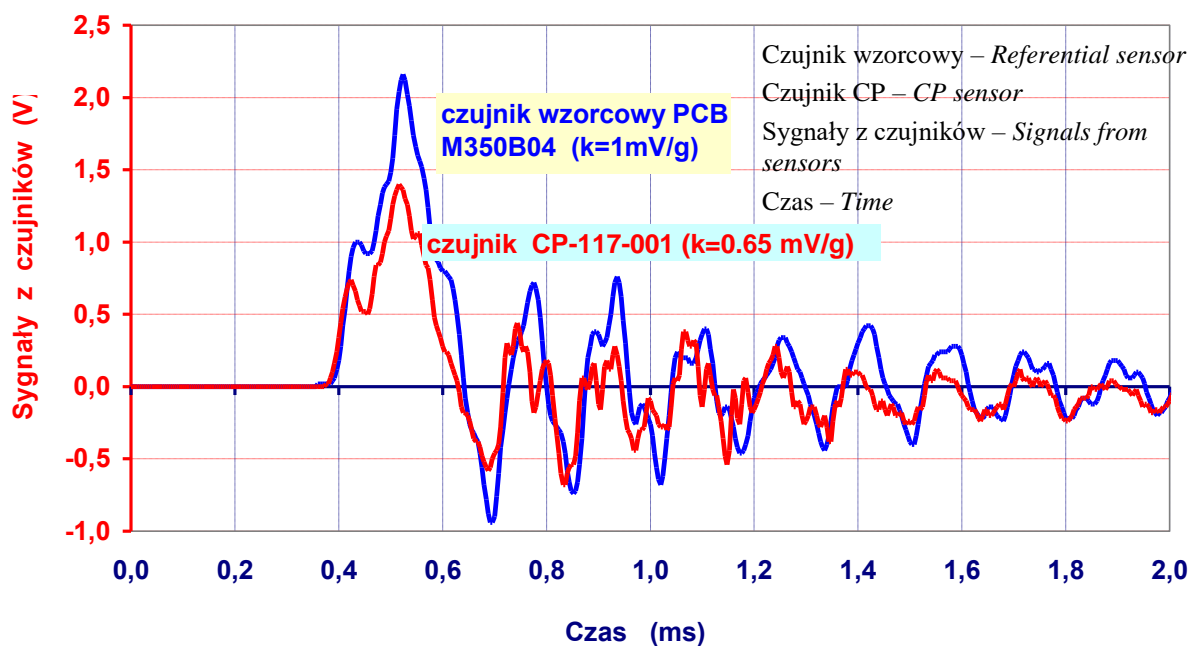
Sygnaly z czujników rejestrowano oscyloskopem cyfrowym RIGOL DS4024.

Przykładowe zapisy sygnałów zarejestrowanych w procesie skalowania pokazano na rys. 7, 8, 9, 10. Należy zwrócić uwagę, że przy czułości czujnika wzorcowego M350B04 wynoszącej 1 mV/g, sygnał wyjściowy z tego czujnika wyrażony w miliwoltach bezpośrednio odpowiada przeciążeniu działającemu na czujniki, wyrażonemu w jednostkach przyspieszenia ziemskiego [g].

placed (copper sheet, paper, rubber) to accept the impact of the calibrating set duralumin rod. Depending on the height of dropping and the type of pad different values of impact accelerations were received.

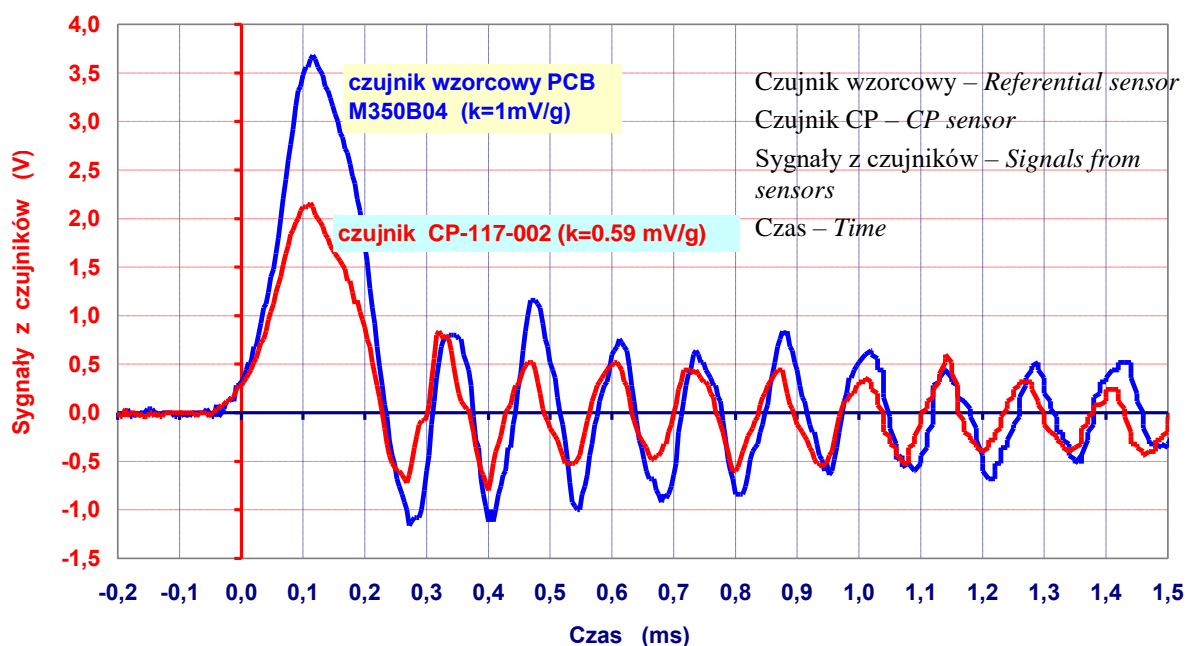
Signals from the sensors were recorded by digital oscilloscope RIGOL DS4024.

Exemplary records of signals recorded during the calibration are shown in Fig. 7, 8, 9, 10. It has to be noted that at the sensitivity of the referential sensor M350B04 equal to 1 mV/g its output signal expressed in millivolts corresponds directly to the overload acting on the sensors expressed in units of Earth's gravity [g].



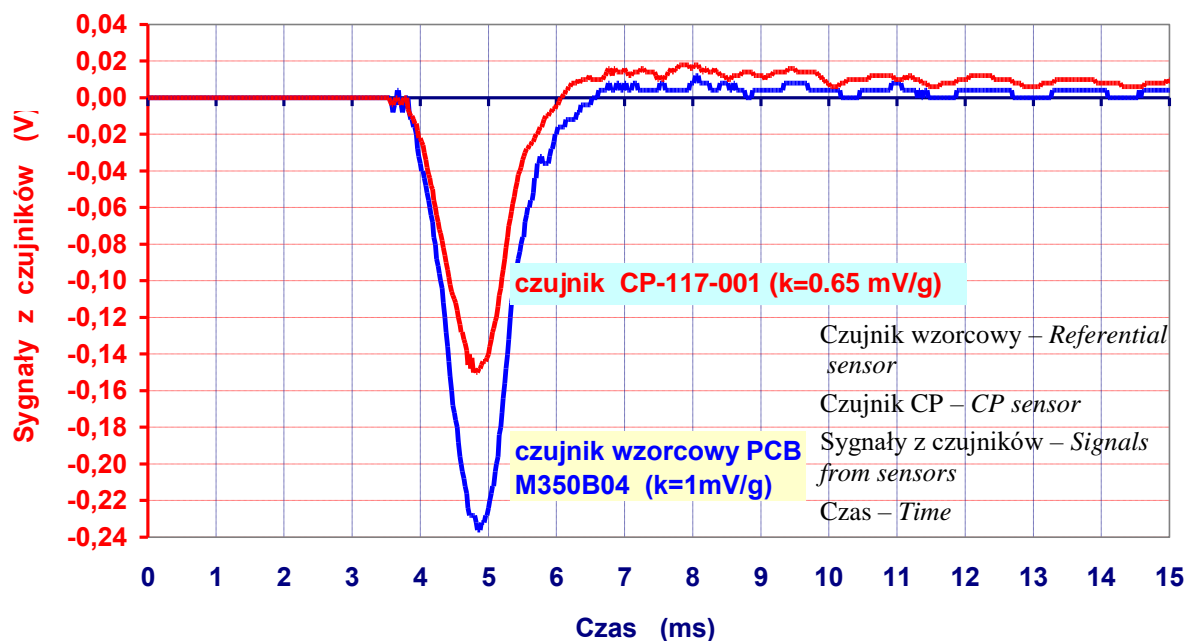
**Rys. 7. Przykład zapisów dodatnich sygnałów przyspieszeń z czujników przy uderzeniu w twardą podkładkę**

*Fig. 7. Example of records of positive acceleration signals from sensors at hitting a hard pad*



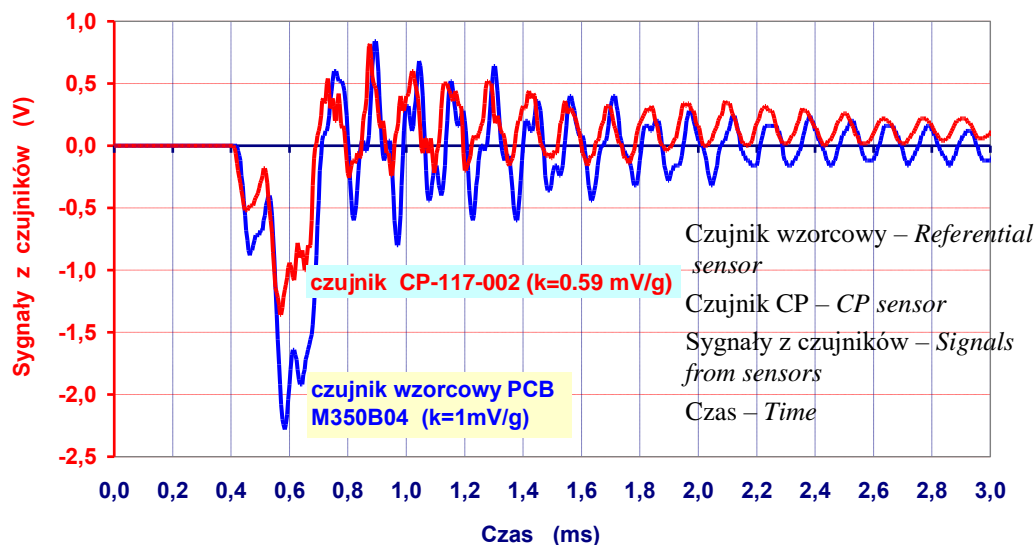
Rys. 8. Przykład zapisów dodatnich sygnałów przyspieszeń z czujników przy uderzeniu w miękką podkładkę

Fig. 8. Example of records of positive acceleration signals from sensors at hitting a soft pad



Rys. 9. Przykład zapisów ujemnych sygnałów przyspieszeń z czujników przy uderzeniu w miękką podkładkę

Fig. 9. Example of records of negative acceleration signals from sensors at hitting a soft pad

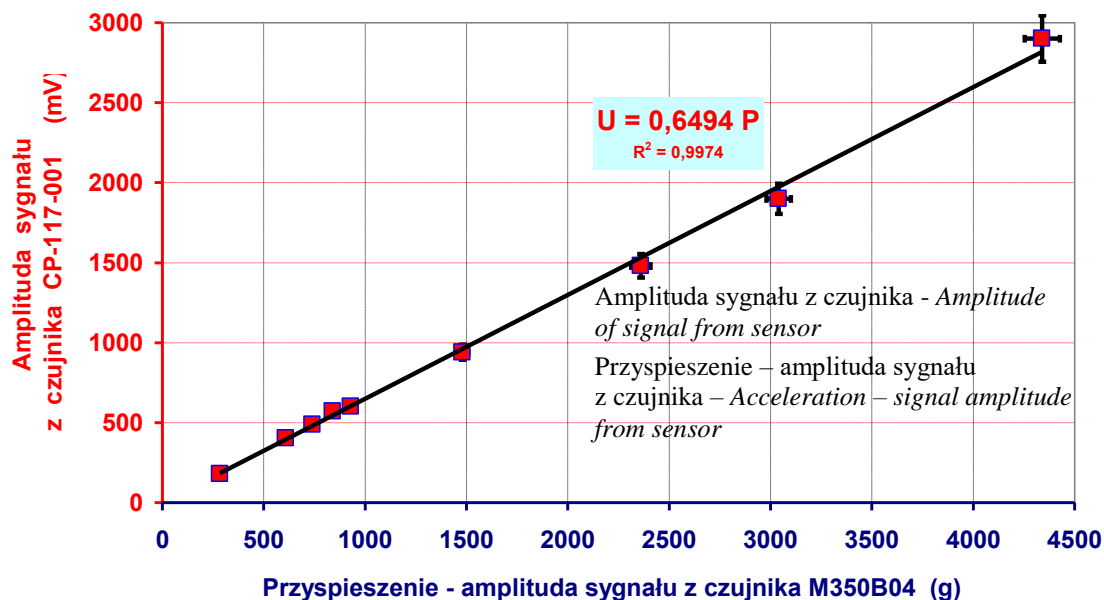


Rys. 10. Przykład zapisów ujemnych sygnałów przyspieszeń z czujników przy uderzeniu w twardą podkładkę

*Fig. 10. Example of records of negative acceleration signals from sensors at hitting a hard pad*

Na rys. 11 pokazano przykładowo, w formie graficznej wyniki skalowania czujnika CP117-001 dla zakresu przeciążeń 300 g ÷ 4400 g (przyspieszeń ok. 3000 ÷ 44000 m/s<sup>2</sup>). Z oczywistych względów otrzymywano w ten sposób charakterystykę dynamiczną.

Fig. 11 shows in graphical form some examples of calibration of CP117-001 sensor for the range of overloads 300 g ÷ 4400 g (accelerations ca. 3000 ÷ 44000 m/s<sup>2</sup>). For obvious reasons, in this way a dynamic characteristic was received.



Rys. 11. Skalowanie porównawcze czujnika przyspieszenia CP117- 001; prosta aproksymująca jest linią trendu wyznaczoną przez program Excel; pokazano równanie linii trendu

*Fig. 11. Comparison calibration for acceleration sensor CP117- 001; the approximating line is a line of trend determined by program Excel; the equation of the line of trend is also shown*

Podobny wykres, jak na rys.11, na podstawie około 10 pomiarów, budowano dla każdego z czujników używając programu Excel.

Zależność amplitudy sygnału z czujnika CP-117 od wielkości działającego na czujnik przyspieszenia określa linia trendu wykorzystująca funkcje programu Excel o równaniu:

$$U = k * P, \tag{1}$$

gdzie: U - napięcie na wyjściu czujnika [mV],  
 k - czułość czujnika,  
 P - przyspieszenie działające na czujnik - wyrażone w jednostkach [g].

Wyznaczone w ten sposób wartości czułości k dla poszczególnych egzemplarzy wykonanych czujników przyspieszenia pokazano w formie zbiorczej w tabeli 1.

Similar graph as in Fig. 11 was prepared for each sensor on the base of ca. 10 measurements by program Excel.

Dependence of sensor CP-117 signal amplitude on the magnitude of acceleration acting to the sensor is identified by the line of trend on the base of Excel program functions expressed by:

where: U – sensor output voltage [mV],  
 k - sensitivity of sensor,  
 P – acceleration acting to the sensor expressed in units of [g].

Values of sensitivity k determined in such way for particular items of fabricated acceleration sensors are collected in table 1.

Tabela 1. Czulość poszczególnych egzemplarzy czujników przyspieszenia  
 Table 1. Sensitivity for particular items of acceleration sensors

L.p. / #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Numer czujnika CP-117 <i>Sensor number</i>	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011
k, (mV/g)	0,65	0,59	0,57	0,53	0,66	0,59	0,37	0,72	0,52	0,52	0,47

Uwzględniając dokładność stosowanego czujnika wzorcowego M350B04 wynoszącą ok. ±2% oraz maksymalne odchylenie punktów pomiarowych od opisanej równaniem (1) linii trendu wynoszące ok. 5% można przyjąć, iż dokładność wyznaczenia przyspieszeń za pomocą opracowanych i wykonanych w ITWL czujników nie będzie gorsza od ±7%.

## 5. Podsumowanie

1. Wyznaczone wartości czułości pojedynczego czujnika w wykonanej serii czujników przyspieszenia zawierały się w zakresie  $k = 0,37 \div 0,72$  mV/g. Różnice

Regarding the accuracy of used referential sensor M350B04 equal to ca. ±2% and maximal deviation of measurement points from the trend line described by equation (1) by ca. 5%, it can be assumed that the accuracy of acceleration measurement by the sensors developed and fabricated in the AFIT is not worse than ±7%.

## 5. Summary

1. The sensitivities established for individual sensors belonging to the fabricated lot of sensors were in the range  $k = 0.37 \div 0.72$  mV/g. Differences of

- między stałymi czułości poszczególnych egzemplarzy były spowodowane użyciem do ich wykonania płytek piezoceramicznych pozyskanych z rezonatorów z różnych partii produkcyjnych.
2. Osiągnięta dokładność wskazań każdego konkretnego czujnika była nie gorsza niż założone 10%.
  3. Fakt, iż czujniki te przeznaczone są do pomiarów w badaniach niszczących z użyciem materiałów wybuchowych powoduje, że w większości przypadków taka dokładność jest wystarczająca.
- sensitivity coefficients for particular items were caused by the use of piezoceramic plates originating from resonators with different production lots.
2. The accuracy achieved for each specific sensor was not worse than assumed 10%.
  3. Due to the fact that the sensors are dedicated for destructive measurements with the use of explosive materials such accuracy in most cases is sufficient.

### Literatura / Literature

- [1] Caldirola P., Knoepfel H. (ed.), *Physics of High Energy Density*, Proc.of the Intern. School of Physics 'Enrico Fermi', Varenna, July 1969, Academic Press New York – London 1971.
- [2] Nemirovsky V., Nemirovsky A., Muralt P., Setter N., *Design of Novel Thin – Film Piezoelectric Accelerometer*”, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 56, No 3, Sept. 1996.
- [3] Sprawozdanie nr S-14-33/17 z pracy p.t., *Opracowanie konstrukcji i wykonanie czujników przyspieszeń*, Bibl. ITWL nr 10175/50, Warszawa 2017.
- [4] *Quartz Shear Mode ICP Accelerometer Series 353, Operators Manual* PCB Piezotronics, Inc. 3425 Walden Avenue 1994.
- [5] *Operating Guide Series 338 Quartz, Shear Mode, ICP Accelerometers* PCB Piezotronics, Inc. 3425 Walden Avenue 1994.



