



## **OCENA SIŁ DZIAŁAJĄCYCH NA OBIEKT PODCZAS URUCHOMIENIA SPADOCHRONOWEGO UKŁADU HAMUJĄCEGO PRZY WYKORZYSTANIU REJESTRATORA DANYCH WŁASNEJ KONSTRUKCJI**

### ***ESTIMATION OF FORCES ACTING TO AN OBJECT AT DEPLOYMENT OF PARACHUTE BRAKING SYSTEM BY DATA RECORDER OF OWN DESIGN***

Mirosław WIJASZKA, miroslaw.wijaszka@itwl.pl, ORCID: 0000-0003-0074-4731

Roman KAMIŃSKI, roman.kaminski@itwl.pl, ORCID: 0000-0002-8256-6010

Marian TYBURA, marian.tybura@itwl.pl, ORCID: 0000-0002-8633-820X

Włodzimierz KEPCZYK, wlodzimierz.kepczyk@itwl.pl, ORCID: 0000-0002-8233-6303

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych – *The Air Force Institute of Technology*

DOI 10.5604/01.3001.0053.7233

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano wyniki badań zrealizowanych z wykorzystaniem opracowanego i wykonanego rejestratora danych. Celem opracowania rejestratora była optymalizacja spadochronowych układów hamujących stosowanych w imitatorach celów powietrznych produkowanych w Zakładzie Uzbrojenia Lotniczego ITWL. Przeznaczeniem rejestratora był pomiar i zapis przyspieszeń liniowych występujących w trakcie otwierania spadochronu hamującego imitatora celu powietrznego.

**Słowa kluczowe:** imitator celu powietrznego, przyspieszeniometer, rejestrator danych, spadochron

### **1. Wstęp**

Imitator celu powietrznego ICP-R imituje cel termiczny, opadający na spadochronie po oddzieleniu się od korpusu rakiety. Cel opracowano dla szkolenia obsługi armat kalibru 23 mm, a także przenośnych i mobilnych zestawów przeciwlotniczych pocisków rakietowych. Jako bazę wykorzystuje się prochowe silniki rakietowe z niekierowanych lotniczych pocisków rakietowych typu S-5. Zamiast głowicy bojowej cel powietrzny prze-

**Abstract:** The article presents the results of research carried out using the developed and constructed flight data recorder. The purpose of developing the recorder was to optimize the parachute braking systems used in imitators of air targets produced at the armament division of the Air Force Institute of Technology. The main task of the recorder was to measure and record the linear accelerations occurring during the parachute system deployment.

**Keywords:** air-target imitator, accelerometers, data recorder, parachute

### **1. Introduction**

Aerial target imitator ICP-R is used for imitation of a thermal target falling down on a parachute after separation from rocket's body. The target was developed for training the crews of 23 mm guns and portable antiaircraft missiles. Rocket motors of aircraft unguided missiles S-5 are used for this purpose. Instead of a warhead the aerial target carriers a packet - the head of imitator which is the thermal target (fire tracer) sus-

nosi pakiet – głowicę imitatora, który stanowi cel termiczny (smugacz ogniowy) zawieszony na spadochronie.

Podczas prac konstrukcyjnych nad imitatorem ICP-R podstawowym problemem było określenie sił, jakie pojawiały się w czasie napełniania się spadochronu i związane z nimi dobór linek łączących spadochron z celem termicznym.

Celem niniejszej pracy była optymalizacja spadochronowych układów hamujących stosowanych w imitatorach celów powietrznych ICP-R, pod kątem doboru (weryfikacji) odpowiednich materiałów stosowanych do budowy spadochronu – w szczególności linek łączących spadochron z celem termicznym. Należało więc pomierzyć siłę z jaką działa otwierający się spadochron na zawieszony na nim cel termiczny – całość wyrzucana w postaci pakietu przy prędkości około 300 m/s.

Osiągnięcie założonego celu uzyskano w ramach realizacji następujących przedsięwzięć:

- opracowanie rejestratora danych do pomiaru sił (poprzez pomiar przyspieszeń);
- wykonanie badań poligonowych;
- analiza i opracowanie wyników badań;
- optymalizacja (weryfikacja) spadochronowych układów hamujących na podstawie powyższych wyników badań.

Koncepcja budowy rejestratora danych do pomiaru sił została oparta na wykorzystaniu przyspieszeniomierzy, co wynika bezpośrednio z drugiej zasady dynamiki Newtona. Dokonano wcześniej analizy literatury, głównie pod kątem problemów związanych z wykorzystaniem przyspieszeniomierzy – ich dokładności i podatności na zakłócenia STMicroelectronics (2013).

Wykorzystanie przyspieszeniomierzy do pomiaru sił zostało opisane np. w (G. Balakalyani, G. Jagadeesh, 2017), gdzie pomiar

zależał od siły hamującej spadochronu.

At the designing phase of development of ICP-R imitator the main problem was to find out what forces are present at the parachute opening and what lines have to be selected to connect the parachute with the thermal target.

The objective of present work was to optimise the parachute braking systems used in aerial target imitators ICP-R to select (verify) suitable materials applied in parachute designs, and especially the lines of harness connecting the parachute with the thermal target. For that, the force of opening parachute acting against the suspended thermal target has to be measured – all the packet being thrown out at velocity of ca. 300 m/s.

The assumed objective was achieved in the frame of following activities:

- Development of a data recorder for the measurement of forces (by the measurement of accelerations);
- Carrying out the range tests;
- Analysis and elaboration of test results;
- Optimisation (verification) of parachute braking systems on the basis of the above mentioned results of tests.

A concept of data recorder design for measurement of forces was based on application of accelerometers what results directly from Newton's second law of dynamics. Before that the literature was scrutinised, especially in aspects of problems connected with the application of accelerometers, and their accuracy and vulnerability to interferences for STMicroelectronics (2013).

The application of accelerometers for measurement of forces was described (G. Balakalyani, G. Jagadeesh, 2017), where the measurements of forces were used to estimate the coefficients of drag and lift

sił wykorzystano do estymacji współczynników siły oporu i siły nośnej działającej na badany model balistyczny.

Wykorzystanie przyspieszeniomierzy do pomiaru sił podczas otwarcia spadochronu zostało zaprezentowane na przykład w pracach US 9522743 B1 i Cassidy et al., 2012. W pierwszej akcelerometr posłużył jako element zintegrowanego systemu nawigacyjnego oraz do pomiaru siły hamowania podczas otwierania spadochronu, natomiast w drugiej przedstawiono wykorzystanie akcelerometrów do pomiaru siły aerodynamicznej (oporu i nośnej).

## 2. Opracowanie i wykonanie rejestratora

Rejestrator składa się z dwóch głównych bloków rys. 1:

- bloku inicjatora,
- bloku pomiaru i rejestracji.

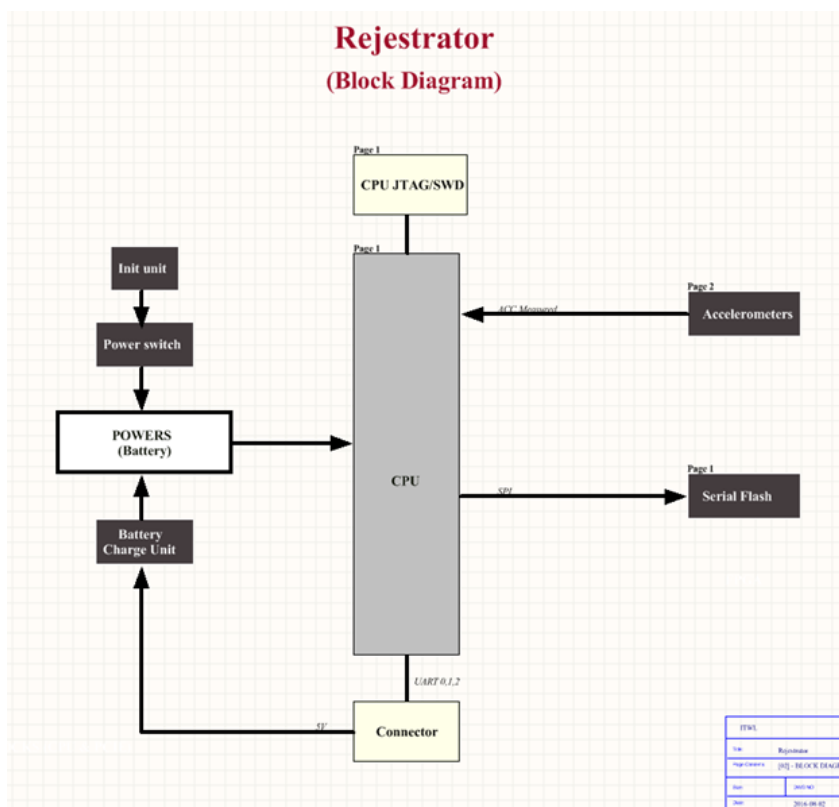
acting to a tested ballistic model.

The use of accelerometers for measurement of forces at the opening of parachute was presented for instance in elaborations US 9522743 B1 and Cassidy et al., 2012. In the first of them the accelerometer was used as a component of an integrated navigation system and for measurement of the braking force at the parachute opening, whereas in the second one the application of accelerometers for measurement of aerodynamic forces (drag and lift) was presented.

## 2. Development and Preparation of Recorder

The recorder consists of two main units Fig. 1:

- Initiator unit,
- Measurement and recording unit.



Rys. 1. Schemat blokowy rejestratora

Fig. 1. Block diagram of the recorder

Blok inicjatora (Init unit) (STMicroelectronics, 2013) służy do wypracowania sygnału uruchamiającego rejestrator w momencie zaistnienia zdarzenia określonego konfigurawalnymi parametrami tj. przyspieszenia oraz czasu jego trwania.

Blok pomiaru i rejestracji zbudowany jest w oparciu o mikrokontroler (CPU) rodziny stm32 (STMicroelectronics, 2017), akcelerometry (Accelerometers) typu MEMS (Analog Devices, 2010) oraz szeregową pamięć flash (Serial Flash) (SPANSION, 2008).

W urządzeniu zastosowano akcelerometry jednoosiowe zdolne mierzyć przyspieszenie rzędu 500 G. Akcelerometry zostały tak rozlokowane na płycie drukowanej rejestratora, aby umożliwić pomiar trzech składowych XYZ przeciążeń występujących po obu stronach środka masy rejestratora (badanego pakietu ICP-R), co miało dodatkowo umożliwić obserwację obrotu obiektu.

Do zasilania rejestratora wykorzystano miniaturową baterię litowo-polimerową 3,7 V 190 mAh.

Na fotografiach przedstawiono płytkę drukowaną rejestratora (fot.1) oraz wersję pakietu ICP-R z obudową rejestratora o masie całości porównywalnej z masą celu termicznego (fot. 2 i fot. 3)

The initiator unit (Init unit) (STMicroelectronics, 2013) is used to produce a signal to start operation of the recorder in a moment of an event specified by the configurable parameters, i.e. the acceleration and its duration.

The measurement and recording unit is built from a microcontroller (CPU) of family stm32 (STMicroelectronics, 2017), accelerometers of MEMS type (Analog Devices, 2010), and a serial flash memory (SPANSION, 2008).

The device employs one axis accelerometers measuring the acceleration of 500 G order. The accelerometers were placed in a printing board of the recorder to provide the measurement of three components XYZ of loads occurring in both sides of the recorder mass centre (tested ICP-R packet), what additionally can be used to observe the object's rotation.

The recorder was powered by a miniaturised lithium-polymer battery 3.7 V, 190 mAh.

The pictures show the printing board of the recorder (Photo 1) and a version of ICP-R packet with the casing of the recorder having total weight similar to the weight of thermal target (Photo 2 and 3).



**Fot. 1. Zmontowany rejestrator**

*Photo 1. Assembled recorder*



**Fot. 2. Pakiet ICP-R z rejestratorem**  
*Photo 2. Packet ICP-R with the recorder*



**Fot. 3. Złożony pakiet ICP-R**  
*Photo 3. Assembled packet ICP*

### 3. Przeprowadzenie badań

Badania przeprowadzono na poligonie w miejscowości Nadarzyce.

Badanie polegało na wystrzeleniu ICP-R z pakietem rejestratora z wyrzutni ustawionej pod kątem elewacji (podniesienia) równym  $15^\circ$  (zachowanie bezpieczeństwa strzelań na poligonie).

Do konfiguracji modułu inicjatora użyto parametrów:

- przyspieszenie – 40 G;
- czas trwania przyspieszenia – 100 ms.

### 3. Execution of Tests

Tests were carried out on the range in Nadarzyce.

The trial included the firing out of ICP-R including the recorder packet with a launcher which was set under the elevation angle of  $15^\circ$  (safety procedures at firing on the range).

Module of initiator was configured by parameters:

- Acceleration – 40 G;
- Acceleration duration time – 100 ms.

Powyższe wynika z zastosowania w ICP-R zapalnika W5K, który zadziała po spełnieniu ww. wymagań (oprócz innych wymagań, których opis wykracza poza ramy niniejszej pracy). W związku z powyższym rejestrator (w sensie zapisu danych) uruchamiany jest przez wewnętrzny układ inicjujący, którego parametry startowe ustawiono na  $400 \text{ m/s}^2$  (40 G) i 100 ms. Oznacza to, że aby doszło do akwizycji danych, najpierw musi nastąpić zdarzenie polegające na wystąpieniu przyspieszenia o wartości ponad  $400 \text{ m/s}^2$  (40 G) i o czasie trwania wynoszącym nie mniej niż 100 ms. Z oczywistych względów samo zdarzenie inicjacji rejestratora oraz inne informacje, jakie mogłyby się pojawić do czasu spełnienia parametrów startowych nie zostaną zapisane. Nie są one również tematem pracy.

Konstrukcja i nastawy ICP-R wskazują na wystąpienie następujących zdarzeń – odpowiednio w kolejności:

- start ICP-R (zdefiniowany jako czas pracy silnika raketowego) powinien trwać ok. 700 ms i charakteryzować się przeciążeniem ok. 60 G;
- rozcalenie – powinno nastąpić po około 10,7 s od startu;
- wyrzut pakietu – po czasie około 14 s od startu;
- hamowanie spadochronu, około 200 ms od wyrzutu pakietu;
- upadek rejestratora na grunt.

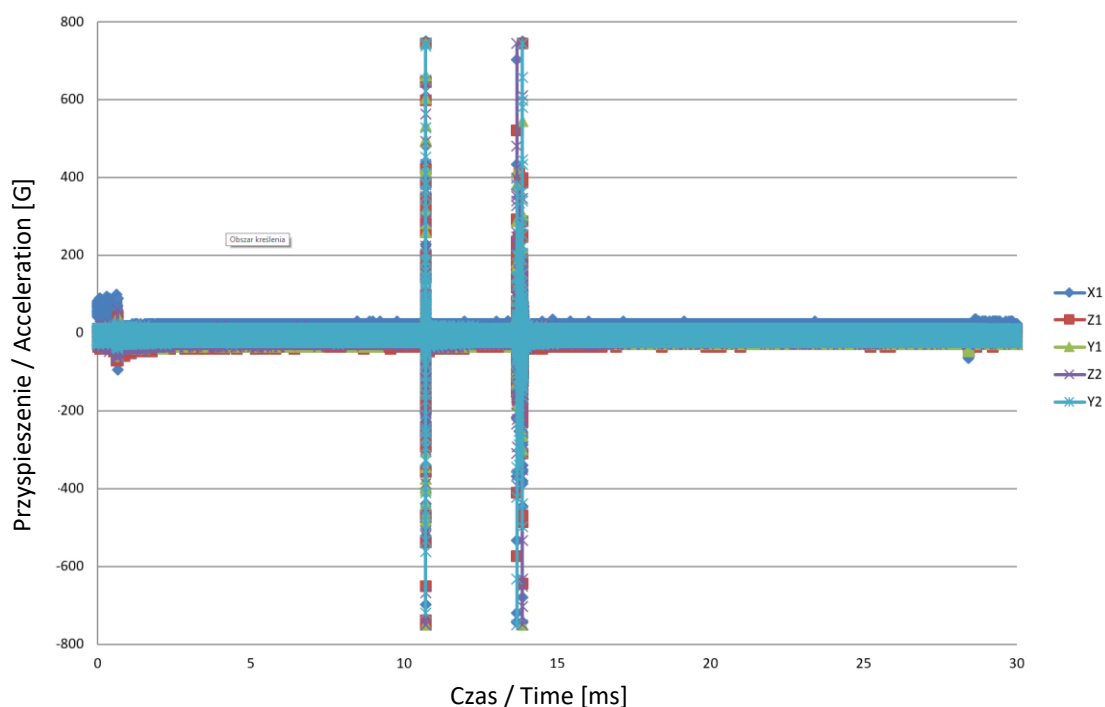
Warunkiem odczytania zarejestrowanych przez rejestrator danych było zlokalizowanie na obszarze poligonu miejsca upadku pakietu. Aby to umożliwić w pakiecie umieszczono „smugacz pirotechniczny”. Po odnalezieniu pakietu i odczytaniu zapisanych w rejestratorze danych możliwe było ich opracowanie i przedstawienie w formie graficznej przebiegu zdarzeń w trakcie całego lotu ICPR, co pokazano na rys. 2.

The above is caused by the application of W5K fuse in ICP-R which can be activated when the above mentioned requirements are met (beside other requirements which cannot be described in frame of the present paper). Regarding the above mentioned, the recorder is started (concerning data recording) by the internal initiating unit with the starting parameters set to  $400 \text{ m/s}^2$  (40 G) and 100 ms. It means that data acquisition may start after the acceleration above  $400 \text{ m/s}^2$  (40 G) and the time of duration at least 100 ms. For the obvious reasons the mere event of recorder initiation and other data which could appear prior the time of meeting the starting parameters are not recorded. It is also not the subject of the paper, anyway.

Design and settings of ICP-R indicate for occurrence of following events – in respective order:

- The launching of ICP-R (defined as the time of rocket motor operation) has to last ca. 700 ms with acceleration of ca. 60 G;
- Separation – has to happen ca. 10.7 s after the take-off ;
- Ejection of the packet – at the time of ca. 14 s after the take-off;
- Parachute braking, ca. 200 ms after packet ejection;
- The fall of the recorder on the ground.

The recorded data could be deciphered only after the packet falling place was localised on the terrain of the range. In order to do it the packet was equipped with a pyrotechnical tracer. After picking up the packet and reading out the data recorded in data register it was possible to elaborate data and present in a graphical form the course of events during the whole flight of ICPR what is shown in Fig. 2.



**Rys. 2. Zarejestrowane przyspieszenia w trakcie lotu ICP-R**

*Fig. 2. Accelerations recorded during the flight of ICP-R*

Na podstawie przedstawionego powyżej wykresu dla całego czasu lotu można określić jedynie zgrubnie wystąpienie dwóch zespołów zdarzeń, z których pierwszy wystąpił po czasie ok. 11 sekund (licząc od chwili startu rakiety), zaś drugi po czasie ok. 14 s.

Pierwszy zespół zdarzeń odpowiada rozcaleniu rakiety (ICP-R), czyli wyrzutu złożonego pakietu (fot. 3) z rakiety ICP-R, zaś drugi zespół zarejestrowanych zdarzeń odpowiada procesowi wyrzutu i hamowania spadochronu z rejestratorem (Fot. 2).

Rozpatrując zjawiska zachodzące po czasie ok. 14 sekund, w oparciu o zarejestrowane wyniki pomiarów przedstawione w formie graficznej w odpowiednio dobranej skali czasowej (rys. 3), stwierdzono złożony ich charakter.

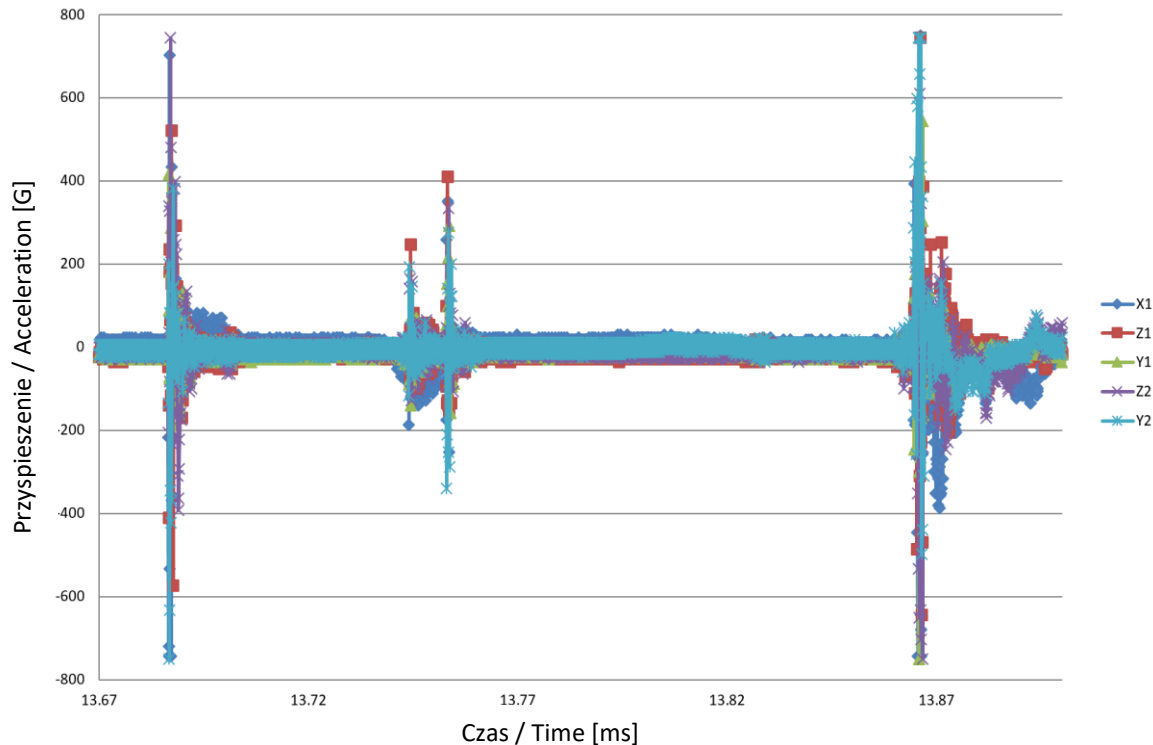
Na tym wykresie można zaobserwować proces wyrzutu pakietu i proces hamowania przez uwolniony spadochron.

On the base of diagram presented above for the whole time of flight the occurrence of two groups of events can be only established in a general way, when the first was ca. 11 sec after the rocket take-off, and the second after ca. 14 sec.

The first group of events corresponds to separation of missile (ICP-R), i.e. the throwing out of the complete packet (Photo 3) from ICP-R missile, whereas the second group of recorded events corresponds to the process of ejection of parachute with the recorder, and process of braking (Photo 2).

Considering the events happening within ca. 14 sec on the basis of recorded results of measurements presented in graphical form with suitable matched time scale (Fig. 3) their complex character was noticed.

The diagram shows the process of throwing out the packet and the process of braking by the released parachute.



**Rys. 3. Przebieg wyrzutu pakietu i hamowania spadochronu**

*Fig. 3. Process of the packet throwing out and the parachute braking*

Dokładne określenie zdarzeń wymagało przedstawienia w formie graficznej zarejestrowanych danych w odpowiedniej skali czasowej. Skalę czasową dobrano kierując się możliwością wychwycenia poszczególnych faz procesu rozcalania pakietu.

### 3.1. Praca silnika raketowego

Pierwszym analizowanym dokładnie zdarzeniem jest start z wyrzutni naziemnej rakiety (ICPR). Na rys. 4 przedstawiono zarejestrowane przyspieszenie wywołane pracą silnika raketowego.

Ciąg silnika raketowego w badanym ICP-R wynosi średnio 2600 N, przy czym w pierwszych 100 ms wynosi on ok 3500 N, a następnie maleje do wartości ok. 2400 N. Ponieważ masa startowa ICP-R wynosi 5,3 kg, to przyspieszenie jakie uzyskuje ten obiekt w pierwszych milisekundach powinno osiągać wartość

Accurate investigation of events was possible after deployment of a suitable time scale for data presented in the graphical form. The time scale was so tailored to discern particular phases of packet disassembling.

### 3.1. Operation of Rocket Motor

The take-off of the missile (ICPR) from a ground launcher is a first event which is accurately analysed. Diagram in Fig. 4 shows the recorded acceleration effected by the operation of rocket motor.

The thrust of the rocket motor in investigated ICP-R was on average 2600 N, and in the first 100 ms it is ca. 3500 N to fall down later to ca. 2400 N. As the launching mass of ICP-R is 5.3 kg then the acceleration of this object in the first milliseconds has to reach the value



$$a = \frac{F}{m}$$

gdzie:

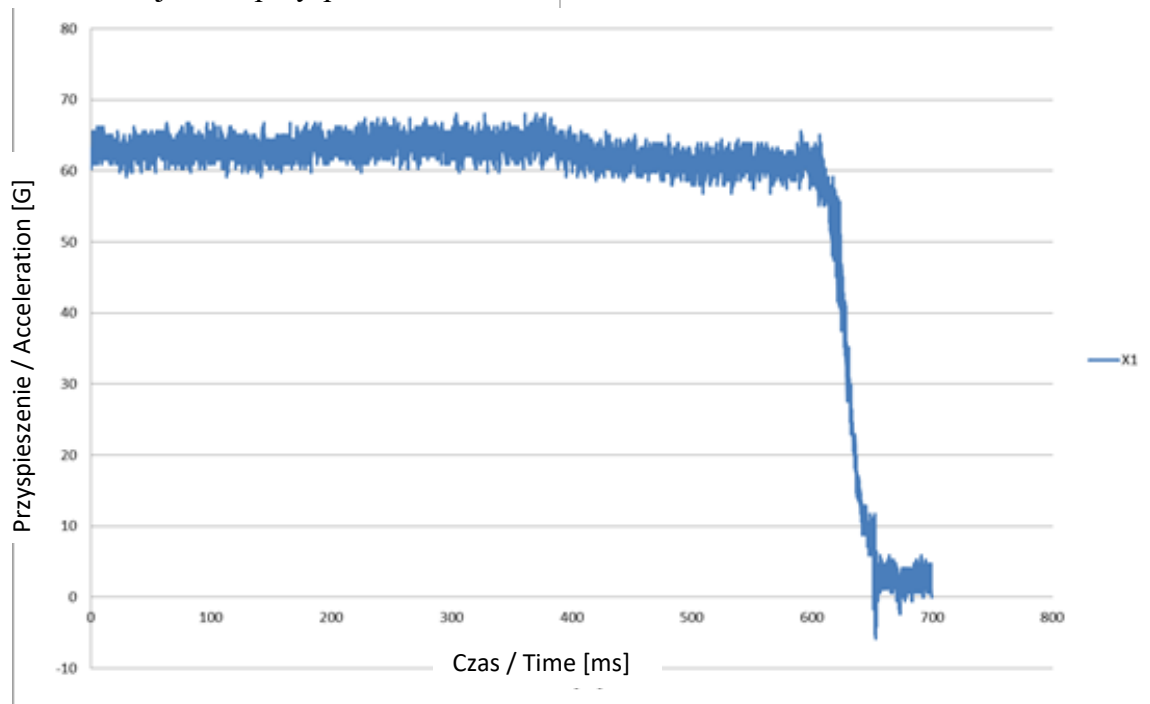
F – siła ciągu silnika rakiety,  
m – masa startowa ICPR

wynoszącą ok.  $670 \text{ m/s}^2$  (67 G). Zadowalająca zgodność zarejestrowanej wartości przyspieszenia w chwili startu potwierdza właściwe działanie rejestratora i zamontowanych w nim czujników przyspieszenia.

where:

F – rocket motor thrust,  
m – ICPR launching weight

equal to ca.  $670 \text{ m/s}^2$  (67 G). An acceptable compliance of recorded value of acceleration at the take-off confirms the proper operation of the recorder and integrated acceleration sensors.



**Rys. 4. Praca silnika raketowego**  
**Fig. 4. Operation of the rocket motor**

Należy mieć na uwadze fakt, iż powyższy przebieg nie pokazuje przyspieszenia w pierwszych ok. 100 ms pracy silnika, co wynika bezpośrednio z konstrukcji rejestratora i ustawionych parametrów startowych.

Rejestrator (w sensie zapisu danych) uruchamiany jest przez wewnętrzny układ inicjujący, którego parametry startowe ustawiono na  $400 \text{ m/s}^2$  (40 G) i 100 ms. Oznacza to, że aby doszło do akwizycji danych, najpierw musi nastąpić zdarzenie polegające na wystąpieniu przyspieszenia o wartości ponad

It has to be noted that the presented diagram does not include the acceleration for the first ca. 100 ms of motor operation what results directly from the recorder's design and the set starting parameters.

The recorder is on (for data recording) by the external initiating unit which has the starting parameters set for  $400 \text{ m/s}^2$  (40 G) and 100 ms. It means that acquisition of data may start after happening of the first event in the form of acceleration exceeding  $400 \text{ m/s}^2$  (40 G) lasting longer than 100 ms.

400 m/s<sup>2</sup> (40 G) i o czasie trwania wynoszącym nie mniej niż 100 ms. Z oczywistych względów samo zdarzenie inicjacji rejestratora oraz inne informacje, jakie mogłyby się pojawić do czasu spełnienia parametrów startowych nie zostaną zapisane.

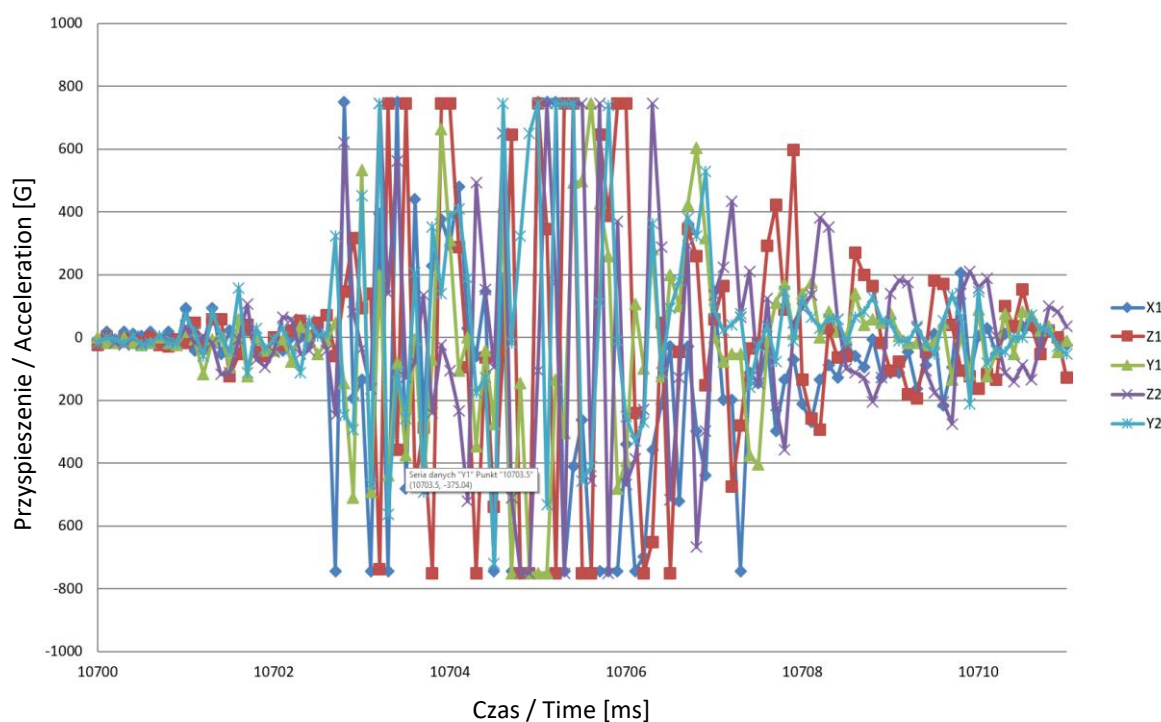
### 3.2. Proces rozcalania pakietu ICP-R

Proces rozcalania pakietu ICP-R to kolejne w czasie zjawisko poddawane analizie. W tym celu na rys. 5 przedstawiono sygnały z 5-ciu akcelerometrów zamontowanych w rejestratorze.

For obvious reasons the mere event of the recorder initiation, and other information which would appear till the time when the starting parameters are met, was not recorded.

### 3.2. Process of ICP-R Packet Separation

Process of ICP-R packet separation is a next event to be analysed. For this reason signals from 5 accelerometers integrated in the recorder are shown in Fig. 5.



**Rys. 5. Proces rozcalania pakietu**

*Fig. 5. Process of packet separation*

Ponieważ akcelerometry zamontowane w rejestratorze tworzą dwa punkty pomiarowe - pierwszy: - trójosiowy umieszczony z przodu rejestratora (z osią X pokrywającą się z osią rejestratora), drugi: dwuosiowy umieszczony z tyłu i rejestrujący w osiach Y2 i Z2 równoległych do osi Y1 i Z1 akcelerometrów zamontowanych w pierwszym punkcie pomiarowym.

The accelerometers integrated in the recorder create two measurement points – the first one: - triple-axial, placed at the front of recorder (with the axis X covering the axis of recorder), the second one: biaxial, placed at the back and recording in the axes Y2 and Z2 which are parallel to axes Y1 and Z1 of the accelerometers integrated in the first meas-

Na rys. 5 przedstawiono przyspieszenia zarejestrowane przez wszystkie akcelerometry w trakcie procesie rozcalania, w rozbiciu na poszczególne składowe dla każdego punktu pomiarowego, w których zostały umieszczone akcelerometry pkt 1 (X1, Y1, Z1) i pkt 2 (X1, Y2, Z2).

Na prezentowanym wykresie można zauważyć, iż zarejestrowane wartości przyspieszeń chwilowych przekraczają katalogowy zakres pomiarowy zastosowanych akcelerometrów (równy  $\pm 5000 \text{ m/s}^2$  (500G)).

Zakres rejestracji (ograniczony napięciem zasilania akcelerometrów) wynosi  $\pm 7400 \text{ m/s}^2$  (740G), w zakresie rejestrowanych przyspieszeń pomiędzy  $|5000| \text{ m/s}^2$  a  $|7400| \text{ m/s}^2$  uzyskane rejestracje należy traktować jedynie jako zgrubne (poglądowe).

### 3.3. Wyrzut pakietu

Kolejny proces wymagający analizy to wyrzut pakietu. Przyspieszenia zarejestrowane w czasie trwania tego zjawiska przedstawiono na rys. 6.

urement point.

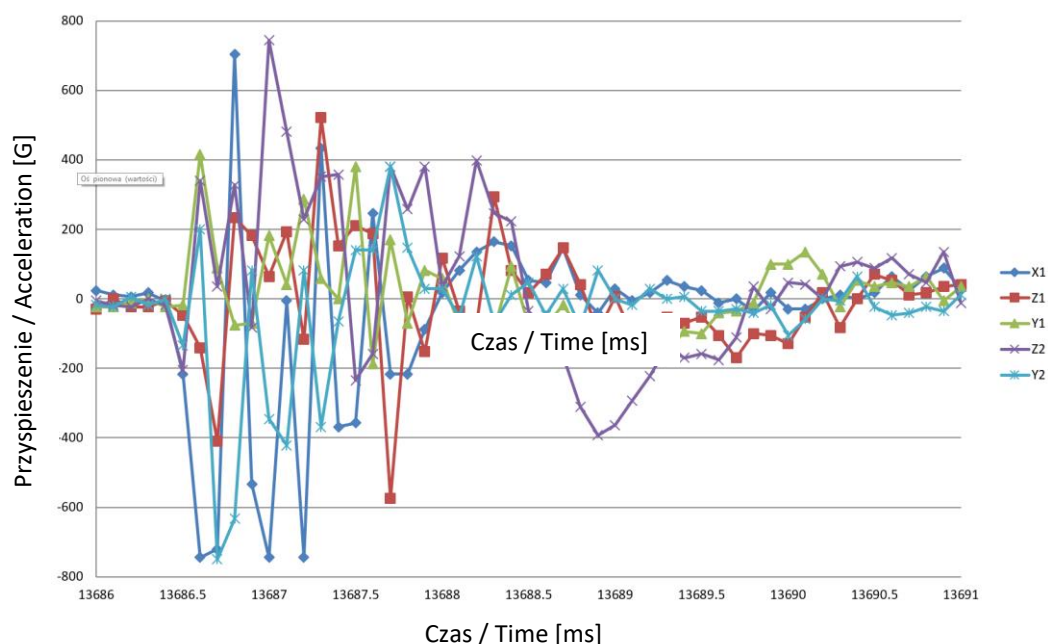
Fig. 5 shows all accelerations recorded by all accelerometers during the process of separation for particular components of each measurement point where the accelerometers were placed, point 1 (X1, Y1, Z1) and point 2 (X1, Y2, Z2).

It may be noticed on the presented diagram that the recorded values of instant accelerations exceed the catalogue measurement range of applied accelerometers (equal to  $\pm 5000 \text{ m/s}^2$  (500G)).

The limit of recording (limited by the supply voltage of accelerometers) is  $\pm 7400 \text{ m/s}^2$  (740G), and for the range of recorded accelerations between  $|5000| \text{ m/s}^2$  and  $|7400| \text{ m/s}^2$  the received records have to be treated only as approximated ones (illustrative).

### 3.3. Ejection of Packet

The ejection of packet is a next process demanding the analysis. The accelerations recorded during this effect are presented in Fig. 6.



Rys. 6. Wyrzut pakietu

Fig. 6. Ejection of packet

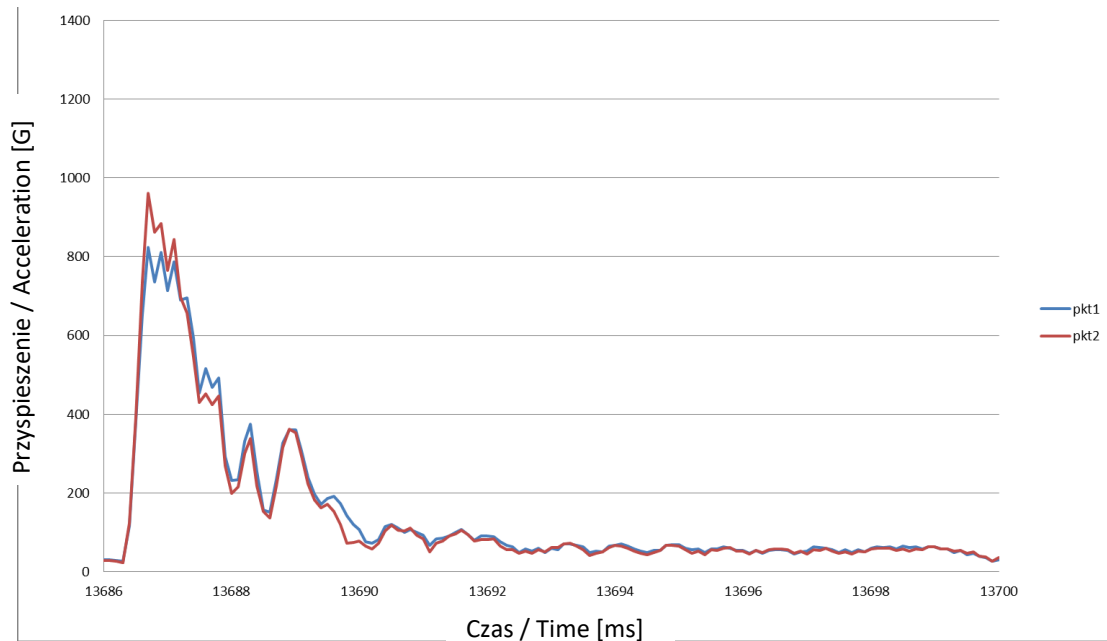
Ze względu na duże wartości przyspieszeń chwilowych oraz szybkie zmiany kierunków działania sił, celowa jest prezentacja danych w formie modułów wektorów przyspieszeń.

Because of the high values of momentary accelerations and rapid changes of senses of forces actions it is reasonable to present data in the form of acceleration vectors modules.

$$|a| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Taka forma prezentacji umożliwia wyznaczenie wartości sił działających na pakiet. Moduł wektora przyspieszeń podczas wyrzutu pakietu przedstawiono na rys. 7.

Such form of presentation provides the identification of forces acting against the packet. The module of acceleration vector during ejection of the packet is shown in Fig. 7.



**Rys. 7. Wyrzut pakietu - moduł wektora przyspieszeń**  
**Fig. 7. Ejection of packet – the module of acceleration vector**

W oparciu o wyznaczone i przedstawione na powyższym wykresie wartości przyspieszeń można stwierdzić, że maksymalne wartości przyspieszeń działających na pakiet podczas jego wyrzutu wynoszą ok.  $9000 \text{ m/s}^2$  (900 G), co (uwzględniając masę wyrzucanego pakietu wynoszącą  $m = 0,8 \text{ kg}$ ) pozwala na ocenę maksymalnych wartości siły działającej na pakiet, które wynosi  $F_{\text{max}} = 7,2 \text{ kN}$  (720 kG).

Wyznaczona maksymalna wartość siły działającej na pakiet w czasie jego wyrzutu

Basing on the established values of acceleration, presented in the above diagram, it can be stated that the maximal values of acceleration acting against the packet during its ejection equal to ca.  $9000 \text{ m/s}^2$  (900G), what (considering the mass of the ejected packet equal to  $m = 0.8 \text{ kg}$ ) allows for estimation of the maximal force acting against the packet as  $F_{\text{max}} = 7.2 \text{ kN}$  (720 kG).

The maximal established value of the force acting against the packet during its

pozwala na zgrubne określenie maksymalnej wartości ciśnienia produktów spalania prochowego ładunku wyrzucającego pakiet.

ejection allows for a rough estimation of powder charge combustion products maximal pressure throwing the packet out.

$$P_{max} = \frac{F_{max}}{S}$$

gdzie: F – siła ciągu silnika rakiety  
 S – powierzchnia tłoka wypychającego pakiet

where: F – is the thrust of rocket motor  
 S – surface of a piston pushing the packet out

Oszacowana wartość ciśnienia dla średnicy tłoka równej 48 mm wynosi ok. 4 MPa (40 bar).

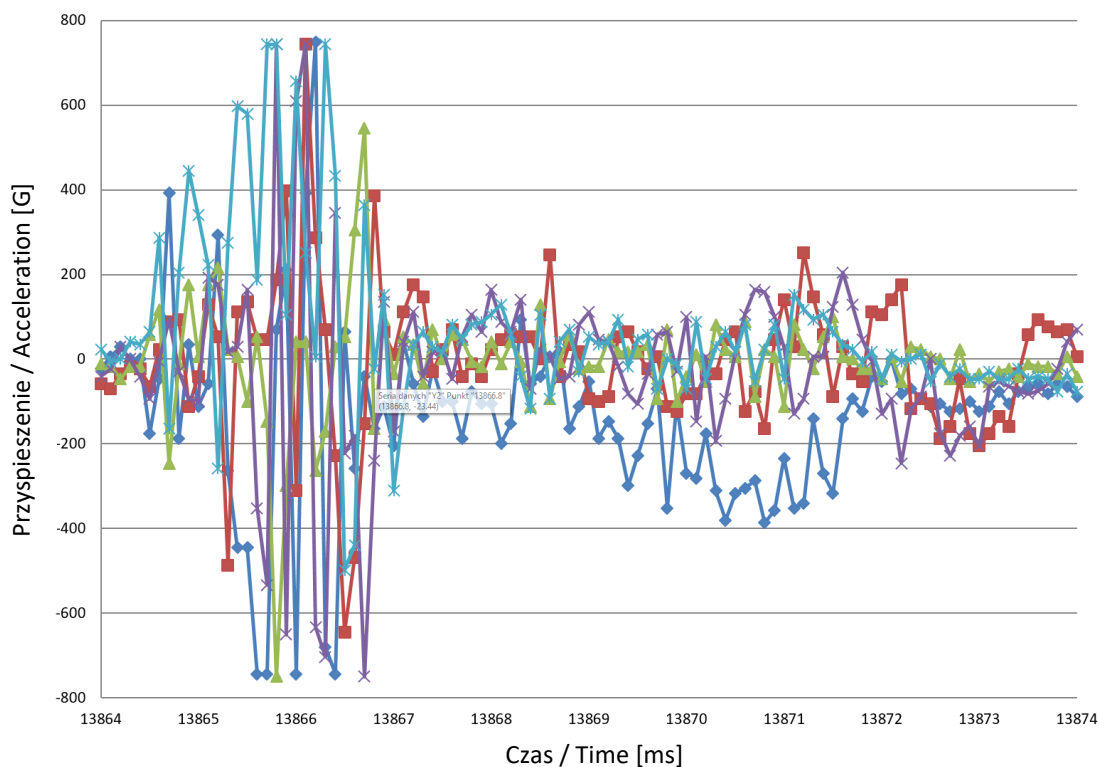
The estimated value of pressure for piston's diameter equal to 48 mm is ca. 4 MPa (40 bar).

### 3.4. Otwieranie spadochronu

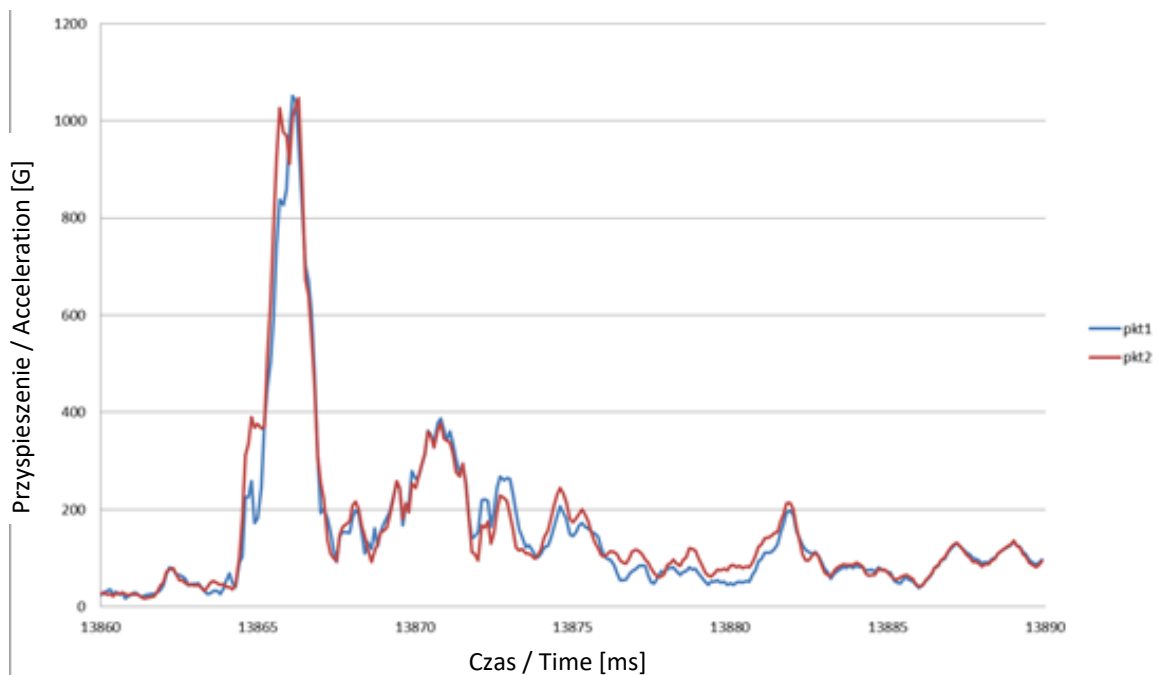
Kolejnym zdarzeniem istotnym dla właściwego działania ICP-R jest proces otwierania spadochronu. Zarejestrowane przez poszczególne akcelerometry przebiegi przyspieszeń w opisywanym procesie pokazano w formie zbiorczej na rys. 8, a na rys. 9 wykres modułu wektora przyspieszeń.

### 3.4. Parachute Opening

The process of parachute opening is a next event important for proper operation of ICP-R. The signals of accelerations recorded by particular accelerometers in the described process are shown in comparative form in Fig. 8, and the diagram of the acceleration vector module in Fig. 9.



Rys. 8. Otwieranie spadochronu  
 Fig. 8. Parachute opening



**Rys. 9. Otwieranie spadochronu - moduł wektora przyspieszeń**

*Fig. 9. Parachute opening – the module of acceleration vector*

Z powyższych przebiegów wynika, że krótkotrwałe przyspieszenia podczas hamowania spadochronu (uwzględniając masę modułu rejestratora  $m = 0,6$  kg) przewyższają  $10000 \text{ m/s}^2$  (1000 G), co odpowiada sile hamującej o wartości około 6000 N (600 kG). Wykres sił wywołanych otwieraniem się spadochronu przedstawiono na rys.10.

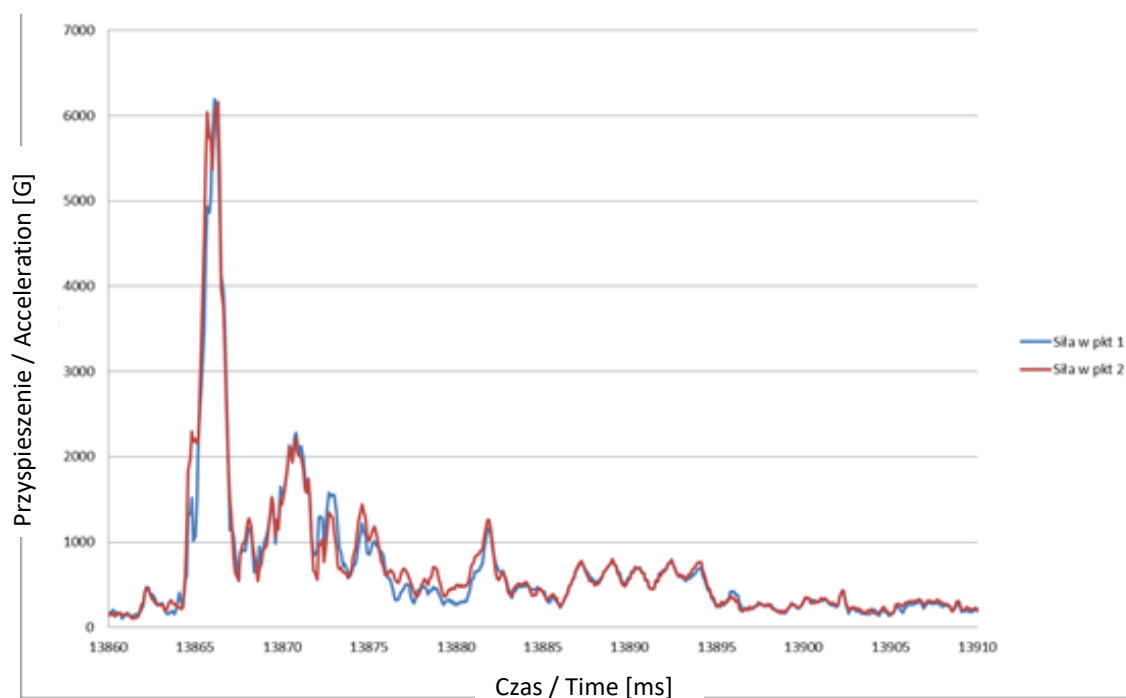
Czasy działania sił na linkę spadochronu (około 3 ms), są na tyle duże, iż naprężenia wywołane przez te siły można traktować jako quasi-statyczne. Uwzględniając powyższe można występujące wartości siły hamowania porównać z wartościami sił zrywających, jakim są poddawane linki podczas stacjonarnych badań niszczących.

Pomierzone wartości maksymalne siły hamowania (siły działającej na linkę) posłużyły do właściwego doboru stalowych linek lotniczych zastosowanych w docelowych egzemplarzach ICP-R.

The above diagrams show that the surges of acceleration at the parachute breaking (regarding the mass of recorder unit  $m = 0.6$  kg) exceed  $10000 \text{ m/s}^2$  (1000 G) corresponding to the braking force of ca. 6000 N (600 kG). The diagram of forces effected by the opening of parachute is presented in Fig. 10.

The forces act into the lines of parachute within a sufficiently long period of time (ca. 3) to assume that the stresses caused by these forces have a quasi-static character. Considering the above the existing braking forces may be compared to values of breaking forces to which the lines are subjected at stationary destructive tests.

The measured values of maximal braking forces (forces acting to the line) were used for proper selection of steel lines in the final items of ICP-R.



**Rys. 10. Siły wywołane otwarciem spadochronu**

**Fig. 10. Forces effected by the opening of parachute**

#### 4. Podsumowanie

W ramach pracy zaprojektowano i wykonano urządzenie do pomiaru i rejestracji przyspieszeń liniowych. Jako inicjator procesu akwizycji danych zastosowano cyfrowy czujnik przyspieszeń liniowych z funkcją wykrywania programowalnych zdarzeń. Rejestrator zamontowano w obudowie o masie równoważnej masie celu termicznego stosowanego w ICP-R.

Następnie, w ramach badań poligonowych, wykonano szereg eksperymentów polegających na wystrzeleniu pakietu z rejestratorem, odnalezieniu rozcalonego pakietu ze spadochronem oraz odczytu zapisanych danych.

Wyniki badań potwierdziły wystąpienie zjawisk wynikających z konstrukcji ICP-R oraz słuszność zastosowanych metod do pomiaru sił występujących podczas uruchamiania spadochronowego układu hamującego.

Dla przedstawionego w pracy przypadku zakres pomiarowy zastosowanych przyspie-

#### 4. Summary

In the frame of the project the device measuring and recording the linear accelerations was designed and constructed. The digital sensor of linear accelerations with the function for detection of programable events was used as the initiator of data acquisition process. The recorder was integrated in a casing with the mass equivalent to the mass of thermal target employed in ICP-R.

Next, a series of tests was performed on the range where the packet with the recorder was shot up, and the separated packet with the parachute was found, and the recorded data was read out.

The results of tests confirmed the presence of effects resulting from the design of ICP-R, and the correctness of methods used for measurement of forces happening at activation of the braking parachute.

The measurement range of accelerometers used for the case presented in the paper

szeniomierzy nie był wystarczający (zakres liniowej pracy – 500 G, całkowity około 700 G), więc dokładność pomiarów dla przyspieszeń na granicy zakresu będzie ograniczona.

Naturalne obroty ICP-R względem osi podłużnej, które wynoszą około 20 obrotów na sekundę oraz ograniczony zakres przyspieszeniomierzy utrudniały interpretację danych, dlatego analizowano moduł wektora przyspieszeń, a nie jego poszczególne składowe.

Powyższe sugerowałyby zastosowanie przyspieszeniomierzy o większym zakresie pomiarowym, jednak wysoki koszt takich elementów oraz osiągnięty cel pracy zakończył badania na obecnym poziomie sprzętowym.

Podstawowym problemem ICP-R były ograniczenia wytrzymałościowe zastosowanych wcześniej materiałów konstrukcyjnych spadochronu, w szczególności linki stalowej łączącej cel termiczny ze spadochronem.

Wyniki badań umożliwiły optymalny pod względem wytrzymałościowym (przy zachowaniu ograniczeń objętościowych) dobór materiałów i kształtu spadochronu.

was not sufficient (the range of linear operation – 500 G, total ca. 700 G) and the accuracy of measurements in the extremes of the range is limited.

Typical rotation of ICP-R against the longitudinal axis equal to ca. 20 rev per sec and the limited range of accelerometers were harmful for data interpretation, and due to it the module of the acceleration vector was analysed instead of its particular components.

The above mentioned could suggest the use of accelerometers with greater measurement range, but the high cost of them, and the achieved objective of the project have terminated the investigations on the present level of hardware.

The main problem of ICP-R were caused by the strength limitations of the parachute design materials which were earlier applied, and especially the steel line connecting the thermal target with parachute.

The results of investigations provided an optimal choice of strength of materials and shape of parachute (at existing capacity limitations).

## Literatura / Literature

Cassady, L., Ray, E., Truong, T. (2012). Aerodynamic Reconstruction Applied to Parachute Test Vehicle Flight Data, Analysis, AIAA, Houston, TX, 77058, USA.

Balakalyani, G. Jagadeesh, G. (2017). An accelerometer balance for aerodynamic force measurements over Hypervelocity Ballistic models in shock tunnel, Bangalore: Indian Institute of Science.

Analog Devices. (2010). High Performance Wide Bandwidth Accelerometer, [www.analog.com](http://www.analog.com)

United States Patent. (2016). Parachute data recorder system, US 9522743 B1.

SPANSION. (2008). S29GL-N MirrorBit® Flash Family ([www.spansion.com](http://www.spansion.com)).

STMicroelectronics. (2013). MEMS motion sensor ([www.st.com](http://www.st.com)).

STMicroelectronics. (2017). RM0383 Reference manual ([www.st.com](http://www.st.com)).



