

prof. dr hab. inż. Józef GACEK *
mjr mgr inż. Janusz WEISS **
* Wojskowa Akademia Techniczna
** Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

ANALIZA PARAMETRÓW LOTU OBIEKTU BALISTYCZNEGO UZYSKANYCH W ZŁOŻONYM SYSTEMIE POMIAROWYM

Streszczenie: W pracy przedstawiono zintegrowany system pomiarowy parametrów lotu pocisków, w którym do pomiaru oraz akwizycji danych fizycznych wykorzystano czujniki pomiarowe rejestrujące parametry lotu obiektu balistycznego na torze lotu. Wykonanie zadania pomiarowego rejestracji i odtworzenia parametrów lotu pocisku wymagało opracowania systemu rejestracji zdolnego do przetrwania w stanie pracy od chwili odpalenia ładunku pocisku, rejestracji w locie wymaganych parametrów oraz przetrwania chwili zderzenia z Ziemią tak, aby było możliwe odtworzenie zarejestrowanych danych oraz dokonanie ich analizy.

AN ANALYSIS OF BALLISTIC OBJECT FLIGHT PARAMETERS OBTAINED IN COMPLEX MEASURING SYSTEM

Abstract: In this work it was presented integrated measuring system for projectiles flight parameters in which for measurement and acquisition of physical data, measuring gauges were applied registering flight parameters of ballistic object on its flight trajectory. Completion of measuring task to register and recovery flight parameters of the projectile, required to develop registration system enabled to survive in operation status from the moment of firing of projectile propelling/throwing charge, through registration of required parameters during flight including hit to the ground, in order to be possible recovery registered data and realization of their analysis.

1. System rejestracji

Rozwój mikroukładów elektronicznych z możliwością wykonania w jednej strukturze krzemowej konstrukcji mechanicznej przetwornika i elektronicznego układu kondycjonującego sygnał wyjściowy. Układy takie wykonywane są w technologii MEMS (ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*), określane jako miniaturowe urządzenia elektromechaniczne, MEMS to urządzenia zawierające trójwymiarowe mikrostruktury elektroniczne i mechaniczne o wymiarach mikrometrowych a nawet nanometrowych wykonane w jednym cyklu technologicznym. Rozmiary takich układów nie przekraczają zwykle powierzchni kilku milimetrów, masa tych układów nie przekracza wartości kilku miligramów. Parametry metrologiczne tych układów i odporność na udary mechaniczne i przeciążenia predysponują je do badań parametrów lotu pocisków balistycznych.

W opracowanym systemie rejestracji parametrów lotu pocisku należało rozwiązać następujące zadania:

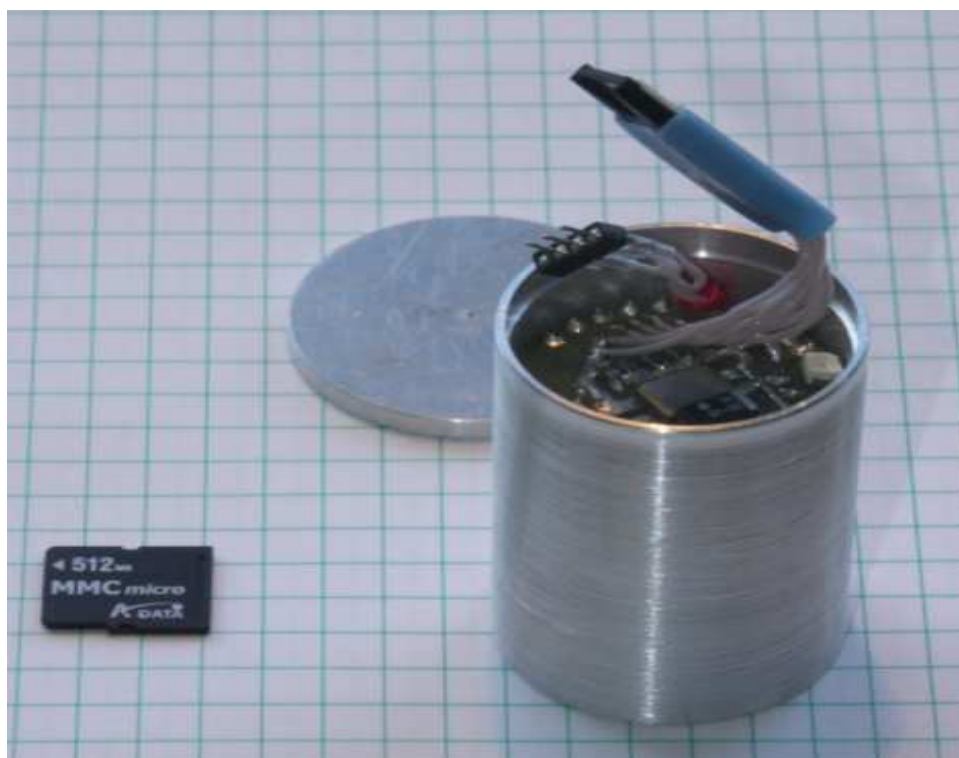
- selekcję podzespołów przydatnych do budowy systemu,
- zaprojektować i wykonać zasobnik systemu rejestracji,

- zaprojektować i wykonać układy elektroniczne,
- opracować rozwiązanie zabudowy i przyłączenie sensorów,
- wykonać stanowiska do badań laboratoryjnych,
- przeprowadzić badania zespołów systemu pod kątem odporności na przeciążenia,
- wykonać oprogramowanie systemu,
- dokonać analizy wykonanych rejestracji,
- przygotować program badań wykonanych układów pomiarowych,
- przygotować metodyki oraz stanowisko badawcze do przeprowadzenia prób doświadczalnych, laboratoryjnych i poligonowych.

1.1. Moduł kontrolno pomiarowy DSP

Moduł kontrolno pomiarowy DSP jest specjalną miniaturową wersją rejestratora PRP-J5. Rejestrator składa się z modułu rejestratora z przyłączonymi sensorami oraz wymiennej karty pamięci FLASH. Uzupełnieniem jest czytnik kart pamięci, interfejs połączenia z komputerem i oprogramowanie nadzorujące.

Zasada działania systemu rejestracji polega na zapisaniu funkcji rejestratora na wymiennej karcie pamięci FLASH. Rozpoczęcie rejestracji następuje po załączeniu zworki na obudowie zapalnika pocisku. Takie rozwiązanie pozwala na wyłączenie rejestracji w chwili penetracji pocisku w Ziemi (zworka zostaje zerwana). Rejestrator zapisuje dane w pamięci FLASH do czasu wyłączenia rejestracji lub przekroczenia deklarowanego rozmiaru pamięci. Zastosowana pamięć 512MB zapewnia co najmniej kilkunastominutowy zapis danych. Po zakończeniu rejestracji i wyłączeniu zasilania rejestratora odczytuje się na karcie pamięci MMC plik wytworzony w procesie rejestracji. Rysunek 1 przedstawia widok rejestratora z przyłączonymi sensorami przyspieszenia i giroskopami MEMS w wersji obudowanej i zabezpieczonej przed udarami mechanicznymi (duralowa obudowa).

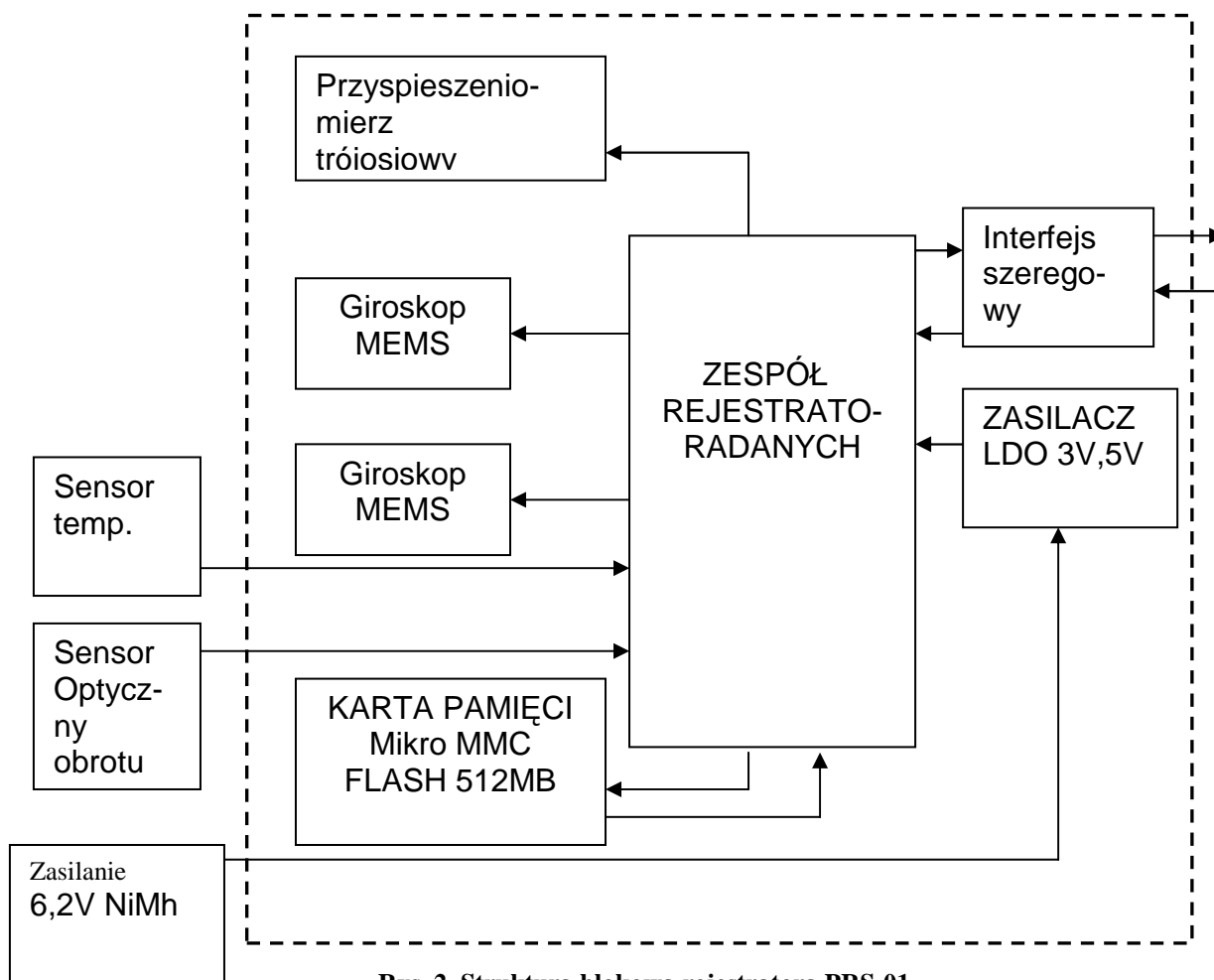


Rys. 1. Rejestrator do badań parametrów lotu pocisku mózdzierzowego

Karta pamięci rejestratora widoczna na zdjęciu obok rejestratora umieszczona jest w górnej części rejestratora i posiada specjalnie wykonane złącze pozwalające na odczyt danych po jej wyjęciu z urządzenia. Widoczne również jest na zdjęciu złącze do programowania rejestratora

i pracy „on line”. Umieszczenie rejestratora w duralowym cylindrze pozwala na zredukowanie działających przyspieszeń w chwili jego przyziemienia.

Moduł rejestratora bazuje na specjalizowanym układzie mikrokomputera jednocukładowego z wejściami analogowymi, interfejsem szeregowym i interfejsem pamięci FLASH. Rejestrator zasilany jest napięciem 3 V z zasilacza typu LDO zabezpieczającym jego poprawną pracę dla napięć zasilania z zakresu (4.5 do 12)V. Interfejs szeregowy pozwala na kontrolę funkcji rejestratora danych, oraz pracę rejestratora w trybie „ON LINE” z przyłączonym komputerem osobistym. Schemat blokowy rejestratora ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Struktura blokowa rejestratora PRS-01

Przedstawione na schemacie elementy składowe systemu rejestracji danych zostały zaprojektowane i wykonane jako specjalizowane układy do pracy w warunkach chwilowych przyspieszeń na poziomie 2000G. Jako podstawowe założenie konstrukcyjne została przyjęta zasada minimalizacji liczby układów, poboru prądu i masy. Poniżej prezentowane są szczegóły rozwiązań konstrukcyjnych opracowanego urządzenia.

1.1.1. Zespół rejestratora danych

Układ zawiera pomiarowy mikrokomputer jednocukładowy z wewnętrznym przetwornikiem AC o rozdzielczości 12bit z programowanym wzmacniaczem sygnałów pomiarowych. Układ posiada 12 wejść pomiarowych, wyprowadzonych na punkty połączeń z sensorami.

1.1.2. Zasilacz LDO

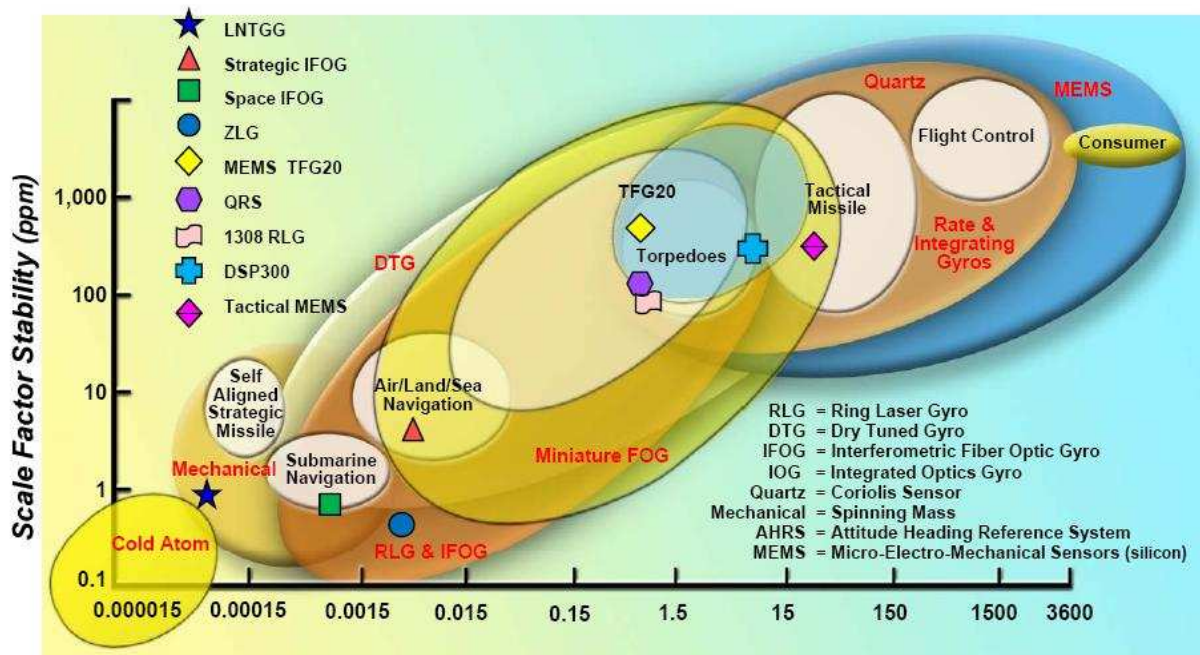
Zasilacz układów składa się z dwóch zasilaczy monolitycznych dostarczających odpowiednio napięcie 3V oraz 5V. Układy posiadają wewnętrzne zabezpieczenia nadprądowe. Napięcie zasilania 5V przyłączone jest do giroskopów MEMS przetwornika temperatury i sensora optycznego. Napięciem 3V zasilany jest przyspieszeniomierz trójosiowy i mikrokomputer rejestratora. Układy zasilające przyłączone są do chemicznego źródła zasilania NiMh o napięciu 7,2V i pojemności 80 mAh.

1.1.3. Giroskop MEMS

Giroskopy MEMS są przetwornikami mierzącymi prędkość kątową. Układ ADXRS 150 firmy Analog Devices jest przykładem zaawansowanej technologii wykonania takiego przetwornika.

Układ ten zawiera drgającą strukturę krzemową pobudzaną do drgań polem elektrycznym wytwarzanym przez wewnętrzną przetwornicę, zmiana prędkości kątowej powoduje wytworzenie proporcjonalnego sygnału napięciowego o wartości 1V/90deg/s. Przetworniki tego typu posiadają dużą odporność na udary i przyspieszenia sięgającą 10000g, małe wymiary 8 x 8 x 4 mm i dokładność pomiaru poniżej 0,5%. Na rysunku nr 3 przedstawiono aplikacje stosowanych układów giroskopowych stosowanych przemysłowo.

Gyroscope Performance



Rys. 3. Aplikacje układów giroskopowych

Obwody elektroniczne giroskopu wykonane zostały wg zaleceń producenta firmy Analog Devices. Wyprowadzenia płytki tego układu przyłączone są do dwóch wejść pomiarowych rejestratora, jedno przyjmuje sygnał napięciowy prędkości kątowej drugie sygnał referencyjny odniesienia (temperatury układu MEMS). Parametry układu zawiera załącznik z danymi producenta. Układy zmontowane są w formie sześcianu, na którego ściankach znajdują się sensory pomiarowe. Moduł pomiarowy zawiera dwa takie układy umieszczone na są-

siednich bokach sześcianu. Układy montowane są w obudowach BGA. Dane szczegółowe parametrów zastosowanego sensora ADXRS150 załączone są w nocie katalogowej producenta.

1.1.4. Zespół przyspieszeniomierza trójosiowego

Przyspieszeniomierze – pomiary przyspieszeń, pomiar orientacji względem pola grawitacyjnego ziemi, pomiar orientacji przestrzennej w układach INS.

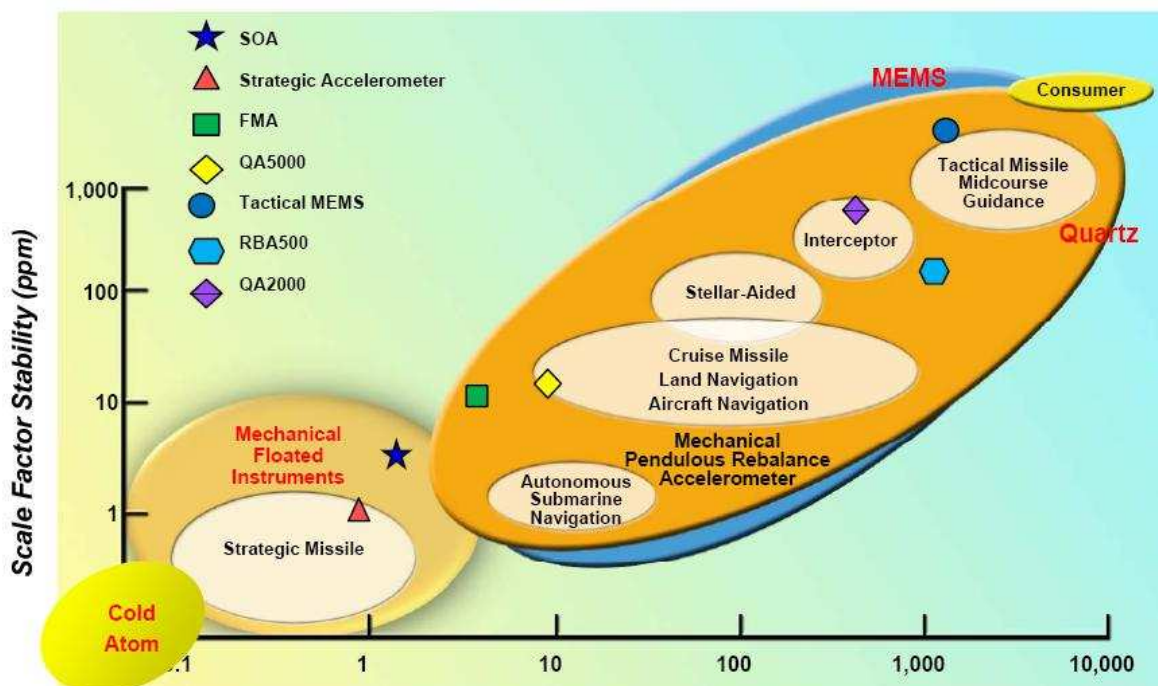
Przykładem takiego przetwornika MEMS jest trzyosiowy sensor przyspieszenia z wyjściem cyfrowym typu LIS331DLH zawarty w obudowie 3 x 3 x1 mm, dokładność pomiaru jest na poziomie 12 bitów. Ważniejsze parametry:

Odporność na wibracje i udary do 10000g, automatyczne skalowanie zakresu +/- 2 g, +/-4 g, +/- 8 g, zakres napięć zasilania 2,16V - 3,6V, częstość wyprowadzania danych do 400Hz, zakres temperatur pracy -40 do +80deg.

Sensor przyspieszenia z termiczną metodą pomiaru firmy MEMSIC wytrzymuje bez uszkodzeń przyspieszenie o wartości 50000g przy zakresie pomiarowym 1,7g i rozdzielczości lepszej od 2mg. Umieszczony w obudowie o wymiarach 5 x 5 x2mm zawiera złożone obwody kondycjonowania sygnałów pomiaru przyspieszeń w dwóch osiach. Zasada działania polega na wytworzeniu przez półprzewodnik wewnątrz układu miniaturowego pęcherza rozgranego powietrza, który przemieszcza się pod wpływem przyspieszenia.

Tendencje w budowie i zastosowaniach przyspieszeniomierzy pokazuje rysunek 4.

Accelerometer Performance



Rys. 4. Aplikacje przyspieszeniomierzy

Układ elektroniczny przyspieszeniomierza trójosiowego wykorzystuje monolityczny przetwornik LIS3L06AL lub LIS331DHL. Układ ten umieszczony jest na płytce sąsiadującej z płytkami giroskopów MEMS. Uzupełnieniem obwodów wyjściowych przyspieszeniomierza jest przyłączenie kondensatorów monolitycznych ograniczających pasmo przenoszenia sensora od częstotliwości 100Hz. Pełne informacje o układzie LIS3L06AL załączone są w nocie

katalogowej producenta.

1.1.5. Przetwornik temperatury

W układzie pomiarowym został zastosowany przetwornik półprzewodnikowy w postaci układu scalonego typu LM335. Jest to przetwornik umieszczony w obudowie SO8 przyłączony w układzie trójprzewodowym. Dane techniczne przetwornika załączone są w nocie katalogowej producenta.

1.1.6. Optyczny sensor obrotu

Jako element pomiaru prędkości obrotowej pocisku zastosowany został fototranzystor typu PT204-6C. Element ten został wybrany z szeregu innych optoelementów ze względu na korzystną charakterystykę luminacja-napięcie i odporność na udary mechaniczne. Dodatkowym atutem tego sensora jest dogodne mocowanie przez umieszczenie go w kalibrowanym otworze zapalnika. Sensor przyłączony jest w układzie potencjometrycznym z szeregowo przyłączonym rezystorem o wartości 10 k Ω .

2. Oprogramowanie mikrokomputera rejestratora PRS-01

Oprogramowanie procesora systemu rejestracji PRS-01 wykonane zostało w asemblerze i realizuje następujące funkcje:

- dwukierunkową asynchroniczną transmisję danych 56kbaud,
- ustawianie parametrów rejestracji zgodnie z plikiem konfiguracji,
- ustawienie protokołu transmisji SPI komunikacji z pamięcią,
- odczytanie deskryptora karty pamięci FLASH mikroMMC,
- sprawdzenie poprawności sektorów pamięci przed rejestracją,
- zaprogramowanie interwału i ustawienie przerw generatora podstawy czasu,
- włączenie procedury kontroli zapisu danych CRC podczas rejestracji,
- ustalenie ramki danych i protokołu potwierdzeń dla pracy „on line”,
- aktualizacja ustawień współczynników kalibracji na podstawie uśrednionych wartości z pracy w trybie „on line”.

Zaimplementowane oprogramowanie wykorzystuje całą przestrzeń pamięci programu mikrokontrolera, wszystkie współczynniki kalibracji umieszczone są w wymiennej pamięci nieulotnej FLASH. Podstawową trudnością obsługi takiej pamięci jest to, że jej protokół komunikacji określają parametry na niej zapisane. Zapis takiej pamięci z poziomu komputera PC nie stanowi problemu, bowiem jest to struktura typowa dla jednostek dyskowych. Zmienny charakter parametrów deskryptora powoduje, że nie wszystkie karty FLASH są poprawnie obsługiwane. Dlatego wybrano protokół kart MMC i procesor nie obsługuje bliźniaczych kart SD. Decyzja wyboru tych kart podyktowana została tym, że są to obecnie najmniejsze karty pamięci dostępne na rynku.

3. Badania poligonowe

Podstawowym zadaniem była rejestracja parametrów lotu 98 mm granatu moździerzowego oraz ocena poprawności działania rejestratora przy odpaleniu na ładunku zasadniczym i kacie

$QE = 80$ stopni.

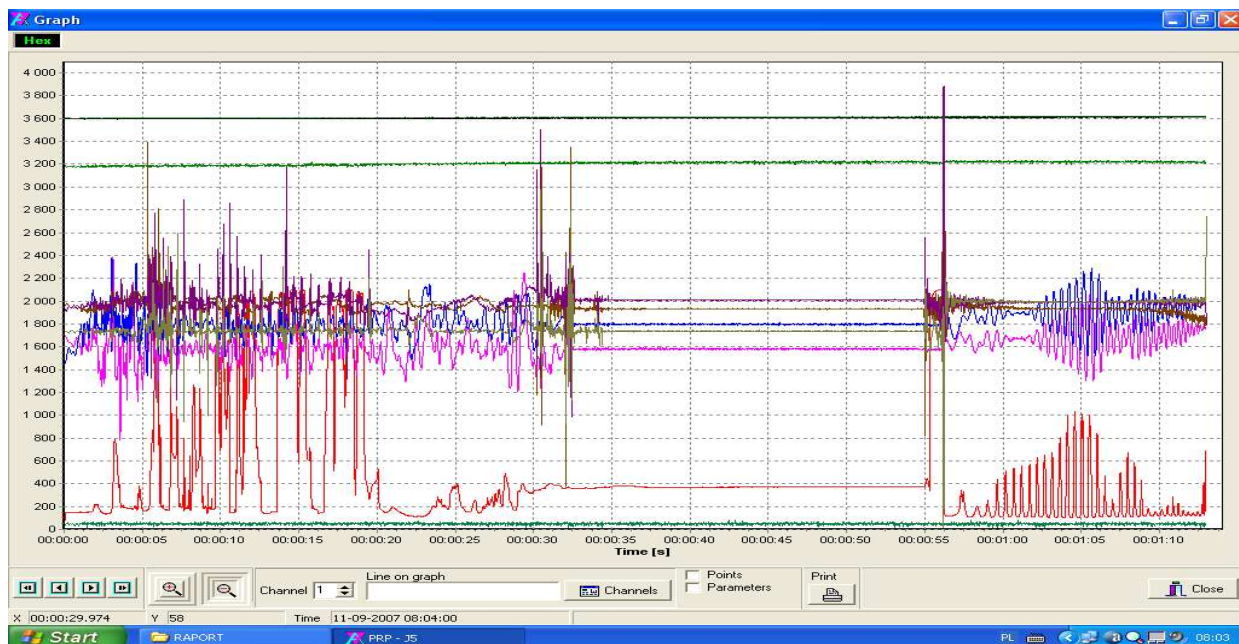
Liczba rejestrowanych kanałów analogowych: 12

Rozdzielczość kanałów analogowych: 12 bit

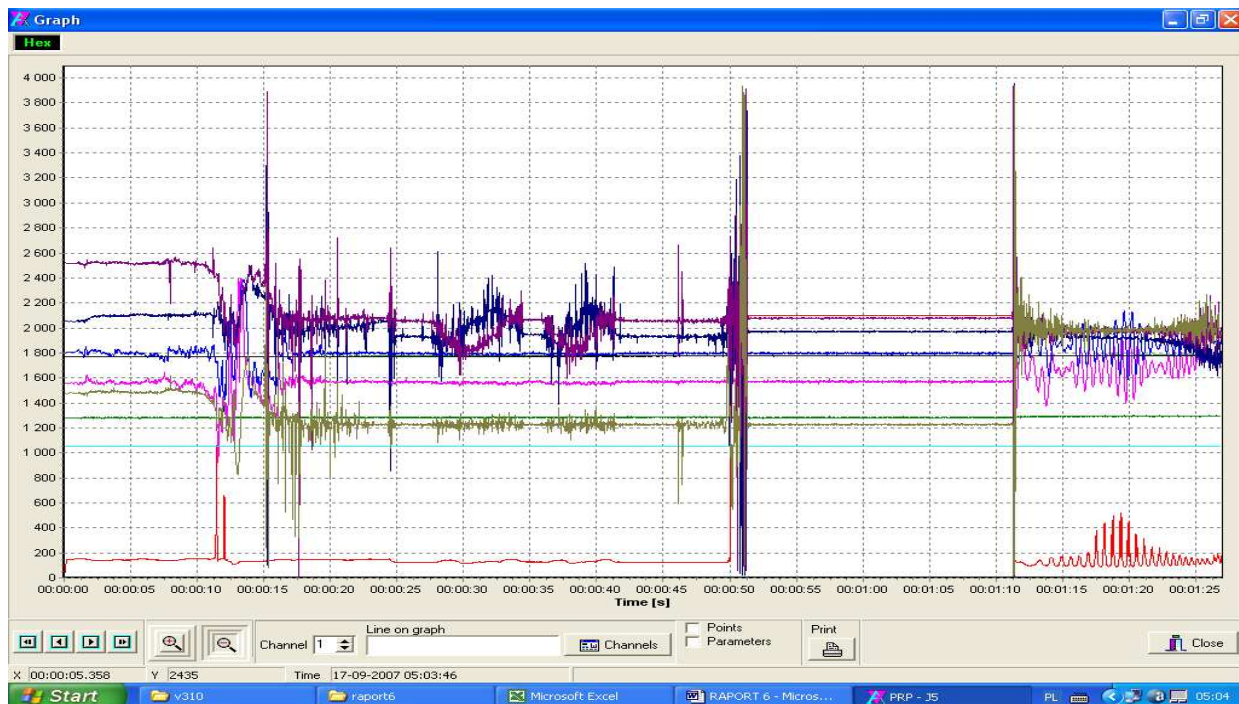
Czas próbkowania: 0.02 s

Moment załączenia rejestratora przyjęto jako zerową sekundę pracy rejestratora.

Próby wykonano na poligonie WITU na wydzielonym obszarze wykorzystując dodatkowo następującą aparaturę badawczą: radar dopplerowski do pomiaru prędkości lotu, odbiornik GPS do lokalizacji pozycji moździerzka i punktu upadku pocisku, aparat fotograficzny o rozdzielczości 5 megapikseli do dokumentacji eksperymentu, kamerę zdjęć szybkich do filmowania lotu pocisku po opuszczeniu lufy na tle specjalnie przygotowanego ekranu, stację do sondowania atmosfery. Na rysunkach nr 5 i 6 przedstawiono zarejestrowane parametry lotu dwóch 98 mmpocisków moździerzowych takie jak: prędkość obrotowa, przyspieszenia liniowe, prędkości kątowe .



Rys. 5.



Rys. 6.

4. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników w badaniach teoretycznych i doświadczalnych można stwierdzić, że:

- 1) Koncepcja implementacji czujników pomiarowych obejmowała uzyskanie informacji z badań parametrów lotu pocisków balistycznych poprzez zabudowanie na pokładzie pocisku kompletnego systemu akwizycji danych.
- 2) Praktyczna realizacja nakreślonych zadań wymagała zbudowania unikalnej bazy badawczej (kompletne urządzenia do prowadzenia takich eksperymentów dla wysokich przyspieszeń sięgających 2000g są aktualnie niedostępne).
- 3) Koncepcja umieszczenia systemu rejestracji w ruchomym zasobniku eliminującym przyspieszenia w wyniku uderzenia pocisku w Ziemię jest bardzo udanym rozwiązaniem pozwalającym na zmniejszenie ryzyka uszkodzenia układów.
- 4) Zastosowanie odrębnych niezależnych systemów pomiarowych pozwala na redundancję rozwiązań sprzętowych i ich bardziej konkurencyjną cenę.
- 5) Miniaturyzacja zespołów umieszczonych na „pokładzie” pocisku, zastosowanie najnowszych miniaturowych sensorów MEMS do pomiaru przyspieszeń i prędkości kątowych, rozszerza możliwość zastosowania ich w praktyce.
- 6) Rezultaty uzyskane na bazie przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych rejestratora i zastosowanych podzespołów są zadowalające i stanowią podstawę do następnych eksperymentów.
- 7) Duża częstość próbkowania powoduje, że obszerne pliki danych niezbyt szybko konwertowane i analizowane są programem Excel, celowa jest więc preselekcja danych ograniczająca pliki do rozmiaru kilku tysięcy rekordów.
- 8) Funkcja pracy ‘on line’ tzw. tryb Test jest szczególnie przydatna do szybkiej walidacji sygnałów pomiarowych.
- 9) Metodyka prowadzenia badań laboratoryjnych opracowana została w celu sprawdzenia elementów i wykonanych zespołów pod kątem przydatności do prowadzenia prób poligonowych i pozwoliła na zebranie cennych doświadczeń z zakresu budowy układów pracujących w warunkach ekstremalnych przyspieszeń.
- 10) Końcowa faza eksperymentów, bazująca na pokładowym systemie rejestrującym, pozwoliła na uzyskanie rzeczywistych danych o parametrach lotu pocisku moździerzowego.
- 11) Nieliczna liczba przeprowadzonych badań poligonowych pozwala z określoną dokładnością określić podstawowe parametry lotu pocisku i potwierdza zadowalającą powtarzalność danych.
- 12) Bardzo przydatny okazał się przetwornik optyczny. Sygnał elektryczny z tego przetwornika pozwolił jednoznacznie określić ilość obrotów jakie wykonał pocisk.

Literatura

- [1]. Gacek J., *Balistyka zewnętrzna. Cz. I. Modelowanie zjawisk balistyki zewnętrznej i dynamiki lotu*, Wydaw. WAT, Warszawa, 1999.
- [2]. Gacek J., *Balistyka zewnętrzna. Cz. II. Analiza dynamicznych właściwości obiektów w locie*, Wydaw. WAT, Warszawa, 1999.
- [3]. Gajda J., *Analiza błędów oraz optymalizacja parametryczna systemów pomiarowych metodami badań modelowych*, SEMINARIUM Komitet Metrologii Polskiej Akademii Nauk Sekcja Aparatury i Systemów Pomiarowych, Warszawa, 2000.
http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~zmetr/sem_jg.rtf.
- [5]. L. BARANOWSKI, J. GACEK, R. DEC, *System identyfikacji parametrycznej obiektu*

- balistycznego*, Materiały III Międzynarodowej Konferencji „Mechanika w Lotnictwie” L-XII, W-wa 2006, str. 153-169, ISBN 83-902194-6-8;
- [6]. L. BARANOWSKI, M. A. KOJDECKI, *Zagadnienie odwrotne balistyki zewnętrznej i algorytm wyznaczania parametrów modeli ruchu pocisków artyleryjskich*, Biul. WAT, vol. LVI, nr 4 (648), 2007, str. 167-186, PL ISSN 0366-4988.