

WYKORZYSTANIE ELEMENTÓW MEMS W MODUŁACH CZASOWYCH O PODWYŻSZONEJ WYTRZYMAŁOŚCI MECHANICZNEJ I PRECYZJI DZIAŁANIA

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości zastosowania oscylatorów MEMS w celu podniesienia wytrzymałości mechanicznej i precyzji działania układów zapalników artyleryjskich z elektronicznymi modułami czasowymi na podstawie wyników prac podjętych w WITU

THE APPLICATION OF MEMS COMPONENTS IN THE MODULES OF THE ENHANCED MECHANICAL RESISTANCE AND THE PRECISION OF ACTION

Abstract: In the paper the possibility of application of MEMS oscillators in order to enhance the mechanical resistance and the precision of action of the artillery fuse systems with electronic time modules were presented on the basis of results of the works taken up in the Military Institute of Armament Technology in Zielonka, Poland.

1. Wstęp

Micro Electro-Mechanical System (MEMS) to urządzenia zawierające trójwymiarowe mikrostruktury elektroniczne i mechaniczne o wymiarach mikrometrowych a nawet nanometrowych. Wymiary całego urządzenia MEMS najczęściej zawierają się między kilkoma mikrometrami, a kilkoma centymetrami. MEMS-y są często wykonane z krzemu. Jednak w ostatnich latach zwiększone zainteresowanie materiałami polimerowymi spowodowało, że zaczęto rezygnować z wykorzystania krzemu na rzecz polimerów. Obecnie najbardziej obiecujący sektor tego rynku stanowią oscylatory typu MEMS. Składają się one z rezonatora oraz sterującego układu scalonego. Wysokie parametry wytrzymałościowe oraz duża stabilność częstotliwości umożliwia zastosowanie ich w modułach elektronicznych zapalników czasowych. Precyzja działania takich zapalników uwarunkowana jest dokładnością zegara systemowego, czyli dokładnością i stabilnością pracy generatora drgań elektrycznych. Kluczowym elementem dla dokładności i stabilności zegara systemowego modułów czasowych jest rezonator. Znane rodzaje oscylatorów charakteryzują się niską odpornością i wytrzymałością mechaniczną, co dyskwalifikuje je, jako elementy wchodzące w skład zapalników artyleryjskich. Pojawienie się na rynku oscylatorów typu MEMS radykalnie zmieniło sytuację.

Pracownia Elektronicznych Systemów Uzbrojenia Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia podjęła prace nad opracowaniem takich modułów, które spełniają wymagania podwyższonej precyzji działania przy jednoczesnym zapewnieniu większej wytrzymałości i odporności w stosunku do obecnie stosowanych.

Parametry katalogowe oscylatorów MEMS pozwalają na spełnienie warunków wytrzymałościowych oraz dotyczących dokładności działania. Przy stabilności generowanych częstotliwości z zakresu 50÷100 ppm zapewniają odporność na udary o wartości 30 000g. Zastosowanie tych oscylatorów pozwoliło na wykonanie w WITU i poddanie badaniom partii zapalników o podwyższonej wytrzymałości jak i zwiększonej dokładności odmierzenia czasu.

2. Analiza techniczna elementów elektronicznych

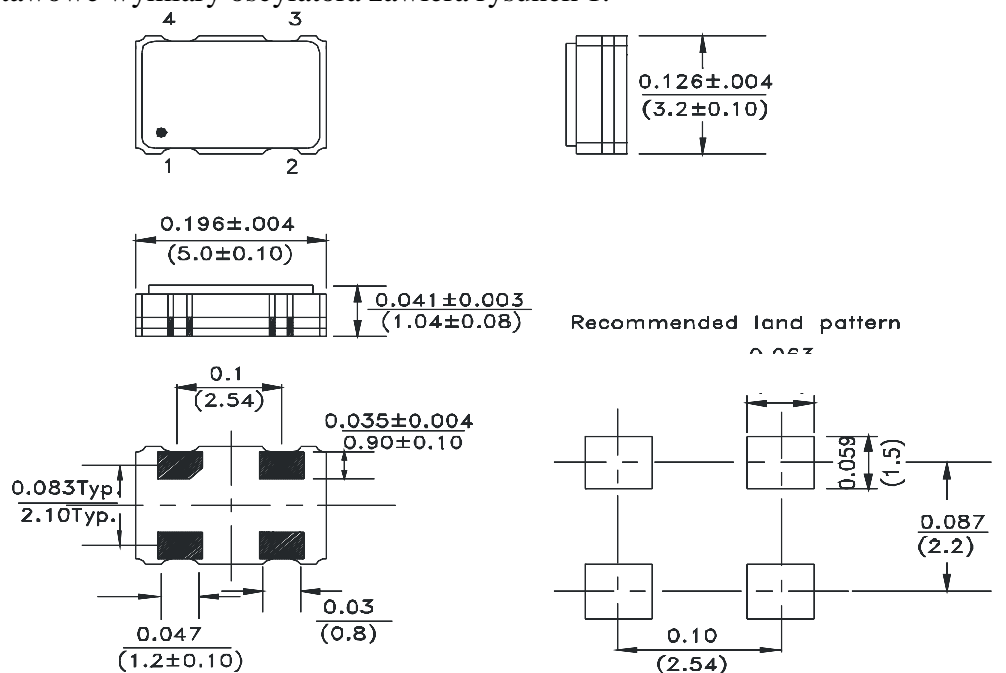
Przed przystąpieniem do prac projektowych przeprowadzone zostały obliczenia odporności na przeciążenia występujące podczas wystrzałów dla elementów takich jak rezystory, kondensatory, elementy półprzewodnikowe oraz rezonatory. Dla większości elementów obliczenia potwierdzone zostały wynikami z praktycznych zastosowań w dotychczas wytwarzanych zapalnikach, takich jak MZR-60, MZR-96M czy AZR-96M. Szczególną uwagę zwrócono, zatem na oscylatory MEMS.

Selekcję oscylatorów MEMS przeprowadzono wielopoziomowo. Wstępnie wytypowano takie, dla których producent gwarantuje odpowiednią wytrzymałość na udary mechaniczne. Następnie rozpatrywano parametry zasilania, w tym zapotrzebowanie energetyczne. Kolejnym kryterium były gabaryty zewnętrzne oscylatorów. W wyniku tak przeprowadzonej weryfikacji wybrany został oscylator typu ASFLM 1-1,8432 MHz-L-C-T.

Oscylator ten charakteryzuje się parametrami:

- wymiary (długość, szerokość, wysokość) 5 x 3,2 x 0,85 mm;
- zasilanie 3,3 ±0,3 V;
- dokładność generowanej częstotliwości ±50 ppm;
- temperatura pracy -40 ÷ +85°C;
- stabilność generowanej częstotliwości ±5 ppm/rok;
- wytrzymałość na przeciążenia do 30 000g.

Podstawowe wymiary oscylatora zawiera rysunek 1.



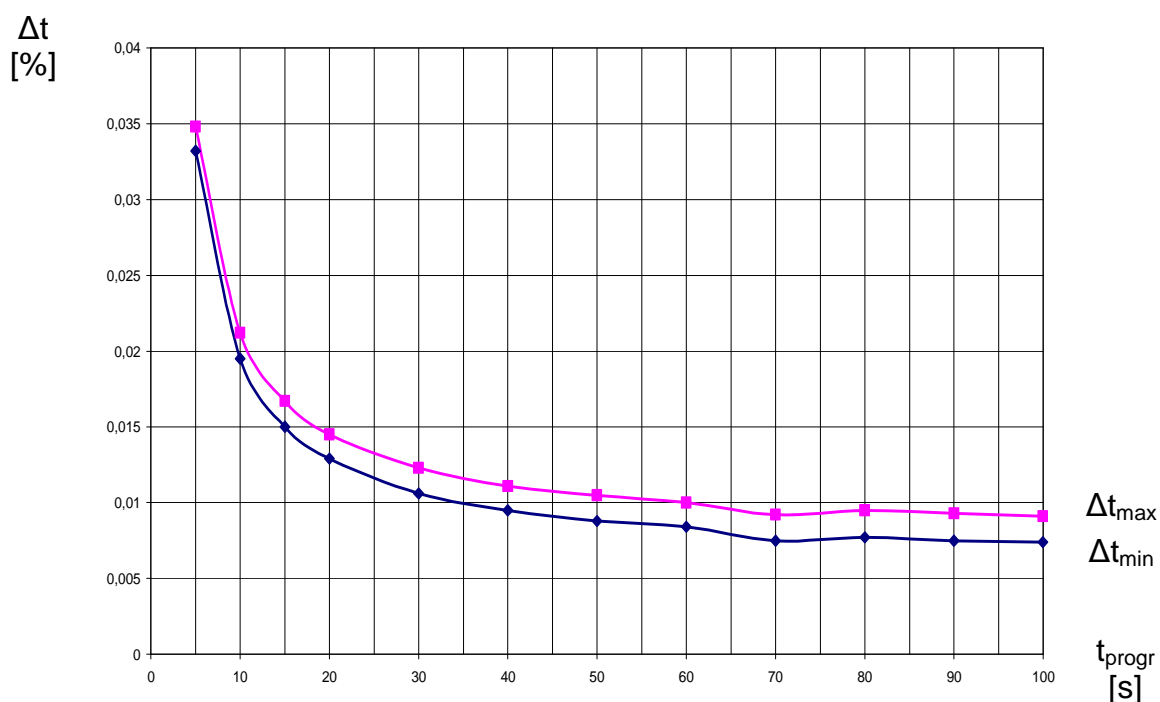
Rys. 1. Podstawowe wymiary typowego oscylatora MEMS.

3. Badanie precyzji działania modułów elektronicznych

Przeprowadzone analizy stanowiły podstawę do rozpoczęcia prac projektowych nowej generacji modułów elektronicznych do zapalników czasowych. W ich wyniku powstała partia modułów do przeprowadzenia badań weryfikujących słuszność przyjętej koncepcji.

Wykonaną partię modułów poddano serii badań.

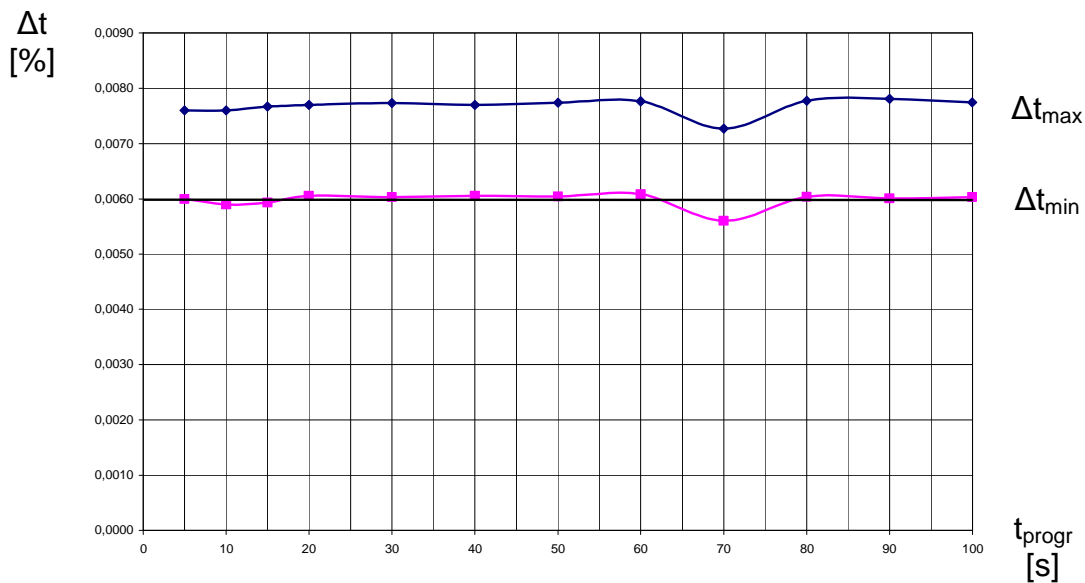
Pierwsze badanie miało na celu określenie rozrzutu parametrów czasowych poszczególnych egzemplarzy oscylatorów. W tym celu wszystkie moduły przebadano w temperaturze 20°C, określając odchyłki czasu zmierzonego w stosunku do zaprogramowanego. Wykonano 4995 pomiarów każdego z 50 modułów, programując czasy w zakresie od 0,1 s do 99,98 s. Następnie wyliczone zostały wartości minimalne i maksymalne odchyłek od zaprogramowanego czasu w ujęciu procentowym. Otrzymane wyniki ilustruje wykres (rys. 2).



Rys. 2. Wykres zależności odchyłki czasu zmierzonego od zaprogramowanego.

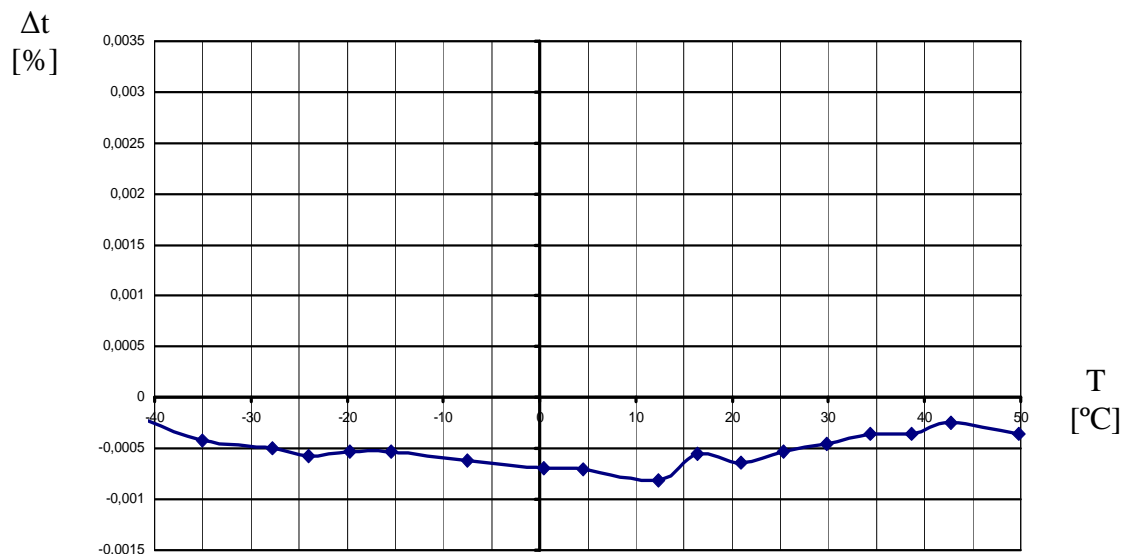
Na wykresie wyraźnie widać szybki wzrost wartości odchyłki przy małych czasach programowania. Sugeruje to występowanie błędu systematycznego. Jego wartość oszacowana została na 1,36 ms. Błąd ten został matematycznie uwzględniony w otrzymanych wynikach pomiarów, co pozwoliło na stworzenie wykresu skorygowanego, przedstawionego na rysunku 3.

Po wprowadzeniu korekty błędu systematycznego procentowa jego wartość jest praktycznie stała w funkcji czasu pracy i wynosi mniej niż 0,008%. Przebieg charakterystyki sugeruje, że wartość błędu systematycznego została niedoszacowana i istnieje możliwość zredukowania odchyłek nawet do wartości rzędu $\pm 0,001\%$.



Rys. 3. Wykres zależności odchyłki czasu zmierzonego od zaprogramowanego (Po korekcie błędu systematycznego)

W celu sprawdzenia wpływu temperatury na stabilność pracy oscylatorów MEMS wykonane zostały pomiary częstotliwości generatorów w pełnym zakresie przewidywanych temperatur pracy zapalników. Pomiaram poddano także całą partię wykonanych modułów czasowych. Po matematycznym skorygowaniu błędu systematycznego wykres błędów zmierzanego czasu w funkcji temperatury przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Wykres zależności błędu mierzenia czasu od temperatury (Po korekcie błędu systematycznego)

Z wykresu wynika, że błąd pomiaru czasu w funkcji temperatury jest praktycznie stały i nie przekracza wartości 0,001%. Można więc uznać, że badane moduły są niewrażliwe na zmiany temperatury.

4. Badanie odporności i wytrzymałości modułów czasowych na narażenia mechaniczne

Badania odporności i wytrzymałości modułów na narażenia mechaniczne przeprowadzono na młocie Masseta. Przed rozpoczęciem badań należało uwiarygodnić urządzenie pomiarowe. W tym celu przeprowadzone zostało skalowanie młota Masseta w warunkach odpowiadających planowanym pomiarom. Skalowanie zostało przeprowadzone za pomocą czujników piezoelektrycznych mierzących przyspieszenie przy danej masie, uwzględniającej sam młot oraz obiekt badań umocowany w uchwycie. Wyniki skalowania w interesującym nas zakresie zawiera tabela 1.

Tabela 1. Wyniki skalowania młota Masseta.

Nr zęba	18	19	20	21	22	23	24	25
a_s [g]	23384	25763	28095	30402	32702	35009	37337	39696

Górna granica wartości uzyskiwanych przeciążeń dochodzi niemal do 40 000g. Daje to możliwość sprawdzenia odporności i wytrzymałości zapalników przy przeciążeniach występujących podczas wystrzału ze wszystkich znanych artyleryjskich środków ogniowych. Badaniom poddane zostały moduły czasowe w czepcach, zalane masą zalewową i umieszczone w odpowiednich uchwytach. Przygotowany do badań podzespół pokazuje foto 1.



Foto 1. Układ czasowy przygotowany do badania odporności i wytrzymałości na udary mechaniczne na młocie Masseta.

Wskaźnikiem pozytywnego wyniku badania był prawidłowy pomiar zaprogramowanego czasu. Wyniki badań podano w tabeli 2.

Tabela 2. Sprawdzenie poprawności działania po danym narażeniu.

Nr modułu	Numer zęba młota Masseta	Czas zaprogramowany [s]	Czas zmierzony [s]
1	21	10	10,00
2	25	10	9,97
3	25	10	10,00
4	25	10	10,00
5	25	6	6,03
6	25	6	6,00
7	25	1	1,00
8	25	0,2	0,22
9	25	0,5	0,50
10	25	1,5	1,50
11	25	2	2,00
12	25	3	3,00
13	25	4	4,00

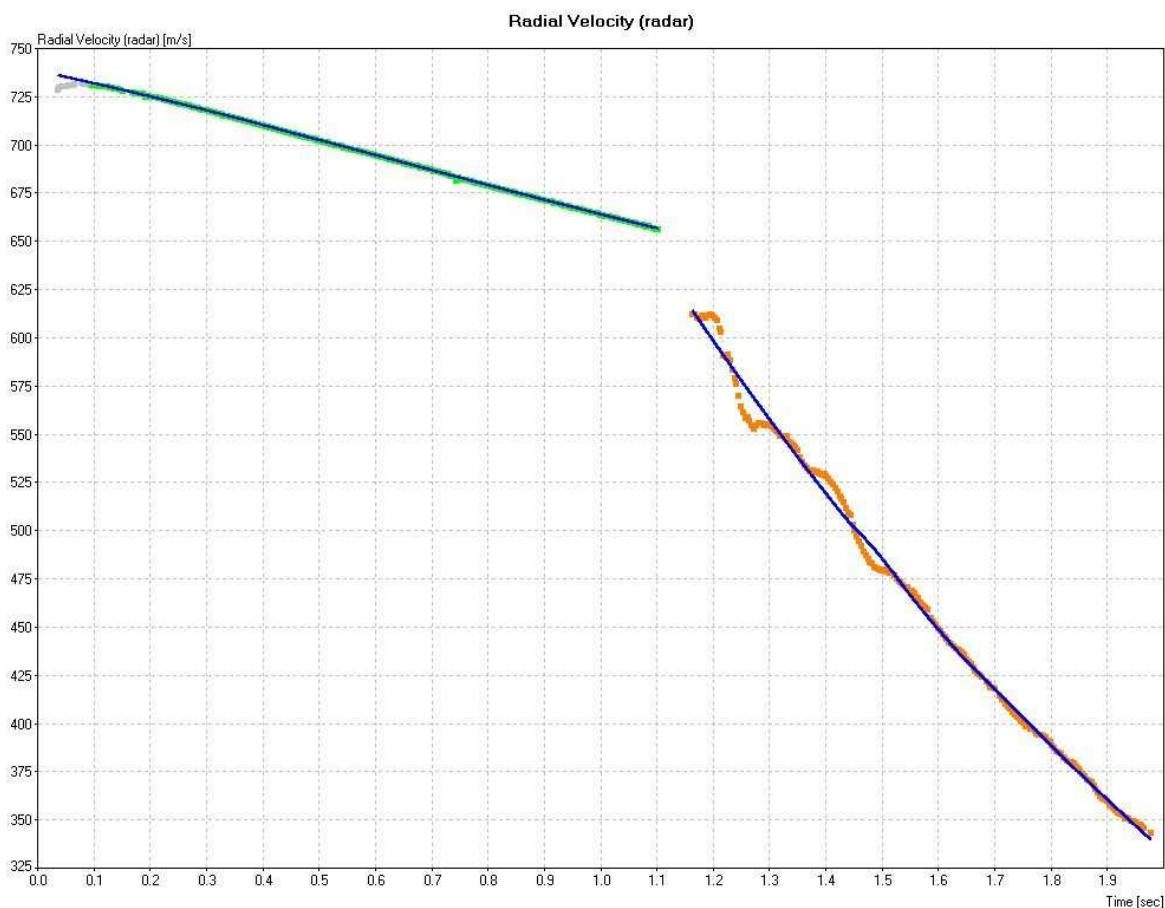
Wyniki badań potwierdziły poprawność działania modułów przy narażeniach mechanicznych o wartościach dochodzących do 40 000g.

5. Badanie strzelaniem

Ostatecznym sprawdzianem poprawności działania modułów było badanie strzelaniem. W tym celu zestawiono kompletne zapalniki, używając do ich wykonania korpusów i zespołów zabezpieczająco – uzbrajających z zapalników AZR-96M.

Badania przeprowadzono na poligonie w Stalowej Woli. Do strzelań użyto 125 mm armaty czołgowej i naboji z pociskami OF-19 elaborowanymi obojętnie, z 200 gramową podsypką z prochu czarnego. Oddano 3 strzały przy ładunku Ż40, pomniejszonym o 1 kg prochu 12/7 i 3 strzały przy ładunku Ż40.

Czasy rozcalenia mierzono przy pomocy radaru Dopplera. Przykładowy wykres lotu pocisku przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Radarowe zobrazowanie lotu pocisku (przykład).

Ze względu na narzucone warunki strzelania pierwszy strzał dał wynik negatywny, ponieważ zaprogramowano zapalnik na zbyt duży czas zadziałania. W efekcie rozalenie nastąpiło po upadku pocisku na ziemię. Przy pozostałych wystrzałach czas zaprogramowany znacznie skrócono. Wyniki pomiarów przedstawia tabela 3.

Tabela 3. Wyniki badania strzelaniem dla modułu czasowego.

Nr strzału	Nr zapalnika	Czas program. [s]	Ładunek	Czas odmierzony [s]	Δt [ms]	Uwagi
1	46	1,00	Ż40-1kg 12/7	0,75	-250	pocisk uderzył w ziemię
2	13	0,50	Ż40-1kg 12/7	1,10	600	zadziałanie prawidłowe
3	12	0,30	Ż40-1kg 12/7	1,00	700	zadziałanie prawidłowe
4	21	0,10	Ż40	(0,66)	560	zadziałanie prawidłowe
5	48	0,10	Ż40	(0,65)	550	zadziałanie prawidłowe
6	41	0,10	Ż40	(0,66)	560	zadziałanie prawidłowe

Wykresy toru lotu dawały świadectwo rozcażeń i pozwalały na określenie czasu rozcalenia pocisku. Zmierzone czasy odbiegały od zaprogramowanych, jednak błąd czasowy był zbliżony dla wszystkich wystrzałów. Pozwala to sądzić, że moduły elektroniczne działały prawidłowo a za powstały błąd odpowiada bezwładność układu zabezpieczająco-uzbrajającego, który podaje sygnał startu na układ czasowy. Dlatego wyniki strzelania dla modułu czasowego należy uznać za pozytywne.

6. Wnioski

Przy aktualnie stosowanych zapalnikach badania prowadzone były dla udarów o przeciążeniach nie przekraczających 25 000g. (zapalnik AZR-96M). Rozszerzenie asortymentu sprzętu artyleryjskiego wykorzystującego zapalniki z elektronicznym modułem czasowym poszerzyło zakres przyspieszeń, jakim poddawane będą podczas wystrzału. Zwiększyło też wymagania odnośnie precyzji działania. Szybciej lecący pocisk wymaga precyzyjniejszego określenia czasu zadziałania i dokładniejszego jego odmierzania.

Zastosowanie oscylatorów MEMS w modułach czasowych zapalników dało oczekiwany efekt. Układy czasowe praktycznie uniezależniły się od wpływu zmian temperatury otoczenia a ich dokładność odmierzania czasu wzrosła o rząd wielkości. Dalsze zwiększenie dokładności można uzyskać w prosty sposób, poprzez zmiany w oprogramowaniu procesora. Nie wymaga zmian natomiast zmian procesu technologicznego podczas seryjnej produkcji modułów.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczo-rozwojowego nr OR00004804 pt. "Czasowy zapalnik artyleryjski o podwyższonej wytrzymałości mechanicznej i precyzji działania finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego".