

prof. dr hab. inż. Józef GACEK\*

mgr inż. Grzegorz JĄCZEK\*\*

\* Wojskowa Akademia Techniczna

\*\* Zakłady Metalowe „DEZAMET” S.A

## **BADANIA TEORETYCZNO – DOŚWIADCZALNE ZAPALNIKA PROGRAMOWANEGO LICZBĄ OBROTÓW WŁASNYCH POCISKU**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono koncepcję zapalnika parametrycznego programowanego liczbą obrotów własnych pocisku na torze lotu. Omówiono różnice pomiędzy klasyczną metodą programowania zapalników za pomocą czasu i proponowaną metodą polegającą na podaniu liczby obrotów, po której zapalnik powinien zadziałać. Scharakteryzowano zjawiska i wielkości fizyczne związane z lotem pocisku w atmosferze. Wyszczególniono wymagania, jakim powinien odpowiadać czujnik aby zapewnić niezawodne wyznaczenie obrotów własnych pocisku w różnych warunkach lotu. Uzasadniono wybór czujnika pola magnetycznego Ziemi możliwego do zastosowania w rozpatrywanym zapalniku oraz podano podstawowe charakterystyki techniczne czujnika. Przedstawiono budowę zapalnika ze szczegółowym opisem zasady działania układu elektronicznego wykrywającego zmianę położenia zapalnika względem pola magnetycznego ziemi.

**Słowa kluczowe:** zapalniki parametryczne, wyznaczenie obrotów własnych pocisku, zliczanie obrotów, geomagnetyzm, czujniki pola magnetycznego ziemi

## **THEORETICAL – EXPERIMENTAL RESEARCH OF A FUZE PROGRAMMABLE BY NUMBER OF OWN ROUND ROTATIONS**

**Abstract:** The paper presents the conception of a parametric fuze programmable by number of own round rotations on the flight trajectory. There is discussed the difference between the classical method of programming fuzes using time and proposed method using the number of rotations after which the fuze should work. There are characterized phenomena and the physical parameters connected with flight of the round in the atmosphere. The paper specifies requirements to be fulfilled by the sensor to provide reliable detection of the round own rotations in different flight conditions. The selection of the Earth's magnetic field sensor as a sensor for the examined fuze was substantiated and basic technical characteristic of the sensor was stated. The paper presents design of the fuze including detailed description of the principle of the electronic system detecting the change in the position of the fuse against the magnetic field of the Earth.

**Keywords:** parametric fuze, own round rotation detection, counting revolutions, geomagnetism, the Earth's magnetic field sensors

### **1. Wstęp**

Współczesne pole walki wymaga precyzji w prowadzeniu działań taktycznych, zarówno podczas obrony jak i natarcia. Działania te muszą wykorzystywać wszelkie dostępne formy środków rażenia. Broń, amunicja, systemy kierowania ogniem, komunikacja, rozpoznanie –

wszystkie te środki powinny być opracowane z wykorzystaniem najnowszej wiedzy i technologii.

Jednym z rodzajów zadań bojowych jest niszczenie odkrytych celów nieprzyjaciela – zarówno siły żywej jak i sprzętu. Używa się w tym celu, między innymi, pocisków odłamkowych wybuchających w powietrzu, uzbrojonych w zapalniki parametryczne czasowe.

W typowych konstrukcjach zapalników czasowych, czas odmierza się za pomocą układów pirotechnicznych, mechanicznych i elektronicznych. Nastawa czasowa, od której zależy miejsce wybuchu, przy konkretnych parametrach strzału, może być wprowadzana do zapalnika na wiele sposobów. Zapalniki pirotechniczne posiadają pierścienie nastawcze z zaprasowaną w nich masą pirotechniczną. Zapalniki mechaniczne podobnie jak pirotechniczne posiadają pierścienie nastawcze połączone z mechanizmem zegarowym. Zapalniki elektroniczne mogą posiadać wbudowane programatory z przyciskami, ale programator stanowić może również oddzielne urządzenie. Najnowsze zapalniki, szczególnie do amunicji artyleryjskiej, są programowane podczas strzału w chwili przechodzenia przez część programatora znajdującą się u wylotu lufy.

Chcąc skutecznie zniszczyć cel pocisk odłamkowy wybuchający w powietrzu nad celem musi zadziałać w ściśle określonym punkcie toru lotu. Jednak czas lotu pocisku do tego punktu może okazać się różny od zaprogramowanego w zapalniku. Zjawisko to nazywa się rozrzutem zadziałania pocisków a wpływ na nie mają warunki strzelania. Rozrzut zadziałania pocisków z zapalnikiem czasowym może sięgać od kilku do kilkunastu metrów, w zależności od prędkości wylotowej, czasu lotu, odległości celu, warunków atmosferycznych. Cel o dużych wymiarach może być skutecznie rażony nawet przy rozrzucie zadziałania pocisków dochodzącym do kilku metrów. W przypadku, kiedy cel ukryty jest na przykład w okopach, rowach strzeleckich, odkrytych obiektach fortyfikacyjnych jego wymiary są wówczas bardzo małe. Rozrzut zadziałania pocisków na torze lotu, nad takim celem powinien być wtedy jak najmniejszy.

Celem niniejszej pracy jest wobec powyższego opracowanie zapalnika parametrycznego niekontaktowego, zapewniającego zmniejszenie do minimum rozrzutu zadziałania pocisków na torze lotu w celu niszczenia celów o małej głębokości.

Zapalnik będący tematem pracy, wykorzystywać będzie bardzo rzadko stosowany w konstrukcjach zapalników programowych parametr, którym jest liczba obrotów pocisku wykonanych po przebyciu określonej drogi. Jest to parametr niezależniący miejsce zadziałania zapalnika na torze lotu od prędkości wylotowej, ponieważ droga przebyta w ciągu jednego obrotu zależna jest od skoku bruzd przewodu lufy. Koncepcja programowania zapalnika przedstawiona w niniejszym opracowaniu opiera się na podaniu liczby obrotów, po jakiej zapalnik powinien zadziałać na celem.

Do tej pory, aby spowodować wybuch pocisku w ściśle określonym punkcie na torze lotu, należało odczytać czas osiągnięcia tego punktu w określonych warunkach z tabel strzelniczych i wprowadzić nastawę od zapalnika.

## **2. Środowisko otaczające pocisk i wybór czujnika**

Zapalnik, który podczas lotu pocisku będzie zliczał jego obroty własne (obroty wzdłuż osi podłużnej pocisku), musi posiadać blok z czujnikiem zjawiska fizycznego, zmiennego w trakcie wykonywania przez pocisk obrotu własnego. W celu wybrania najkorzystniejszego czujnika tego zjawiska fizycznego, należy dokonać analizy środowiska otaczającego pocisk na torze lotu. Najistotniejsze zjawiska i wielkości fizyczne charakterystyczne dla ruchu pocisku wraz z zapalnikiem w otoczeniu Ziemi i zmienne w trakcie wykonywania obrotu to:

- a) pole magnetyczne Ziemi i jego natężenie,

- b) przyspieszenie ziemskie,
- c) światło (natężenie lub luminacja),
- d) ruch obrotowy.

Do wykrywania zmian pola magnetycznego Ziemi służą czujniki pola magnetycznego. Przetwarzają one sygnał proporcjonalny do indukcji lub natężenia pola magnetycznego w otoczeniu Ziemi, na sygnał elektryczny. Czujniki przyspieszenia zamieniają wykryte przyspieszenie na sygnał elektryczny proporcjonalny do jego wielkości. Czujniki reagujące na zmianę intensywności docierającego do nich światła mogą wykrywać zarówno światło widzialne, podczerwone i laserowe. W zależności od tego, na jakim elemencie oparta jest budowa czujnika, zmienia się napięcie, oporność lub prąd. Czujnikami ruchu obrotowego w przestrzeni są giroskopy. W tabeli 1 przedstawiono rodzaje czujników, umożliwiających wykrycie zmiennych w trakcie wykonywania przez zapalnik obrotu zjawisk fizycznych.

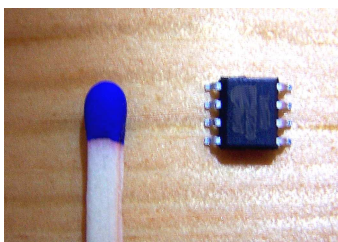
**Tabela 1**

|   | <b>Pole magnetyczne</b>        | <b>Przyspieszenie ziemskie</b> | <b>Światło</b>          | <b>Ruch obrotowy</b>      |
|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 | Czujnik nadprzewodnikowy SQUID | Czujnik w technologii MEMS     | Czujnik optyczny        | Giroskopy MEMS            |
| 2 | Czujnik magnetoptyczny         | Czujnik termiczny              | Czujnik fotoelektryczny | Giroskopy z wirującą masą |
| 3 | Czujnik indukcyjny             | Sejsmometr                     |                         | Giroskopy optyczne        |
| 4 | Czujnik transkonduktorowy      | Grawimetr                      |                         | Giroskopy gazowe          |
| 5 | Hallotron                      | Czujnik piezoelektryczny       |                         |                           |
| 6 | Czujnik AMR                    | Czujnik piezorezystywny        |                         |                           |
| 7 | Czujnik GMR                    | Czujnik optyczny               |                         |                           |
| 8 | Czujnik GMI                    | Czujnik magnetorezystywny      |                         |                           |

Wymienione czujniki mierzą różne rzędy danej wielkości fizycznej. Od zastosowanej metody pomiaru zależy ich konstrukcja. To z kolei wpływa na gabaryty całego urządzenia. Czujniki umieszczone są w obudowach o rozmiarach pozwalających na umieszczenie ich w zapalnikach o niewielkich rozmiarach. Z analizy czujników, wielkości fizycznych, wielkości zapalnika i zjawisk podczas strzału wynika, że czujnik powinien:

- a) posiadać jak najmniejsze rozmiary,
- b) być odporny na bardzo duże przeciążenia przy strzale i siły odśrodkowe,
- c) posiadać odpowiednią rozdzielczość i czułość,
- d) być zasilany małym napięciem i mieć niski pobór mocy,
- e) być dostępny w handlu,
- f) być możliwie tani,
- g) gwarantować pracę w szerokim zakresie temperatur obniżonych i podwyższonych.

Powyższe wymagania spełniają magnetorezystywne czujniki pola magnetycznego, wykorzystujące anizotropowe zjawisko magnetorezystancji. W literaturze specjalistycznej posiadają oznaczenie AMR (Anisotropic Magnetoresistance). Przykład takiego czujnika pokazany jest na rysunku 1.



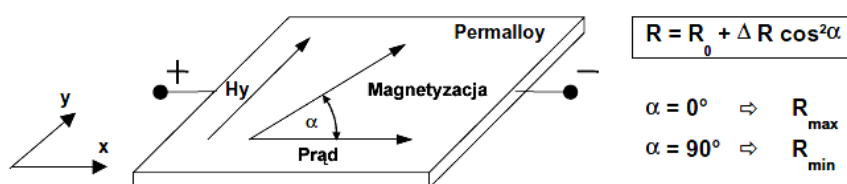
Rysunek 1. Przykład czujnika magnetorezystywnego [Opracowanie własne]

### 3. Charakterystyka czujników AMR

Czujniki pola magnetycznego AMR zbudowane są na zasadzie działania mostka Wheatstone'a. Do wytwarzania różnicy potencjałów na wyjściu mostka wykorzystują zjawisko magnetorezystywności, polegające na zmianie oporności materiału permalloy (stop żelaza z niklem), z którego wykonany jest czujnik, w obecności zewnętrznego pola magnetycznego.

Jeżeli na stop permalloy w postaci taśmy nie oddziałuje zewnętrzne pole magnetyczne ( $H_x = 0$ ) to ma on wektor magnetyzacji równoległy do kierunku przepływu prądu. Kierunek magnesowania w kierunku paska jest nadawany na skutek anizotropii indukowanej w procesie wytwarzania warstwy.

Jeżeli taśma znajdzie się w zewnętrznym polu magnetycznym o natężeniu  $H$ , równoległym do płaszczyzny permalloyu i prostopadłym do kierunku przepływu prądu, to wewnętrzny wektor magnetyzacji będzie zmieniał się w zależności od kąta  $\alpha$ . W wyniku tego nastąpi zmiana rezystancji  $R$  w zależności od kąta  $\alpha$ . Zależność tę ilustruje rysunek 2.



Rysunek 2. Zjawisko magnetorezystywne w stopie permalloy [Philips]

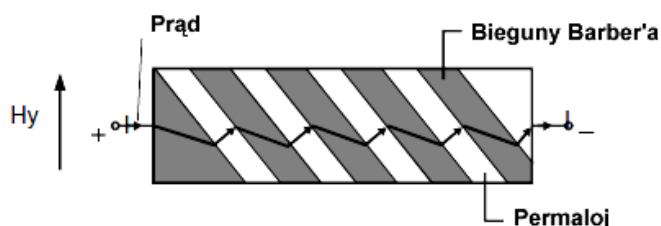
Zależność  $R = R_0 + \Delta R \cos^2 \alpha$  jest równaniem kwadratowym. Z tego wynika, że zależność rezystancji paska permalloyu od natężenia pola magnetycznego nie jest liniowa (rysunek 3a). Dla małych wartości  $H_x$  czułość jest niska, ponadto nie można ściśle określić zwrotu wektora pola magnetycznego.



Rysunek 3. a) nieliniowa zależność rezystancji od natężenia pola magnetycznego, b) zależność rezystancji od pola magnetycznego po linearyzacji [Philips]

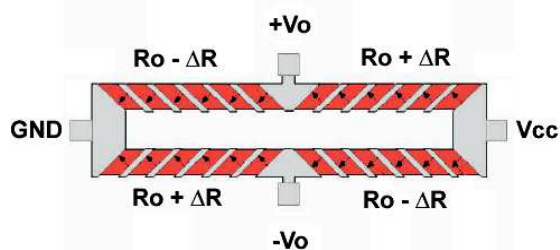
W celu zlinearyzowania przebiegu zmiany rezystancji w funkcji natężenia pola magnetycznego na powierzchni taśmy ze stopu permalloy nałożone są paski aluminiowe pod kątem  $45^\circ$  do osi taśmy (rysunek 4). Ponieważ aluminium posiada wyższą przewodność niż

permaloj zadaniem „biegunów Barber’a” (ang. Barber pole) jest obrócenie kierunku przepływu prądu o  $45^\circ$  (przepływ prądu przyjmuje kształt „zębów piły” – ang. „saw-tooth”), co efektywnie zmienia kąt magnetyzacji w równaniu  $R = R_0 + \Delta R \cos^2 \alpha$  [1].



Rysunek 4. Czujnik AMR z biegunami Barber’a [Philips]

W czujnikach AMR wykorzystuje się cztery paski ze stopu permaloj ułożone w wężykowaty wzór na strukturze krzemu i połączone w konfiguracji mostka Wheatstone’a. Schemat ogólnej budowy tego rodzaju czujnika pokazuje rysunek 5.



Rysunek 5. Struktura [Honeywell]

#### 4. Ogólny opis techniczny i przeznaczenie zapalnika.

Zapalnik, którego koncepcja przedstawiona jest w pracy przeznaczony będzie do uzbrajania amunicji granatnikowej kalibru 40 mm granatników jednostrzałowych lub automatycznych. W przypadku otrzymania pozytywnych wyników, układ elektroniczny zapalnika z czujnikiem obrotów będzie można zastosować w zapalnikach do innych rodzajów amunicji, dla której skuteczność bojowa zależy od zadziałania w ściśle określonym punkcie toru lotu. Przy czym mowa tutaj jest o amunicji, której pociski wystrzeliwane są z luf o przewodzie bruzdowanym. Przewiduje się również przeprowadzenie testów na pociskach rakietowych wystrzeliwanych z granatników bezodrzutowych, które mimo stabilizacji brzechwowej wprowadzane są w ruch obrotowy poprawiający dodatkowo ich celność.

Zapalnik parametryczny programowany liczbą obrotów własnych pocisku składa się z czterech podstawowych zespołów:

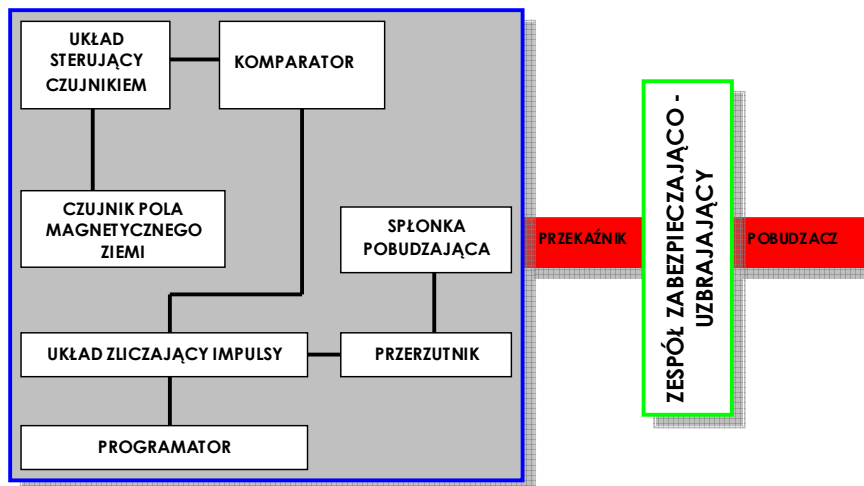
- a) modułu elektronicznego z czujnikiem pola magnetycznego Ziemi,
- b) zespołu zabezpieczająco – uzbrajającego,
- c) łańcucha ogniowego,
- d) źródła zasilania.

W pracy bardziej szczegółowo przedstawiono moduł elektroniczny z czujnikiem pola magnetycznego Ziemi.

#### 5. Moduł elektroniczny z czujnikiem pola magnetycznego Ziemi

Moduł elektroniczny z czujnikiem pola magnetycznego Ziemi zbudowany został w oparciu o części analogowe i cyfrowe bez zastosowania mikroprocesora. Składa się z sześciu głównych układów (rysunek 6):

- a) czujnika pola magnetycznego Ziemi,
- b) układu sterującego czujnikiem pola magnetycznego,
- c) komparatora,
- d) układu zliczającego impulsy z komparatora,
- e) programatora,
- f) przerytnika.



**Rysunek 6. Schemat blokowy zapalnika [Opracowanie własne]**

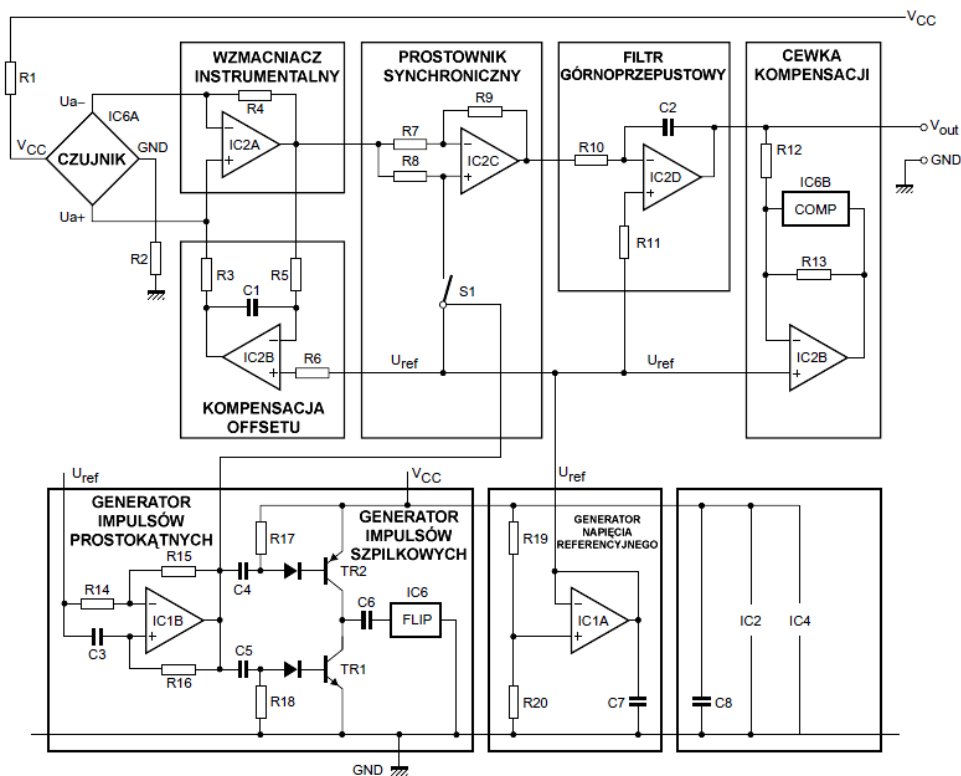
W skład układu sterującego czujnikiem pola magnetycznego wchodzi (rysunek 7):

- a) wzmacniacz instrumentalny,
- b) prostownik synchroniczny,
- c) filtr górnoprzepustowy,
- d) generator impulsów prostokątnych,
- e) generator impulsów szpilkowych prądu,
- f) generator napięcia referencyjnego,
- g) układ kompensacji offsetu,

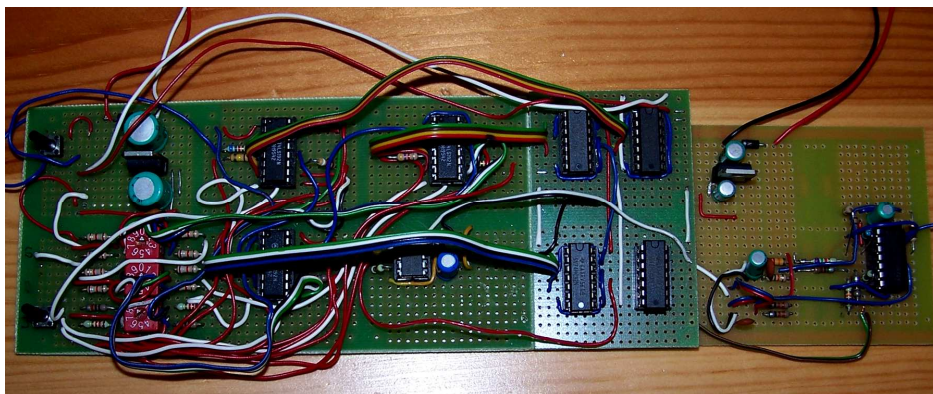
Model modułu elektronicznego zapalnika zbudowany został na płytkach uniwersalnych (rysunek 8), przy wykorzystaniu części elektronicznych w najczęściej spotykanych obudowach. Przy projektowaniu przyjęto wymaganie, aby wykorzystane do projektu elementy elektroniczne miały wersje stosowane w układach do celów militarnych.

## 6. Budowa i zasada działania modułu z czujnikiem pola magnetycznego

Do prawidłowej pracy czujnika pola magnetycznego jego producent zaleca specjalnie dedykowany układ sterowania. Jego schemat jest zawarty w nocie katalogowej dotyczącej czujnika. Czujnik pola magnetycznego, zastosowany w konstrukcji zapalnika wymaga do prawidłowej pracy okresowego magnesowania w celu odblokowywania. Służy do tego celu zintegrowana z nim cewka. Podczas pracy czujnika przez cewkę przepuszczane są na przemian raz dodatnie a raz ujemne szpilkowe impulsy prądu o wartości 1 A i czasie trwania 3  $\mu$ s.



**Rysunek 7. Schemat układu sterującego czujnikiem pola magnetycznego Ziemi [Philips]**



**Rysunek 8. Model modułu elektronicznego zapalnika [Opracowanie własne]**

Najkorzystniejsza częstotliwość, z jaką układ jest magnesowany wynosi około 1 kHz. Wytworzone pole magnetyczne ustawia domeny magnetyczne czujnika w położeniu początkowym. Za wytwarzanie impulsów prądu odpowiedzialny jest układ oparty na dwóch tranzystorach mocy, sterowany generatorem impulsów prostokątnych o napięciu 5 V. Sygnał z czujnika zostaje w ten sposób zmodulowany i w tej postaci podawany jest do wzmacniacza instrumentalnego o wzmacnieniu 200 razy. Sygnał z wyjścia wzmacniacza instrumentalnego podawany jest do prostownika synchronicznego i dalej do filtra dolnoprzepustowego. Na wyjściu filtra mamy zdemodulowany i wzmacniony sygnał, który podawany jest z kolei do analogowego komparatora napięcia. Komparator wytwarza na wyjściu logiczny sygnał 0 lub 1, porównując sygnał napięciowy przekazany z filtra górnoprzepustowego z napięciem odniesienia. Wykonana została też wersja układu elektronicznego, w której pominięto prostownik synchroniczny. Sygnał ze wzmacniacza

podawany jest w nim jest bezpośrednio do filtra górnoprzepustowego i dalej do detektora przejścia przez zero. Na wyjściu detektora jest generowany logiczny sygnał 0 lub 1.

Otrzymaany dwustanowy przebieg cyfrowy podawany jest do układu zliczającego impulsy. Układ ten oparty jest na trzech synchronicznych licznikach rewersyjnych mających możliwość programowania i na trzech czterowejściowych bramkach OR. Układ pozwala zliczać do 999 obrotów, przy czym można go rozbudować, dodając licznik i bramkę logiczną OR, umożliwiając zliczanie większej liczby obrotów.

Programowanie układu elektronicznego, czyli zadawanie liczby obrotów po jakiej zapalnika ma zadziałać, odbywa się przy wykorzystaniu kodu BCD. Kod zadawany jest bezpośrednio do synchronicznego licznika rewersyjnego z nastawnika kodu BCD. W badanym układzie są trzy nastawniki kodu do zadawania cyfry jedności, dziesiątek i setek. Nastawniki mogą być wbudowane do zapalnika lub mogą stanowić odrębne urządzenie traktowane jako programator. Układ zliczający obroty liczy od zadanej wartości do zera. Po zliczeniu obrotów podawany jest sygnał logiczny 1 do przerzutnika Schmitta, który powoduje odpalenie spłonki pobudzającej oraz zainicjowanie pozostałych elementów łańcucha ogniowego i w konsekwencji wybuch pocisku nad celem.

## 6. Wnioski

Pojawienie się na rynku łatwo dostępnych czujników pozwalających mierzyć obroty ciał stałych nawet powyżej 1000 obrotów na sekundę, w dowolnych warunkach, ułatwiło konstruktorom uzbrojenia projektowanie nowych zapalników parametrycznych, które zliczają obroty pocisku i powodują jego zadziałanie po zliczeniu zadanej liczby obrotów.

Programowanie zapalnika parametrycznego przez zadanie liczby obrotów własnych pocisku znacznie poprawia parametry taktyczne amunicji. Umożliwia dokładniejsze wyznaczanie punktu zadziałania zapalnika na torze lotu, zwiększające prawdopodobieństwo zniszczenia celu, w porównaniu z metodą wprowadzania czasu po jakim zapalnik ma zadziałać.

Pozytywne wyniki z badań poligonowych amunicji granatnikowej kalibru 40 mm uzbrojonej w nowe zapalniki będą stanowić podstawę do dalszych prac i badań. Jednym z celów pracy będzie opracowanie uniwersalnego modułu, który zlicza obroty pocisku. Moduł taki będzie można stosować w zapalnikach do amunicji, której przeznaczeniem jest zadziałanie w powietrzu w ściśle określonym punkcie toru lotu. Jedynym warunkiem jest to aby zapalnik wraz z pociskiem wykonywał ruch wirowy względem osi podłużnej pocisku.

## Literatura

- [1] „*Magnetic field sensors. General*”, Philips Semiconductors, 1998.
- [2] T. Stork – „*Electronic compass design using KMZ51 and KMZ52*”, AN00022, Philips Semiconductors, 2000.
- [3] Sang-Hee Yoon, Seok-Woo Lee, Young-Ho Lee, Jong-Soo Oh „*A Miniaturized Magnetic Induction Sensor Using Geomagnetism for Turn Count of Small-Caliber Ammunition*”, Sensors 2006, 6, 712 – 726.
- [4] „*Podstawy strzelania artylerii przeciwlotniczej*”, Uniwersytet Warszawski, Warszawa 1964.
- [5] J. Szapiro - „*Balistyka zewnętrzna*”, Wydawnictwo MON, Warszawa 1956.
- [6] J. Gacek - „*Balistyka zewnętrzna*”, Część I, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1997.
- [7] J. Gacek - „*Balistyka zewnętrzna*”, Część II, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1998.