



## WYBRANE ROZWIĄZANIA FUNKCJONALNE CZUJNIKÓW RADIOWYCH ZAPALNIKÓW ZBLIŻENIOWYCH RAKIET PRZECIWLOTNICZYCH *SELECTED FUNCTIONAL SOLUTIONS OF PROXIMITY RADIO-FUSES FOR ANTI-AIRCRAFT MISSILES*

Stanisław ŻYGADŁO, Maciej PODCIECHOWSKI, Jakub MIERNIK  
Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46  
*Military University of Technology, 2 Sylwestra Kaliskiego St., 00-908 Warsaw, Poland*  
*Author's e-mail address: stanislaw.zygadlo@wat.edu.pl; ORCID: 0000-0003-2019-5872*

DOI 10.5604/01.3001.0013.3771

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wybrane rozwiązania funkcjonalne czujników stosowane w radiowych zapalnikach zbliżeniowych.

**Słowa kluczowe:** przetwarzanie sygnałów, rakietka bojowa głowica bojowa, radiozapalnik

### 1. Wstęp

Skuteczność rażenia celu przez raketę przeciwlotniczą zależy nie tylko od rodzaju głowicy bojowej, ale także od momentu zainicjowania detonacji głowicy bojowej przez radiozapalnik (dalej: RZ). Tak więc głowica, typ RZ, warunki zbliżania rakiety do celu oraz jego wrażliwość na oddziaływanie energii rażącej, określają rzeczywistą strefę rażenia. Jej wyznaczenie, to zadanie bardzo trudne, wymagające między innymi dopasowania obszaru reagowania RZ do dynamicznej charakterystyki rozprzestrzeniania się energii rażącej, z uwzględnieniem rzeczywistych warunków zbliżania rakiety do celu. Uzyskanie dobrych wyników w tym zakresie wymaga rozpatrywania łącznie charakterystyk głowicy bojowej i RZ (Żygadło i Miernik, 2016a, 2016b). W przypadku rakiet przeciwlotniczych najczęściej stosowanymi są radiozapalniki radiowe: amplitudowe, częstotliwościowe, impulsowe oraz kombinowane.

**Abstract:** The paper presents selected solutions of functional sensors used in proximity radio-fuses (radio-detonators).

**Keywords:** signal processing, missile, warhead, radio-fuse (radio-detonator)

### 1. Introduction

Efficiency of hitting the target by an anti-aircraft missile depends not only on the type of a warhead but on the moment of its detonation by a radio-detonator (RD) as well. Hence the real zone of killing is defined by the warhead, type of the radio-detonator, conditions of target approaching by a missile, and target's resistance against the hitting energy. It is not an easy task to precise the zone as it requires above all a matching of the RD reaction area to the dynamical characteristics of propagation of the hitting energy and taking into account the real conditions of the missile nearing to the target. A good result may be achieved when both characteristics of the warhead and RD are investigated jointly (Żygadło & Miernik, 2016a, 2016b). The anti-aircraft missiles usually employ the amplitude, frequency, pulse, and combined types of radio-detonators.

W amplitudowym RZ informację o odległości do celu uzyskuje się przez pomiar amplitudy sygnału echa, wyselekcjonowanego na częstotliwości Dopplera (Podciechowski i Zimończyk, 1987). Pomiar odległości obarczony jest znacznym błędem spowodowanym dużymi fluktuacjami skutecznej powierzchni „odbicia” celu. Innym mankamentem jest bardzo duża wrażliwość na zakłócenia pasywne (dipole i paski folii), co obecnie dyskwalifikuje go, jako radiozapalnik do rakiet plot (jest np. stosowany w rakiecie Kub).

W impulsowym RZ informację o odległości do celu uzyskuje się przez pomiar opóźnienia impulsów echa w stosunku do impulsów sondujących, selekcjonowanych w bramce odległości o czasie trwania odpowiadającym maksymalnej odległości skutecznego rażenia (Zimończyk, 1987). Ten typ RZ jest powszechnie stosowany w rakietach plot. (np. Osa, Newa, Tunguska, Pancyr-S1, Roland, Crotale).

W częstotliwościowym RZ odległość do celu ocenia się przez pomiar częstotliwości różnicowej powstałej w wyniku porównania częstotliwości sygnału echa z częstotliwością sygnału sondującego, która jest modulowana przebiegiem harmonicznym lub piłokształtnym (Zimończyk, 1987).

Ze względu na uniwersalność zastosowania, dużą dokładność pomiaru odległości i małą wrażliwość na zakłócenia ten typ RZ uznaje się za perspektywiczny w zastosowaniu, szczególnie do pocisków odłamkowych.

## 2. Wybrane rozwiązania funkcjonalne czujników RZ

Wśród wielu rozwiązań czujników zapalników zbliżeniowych można wyróżnić czujniki: częstotliwościowe, impulsowe, dopplerowskie i kombinowane.

W częstotliwościowym RZ odległość do celu ocenia się przez pomiar częstotliwości różnicowej powstałej w wyniku porównania częstotliwości sygnału echa z częstotliwością sygnału sondującego, która jest modulowana przebiegiem harmonicznym lub piłokształtnym. Są także wersje, w których odległość do celu ocenia się przez pomiar amplitudy sy-

The amplitude RDs determine the distance to the target by measurement of reflected signal amplitude on the selected Doppler velocity (Podciechowski & Zimończyk, 1987). The measurement of the distance is highly inaccurate because of great fluctuations of the target radar cross section. Another disadvantage of this method is caused by its large sensitivity to passive interferences (dipoles and foil chaff) what currently eliminates it as the radio-detonator for anti-aircraft missiles (for instance it is used in KUB missiles).

The pulse RDs get the information about target's range by the measurement of the delay time between the echo and probing pulses which is selected by a range frame having the time of duration equal to the maximal range of the efficient hitting (Zimończyk, 1987). This type of the RD is widely used in the anti-aircraft missiles (e.g. OSA, NEWA, Tunguska, Pancyr-S1, Roland, Crotale).

The frequency RDs deploy the measurement of a difference frequency produced as a result of comparison between the echo frequency and probing frequency which is modulated by a harmonic or saw-tooth signal (Zimończyk, 1987).

This type of RDs is a perspective one especially for fragmentation missiles because of universal applications, high accuracy of range measurements and low sensitivity to interferences.

## 2. Examples of Functional Solutions of RD Sensors

Among many solutions of proximity detonators the frequency, pulse, Doppler and combined sensors can be distinguished.

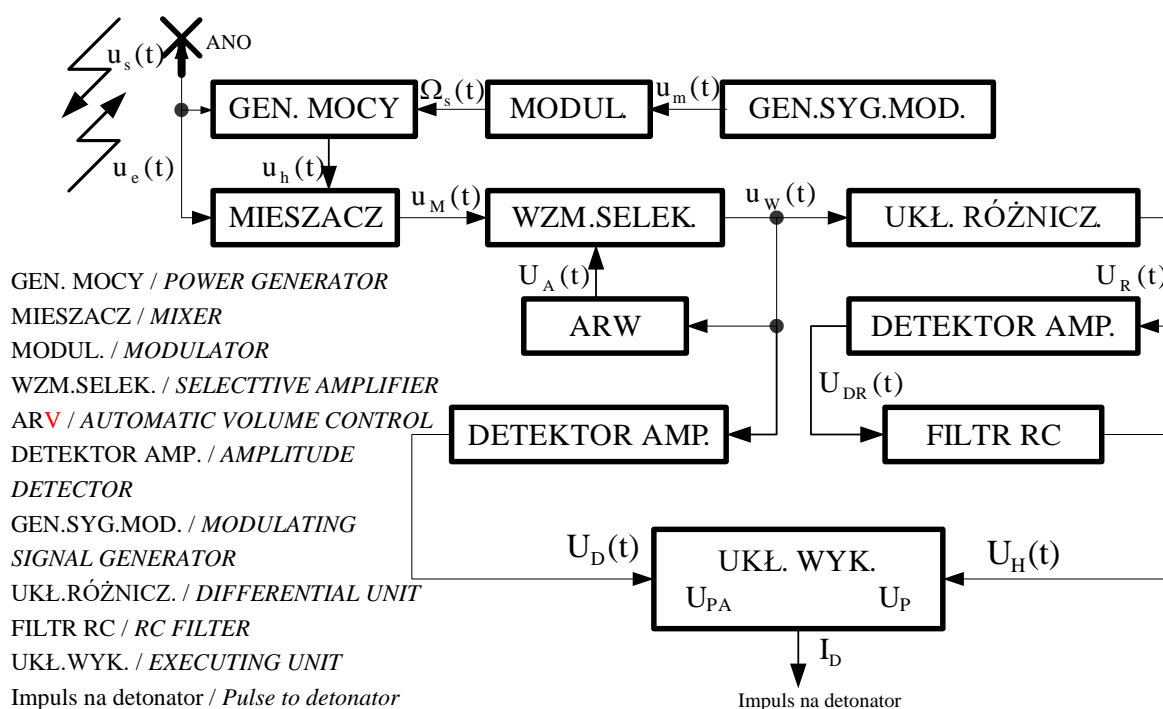
The frequency RD estimates the range to the target by the measurement of a difference frequency produced as a result of comparison between the echo frequency and probing frequency which is modulated by a harmonic or saw-tooth signal. There are also options where the range to the target is estimated by the measurement of

gnału wyselekcjonowanego na częstotliwości różnicowej lub jej pochodnej. Na rys. 1 pokazano schemat funkcjonalny czujnika częstotliwościowego RZ w skład którego wchodzi:

- nadajnik z: generatorem sygnału modulującego, modulatorem, generatorem mocy i anteną nadawczo-odbiorczą;
- odbiornik z: mieszaczem, wzmacniaczem selektywnym z pętlą ARW, układem różniczkującym, dwoma detektorami amplitudy oraz filtrem RC;
- układ wykonawczy, sprzężony z detonatorem.

amplitude of a signal selected on a differential frequency or its derivative. Fig. 1 shows a functional diagram of the RD frequency sensor consisting of:

- Transmitter with: modulating signal generator, modulator, power generator and transmitter-receiver antenna;
- Receiver with: mixer, selective amplifier with the automatic volume control (AVC) loop, differentiating unit, two amplitude detectors and RC filter;
- Executing unit coupled with the detonator.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny czujnika częstotliwościowego RZ

Fig. 1. Functional diagram of RD frequency sensor

W generatorze sygnału modulującego kształtowany jest przebieg harmoniczny:

$$u_m(t) = U_m \cos \omega_m t \quad (1)$$

lub napięcie piłokształtne:

Modulating signal generator provides a harmonic signal:

or a saw-tooth voltage:

$$u_m(t) = \frac{U_m}{T_m} (t - nT_m) \quad \text{dla } -(n - 0,5)T_m \leq t \leq (n + 0,5)T_m \quad (2)$$

gdzie:  $U_m$  – amplituda sygnału  $u_m(t)$ ; | where:  $U_m$  – signal amplitude  $u_m(t)$ ;

$T_m \frac{2\pi}{\omega_m}$  - okres modulacji

$T_m \frac{2\pi}{\omega_m}$  - period of modulation

W wyniku „odbicia” fali EM od celu punktowego, na obciążeniu anteny powstaje sygnał echa:

In effect of EM wave reflection from a point target an echo signal appears on the antenna termination:

$$u_e(t) = U_e \cos[(\omega_s + \omega_D)(t - t_R + \Psi_s(t - t_R) + \Psi_e)] \quad (3)$$

gdzie:  $t_R = \frac{2H}{c \sin \theta_p}$ ; c-prędkość światła;

where:  $t_R = \frac{2H}{c \sin \theta_p}$ ; c-light speed;

$\omega_D = \frac{4\pi v_p}{\lambda_s}$  - pulsacja Dopplera.

$\omega_D = \frac{4\pi v_p}{\lambda_s}$  - Doppler's pulsation.

W mieszaczu suma  $u_e(t) + u_h(t)$  zostaje przekształcona w sygnał:

The sum  $u_e(t) + u_h(t)$  is converted in the mixer to signal:

$$u_M(t) = K_M U_e \cos \int_0^t |\omega_r(x)| dx \quad (4)$$

gdzie:

where:

$$\omega_r(t) = \omega_D + \frac{d}{dt} [\Psi_s(t - t_R) - \Psi_s(t) + \Psi_e(t)]$$

- pulsacja różnicowa,  
 $K_M$  – współczynnik przenoszenia mieszacza.

- differential pulsation,  
 $K_M$  – mixer transmission coefficient.

Dla wyeliminowania wpływu amplitudy  $U_e$  na pomiar odległości H, wzmacniacz selektywny objęty jest pętlą ARW, co zapewnia stałą amplitudę sygnału. Uśredniony w filtrze RC sygnał  $U_{DR}(t)$  podawany jest na detektor amplitudy który z sygnału  $u_w(t)$  kształtuje napięcie:

To eliminate influence of amplitude  $U_e$  into the measurement of range H the selective amplifier works in a loop of AVC providing the constant amplitude of signal. The mean signal  $U_{DR}(t)$  received after RC filter is sent to the amplitude detector forming from signal  $u_w(t)$  a voltage:

$$U_D(t) = K_D U_W(t) \quad (5)$$

W układzie wykonawczym napięcia  $U_H(t)$  i  $U_D(t)$  porównywane są z progami  $U_P$  i  $U_{PA}$ . Gdy spełniony jest warunek:

The executing unit compares voltages  $U_H(t)$  and  $U_D(t)$  with levels  $U_P$  and  $U_{PA}$ . If condition is met:

$$[U_D(t) \geq U_{PA}] \cap [U_H(t) \leq U_P] \quad (6)$$

to następuje wypracowanie impulsu detonacji. Powyższe rozważania dotyczyły „odbicia” fal EM od celu punktowego przy braku występowania zakłóceń. W przypadku zapalnika „odbicie” będzie występowało od pew-

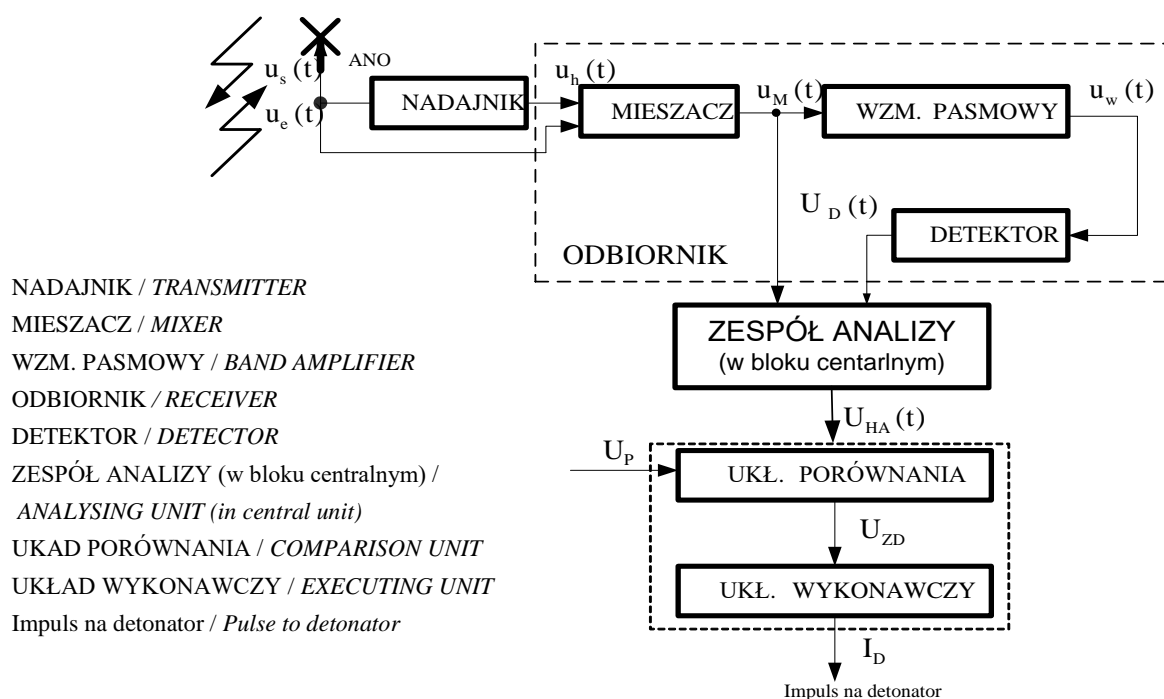
then a detonating pulse is worked out. The above considerations refer to reflection of EM waves from a point target and without any interferences. In the case of the radio-detonator the reflection will take place

nej powierzchni celu powierzchniowego, a proces pomiaru będzie zakłócany.

W amplitudowym RZ informację o odległości do celu uzyskuje się przez pomiar amplitudy sygnału echa, wyselekcjonowanego na częstotliwości Dopplera. W skład czujnika dopplerowskiego (rys. 2) wchodzi: nadajnik, antena nadawczo-odbiorcza, odbiornik z mieszaczem, wzmacniaczem pasmowym i detektorem amplitudy, zespół analizy oraz układ wykonawczy.

from a certain surface of the target and the process of measurement will be disturbed.

In the amplitude type of the RD the distance to the target is obtained by measuring the echo amplitude from a signal selected for the Doppler's frequency. The Doppler sensor (Fig 2) includes: transmitter, transmitting-receiving antenna, receiver with mixer, band amplifier and amplitude detector, and analysing unit, and the executing unit.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny czujnika dopplerowskiego RZ

Fig. 2. Functional diagram of RD's Doppler sensor

W uproszczonym ujęciu występujące na schemacie sygnały można opisać wyrażeniami:

- sygnał sondujący i heterodyny:

$$\begin{aligned} u_s(t) &= U_s \cos \omega_s t \\ u_h(t) &= U_h \cos \omega_s \end{aligned} \quad (7)$$

- sygnał echa:

$$u_e(t) = U_e \cos[(\omega_s + \omega_D)t + \Psi_e(t)] \quad (8)$$

gdzie:  $\omega_D = \frac{4\pi v_p}{\lambda_s}$  – pulsacja Dopplera,

The signals present in the diagram may be expressed in a simplified representation by:

- Probing and heterodyne signals:

- Echo signal:

where:  $\omega_D = \frac{4\pi v_p}{\lambda_s}$  – Doppler pulsation,

– sygnał odległości do celu:

$$U_H(t) = \frac{1}{H} A_{NA}(N, P, C) K_M K_W(\omega_D) K_D \quad (9)$$

gdzie:  $K_M$ ,  $K_W$ ,  $K_D$  – współczynniki przenoszenia mieszacza, wzmacniacza i detektora;

$A_{NA}$  – wielkość zależna od parametrów nadajnika, pocisku i celu.

Odległość zadziałania:

$$H_{ZA} = \frac{1}{U_P} A_{NA}(N, P, C) K_M K_W(\omega_D) K_D \quad (10)$$

W przypadku dopplerowskich czujników - amplitudowego i różniczkującego - mają one ten sam mankament polegający na tym, że odległość zadziałania zależy od amplitudy sygnału echa, a ta jest funkcją całego szeregu wielkości, charakteryzujących się losowym charakterem i stosunkowo dużym zakresem zmian wartości. Stąd znaczny rozrzut odległości zadziałania takich zapalników, co jest ich istotną wadą.

Wpływ amplitudy sygnału echa na odległość zadziałania zapalnika można wyeliminować (w praktyce zminimalizować) oceniając stosunek pochodnej  $U'_{HA}(t)$  do sygnału  $U_{HA}(t)$

$$q_H(t) = \frac{U'_{HA}(t)}{U_{HA}(t)} = \frac{A'(t)}{A(t)} + \frac{v_{pp}}{H(t)} \quad (11)$$

Z (11) widać, że wartość  $q_H(t)$  jest funkcją stosunku prędkości zbliżania się pocisku do celu  $v_{pp}$  i odległości bieżącej „pocisk-cel”  $H(t)$ , przy czym ta zależność jest zakłócana

wielkością  $\frac{A'(t)}{H(t)}$ , która uwarunkowana jest

między innymi występowaniem w sygnale echa  $u_e(t)$  składowych – koherentnej  $u_k(t)$  i rozproszonej  $u_r(t)$  o różnych częstotliwościach Dopplera. Proces oceny stosunku  $q_H(t)$  będzie również deformowany zakłóceniami wewnętrznymi i zakłóceniami organizowanymi przez przeciwnika. Czujnik ilorazowy można zrealizować w wersji analogowej (rys. 3) lub wersji analogowo-cyfrowej (rys. 4).

– Target distance signal:

where:  $K_M$ ,  $K_W$ ,  $K_D$  – mixer, amplifier and detector transmission coefficients;

$A_{NA}$  – quantity dependent on parameters of the transmitter, missile and target.

Distance of activation:

In the case of Doppler amplitude and differential sensors they have the same deficiency relating to the fact that the distance of activation depends on the reflected signal amplitude which is a function of many factors of a random character and a relatively huge range of changes. Hence these detonators have a large dispersion of activation distances what is an essential disadvantage.

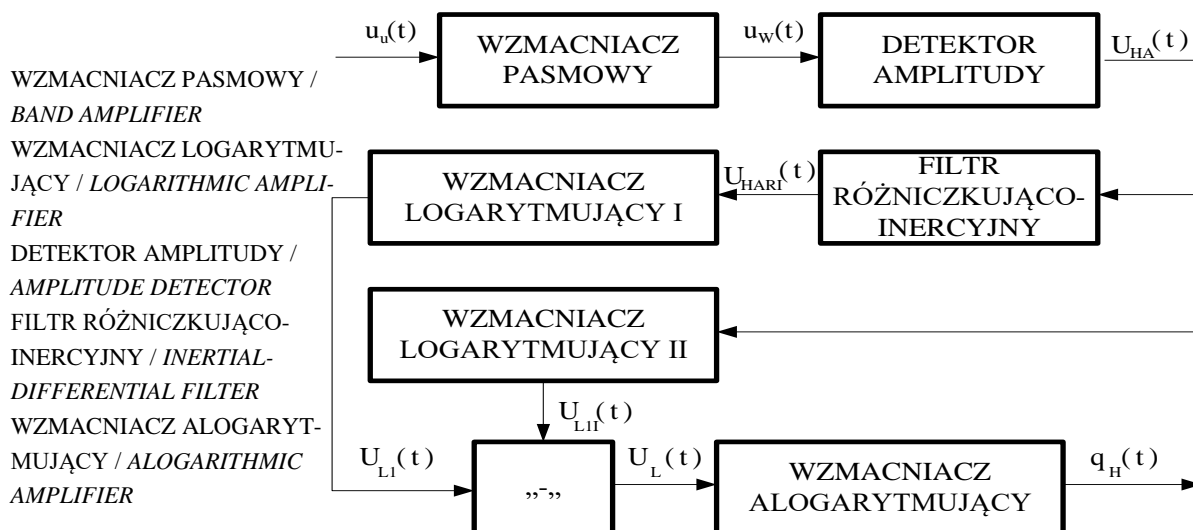
Influence of reflected signal amplitude on the detonator activation distance may be eliminated (in practice minimised) by estimating the ratio of the derivative  $U'_{HA}(t)$  to the signal  $U_{HA}(t)$

Expression (11) shows that the value of  $q_H(t)$  is a function of a ratio between the missile's velocity of approaching to the target  $v_{pp}$  and the running “missile-target” distance  $H(t)$  but it has to be noted that this dependence is disturbed by the value  $\frac{A'(t)}{H(t)}$  which depends

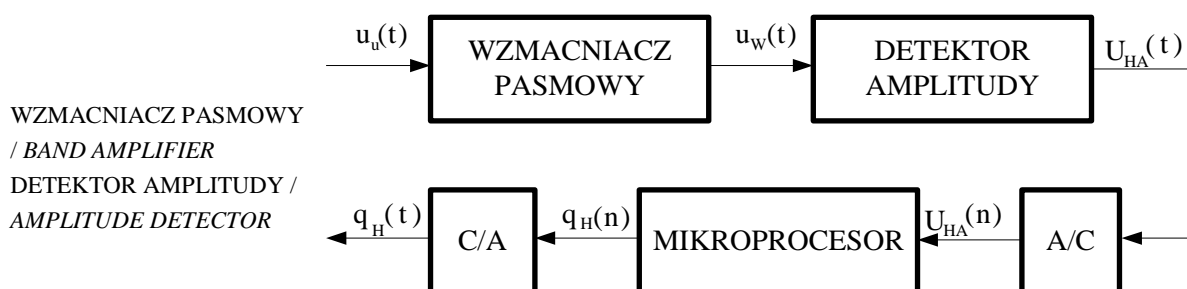
above all on the existence of the coherent  $u_k(t)$  and dispersed  $u_r(t)$  components with different Doppler frequencies in the reflected signal  $u_e(t)$ . The process of estimation for the ratio  $q_H(t)$  will be also disturbed by the internal and enemy interferences. A quotient sensor may be prepared in analog (Fig.3) or analog-digital (Fig.4) versions.

Do walki z zakłóceniami szumowymi w czujnikach dopplerowskich stosuje się obróbkę dwukanałową w układzie, którego schemat funkcjonalny pokazano na rys. 5.

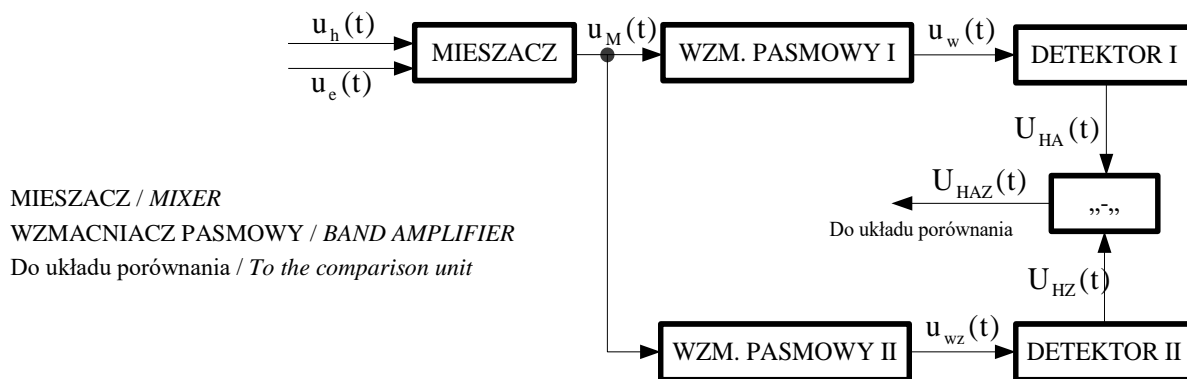
In order to defeat the noise interferences the Doppler sensors employ a two-channel processing in the arrangements shown in functional diagrams in Fig.5.



Rys. 3. Struktura czujnika ilorazowego w wersji analogowej  
 Fig. 3. Structure of an analog version of the quotient sensor



Rys. 4. Struktura czujnika ilorazowego w wersji analogowo-cyfrowej  
 Fig. 4. Structure of an analog-digital version of the quotient sensor



Rys. 5. Schemat funkcjonalny czujnika dwukanałowego dopplerowskiego RZ  
 Fig. 5. Functional diagram of RD Doppler two-channel sensor

Kanały mają rozłączne funkcje przenoszenia, przy czym kanał główny jest dopasowany do zakresu zmian częstotliwości Dopplera sygnału echa, a kanał pomocniczy (przeciwzakłóceniu) tych częstotliwości nie obejmuje. Tak więc w kanale głównym może być obrabiany sygnał echa i zakłócenia lub same zakłócenia (gdy poziom sygnału użytecznego jest pomijalnie mały), natomiast w kanale przeciwzakłóceniu obrabiane są tylko zakłócenia. Rozwiązanie jest skutecznym sposobem walki z pasmowymi zakłóceniami szumowymi i nie dopuści do zadziałania zapalnika na torze lotu, jeżeli spełni się warunek:

$$K_{wII} = 0,6K_{wI} \sqrt{\frac{\Delta F_{wII}}{\Delta F_{wI}}} \quad (12)$$

Z czujnikiem zbliżeniowym, a także z innymi zespołami zapalnika współpracuje blok centralny. Blok ten jest dość rozbudowany, a jego podstawowymi elementami są: procesor z oprogramowaniem, odbiornik programatora indukcyjnego, układy logiczne, elementy komutacji, zegary, interfejsy i inne układy elektroniczne, a także mechanizm wykonawczy.

Z kolei w zapalnikach inteligentnych w skład bloku centralnego mogą wchodzić dodatkowo: odbiornik GPS z INS i anteną, odbiornik lub odbiornik i nadajnik radiolinii (transmitera).

### 3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane rozwiązania funkcjonalne czujników stosowane w radiowych zapalnikach zbliżeniowych. Obecnie prowadzone są prace nad różnymi sensorami zbliżeniowymi oraz możliwością ich wykorzystania do realizacji zadań RZ rakiety przeciwlotniczej. W ramach tych prac zostaną przeprowadzone badania mające na celu przetestowanie różnych sensorów w warunkach fluktuacji parametrów sygnału echa i zakłóceń oraz metod obróbki sygnałów pozwalających zwiększyć stosunek sygnał/szum celem zapewnienia niezawodności działania RZ. Zaprojektowane stanowiska laboratoryjne

The channels have the mutually exclusive transmission functions as the main channel is matched to changes of Doppler frequencies for the reflected signal whereas the assisting channel (anti-jamming) works beyond these frequencies. In such way in the main channel the reflected signal and the interferences or the interferences alone (if level of useful signal is neglectable) are processed, whereas in the anti-jamming channel only interferences are processed. The solution fights effectively the band noise interferences and prevents any activation of the detonator on the flying path when the condition is met:

The central unit works together with the proximity sensor and other units of the detonator. The unit is a relatively complex unit and it contains following main components: processor with software, receiver of an inductive programmer, logical subunits, commutating components, clocks, interfaces and other electronic subunits, and finally the executing mechanism.

On the other hand the smart detonators may additionally contain following components in the central unit: GPS and INS with antenna, receiver, or receiver and transmitter of a radio link.

### 3. Summary

The paper describes some selected functional solutions of sensors used in proximity radio-detonators. Now the work is focused on different proximity sensors and possibilities of their application for the RD of the anti-aircraft missile. In the frame of the work the tests will be carried out for different sensors at conditions of fluctuating parameters of echo and interference signals, and the signal processing methods will be investigated to increase the signal-to-noise ratio and get a reliably functioning RD. Designated laboratory setups will be used to test pa-



ne pozwolą na przebadanie parametrów zespołów przetwarzania sygnałów sensorów zbliżeniowych oraz ich konfiguracji sprzętowej. Weryfikacja przydatności sensorów w warunkach występowania zakłóceń sztucznych oraz naturalnych pozwoli na ocenę skuteczności ich działania zapewniającej wysoką efektywność niszczenia celów przez głowicę bojową. Zostaną również opracowane moduły programowe oraz algorytmny generowania różnorodnych sygnałów użytecznych i zakłóceń na wejściu kanałów odbiorczych oraz ich wpływ na pracę zapalnika radiowego. Wynikiem prac będą rozwiązania układowe i programowe służące do symulacji i badań przydatności sensorów zbliżeniowych w procesie detekcji obiektów przez zapalnik radiowy rakiety przeciwlotniczej krótkiego zasięgu.

rameters of units processing the signals from proximity sensors and a hardware configuration of the units. The verification of sensors usability in conditions of artificial and natural interferences can be used to assess the efficiency of their operation at hitting the target by the warhead. Moreover the programming modules and the algorithms generating different useful and interference signals at the inputs of receiving channels, aimed to assess their impact into the operation of the radio-detonator, will be also developed. The system and program solutions will be received in the result of the work and they will be used to simulate and test the usability of proximity sensors for detection of objects by the radio-detonator of a short range anti-aircraft missile.

### Literatura / Literature

- Żygadło, S., Miernik, J. (2016a). Modelowanie i symulacja procesu aktywacji radiozapalnika rakiety przeciwlotniczej. *Mechanik, Nr 7*, 888-890.
- Żygadło, S., Miernik, J. (2016b). Modelowanie i symulacja wpływu kąta ataku rakiety przeciwlotniczej na skuteczność rażenia głowicy bojowej. *Mechanik, Nr 7*, 885-887.
- Podciechowski, M., Zimończyk, K. (1987). *Dopplerowski czujnik małych wysokości*. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna.
- Zimończyk, K. (1987). Zapalniki zbliżeniowe, cz.1 i cz. 2. *WPT 5/87, WPT 6/87*.

