



WYMAGANIA DOTYCZĄCE ĆWICZEBNYCH BOMB KIEROWANYCH *REQUIREMENTS FOR TRAINING GUIDED BOMBS*

Grzegorz KOWALECZKO

Lotnicza Akademia Wojskowa, ul. Dywizjonu 303 nr 35, 08-521 Dęblin
Military University of Aviation, 35 Dywizjonu 303 St. nr, 08-521 Dęblin, Poland

Mariusz PIETRASZEK, Krzysztof GRAJEWSKI, Tomasz KLEMBBA

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa
Air Force Institute of Technology, 6 Księcia Bolesława St., 01-494 Warsaw, Poland
Author's e-mail address: krzysztof.grajewski@itwl.pl; ORCID: 0000-0002-0513-3887

DOI 10.5604/01.3001.0014.0787

Streszczenie: Wymagania współczesnego pola walki zmuszają do szerokiego stosowania precyzyjnych środków rażenia (PŚR), do których zaliczają się między innymi bomby kierowane. Ich wysoka cena zmusza użytkownika do stosowania w procesie szkolenia ćwiczebnych odpowiedników PŚR. W artykule przedstawiono wymagania dotyczące współczesnych bomb kierowanych. Dokonano ogólnego podziału bomb lotniczych ze względu na przeznaczenie, sposób zastosowania oraz sposób realizacji ruchu bomby. Przedstawiono specyfikę zrzutu bomb kierowanych i niekierowanych. Dokonano przeglądu podstawowych systemów naprowadzania i sterowania precyzyjnych środków rażenia. Artykuł przedstawia podstawowe rozwiązania techniczne zastosowane w lotniczej ćwiczebnej bombie kierowanej (LBĆWK) opracowanej w ITWL, porównując je z wymaganiami dotyczącymi produkcji i eksploatacji nowo zaprojektowanych ćwiczebnych bomb tego typu.

Słowa kluczowe: bomba, systemy naprowadzania, system kierowania bomb, bombardowanie

1. Wstęp

Broń lotnicza jest częścią uzbrojenia lotniczego przeznaczoną do oddziaływania na obiekty przeciwnika. Nazwano ją wyposażenie bo-

Abstract: Requirements of the modern battlefield enforce the use of precision assets of striking (PAS) including above all the guided bombs. Their high price compels the user for employment of exercise PAS equivalents in the training process. The article presents requirements for modern guided bombs. A general division of airborne bombs was made regarding the purpose, the method of use and the manner of bomb's movement. The specifics of dropping for guided and classic bombs are presented. The basic systems of guidance and control for precision assets of strike are reviewed. The article presents basic technical solutions used in a guided airborne exercise bomb (G-AEB) developed by the Air Force Institute of Technology (AFIT), and compares them with specifications for production and using of newly designed exercise bombs of this family.

Keywords: bomb, guiding systems, bomb control system, bombardment

1. Introduction

An aircraft weapon system is a part of airborne systems designated for striking the enemy objects. It includes the combat

jowe statku powietrznego, obejmujące lotniczą broń lufową, raketową i bombardierską, przeznaczone do rażenia określonych celów. W skład broni lotniczej wchodzi: lotnicze środki rażenia, stanowiska broni lotniczej, systemy nawigacyjno-celownicze oraz układy sterowania bronią lotniczą. Każdy rodzaj uzbrojenia odgrywa istotną rolę w określonych warunkach działań i dlatego współczesne samoloty są z reguły uzbrajane zarówno w pociski raketowe, jak i w broń lufową oraz zamki do przenoszenia bomb. Uzbrojenie lotnicze jest jednym z głównych elementów, stanowiących o wartości bojowej samolotów (Długołęcki, Buler, Faryński, Winczura, 2016). W fachowych publikacjach zachodnich bardzo popularna jest ilorazowa formuła wartości bojowej samolotu, w której skuteczność uzbrojenia występuje w czwartej potęgze, podczas gdy inne parametry, jak manewrowość, stateczność i sterowność, tylko w pierwszej potęgze. Warto dodać, że współczynnik wyposażenia elektronicznego samolotu występuje w tej formule w trzeciej potęgze. Takie zakwalifikowanie uzbrojenia lotniczego związane jest z dynamiką prowadzenia współczesnych działań bojowych oraz nowymi wymaganiami, które panować będą na przyszłym polu walki. Warunki panujące na współczesnym teatrze działań wojennych zwiększają wymagania w stosunku do środków bojowych oraz sposobów ich zastosowania.

Z analizy współczesnych konfliktów zbrojnych wynika, że sukcesywnie zmniejsza się liczba lotniczych środków rażenia potrzebnych do zniszczenia wybranych celów, na rzecz precyzyjnych środków rażenia, a tym samym liczba samolotów potrzebnych do wykonania określonych zadań. Uzbrojenie bombardierskie pozostaje najważniejszym środkiem rażenia lotnictwa bojowego, przeznaczonym do działań związanych ze niszczeniem celów naziemnych. We wszystkich znanych dotąd operacjach lotniczych bomby były najczęściej stosowanym środkiem do atakowania celów naziemnych. W operacji „Pustynna Burza”, tylko bomby niekie-

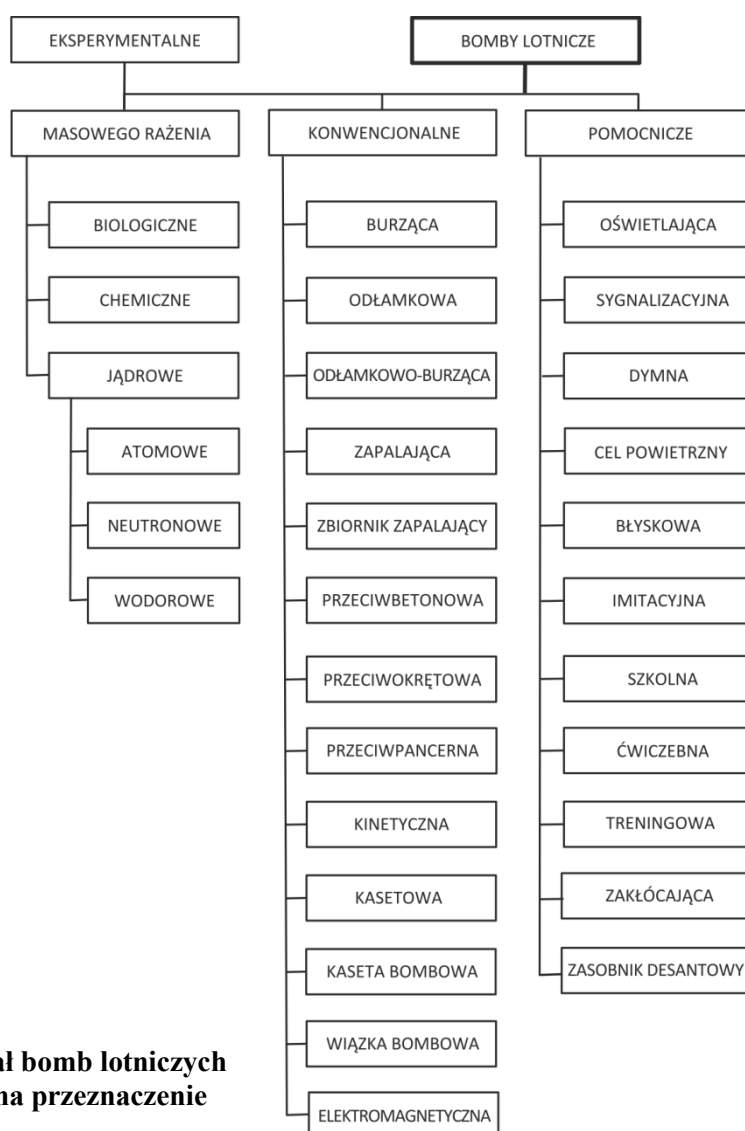
assets of an aerial vessel comprising the gun, missile and bomb weapons designed for striking specific targets. Aircraft weapon system contains the striking assets, the stands of weapons, the navigation-aiming systems, and the aircraft weapon control systems. Each type of weapon is important at specific operational conditions and for that the modern planes are usually armed both with missiles and guns, and have fastenings for carrying the bombs. The aircraft weapon system is one of the main components deciding on the aircraft combat efficiency (Długołęcki, Buler, Faryński, Winczura, 2016). Professional Western publications often use a quotient formula of a plane combat efficiency where the efficiency of the weapon system is put in the fourth exponent whereas other parameters as the manoeuvrability, controllability and stability are only in the first exponent. It is worth to add that the coefficient for plane electronic equipment of this formula is put in the third exponent. The aircraft weapon systems are qualified in such way due to the dynamics of contemporary combat operations and the new requirements of the future combat fields. Conditions existing at the contemporary military operation theatre increase the level of demands for the combat assets and their deployment. Analysis of contemporary military conflicts shows that the number of airborne striking assets, and by the same the number of planes for execution of specific tasks, needed for destruction of selected targets is successfully reduced in favour of precision assets of striking. Bombardment systems remain the most important striking asset of the air forces designated for destruction of ground targets. The bombs were the most often used assets for attacking the ground targets in all known aerial operations up to now. At the operation

rowane, stanowiły 93% tonażu wszystkich użytych środków rażenia, zrzuconych przez samoloty koalicji (Długołęcki i in., 2016). Różnorodność zadań wykonywanych przez lotnictwo, rozwój techniki lotniczej, a zwłaszcza zwiększenie możliwości bojowych samolotu i ich wyposażenia oraz postęp w dziedzinie techniki uzbrojenia, doprowadziły do pojawienia się całej gamy nowych rodzajów bomb specjalnie przystosowanych do zwalczania określonych celów.

Bomby lotnicze dzielimy względu na ich przeznaczenie, sposób działania i sposób realizacji ruchu (ITWL, 2016; Koruba, Osiecki, 2006). Podstawowym, najczęściej używanym kryterium podziału bomb lotniczych jest klasyfikacja ze względu na przeznaczenie i sposób działania rys. 1.

“Desert Storm” only the unguided bombs provided 93% of the whole weight of striking assets dropped by the coalition planes (Długołęcki et al., 2016). Some new types of bombs specially adapted for fighting specific targets have appeared due to the variety of assignments performed by the air forces, and development of aircraft technology, especially in domains of boosting the combat efficiency of planes and weapon systems.

The aircraft bombs may be divided regarding their designation, mode of operation and movement (ITWL, 2016; Koruba, Osiecki, 2006). They are usually graded by their designation and way of operation – Fig. 1.



Rys. 1. Podział bomb lotniczych ze względu na przeznaczenie

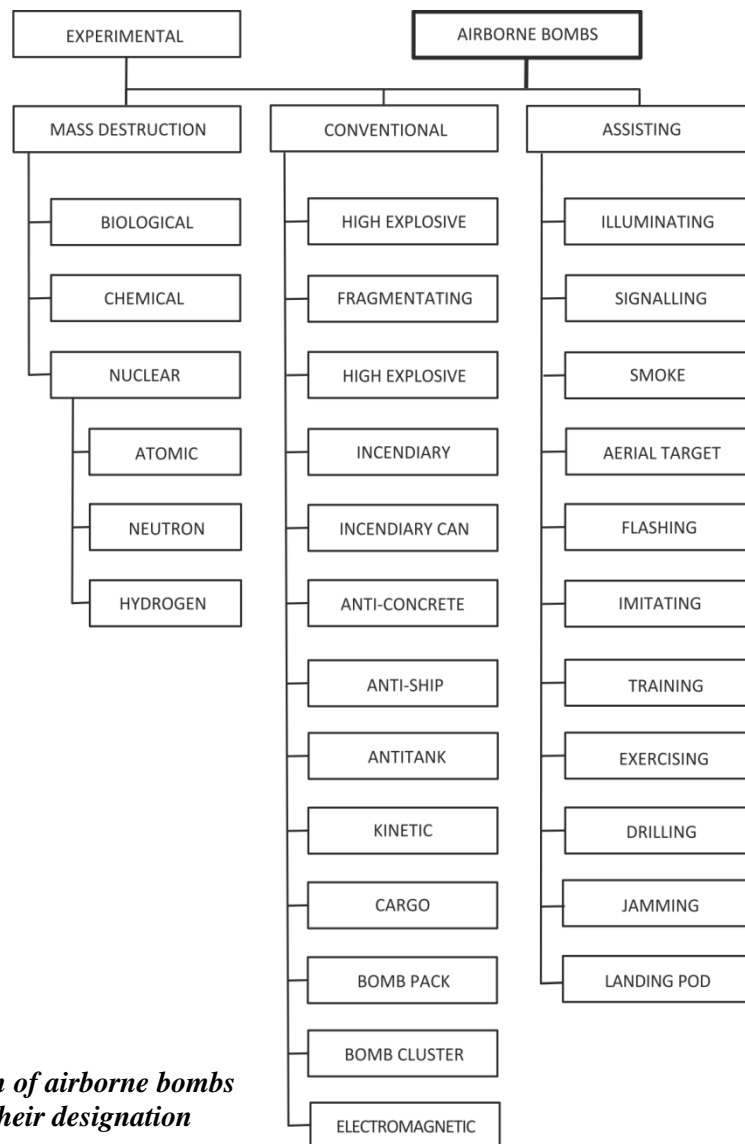
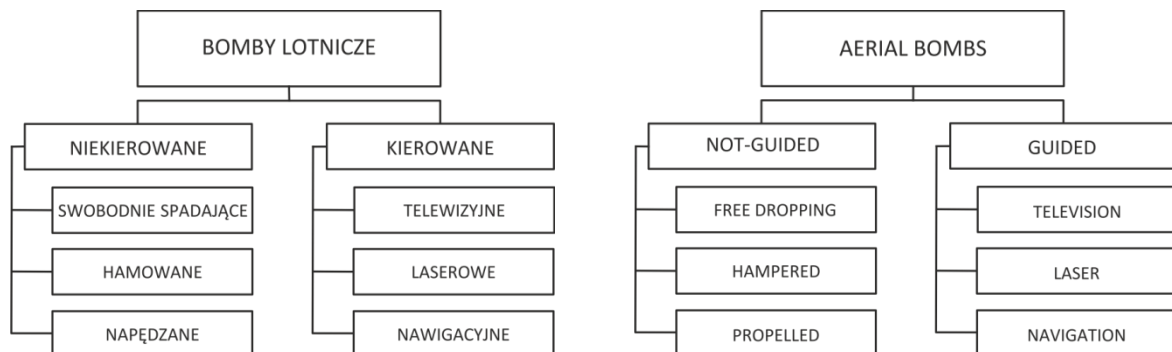


Fig. 1. Division of airborne bombs regarding their designation

Kolejne kryterium obejmuje sposób realizacji ruchu przez bombę rys. 2.

The next criterium refers to a method of bomb's movement – Fig. 2.



Rys. 2. Klasyfikacja bomb lotniczych ze względu na sposób realizacji ruchu (Pietraszek, 2019)

Fig. 2. The grades of airborne bombs regarding their movement (Pietraszek, 2019)

Istotną kategorię stanowią bomby kierowane, które powoli stają się głównym lotniczym środkiem używanym do rażenia celów, głównie naziemnych. Dynamiczny rozwój lotniczego uzbrojenia kierowanego spowodowany został zwiększeniem wymagań taktycznych współczesnego pola walki. Na współczesnym teatrze działań, niezbędne stały się środki bojowe precyzyjnego rażenia. Zapewniają one między innymi: rażenie celów ze zminimalizowaniem strat wśród ludności cywilnej, zmniejszenie kosztów prowadzenia konfliktu zbrojnego, zwiększenie bezpieczeństwa własnych statków powietrznych i ich załóg.

Historia bomb korygowanych sięga okresu międzywojennego XX wieku. W czasie trwania II wojny światowej, spektakularnym użyciem bomb korygowanych zasłynęła operacja lotnicza Luftwaffe, w wyniku której uszkodzono kilka okrętów floty alianckiej biorących udział w inwazji na Sycylię. W kolejnych latach nastąpił dynamiczny rozwój lotniczej broni precyzyjnego rażenia. Potwierdziła ona swoją skuteczność w działaniach lotniczych prowadzonych przez koalicję antyterrorystyczną na terenie Bliskiego Wschodu. Wytyczyły one kierunek zastosowania bomb kierowanych w niszczeniu celów przeciwnika. Zrzucano je z samolotów, jak i platform bezzałogowych. W ostatnim konflikcie zbrojnym prowadzonym na terenie Syrii lotnictwo rosyjskie dokonało wielu nalotów z użyciem kierowanych bomb KAB-250 i KAB-500. Naloty te potwierdziły zasadność zastosowania uzbrojenia kierowanego do niszczenia wyselekcjonowanych celów naziemnych, bomby osiągnęły skuteczność trafienia na poziomie ± 5 m dla bomby KAB-500 o wagomiarze¹ 500kg i $3 \div 5$ m dla bomby KAB-250 (wagomiar 250

The guided bombs have been gradually becoming an essential category used mainly for hitting the ground targets. The dynamical progress of the airborne guided weapons was enforced by increased tactical demands of the present battlefield. The precision combat assets of striking are indispensable in the contemporary theatre of operation. They provide, above all, the hitting of targets at minimal civilian losses, the reduction of costs for military conflicts, and the increased level of safety for own aerial platforms and their crews.

The history of corrected bombs started in interwar times of the 20th century. During the WWII the Luftwaffe deployed the corrected bombs at a spectacular air-force operation when a few Alliance ships invading Sicilia were hit. In following years the aircraft weapon systems of precise hitting witnessed a dynamical progress. The systems confirmed their efficiency in aerial operations conducted by the anti-terroristic coalition in the Near East. They indicated the direction for using the guided bombs to destroy the enemy targets. They were dropped both from the planes and the unmanned platforms. In the last military conflict in Syria the Russian Air Forces deployed guided bombs KAB-250 and KAB-500 for many attacks. The bombings confirmed the reasons for deployment of the guided weapons for destruction of selected ground targets, and the bombs have achieved the hitting efficiency at the level of ± 5 m for KAB-500 bomb with weight grade² 500kg, and $3 \div 5$ m for KAB-250 (weight grade 250 kg) (Gawęda, 2015). Such operations of

¹ Wagomiar- jest podstawową charakterystyką określającą masę bomby, wyrażony jest w mierze metrycznej, w kilogramach, a w krajach anglosaskich w funtach. Współczesne lotnicze środki rażenia mieszczą się w przedziale od 0,5 do 250 i więcej kilogramów. Bomby o wagomiarze od 0,5 do 25 kilogramów nazywa się bombami małego wagomiaru.

² Weight grade- is a basic characteristics describing the mass of the bomb, and is expressed in metrical measure, in kilograms, and in the UK in pounds. Contemporary airborne striking assets fall in the range between 0.5 to 250 and more kilograms. Bombs with weight from 0.5 to 25 kilograms are named as the low weight grade bombs.

kg) (Gawęda, 2015). Takie działania lotnictwa rosyjskiego potwierdzają światową tendencję rozwoju precyzyjnych środków rażenia.

2. Specyfika użycia bomb lotniczych

Wszystkie rodzaje bomb niekierowanych, a także niektóre bomby kierowane, zrzucają się sposobem balistycznym. Bombardowanie balistyczne wymaga wprowadzenia algorytmów umożliwiających wyliczenie trajektorii lotu bomby w oparciu o rozwiązanie równań różniczkowych. W praktyce stosuje się różne algorytmy obliczeniowe do wyznaczania balistycznych parametrów trajektorii lotu bomby na podstawie jej charakterystyk masowych i aerodynamicznych oraz parametrów lotu w chwili zrzutu. Ich zróżnicowanie wynika między innymi z różnych metod numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych (całkowanie metodą Eulera, Rungego-Kutty, Adamsa itp.), a także przyjętych uproszczeń, danych gabarytowo-masowych bomby oraz czasu charakterystycznego bomby do układu celowniczo-nawigacyjnego nosiciela (Pietraszek, 2019). Proces prawidłowego zrzutu bomby polega na rozpoznaniu atakowanego celu przez pilota lub operatora uzbrojenia i naprowadzeniu znacznika celu umiejscowionego na celowniku na atakowany cel poprzez manewr samolotem. W wyniku manewru wektor prędkości podróży samolotu pokrywa się z kierunkiem na cel. W czasie zbliżania się do celu system celowniczo-nawigacyjny (SNC) wylicza poziomą odległość do celu D_{xSC} . Odległość ta wyliczana jest z zależności:

$$D_{xSC} = \frac{Y_{gS}}{\operatorname{tg}\vartheta_{SC}} = D_{SC} \cos\vartheta_{SC}$$

gdzie:

- D_{xSC} - pozioma odległość do celu;
- Y_{gS} - wskazania wysokości radiowysokościomierza, podawane

the Russian Air Forces are a confirmation of a world tendency in development of precision assets of striking.

2. Specifics of Deployment for Aircraft Bombs

All types of unguided bombs, and some guided bombs as well, are dropped ballistically. Ballistic bombardment employs algorithms calculating the bomb flight trajectory by solutions of differential equations. Different algorithms are used in practice to calculate ballistic parameters of the bomb flight trajectory with bomb's mass and aerodynamic characteristics, and flight parameters existing at the moment of dropping. They differ above all due to different methods applied for finding numerical solutions of differential equations (integration by Euler's, Runge-Kutty's, Adams' methods etc.), and due to accepted simplifications, size-mass characteristics of the bomb, and the specific time of the bomb for the aiming-navigating system of the carrier (Pietraszek, 2019). The process of a proper bomb dropping is based on spotting the attacked target by pilot or weapon operator, and manoeuvring the plane to cover the sighting marker of the target with the attacked target. The manoeuvre makes the plane flight velocity vector cover the direction into the target. During approaching to the target the aiming-navigating system (ANS) calculates the horizontal distance to the target D_{xSC} . The distance is calculated from the relation:

where:

- D_{xSC} - horizontal distance to target;
- Y_{gS} - altitude indications received from the carrier radar measurement

z pokładu nosiciela;

- ϑ_{SC} - kąt wizowania względem horyzontu, wypracowywany przez nosiciela;
- D_{SC} - odległość od celu (w literaturze występuje także - nachylona odległość do celu).

Odległość nachylona może być określana bezpośrednio przy pomocy dalmierza laserowego lub obliczana jest metodą wysokościowo-kątową na podstawie wskazań radiowysokościomierza Y_{gs} i kąta wizowania celu ϑ_{SC} , przy czym z uwagi na większą dokładność, pomiar odległości poprzez dalmierz laserowy jest wariantem priorytetowym.

Jednocześnie z wyliczaniem D_{xSC} w procesie zbliżania się samolotu do celu, obliczane jest spodziewane położenie punktu upadku bomby, jej zasięg balistyczny A_B i czas balistycznego spadania T_B . Sygnał do zrzutu bomby wypracowany jest w chwili spełnienia warunku $D_{xSC} = A_B$ tzn. bieżąca pozioma odległość do celu równa jest z wyliczonym, balistycznym zasięgiem bomby dla bieżących parametrów lotu samolotu. Algorytm balistycznego bombardowania polega na określeniu tego jedyne punktu na trajektorii lotu samolotu, w którym zrzut bomby spowoduje, że trajektoria lotu bomby zakończy się w miejscu położenia atakowanego celu (Długołęcki i in., 2016).

Uzyskanie pożądanego efektu w schemacie bombardowania balistycznego zależy od dokładności celowania tzn. prawidłowego pokrycia celu przez znacznik celownika, błędów pomiarowych nadajników pokładowych, stanu atmosfery w momencie lotu bomby, dokładności obliczeń, rozbieżności nominalnych charakterystyk bomby wprowadzonych do SNC w stosunku do rzeczywistych.

Bomby kierowane niewyposażone w satelitarne i inercjalne układy naprowadzania, zrzucone są sposobem balistycznym z zachowaniem wysokości, prędkości, kąta i kierunku zrzutu na cel. System naprowadzania takiej bomby pozwala na rozszerzenie dozwolonej strefy zrzutu. Statki powietrzne

system;

- ϑ_{SC} - sighting angle against the horizon provided by the carrier;
- D_{SC} - distance to the target (sometimes named as the inclined distance to the target).

The inclined distance may be measured directly by a laser range finder, or may be calculated by the altitude angular method on the basis of indications of the radio-altitude meter Y_{gs} and the target sighting angle ϑ_{SC} , but the laser range finder measurement has priority due to greater accuracy.

Concurrently to the calculation of D_{xSC} at the time of approaching the target by the plane the calculations are made for an expected bomb falling point, the bomb's ballistic range A_B , and the time of ballistic falling T_B . A signal for dropping the bomb is produced when the condition is met $D_{xSC} = A_B$, i.e. the current horizontal distance to the target equals to the calculated ballistic range of the bomb for the instantaneous parameters of the plane flight. Algorithm of ballistic bombardment has to determine a singular point on the plane flight trajectory for dropping the bomb which secures that the bomb flight trajectory terminates at the site of the attacked target (Długołęcki et al., 2016).

Achievement of the desired effect for the ballistic bombardment method depends on the aiming accuracy, i.e. the proper covering of the target by the sight market, measurement errors of onboard transmitters, atmospheric conditions at the moment of bomb flight, accuracy of calculations, and the discrepancies between the nominal characteristics of the bomb entered to the ANS and the real ones.

The guided bombs which are not equipped with the satellite and inertial guiding systems are dropped by the ballistic method at established altitude, velocity, angle and dropping direction into the tar-

wyposażone w bomby kierowane z zabudowanymi satelitarnymi i nawigacyjnymi układami kierowanymi, do których wprowadza się przed wylotem lub podczas wykonywanego zadania współrzędne geocentryczne atakowanego celu, pozwalają na bombardowanie z rozszerzonej strefy dozwolonych zrzutów. Załoga ma większą możliwość podjęcia decyzji, w którym momencie lotu dokona zrzutu, a kombinowane systemy naprowadzania, tzn. wykorzystanie na etapie dolotu bomby do celu systemu GPS i/lub INS i drugiego systemu w rejonie celu (np. naprowadzania laserowego lub telewizyjnego) pozwalają na precyzyjne trafienie w cel.

Wiążący się z takim sposobem zrzutu, wzrost taktycznej elastyczności nosiciela, zmniejsza ryzyko jego zestrzelania, a zarazem zwiększa prawdopodobieństwo porażenia atakowanego celu. Ze wzrostem maksymalnej dozwolonej odległości zrzutu oraz rozszerzeniem bocznych granic dozwolonych zrzutów (tzw. rekursów) wzrasta bezpieczeństwo nosiciela, gdyż oddala się zagrożenie przeciwdziałania środków naziemnej obrony przeciwlotniczej przeciwnika. Możliwe jest również wykonywanie odpowiednich manewrów unikowych po zrzucie bomby. W konsekwencji powoduje to wzrost efektywności bojowej uzbrojenia. Zwiększenie zakresu dozwolonych odległości zrzutu umożliwia także użycie w jednym zejściu większej liczby bomb. Umożliwia to zniszczenie kilku celów rozmieszczonych w bombardowanym rejonie lub rażenie jednego celu kilkoma bombami. Ponadto, podczas operacyjnego poszukiwania i rozpoznania (prowadzonego przez pilota) dobrze zamaskowanego celu lub grupy celów, po wykryciu z odległości $D_{xSC} = A_B$ balistyczny sposób zrzutu nie może być zastosowany, co z kolei powoduje konieczność wykonania powtórnego zejścia na cel. W przypadku bombardowania bombami kierowanymi, strefy dozwolonych zrzutów zwiększają się i istnieje możliwość przepro-

get. The guiding system of such bomb extends the permitted zone of dropping. The aerial platforms equipped with guided bombs with integrated satellite and navigation control systems can be programmed before take-off or during the combat mission with the entered geocentric coordinates of the attacked target to bomb from the extended zone of permitted droppings. The crew has more chances for making decision about the moment of dropping, whereas the guiding systems combining GPS and/or INS, and yet another system at terminal part of trajectory (e.g. a laser or television guidance) secure a precision hitting of the target.

As such method of dropping provides more tactical possibilities for the carrier then the risk of shooting it down is diminished and the probability for hitting the attacked target increases. The safety of the carrier increases together with the maximal permitted distance of dropping and with the breath of the side borders for the permitted droppings (so called recourses) as the threat of counteractions from the enemy ground antiaircraft defence assets decreases. It is also possible to perform some avoidance manoeuvres after bomb dropping. Finally, it increases the combat efficiency of the weapon system. At the increased range of permitted droppings a greater number of bombs may be used in one mission. It provides a possibility for killing a few targets placed in the zone of bombing or for hitting one target by a few bombs. Moreover, during operational searching and identification (carried out by the pilot) of a well camouflaged target, or a group of targets, the ballistic method of dropping cannot be applied when the detection takes place at distance of $D_{xSC} = A_B$, and the second approach to the target has to be made. In the case when the controlled bombs are used it is possible to perform the attack at this approach as the

wadzenia ataku w tym zakresie.

3. Systemy naprowadzania lotniczych środków bojowych

Systemy kierowania powietrznych środków rażenia (PŚR), dzielimy na programowane układy naprowadzania i układy otrzymujące sygnał od celu (Grenda, Bielawski, 2017). Ze względu na stopień automatyzacji wyróżniamy systemy kierowania automatyczne i półautomatyczne. Środki rażenia z zabudowanymi układami samonaprowadzania dzielimy na (Adamczyk, Mazur, Olearczuk, Skomra, 1991; Grenda, Bielawski, 2017):

- pasywne (podczerwone, radiolokacyjne, optoelektroniczne);
- półaktywne (radiolokacyjne, laserowe);
- aktywne (radiolokacyjne).

Stan aktualny i rozwój systemów naprowadzania uwarunkowany jest wieloma czynnikami. Jednym z zasadniczych czynników stymulujących ich rozwój jest dążenie do zapewnienia efektywnego, a zarazem pozbawionego nadmiernego ryzyka działania. Podstawą cechą obecnie prowadzonych działań jest precyzyjny i skuteczny atak na dokładnie wyselekcjonowane cele, spoza zasięgu obrony przeciwlotniczej przeciwnika i bez względu na warunki atmosferyczne czy porę dnia. Realizowane jest to w większości przypadków przy użyciu systemu naprowadzania znajdującą się w środku bojowym.

3.1. Półaktywny system laserowy

Technika naprowadzania z wykorzystaniem półaktywnego systemu laserowego (SAL - semi-active laser) łączy wysoką precyzję z zaletami wykorzystania operatora, uzbrojenia w procesie sterowania.

Czujniki uzbrojenia wykorzystują SAL do wykrycia zakodowanej plamki laserowej, która jest tworzona przez oświetlenie urządzeniem wskazującym cel. Plamka laserowa wskazuje cel ataku podczas całego procesu naprowadza-

zones of permitted droppings are greater.

3. Airborne Combat Assets Guiding Systems

Control systems of aerial assets of striking (AAS) are divided on programmed guiding systems and the systems receiving a signal from the target (Grenda, Bielawski, 2017). Regarding the level of automatization the automatic and semiautomatic control systems may be distinguished. The striking assets with the integrated self-guiding systems are divided into (Adamczyk, Mazur, Olearczuk, Skomra, 1991; Grenda, Bielawski, 2017):

- Passive (infrared, radar, optoelectronic);
- Semi-active (radar, laser);
- Active (radar).

The state of art and development of the guidance system technology depends on many factors. One of the essential factors stimulating their development is a tendency securing the highest efficiency at not excessive risk. The precise and efficient attack delivered to accurately selected targets from the distance beyond the range of the enemy anti-aircraft defence at every atmospheric conditions and part of day is a basic feature of present stand-off operations. In most cases it is performed by using a guiding system integrated in the combat asset.

3.1. Semi-active Laser System

Technique of guiding employing the semi-active laser system (SAL) combines the high precision with the benefits of the presence of weapon's operator in the control process.

The weapon sensors use the SAL for detection of a coded laser spot produced by lighting the target with the indicating device. The laser spot indicates the target to be attacked during the whole time of

nia środka bojowego. Koordynacja procesu naprowadzania, jest osiągnięta z prędkością światła (promieniowania laserowego), bez konieczności podatnego na błędy procesu przesyłania danych zawierających współrzędne celu.

Laserowe systemy mogą być skutecznie wykorzystane także w terenie zurbanizowanym. Konieczne jest jednak zapewnienie stałej linii widzenia pomiędzy celem, urządzeniem wskazywania celu i uzbrojeniem. Do wskazywania celu mogą być wykorzystane urządzenia naziemne oraz powietrzne. Przy zastosowaniu laserowego systemu naprowadzania konieczne jest zapewnienie wzajemnej widoczności oraz uzgodnienie stosowanych kodów przed misją. Efektywność użycia systemów uzbrojenia sterowanych laserowo jest silnie zależna od warunków atmosferycznych, widzialności (chmury, dymy itp.) (Długołęcki i in., 2016).

3.2. System GPS/INS

Systemy naprowadzania wykorzystujące satelitarny system nawigacyjny i inercjalny układ sterowania (GPS/INS), są relatywnie tanimi systemami precyzyjnego celowania należącymi do klasy autonomicznych układów kierowania. Są to rozwiązania bardzo efektywne w przypadku atakowania celów stacjonarnych lub mobilnych, dla których można przyjmować, że ich położenie nie zmieni się w czasie niezbędnym do zaplanowania i wykonania ataku.

System sterowania wykorzystuje wielokanałowy odbiornik GPS oraz moduł inercjalny INS (INS - Inertial Navigation System), które nadzorują położenie geograficzne oraz orientację przestrzenną systemu uderzeniowego tak, aby wypracować dane do wyznaczenia trajektorii lotu gwarantującej dokładne uderzenie w cel. INS określa w sposób autonomiczny bieżące parametry lotu z dokładnością do kilkudziesięciu metrów i jest odporny na zakłócenia, natomiast odbiornik GPS aktualizuje je z dokładnością do kilku metrów.

Głównym zadaniem odbiornika systemu

the combat asset guiding process. Coordination of the guiding process is made with the velocity of light (laser beam) without any need for transmitting the data of target coordinates which may generate some errors.

The laser systems may be also used effectively in the urban terrain. But then, a permanent visibility is needed between the target, indicating device and the weapon. The target may be indicated by the ground or airborne devices. For laser guiding system the mutual visibility must be secured and a coding has to be agreed before the mission. Efficiency of laser controlled weapon systems strongly depends on weather conditions and especially on visibility (clouds, smoke, etc.) (Długołęcki et al., 2016).

3.2. GPS/INS Systems

The guiding systems employing the Global Positioning System and the Inertial Navigation System (GPS/INS) belong to relatively inexpensive systems of precise aiming belonging to a category of autonomous control systems. They represent high efficiency at attacking the stationary or mobile targets for which it may be accepted that their position remains unchangeable within the time needed for the planning and execution of the attack.

The control system uses a multichannel GPS receiver and an inertial module INS which monitor the geographic position and spatial orientation of the striking system to elaborate the necessary data for calculating the flight trajectory which warrants the precise hitting of the target. The INS is resistant against the interferences and determines in an autonomous way the current flight characteristics with the accuracy of a few dozen metres, whereas the GPS receiver updates them with the accuracy of a few metres.

GPS jest ustalenie pozycji obiektu przy wykorzystaniu co najmniej 4 sztucznych satelitów Ziemi. Są to odbiorniki wielokanałowe, umożliwiające jednoczesną rejestrację sygnałów pochodzenia nawet od 12 satelitów. W tanich beznapędowych systemach uzbrojenia np. JDAM, system sterowania koryguje balistyczny tor lotu środka bojowego tak, aby trafił on w zamierzony cel, którego współrzędne zostały wprowadzone przed zrzutem uzbrojenia.

Współrzędne celu są wprowadzane do systemu sterowania środka bojowego przed lotem lub przekazane przed zrzutem z pokładowego systemu sterowania uzbrojeniem poprzez szynę danych MIL-1760, wykorzystując uaktualnione dane z systemu pokładowego lub zewnętrznego systemu lokacji celów. Nowoczesne wskaźniki-oświetlacze laserowe celu, czy radarowe systemy obserwacji terenu (SAR), posiadają możliwość automatycznego wyznaczania współrzędnych celów z obrazowań, jakie są przez nie generowane.

Systemy GPS są odporne na wpływ warunków pogodowych, maskowanie celu, mniej natomiast na zakłócenia naturalne (promieniowanie kosmiczne, zaburzenia na słońcu) i walkę radioelektroniczną. Systemy uzbrojenia ostatniej generacji są bardziej odporne na zakłócanie systemu GPS poprzez stosowanie modułów GPSAJ. Systemy uzbrojenia wykorzystujące standardowe odbiorniki mają ograniczoną dokładność trafienia do kilkunastu metrów i mogą być stosowane do zwalczania obiektów stacjonarnych. Sygnał systemu GPS w pobliżu powierzchni Ziemi jest ekstremalnie słaby i podatny na zakłócenia przez zamierzoną walkę radioelektroniczną, jak i przypadkowe zakłócenia - szumy elektromagnetyczne (Długołęcki i in., 2016).

3.3. Systemy telewizyjne i termiczne

Kamery telewizyjne TV, na podczerwień IR i inne sensory zobrazowania w paśmie widzialnym i podczerwonym były wykorzystywane w precyzyjnych systemach naprowadzania uzbrojenia już od początku 1970 r. Ta-

The main task of GPS receiver is the establishment of the object's position with the use of at least 4 Earth satellites. The multi-channel receivers can record at the same time the signals originating from 12 satellites. The control system deployed in cheap non-propelled weapon systems like JDAM corrects the ballistic flight path of the combats asset in a way securing its hitting into the designated target, having its coordinates entered before the dropping of the weapon.

The coordinates of the target are entered into the weapon control system before the flight or are transferred from the onboard weapon control system via MIL-1760 data bus before the dropping by using the updated data from the onboard or external systems of target location. Modern laser indicators-illuminators of targets, or the radar terrain surveillance systems (SAR), can automatically generate the coordinates of targets from the images they produce.

The GPS solutions are resistant against weather conditions, camouflage of targets, and in a lesser degree against the natural interferences (cosmic radiation, disturbances on the Sun) and the radio-electronic warfare. The weapon systems of the last generation are better protected against the GPS interferences due to the application of GPSAJ modules. The weapon systems deploying the standard receivers have an accuracy of hitting limited to a dozen metres and may be used to fight the stationary objects. The GPS signal is very weak near the Earth surface and is vulnerable to the intentional radio-electronic warfare and the random electromagnetic interferences-noises (Długołęcki et al., 2016).

3.3. Thermal and Television Systems

Television TV, infrared IR cameras and other sensors of visualisation on the visible and infrared bands have been used in the weapon precise guiding systems since the beginning of 1970-ties. Such guiding sys-

kie systemy naprowadzania stosowane były w uzbrojeniu o relatywnie małym zasięgu, takim jak lotnicze pociski raketowe Maverick (pierwszej generacji), bomby naprowadzane telewizyjnie (również pierwszej generacji) czy w pociskach uderzeniowych średniego zasięgu, takich jak Hale Lite i SLAM. Wprowadzenie wydajniejszych sensorów telewizyjnych, termalnych (macierzy CCD) oraz procesorów sygnałowych umożliwiło budowę i stosowanie autonomicznych rakiet przeciwpancernych typu "odpal i zapomnij", a także bomb kierowanych z TV głowicą samonaprowadzania i bezprzewodowym układem przekazywania komend typu Data Link.

Optoelektroniczne sensory zapewniają bardzo ważne funkcje, które stają się niezbędne na współczesnym polu walki, takie jak ręczna (operator uzbrojenia) lub automatyczna identyfikacja celu, zwalczanie celów ruchomych i wybór celu ataku podczas lotu środka bojowego, nawet dla autonomicznych systemów uzbrojenia, poprzez użycie rozpoznania i śledzenia celu (ATA/ATR) oraz umożliwiają pewną ocenę zniszczeń na polu walki, czego nie umożliwiają systemy oparte o GPS, SAL lub sterowane radarem (Długołęcki i in., 2016).

3.4. System z aktywnym radarem z falą milimetrową (MMW Radar)

W czasie lotu środka bojowego z MMW Radar, we wcześniej zdefiniowanym punkcie trajektorii lotu, gdzie jest przewidywana możliwość widoczności celu, uruchamiany jest radar w trybie przeszukiwania, który nakerowuje się na sygnał odpowiadający spodziewanemu celowi. Sygnał taki może być silniejszy niż sygnały od innych obiektów lub mieć specyficzną sygnaturę. Rakieta z radarowym systemem naprowadzania jest podatna na przeciwdziałanie atakowanego. Stąd też czasami niezbędna jest interwencja człowieka na etapie weryfikacji celu. Inne zastosowania dużo mniejszych radarowych systemów napro-

tems were deployed in the weapons of a relatively short range like airborne rocket missiles Maverick (first generation), television guided bombs (also the first generation) or in the medium range striking missiles like Hale Lite and SLAM. The implementation of more efficient television and thermal sensors (CCD matrix) and signal processors effected the building and use of autonomous antitank missiles of "fire and forget" family, and the controlled bombs with a TV self-guided head and a wireless command transmission system Data Link.

Optoelectronic sensors provide a lot of important and indispensable functions for the contemporary battlefield such as a manual (weapon's operator) or automatic target identification, engagement of movable targets, and a selection of a target to be attacked during the flight of the combat asset, even for the autonomous weapon systems, through the employment of target recognition and tracking systems (ATA /ATR), and finally they provide an assessment of damages on the battlefield what was not possible for the systems based on GPS, SAL, or radar control (Długołęcki et al., 2016).

3.4. Millimetre Wave (MMW) Radar Active System

The combat asset flying with MMW Radar has the radar switched on in the surveillance mode at the previously defined point of trajectory where the visibility of the target was predicted, to direct the asset to the signal corresponding to the expected target. Such signal may be stronger than the signals received from other objects or may have a specific signature. The missile with the radar guiding system is susceptible to the counteractions of enemy. Hence, in some cases a human intervention is needed at the stage of target verification. Other applications of smaller ra-

wadzania wykorzystują radary pracujące na falach milimetrowych do lokalizacji, klasyfikacji, identyfikacji, wykrywania pojazdów opancerzonych i innych celów o wysokim priorytecie. Wykorzystanie takich radarów zapewnia wysoką rozdzielczość, zdolność operowania w dowolnych warunkach atmosferycznych oraz odporność na aktualnie stosowane przez pojazdy opancerzone konwencjonalne systemy przeciwdziałania (Długołęcki i in., 2016).

3.5. System naprowadzania wykorzystujący radar laserowy (LADAR)

Radary laserowe (LADAR - Laser Detection And Ranging) wykorzystują wiązki laserowe do przeszukiwania i przetwarzania sygnału echa od celów tak, aby stworzyć wirtualny obraz terenu. Procesor LADAR-u wyszukuje znane wzorce w uzyskiwanych obrazach. Porównuje on te obrazy z trójwymiarowymi wzorcami celów przechowywanymi w pamięci systemu uzbrojenia.

Dzięki zdolności do przeszukiwania dużego obszaru z dużą rozdzielczością i możliwości budowania szczegółowego obrazu rozpoznawanego terenu, czujniki LADAR-owe są stosowane w systemach patrolujących ponad terenem, które mogą patrzeć na cele z różnych kątów, weryfikując identyfikację celu i wybierając najlepszą pozycję do ataku tak, aby uzyskać zakładany efekt.

Głowica przeszukująca radaru laserowego może wykryć obiekty i zidentyfikować ich specyficzne właściwości z rozdzielczością do 15 cm (z odległości 1000 m).

Algorytm automatycznego przechwytywania celu ciągle przetwarza zobrazowania w celu identyfikacji i przechwycenia celu, opierając się na trójwymiarowych wzorcach załadowanych do pamięci przed misją. Proces ten określa czy priorytetowe cele znajdują się na przeszukiwanym obszarze, a kiedy ich obecność jest wykryta, nosiciel rozpoczyna krążenie nad spodziewanym celem, aby zebrać większą ilość danych. Uzyskane, trójwymiarowe zobrazowanie celu może posłużyć zarówno do wykluczenia, jak i potwierdzenia celu. Jeżeli cel jest potwierdzony i przeznaczony do ataku wtedy sys-

tem wykorzystujący radary pracujące na falach milimetrowych do lokalizacji, klasyfikacji, identyfikacji, wykrywania pojazdów opancerzonych i innych celów o wysokim priorytecie. Wykorzystanie takich radarów zapewnia wysoką rozdzielczość, zdolność operowania w dowolnych warunkach atmosferycznych oraz odporność na aktualnie stosowane przez pojazdy opancerzone konwencjonalne systemy przeciwdziałania (Długołęcki et al., 2016).

3.5. Guiding System with Laser Radar (LADAR)

Laser radar (LADAR - Laser Detection And Ranging) deploys the laser beams for scanning and converts the received echo signals reflected from objects to produce a virtual picture of terrain. The LADAR's processor searches for known patterns in the received pictures. It compares these pictures with the three-dimensional patterns of targets stored in the memory of the weapon system.

Due to the capacities for searching through a large area with the high resolution, and building a detailed picture of the scanned terrain, the LADAR sensors are used for the terrain patrolling systems to look for the targets at different angles and verify the target identification, and to select the best attack position securing the expected result.

The scanning head of the Laser Radar may detect objects and identify their specific characteristics with the resolution of 15 cm (at the range of 1000m).

The algorithm for automatic acquisition of targets continuously processes the images for identification and acquisition of the target basing on three dimensional patterns loaded to the memory before the mission. This process decides if any priority targets are within the searched area and after detecting their presence the carrier starts to encircle over the expected target to collect more data. The received three dimensional image of the target may be used both for the rejection or confirmation of the target. If the target is confirmed

tem uzbrojenia ustawia się w pozycji i nakierowuje na taki punkt celu, który gwarantuje największą skuteczność ataku (Długołęcki i in., 2016).

3.6. System wykorzystujący cyfrowe przetwarzanie obrazu

Taka technika naprowadzania wykorzystywana jest głównie na końcowych fazach lotu środka bojowego, gdzie istnieje potrzeba rozpoznania i identyfikacji celu. Może być również stosowana do zapewnienia autonomicznej nawigacji nad terenem, dla którego tworzone są dokładne mapy.

Sensor przeszukuje teren identyfikując charakterystyczne obiekty wykorzystywane jako pomoce nawigacyjne, zapewniając bądź precyzyjne zidentyfikowanie celu, bądź uaktualnienia orientacji i nawigacji trasy dolotowej do celu.

Technika ta opiera się na wielu punktach orientacyjnych i trójwymiarowym obrazie obiektów i jest ona bardzo odporna na zakłócanie przez przeciwnika.

Metoda naprowadzania z wykorzystaniem mapowania terenu jest przede wszystkim wykorzystywana do nawigacji w środkowej fazie lotu, tj. dolotu do strefy ataku (tzw. korelacyjne układy nawigacji). System poszukuje znanych konturów gruntu (rzeźby terenu), porównuje je z danymi zawartymi w mapie cyfrowej przechowywanej w komputerze misji systemu uzbrojenia i koryguje trasę lotu w kierunku celu. Metoda ta jest szczególnie efektywna w terenie urozmaiconym, gdzie naturalne ukształtowanie terenu lub zbudowane przez człowieka drogi, budynki, kanały itp. mogą być wykorzystywane do orientacji (Długołęcki i in., 2016).

3.7. Porównanie systemów naprowadzania

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe cechy (wady i zalety) zaprezentowanych powyżej systemów naprowadzania, stosowanych w lotniczych (głównie beznapędowych) środkach bojowych precyzyjnego zrzutu.

as a legitimate target for attack then the weapon system takes a suitable position and direction into such point of the target to secure the highest efficiency of attack (Długołęcki et al., 2016).

3.6. Systems with Digital Image Processing

Such guiding technique is mainly used at the terminal phases of the combat asset flight where the target has to be recognised and identified. It may be also used for providing an autonomous navigation over the detailly mapped terrain.

The sensor scans the terrain to identify the characteristic objects used as the navigational references and to identify precisely the target, or to update the orientation and the approaching path to the target.

This technique is based on many orientating points and on a three-dimensional image of objects, and it is very resistant against the jamming and the enemy interference.

The guiding method employing the terrain mapping is mainly used for the navigation at the middle phase of flying path i.e. at approaching the attacking zone (so called correlating navigation systems). The system is looking for known contours of the ground (terrain layout) to compare them with the data included in the digital map which is stored in the weapon system mission computer and to correct the flying path to the target. The method is especially effective in the complex terrain where the natural profiles of the terrain or the manmade roads, buildings, channels, etc. may be used for the orientation (Długołęcki et al., 2016).

3.7. Comparison of Guiding Systems

The basic features (deficiencies and advantages) of the presented above guiding systems (mainly unpropelled) for the airborne precision dropping combat assets are shown in table 1.

Tabela 1. Porównanie systemów naprowadzania lotniczych środków bojowych precyzyjnego rażenia

Lp.	System naprowadzania	Zalety	Wady
1	GPS/INS	- autonomiczny - pasywny - niewrażliwy na warunki meteorologiczne - niska cena	- podatny na zakłócenia i WRE - brak możliwości selekcji i wyboru celu po zrzucie - tylko do celów stacjonarnych
2	Semi Active Laser	- półautonomiczny - możliwość ataku celów ruchomych	- wrażliwy na warunki meteorologiczne i walkę radioelektroniczną - konieczność podświetlenia celu
3	Elektro-Optical IV-IR	- półautonomiczny lub autonomiczny - pasywny - zdolność do wyboru i selekcji celu ataku - możliwość ataku celów ruchomych - odporny na zakłócenia	- ograniczony zasięg - problem z transmisją danych
4	Radar/MMW Radar	- autonomiczny - aktywne naprowadzanie - odporny na warunki meteo. - możliwość zmiany i wyboru celu ataku - możliwość ataku celów ruchomych	- wysoka cena
5	LADAR	jak dla systemu Radar/MMW Radar	
6	Scene Matching	- autonomiczny - pasywny - odporny na zakłócenia	- wymaga map terenu - wymaga obrazu celu - tylko do celów stacjonarnych
7	Terrain Mapping	- autonomiczny - odporny na zakłócenia	- wymaga map terenu - tylko do celów stacjonarnych

Table 1. Comparison of guiding systems for airborne combat assets of precision striking

No	Guiding system	Advantages	Disadvantages
1	GPS/INS	- autonomous - passive - insensitive to weather conditions - low price	- vulnerable to jamming and REW - lack of possibilities to select and point the target after dropping - only for stationary targets
2	Semi Active Laser	- semi-active - possibilities to attack moving targets	- vulnerable to weather conditions and radio-electronic warfare - necessity for target illumination
3	Electro-Optical IV-IR	- semi or fully autonomous - passive - possible selection of target for attack - possibility to attack moving targets - resistant against jamming	- limited range - problem with data transmission
4	Radar/MMW Radar	- autonomous - active guidance - resistant against weather conditions - possibilities for changing the target - possibility for attacking the moving targets	- high price
5	LADAR	as Radar/MMW Radar	
6	Scene Matching	- autonomous - passive - insensitive to jamming	- terrain maps required - target image required - only for stationary targets
7	Terrain Mapping	- autonomous - insensitive to jamming	- terrain maps required - only for stationary targets

Analiza porównawcza wykazuje, że nie ma idealnego rozwiązania, dlatego we współczesnych precyzyjnych środkach bojowych stosowane są kombinacje kilku systemów. Do nawigacji po trasie, na etapie do lotu do strefy ataku stosowany jest system GPS/INS, jako autonomiczny, pasywny i niewrażliwy na warunki atmosferyczne. W końcowej fazie lotu bomby, do korekcji i selekcji stosowany jest system optoelektroniczny (kamera telewizyjna, termowizyjna itp., LADAR) i w tym kierunku idą ostatnie prace rozwojowe [(Długołęcki i in., 2016; Grenda, Bielawski, 2017; Koruba, Osiecki, 2006; Pietraszek, 2019).

4. Metody sterowania lotniczymi środkami bojowymi

4.1. Sterowanie aerodynamiczne

Podstawą działania sterów aerodynamicznych są siły i momenty aerodynamiczne powstałe na skutek zmiany położenia powierzchni sterowych względem prędkości oporu. Poprzez celowy ruch powierzchni sterowych, układ sterowania wywołuje powstanie momentów sił aerodynamicznych wokół środka masy obiektu. Efektem tego jest zmiana położenia obiektu oraz zmiana obciążeń aerodynamicznych oddziałujących na obiekt, co powoduje zmianę jego wektora prędkości lotu (Głębocki, 2013).

Rozwiązania takie charakteryzują się dużym opóźnieniem między wypracowanym sygnałem sterującym a odpowiedzią całego obiektu. Może to być wada w przypadku precyzyjnego naprowadzania obiektu na cel w krótkim czasie np. mała wysokość zrzutu, niewielka odległość do celu), gdy wymagana jest szybka reakcja obiektu na sygnały sterujące. Zaletą tego systemu jest możliwość naprowadzania obiektów stabilizowanych przy pomocy stabilizatorów lub stabilizowanych obrotowo. Systemy te pozwalają na zasto-

The comparison analysis shows that there is no ideal solution and for that the contemporary precise combat assets employ combinations of a few systems. The GPS /INS system is used to navigate on the flying path at the stage of approaching the zone of the attack as it operates independently in passive way, and is insensitive to weather conditions. At the bomb terminal flying path an optoelectronic system (video camera, thermal camera, etc., LADAR) for correction, selection is used, and this is a trend of many current developments (Długołęcki et al., 2016; Grenda, Bielawski, 2017; Koruba, Osiecki, 2006; Pietraszek, 2019).

4. Airborne Combat Assets Control Methods

4.1. Aerodynamic Control

The aerodynamic forces and moments, produced in effect of changed position of controlling surfaces against the drag velocity, are the basis of operation for aerodynamic controls. The intentional movement of controlling vanes effects the moments of aerodynamic forces around the object's mass centre. It changes the position of the object, and the aerodynamical loads acting against the object, and finally its velocity vector (Głębocki, 2013).

Such solutions are characterised by a significant delay between the controlling signal and the reaction of the whole object. It may be a disadvantageous factor at cases of precise guiding of objects into the target within a short time (e.g. at low dropping altitude, small distance to target) when a rapid reaction of the object to the controlling signals is required. The system shows its benefits at guiding the objects with stabilisers or rotational stabilisation. These systems can employ different servomecha-

sowanie różnorodnych mechanizmów wykonawczych zasilanych energią elektryczną, lub serw gazodynamicznych. Metoda sterowania aerodynamicznego pozwala na długotrwałą pracę układu i dobór wielkości sił i momentów oddziałujących na obiekt, poprzez zmianę kąta wychylenia sterów.

4.2. Sterowanie gazodynamiczne

Podstawą działania sterów gazodynamicznych jest siła reakcji (ciągu), jaka powstaje na skutek wypływu gazów uzyskanych w wyniku spalania paliw w komorach silników.

Rozwiązanie to pozwala na szybką reakcję obiektu na powstałe siły wywołujące obrót obiektu wokół środka masy. Skuteczność działania sterów gazodynamicznych nie zależy wprost od gęstości powietrza i prędkości lotu. Jest to ich zaletą w porównaniu do sterów aerodynamicznych. Rozwiązanie to posiada mankament w postaci ograniczonego czasu działania (czas ograniczony jest ilością zgromadzonego gazu przeznaczonego do sterowania), co znacząco wpływa na zasięg obiektu. Sterowanie gazodynamiczne może być zastosowane do obiektów stabilizowanych obrotowo, jak i przy pomocy stabilizatorów (Głębocki, 2013).

4.3. Sterowanie impulsowe

Zasada impulsowej korekcji toru lotu polega na krótkotrwałym przyłożeniu siły o określonej wartości, wywołanej ukierunkowanym strumieniem gazów, w odpowiedni punkt sterowanego obiektu. Taki sposób sterowania realizowany jest na dwa sposoby.

Pierwszym sposobem jest umieszczenie silnika na paliwo ciekłe z dyszami rozmieszczonymi wokół środka ciężkości, prostopadle do osi głównej symetrii obiektu sterowanego. Złożoność tego systemu oraz duży koszt związany z budową wyklucza zastosowanie silnika na paliwo ciekłe z układem wykonawczym w bombach o ma-

nismis powered by electric energy or gas-dynamical servo-mechanisms. The method of aerodynamic control provides a long time operation of the system and allows for the change of magnitudes of forces and moments acting against the object through the change of inclination angle of vanes.

4.2. Gas Dynamic Stabilisation

The operation of gas-dynamic controls is based on the force of reaction (thrust) produced in effect of gas outflow due to combustion of propellants in the chambers of engines.

This solution provides a quick reaction of the object against the generated forces rotating the object against the mass centre. The efficiency of gas-dynamical controls does not depend directly on the air density and the flight velocity. It is an advantageous feature comparing with the aerodynamical controls. A drawback of this solution is a limited time of operation (it is limited by the amount of stored gas designated for control) what has a significant impact into the object's range. The gas-dynamical control may be used both for objects stabilised by the rotation or the stabilisers (Głębocki, 2013).

4.3. Impulse Control

The principle of impulse correction of the flight path is based on a short application of a force of specific value, produced by a directed stream of gases, into a suitable point of the controlled object. This way of control is performed in two methods.

The first method deploys a liquid propellant motor with nozzles placed around the mass centre in vertical directions against the main axis of the controlled object. The complexity of this system and a high cost of building excludes the application of the liquid propellant motor with the

łym wagomiarze i pociskach artyleryjskich.

Drugim sposobem sterowania impulsowego jest rozmieszczenie na obwodzie obiektu sterowanego jednorazowych rakietowych silniczków korekcyjnych. W tym układzie stosuje się zestaw niewielkich silniczków impulsowych na paliwo stałe. Każdy z silniczków może być uruchomiony oddzielnie i tylko raz. W obu tych systemach siła oddziałuje prostopadle do głównej osi symetrii sterowanego obiektu. Sterowane w ten sposób mogą być tylko obiekty osiowo symetryczne. Siła ciągu silnika korekcyjnego w pierwszej jak i drugiej metodzie powoduje zmianę wektora prędkości lotu obiektu, zarówno co do kierunku jak i wartości, a więc również toru lotu.

Zaletą pierwszego rozwiązania jest możliwość długotrwałej pracy oraz regulacji wielkości impulsu sterującego. Zaletą drugiego systemu jest bardzo prosty układ wykonawczy oraz możliwość zastosowania w mniejszych obiektach sterowanych, takich jak bomby i pociski artyleryjskie. Wadą sterowania impulsowego jest możliwość zamontowania tylko w obiektach stabilizowanych obrotowo. Bardzo dużą zaletą systemów sterowania impulsami jest natychmiastowe oddziaływanie sił sterujących na sterowany obiekt. Zastosowanie pojedynczych silników korekcyjnych pozwala na wykonanie takiej liczby manewrów obiektu, jaka jest liczba zabudowanych silniczków na obwodzie sterowanego obiektu. W założeniach przedstawionych w literaturze, liczba silników potrzebnych do naprowadzenia obiektu na cel wynosi 12 do 20 sztuk. Czas reakcji obiektu na sygnały jest o jeden do dwóch rzędów krótszy niż w przypadku sterowania innego niż bezpośrednio (Długołęcki i in., 2016; Głębocki, 2013).

W tabeli 2 przedstawiono wady i zalety opisanych systemów sterowania.

executive system in the low weight bombs and artillery shells.

Second control method deploys on the perimeter of the object a system of corrective rocket mini-motors of single action. The system deploys small impulse solid propellant mini-motors. Each of mini-motors may be fired individually and only one time. In the both systems the force is acting vertically to the main axis of symmetry of the controlled object. This way of control may be only applied to the objects with axial symmetry. In each method the thrust of a corrective motor changes the object flight velocity vector, and finally its flight trajectory, both in the direction and magnitude.

The first solution benefits in a possibility for long time operation and control of the steering pulse. The second solution benefits from a very simple executive system and possibilities for using in small size objects such as the artillery shells and bombs. A negative side of the impulse control is that it may be integrated only in objects with rotational stabilisation. The instantaneous reaction of steering forces into the controlled object is a great advantage of the impulse control systems. Deployment of individual corrective mini-motors allows for execution of manoeuvres which number equals to applied mini-motors at the perimeter of controlled object. The specifications presented in the literature show that the number of mini-motors needed for guiding the object into the target is between 12 to 20 items. The time of object reaction against the signals is one or two orders shorter than for any indirect controlling (Długołęcki et al., 2016; Głębocki, 2013).

Advantages and disadvantages of described control systems presents table 2.

Tabela. 2 Porównanie systemów sterowania kierowanych środków bojowych

Lp.	System sterowania	Zalety	Wady
1	Aerodynamiczny	<ul style="list-style-type: none"> - proste rozwiązania techniczne - duża różnorodność mechanizmów wykonawczych - długi czas pracy systemu na torze lotu - możliwość zastosowania w obiektach stabilizowanych obrotowo i stabilizatorami - możliwość zastosowania w obiektach naprowadzanych na płaskim torze lotu - możliwość doboru siły działającej na powierzchnie aerodynamiczne - niska cena 	<ul style="list-style-type: none"> - długi czas reakcji obiektu sterowanego po otrzymaniu sygnału sterującego - mała efektywność sterowania obiektów o dużej prędkości i na krótkich odcinkach lotu
2	Gazodynamiczny	<ul style="list-style-type: none"> - szybki czas reakcji obiektu na sygnał sterujący - możliwość zastosowania do obiektów stabilizowanych obrotowo lub stabilizatorami 	<ul style="list-style-type: none"> - skomplikowana konstrukcja - ograniczony czas pracy układu na torze lotu
3	Impulsowy	<ul style="list-style-type: none"> - najszybszy czas działania obiektu na sygnał sterujących - prosta konstrukcja - duża manewrowość sterowanego obiektu 	<ul style="list-style-type: none"> - ograniczony zasięg sterowanego toru lotu obiektu przy zastosowaniu silniczków korekcyjnych - obiekty sterowane muszą być stabilizowane obrotowo i posiadać konstrukcję osiowo symetryczną - bardzo mała efektywność systemu naprowadzania na torach lotu mniejszych niż $\Theta 45^\circ$

Table 2. Comparison of steering systems for the controlled combat assets

No	Steering system	Advantages	Disadvantages
1	Aerodynamical	<ul style="list-style-type: none"> - simple technological solutions - great variety of executive mechanisms - long duration of system operation on flight path - may be used in objects with stabilisers or rotating stabilisation - may be used in objects guided on flat flying path - the force acting to the aerodynamical surfaces may be controlled - low price 	<ul style="list-style-type: none"> - long time of steered object's reaction after receiving the control signal - low efficiency of steering for objects with high velocities and for short parts of the flying path
2	Gas-dynamical	<ul style="list-style-type: none"> - rapid reaction of the object to steering signal - may be used in objects with stabilisers or rotating stabilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - complex structure - limited time of system operation on the flying path
3	Impulse	<ul style="list-style-type: none"> - the shortest object's reaction time to the steering signal - simple design - high manoeuvrability of controlled object 	<ul style="list-style-type: none"> - limited range of controlled path by using the corrective mini-motors - the steered objects must be stabilised by rotation and have the axial symmetry design - very low efficiency of the guiding system for the flying paths below $\Theta 45^\circ$

5. Wymagania dotyczące współczesnych bomb kierowanych

Współczesne bomby charakteryzują się starannym opracowaniem aerodynamicznym, są silnie wydłużone (smukłe) i posiadają stabilizatory. Do bomb ogólnego przeznaczenia stosuje się z reguły dwa zapalniki (czołowy i denny). Są to, zależnie od potrzeb, zapalniki uderzeniowe natychmiastowego działania, ze zwłoką lub zbliżeniowe. Współczesne środki bojowe konstruowane są z wykorzystaniem zasad modułowości i unifikacji (Długołęcki i in., 2016; Grenda, Bielawski, 2017). Modułowość oznacza tworzenie wymiennych (na etapie produkcji lub/i w procesie eksploatacji) zespołów lub części składających się na złożony system (wyrób), połączonych razem w celu wykonywania założonych zadań, używając do tego pewnych wspólnych elementów i interfejsów. Połączenie modułowości w budowie lotniczych środków bojowych (łśb), w tym i bomb kierowanych z zasadami unifikacji na poziomie poszczególnych modułów niesie za sobą konkretne korzyści, z których najważniejsze to:

- zmniejszenie różnorodności wyrobów poprzez ujednoczenie ich cech np. konstrukcji, kształtu, wymiarów, parametrów jakościowych, cech użytkowych;
- skrócenie procesu konstruowania;
- obniżenie kosztów na etapie badań i produkcji;
- uproszczenie procesów produkcyjnych;
- umożliwienie specjalizacji i koncentracji produkcji;
- ułatwienie modernizacji w czasie eksploatacji;
- zwiększenie elastyczności w zakresie zdolności operacyjnych poprzez możliwość zamiany modułów.

Dodatkowo, dla współczesnych lotniczych bomb kierowanych, stawiane wymagania mają wieloaspektowy charakter i wiążą się z:

- poszerzeniem możliwości zastosowania

5. Requirements for Modern Guided Bombs

Present bombs have excellent aerodynamics, are elongated (slender), and have stabilisers. The bombs of general designation usually have two fuses (head and base). Depending on demand they are the proximity fuses, or percussion fuses of instant or delayed action. The contemporary combat assets are designed according to principles of modularity and unification (Długołęcki i in., 2016; Grenda, Bielawski, 2017). The modularity is a fabrication of exchangeable modules or parts (at the stage of production or/and the service life) being a part of a complex system (article) which are put together to perform the accepted tasks by using certain common elements and interfaces. Combination of modularity in designing the airborne combat assets (ACA), including the guided bombs, with the principles of unification at the level of particular modules gives the following real benefits:

- Reduction of a variety of articles due to the unification of their features e.g. design, shape, size, quality parameters, operation performance;
- Reduction of designing process;
- Reduction of costs for development and production;
- Simplification of production processes;
- Specialisation and concentration of production;
- Facilitation of upgrading at the service life;
- Increasing the flexibility for operational capacities due to the exchange of modules.

Moreover, the requirements for the modern airborne guided bombs have a multi-aspect character connected with:

- (dot. warunków pogodowych i pory dnia);
- zwiększeniem zakresu taktycznych parametrów użycia, w tym głównie odległości, wysokości, prędkości i kątów zrzutu;
- zwiększeniem precyzji w dokładności trafienia;
- zwiększeniem efektywności rażenia celu;
- zmniejszeniem kosztów;
- uwzględnieniem wielu czynników o charakterze taktyczno-technicznym, dotychczas niebranych pod uwagę.

6. Wymagania stawiane w procesie projektowania, konstrukcji i eksploatacji ćwiczebnych bomb kierowanych

Kierowane bomby ćwiczebne, tak samo jak ich odpowiedniki bojowe, podwieszane są na węzłach przeznaczonych do przenoszenia bojowego uzbrojenia bombardierskiego. Konstrukcja i sposób obsługi bomb ćwiczebnych pozwala na wykształcenie nawyków wśród personelu technicznego, jak i latającego, takich samych jak przy uzbrojeniu bojowym. Ponadto współczesne lotnicze kierowane bomby ćwiczebne cechują się:

- dużą celnością;
- uproszczoną konstrukcją, mniejszą masą i wymiarami, co efektywnie zmniejsza koszty przechowywania i produkcji;
- modułową konstrukcją bomby umożliwiającą zastosowanie systemu naprowadzania i sterowania z bomby bojowej;
- zredukowaniem lub brakiem ładunków wybuchowych, wyeliminowaniem w części bomb zapalników, co przekłada się na poprawę bezpieczeństwa w procesie szkolenia;
- możliwością podwieszenia większej liczby bomb pod nosicielami, co pozwala na zredukowanie kosztów szkolenia (większa liczba zrzutów szkolnych w jednym wylocie);
- zmniejszeniem strat i zanieczyszczeń

- Extension of deployment (weather conditions and part of day);
- Increase of tactical performance like range, altitude, velocity and angles of dropping;
- Increased precision of hitting;
- Increased efficiency of target striking;
- Reduction of costs;
- Counting many factors of tactical-technical character which were not considered up to now.

6. Requirements for Development and Use of Exercise Guided Bombs

The guided exercise bombs are fastened to bombardment equipment fixing locks in the same way as their live counterparts. Design and handling of the exercise bombs teaches the same skills to the flying and technical personnel as the live ordnance. Moreover, the nowadays airborne guided exercise bombs are characterised by:

- High accuracy;
- Simplified design and lower mass and size what efficiently reduces the costs of storing and production;
- Modular design of the bomb facilitating the use of the guiding and controlling systems from the live bomb;
- Reduced presence or complete lack of explosive charges, and removing the fuses for some bombs what improves the safety in the process of training;
- A greater number of bombs may be suspended under the carrier what reduces the costs of training (greater number of practicing droppings at one mission);
- Reduction of environmental losses and contamination in the case of

- nia środowiska naturalnego w przypadku nietrafienia w cel;
- ograniczeniem negatywnego wpływu na środowisko naturalne;
- zastosowaniem do budowy bomb tworzyw sztucznych w celu zminimalizowania zniszczeń i skażenia obiektów po aktywacji ładunku;
- kształtem bomby, który minimalizuje rykoszetowania.

7. Lotnicza ćwiczebna bomba kierowana małego wagomiaru LBĆw-K

Biorąc pod uwagę powyższe wymagania opracowano wstępny projekt lotniczej ćwiczebnej bomby kierowanej (ITWL, 2016; Pietraszek, 2019). Zaprojektowana ona została na bazie używanej przez Siły Powietrzne RP lotniczej bomby ćwiczebnej małego wagomiaru LBĆw-10. Ćwiczebną bombę zakwalifikowano pod względem przeznaczenia do grupy bomb pomocniczych, a pod względem realizacji ruchu jako bombę lotniczą kierowaną. Sposób uzbrajania nosiciela w LBĆw-K, trajektoria lotu, zrzut bomby oraz sposób naprowadzania na wskazany cel jest taki sam, jak dla bomb kierowanych używanych w SZRP. Uwzględniając wymiary bomby LBĆw-10, powstała bomba kierowana w układzie aerodynamicznym typu „kaczka”. Na rysunku 3 przedstawiono ogólny jej widok.

Półaktywny laserowy system naprowadzania zaprojektowano w oparciu o system zabudowany na bombach kierowanych używanych w wojsku polskim, który jest kompatybilny z laserowymi oświetlaczami celu GLTD-II. Zespół detekcyjno-wykonawczy składa się z bloku detektorów laserowych (rys. 4), bloku logicznego (rys. 5) oraz bloku wykonawczego. Blok detektorów wykrywa odbitą od celu energię laserową i przekształca ją na sygnały elektryczne, natomiast blok logiczny obrabia te sygnały i wypracowuje

- missing the mark;
- Limitation of a negative impact into the natural environment;
- Application of plastic materials for design of the bombs to minimise damages and contamination of objects after activation of the charge;
- The shape of the bomb which minimises the ricocheting.

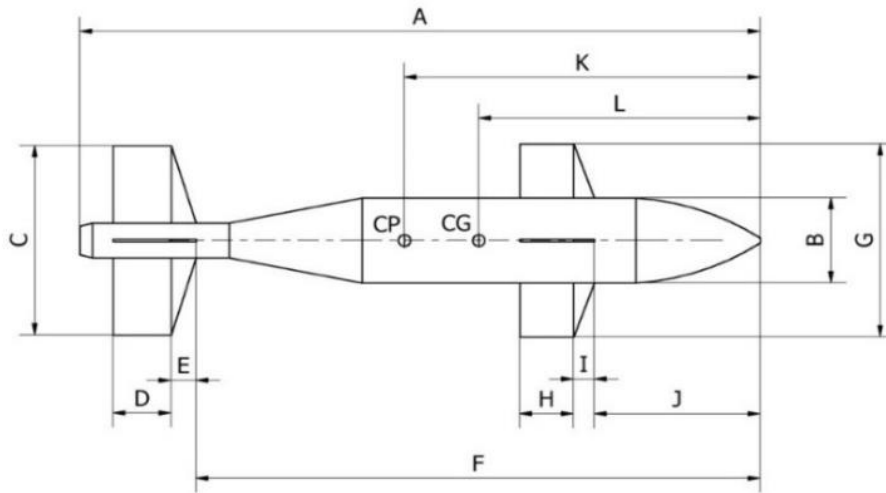
7. Airborne Exercise Guided Bomb of Low Weight Grade G-AEB

An initial design of the airborne exercise guided bomb was developed considering the above mentioned requirements (ITWL, 2016; Pietraszek, 2019). It was designed on the base of the low weight grade airborne exercise bomb AEBw-10 used by the Polish Air Forces. The exercise bomb was qualified by its designation to the group of auxiliary bombs, and by its movement as an airborne guided bomb. The bomb AEBw-10 is installed in the carrier in identical way as guided bombs used by the Polish Armed Forces, and its trajectory, and way of dropping and guiding into the indicated target are identical as well. Considering the dimensions of bomb AEBw-10 a guided bomb in “canard” configuration was created and its general view is pictured in Fig. 3.

Semi-active laser guiding system was designed basing on the system integrated in the guided bombs used by the Polish Army which is compatible with the target laser pointers GLTD-II. The detection-execution module comprises a block of laser detectors (Fig. 4), a decision block (Fig. 5), and an executing block. The block of detectors receives the energy reflected from the target and converts it into the electric signals whereas the decision making block processes the signals and

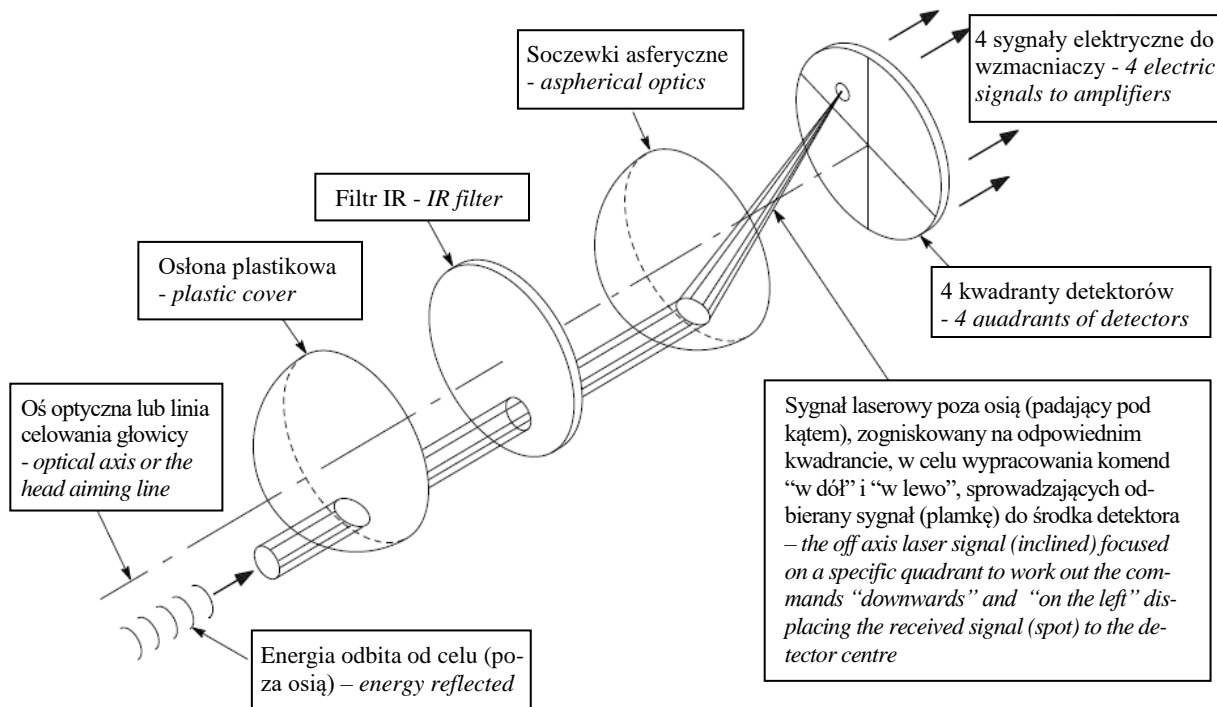
stosowne komendy sterujące, które są przesyłane do bloku wykonawczego, który wychyla powierzchnie sterowe za pomocą silników elektrycznych (elektroserwa). Zastosowany system naprowadzania pozwala na rozbudowę bomby o kolejne moduły takie jak GPS, INS.

produces relevant steering commands transferred to the executing block which deflects the steering vanes by electric motors (electric servomotors). The applied system of guidance allows for extension of bomb's design by consecutive modules, such as GPS, INS.



Rys. 3. Podstawowe wielkości geometryczne bomby ćwiczebnej z korekcją lotu

Fig. 3. Main geometrical parameters of exercise bomb with the flight correction



Rys. 4. Budowa bloku detektorów

Fig. 4. Structure of detector block

Zrzut ćwiczebnej bomby kierowanej następuje sposobem balistycznym z rozszerzonej strefy dozwolonych zrzutów. Trajektorie lotu bomby ćwiczebnej od zejścia do momentu uderzenia można podzielić na 3 fazy: faza lotu balistycznego, faza przejściowa oraz faza końcowa (Pietraszek, 2019).

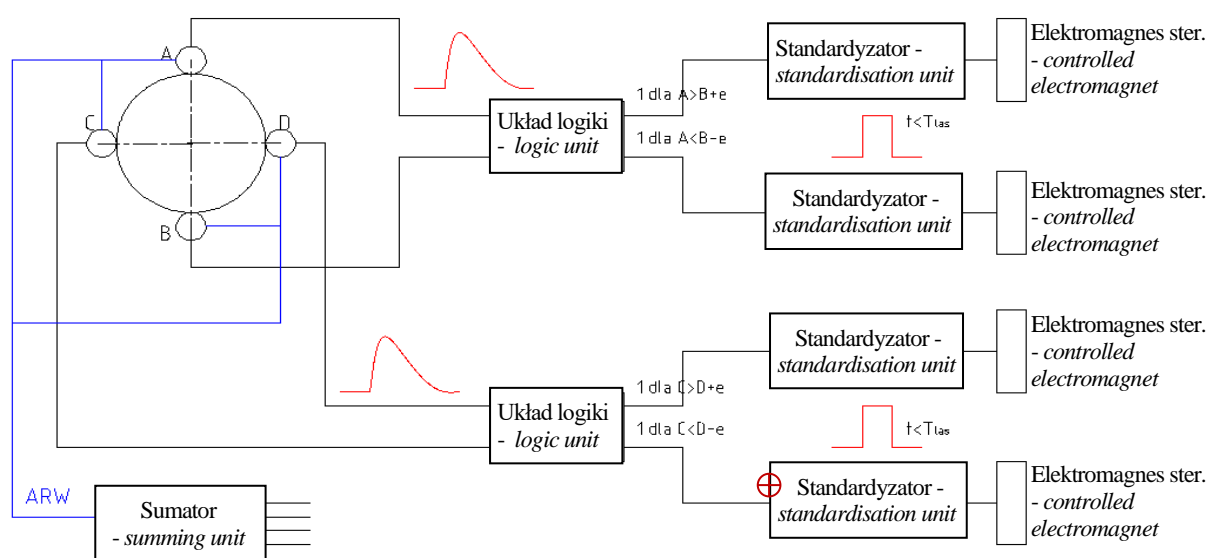
Faza lotu balistycznego występuje pomiędzy zejściem LBCw-K a punktem, gdzie bomba zaczyna odbierać odbite promieniowanie laserowe. W trakcie tej fazy, charakterystyki balistyczne LBCw-K są bardzo zbliżone do charakterystyk klasycznej bomby dla dowolnych warunków zrzutu (z lotu nurkowego, z podrzutu i z lotu poziomego).

Przejściowa faza lotu występuje pomiędzy odebraniem promieniowania laserowego, a punktem, gdzie obraz plamki został sprowadzony do środka kwadrantu. Faza ta charakteryzuje się względnie dużymi okresami pełnego wychylenia powierzchni sterowych w czasie, gdy blok logiczny koryguje uchyby większe od 1 stopnia. Faza przejściowa może trwać od 3 do 5s dla prawidłowo zrzuconej bomby.

The exercise guided bomb is dropped in ballistic path from the extended zone of permitted droppings. The flight trajectory of the exercise bomb may be divided on three phases: the phase of ballistic flight, the transition phase and the terminal phase (Pietraszek, 2019).

The phase of ballistic flight is between the separation of the G-AEB and the moment when it starts to receive the reflected laser radiation. During this phase the ballistic characteristics of G-AEB are similar to the characteristics of a classical bomb at any dropping conditions (diving or jumping flight, and flat flight).

The transitional phase of flight occurs between the reception of laser radiation and a point where the picture of the beam spot is placed in the centre of the quadrant. This phase is characterised by a relatively large deflections of steering vanes when the decision block corrects the deflections which are greater than 1 degree. The transitional phase may last from 3 to 5s for a properly dropped bomb.



Rys. 5. Schemat blokowy bloku logicznego

Fig. 5. Schematic of the decision logic block

Końcowa faza lotu występuje, gdy LBĆw-K znajduje się w stanie zgodności osi bomby z osią wizowania i błąd celowania utrzymuje się w zakresie 1 stopnia. Charakterystyki lotu bomby w trakcie tej fazy są charakteryzowane przez oscylacje pomiędzy osią bomby a osią wizowania. W tej fazie lotu, kiedy odbierana plamka światła odbitego od celu jest centrowana na kwadrancie, nie są generowane sygnały sterujące powodując, że bomba opada balistycznie. Gdy jeden lub dwa detektory odbierają więcej energii laserowej niż pozostałe i blok logiczny generuje komendy uruchamiające stery w odpowiednim kanale, co powoduje sprowadzenie plamki do środka kwadrantu. Gdy tylko plamka celu znajdzie się na środku kwadrantu, komenda sterowania zostaje wstrzymana i para sterów ustawia się w położeniu zerowym (Pietraszek, 2019).

The terminal phase of flight takes place when the G-AEB vision axis is covered with the bomb axis and the error of aiming is below 1 degree. The characteristics of the bomb during this phase are described by the oscillations between the bomb axis and the axis of vision. In this phase of flight when the spot of the light reflected from the target is centred on the quadrant, the steering signals are not generated and the bomb is falling ballistically. In the case of a need, when one or two detectors receive more laser energy than the other ones, the logical block generates the commands activating the deflection of steering surfaces in an appropriate channel and the spot of the beam is shifted to the quadrant centre. When the spot of the target is placed in the centre of the quadrant, the steering command is interrupted and the couple of control vanes is set in the neutral position (Pietraszek, 2019).

Literatura / Literature

- Adamczyk, S., Mazur, A., Olearczuk, E., Skomra A. (1991). *Ilustrowany leksykon lotniczy*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- Długołęcki, A., Buler, W., Faryński, A., Winczura, Z. (2016). *Sprawozdanie z pracy statutowej Opracowanie koncepcji modułowej konstrukcji rodziny bomb o wagomiarze 100, 250 i 500kg*. Warszawa: Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.
- Gawęda, M. (2015). *Rosyjski "poligon" bomb kierowanych w Syrii. Su-34 na Bliskim Wschodzie*. (<http://www.defence24.pl/rosyjski-poligon-bomb-kierowanych-w-syrii-su-34-na-bliskim-wschodzie>. Pobrane 01.04.2019 r.).
- Głębocki, R. (2013). *Impulsowe systemy sterowania lotem pocisków beznapędowych i bomb lotniczych*. Warszawa: Politechnika Warszawska.
- Grenda, B., Bielawski, R. (2017). *Rozwój lotniczych środków rażenia*. Warszawa: Akademia Sztuki Wojennej.
- Koruba, Z., Osiecki, J. W. (2006). *Budowa dynamika i nawigacja wybranych broni precyzyjnego rażenia*. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
- Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych (ITWL). (2016). *Lotnicza bomba ćwiczebna z laserowym układem korekcji lotu (LBĆw-10K) Opis techniczny i tymczasowa instrukcja eksploatacji*. Warszawa.
- Pietraszek, M., Wijaszka, M. (2017). *Sprawozdanie nr S-14-17/17. Opracowanie projektu koncepcyjnego automatycznego układu sterowania bomby kierowanej*. Warszawa: Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.
- Pietraszek, M. (2019). *Modelowanie i symulacja dynamiki ruchu bomby kierowanej*. War-

szawa: Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.

Laserowy system korekcji lotu dla bomb lotniczych.

Projekt finansowany przez NCBiR w ramach konkursu nr 8/2018 realizowany na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa.

Laser system of flight correction for airborne bombs.

The project financed by the National Centre of Research and Development in the frame of competition nr 8/2018 and conducted in favour of the national defence and security.

