



STANOWISKA TYPU HARDWARE IN THE LOOP DO BADAŃ BOMB NAPROWADZANYCH LASEROWO

HARDWARE IN THE LOOP STATIONS FOR TESTING AERIAL LASER GUIDED BOMBS

Tomasz KLEMB, *tomasz.klemba@itwl.pl*, ORCID: 0000-0001-8822-6394
Wiesław MILEWSKI, *wieslaw.milewski@itwl.pl*, ORCID: 0000-0002-2128-6736
Mariusz PIETRASZEK, *mariusz.pietraszek@itwl.pl*, ORCID: 0000-0001-6456-4778
Mirosław WIJASZKA, *miroslaw.wijasza@itwl.pl*, ORCID: 0000-0003-0074-4731
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych - *Air Force Institute of Technology*
ul. Księcia Bolesława 5, 01-494 Warszawa, Poland

DOI 10.5604/01.3001.0054.6671

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki symulacji rzutu kierowanych bomb lotniczych z wykorzystaniem wcześniej zaproponowanego stanowiska typu Hardware-in-the-Loop (HIL). Przedstawiono koncepcję wykonania takiego stanowiska, model ruchu bomby kierowanej oraz środowisko sterujące do przeprowadzenia symulacji. Wprowadzono zasadę działania detektora echa sygnału laserowego oraz sposób obliczania kąta obserwacji celu. Do celów symulacyjnych ruch przestrzenny bomby opisano układem dwunastu równań różniczkowych zwyczajnych, które uzupełniono prawami sterowania. Następnie wykonano wiele badań polegających na symulacji rzutu bomby kierowanej z wykorzystaniem stanowiska zbudowanego na bazie wcześniej przedstawionych założeń oraz zaprezentowano ich rezultaty. Wyniki badań pozwalają ocenić zarówno poprawność modeli (w szczególności modelu detektora) zastosowanych w programie symulacyjnym, jak i ich rzeczywistych odpowiedników zastosowanych w badaniach na stanowisku typu HIL.

Słowa kluczowe: modelowanie, symulacja numeryczna, aerodynamika, bomba korygowana, balistyka zewnętrzna

1. Wstęp

Pierwszym etapem współczesnego projektowania jest prowadzenie weryfikacyjnych badań symulacyjnych z użyciem opracowanych

Abstract: The article details a comprehensive simulation study on guided aerial bombs, utilizing a Hardware-in-the-Loop (HIL) station. It outlines the construction of the HIL station, the guided bomb model, and the simulation's control environment. The principle of operation of the laser seeker and the method of calculating the target observation angle are introduced. For simulation purposes, the spatial motion of the bomb was described by a system of twelve ordinary differential equations, supplemented with control laws. Subsequent tests validate the simulation models against their real-world counterparts, proving the efficacy of the HIL station in guided bomb testing. The test results make it possible to assess both the correctness of the models (especially the seeker) used in the simulation program and their real counterparts used in tests on the HIL station.

Keywords: modelling, numerical simulation, aerodynamics, corrected bomb, external ballistics

1. Introduction

Execution of verifying simulating tests using developed models is now a first stage of designing process. The models

modeli. Modele można opracowywać na bazie wyprowadzeń analitycznych, lub na podstawie wyników prowadzonych eksperymentów identyfikacyjnych. Oprogramowanie do badań symulacyjnych zainstalowane jest zwykle na komputerze projektanta, zależy to jednak od stopnia skomplikowania modelu. Taki sposób modelowania rzeczywistych zjawisk określane jest terminem Model-in-the-Loop (MIL) i służy realizacji algorytmu sterowania, modelu matematycznego obiektu sterowania oraz modeli matematycznych układów wykonawczych i pomiarowych w jednolitym środowisku sprzętowo programowym, w oparciu o zależności opracowane na drodze analizy teoretycznej lub identyfikacji doświadczalnej.

Modele matematyczne obiektów i układów pomiarowych w przybliżeniu uwzględniają rzeczywiste procesy, nie są w stanie ujawnić niektórych zjawisk, mogących odgrywać negatywną rolę w późniejszym funkcjonowaniu całego systemu. Ujawnienie tych zjawisk dopiero na etapie testowania gotowego rozwiązania może wiązać się z dużymi nakładami czasu i kosztów, a nawet z zagrożeniem dla zdrowia i życia ludzkiego. Stąd coraz większego znaczenia nabierają techniki badań Hardware-in-the-Loop (HIL), wykorzystujące rzeczywisty układ sterownika i komputerowy model sterowanego obiektu.

Symulacja HIL pozwala na wykorzystanie modelu do odwzorowania sprzętu i środowiska, oferując korzyści pod względem kosztów i praktyczności. Celem HIL jest przeprowadzenie symulacji w celu wyeliminowania błędów, by następnie przejść do badań eksperymentalnych, w których sprawdza się poprawność projektu (The MathWorks, 2021).

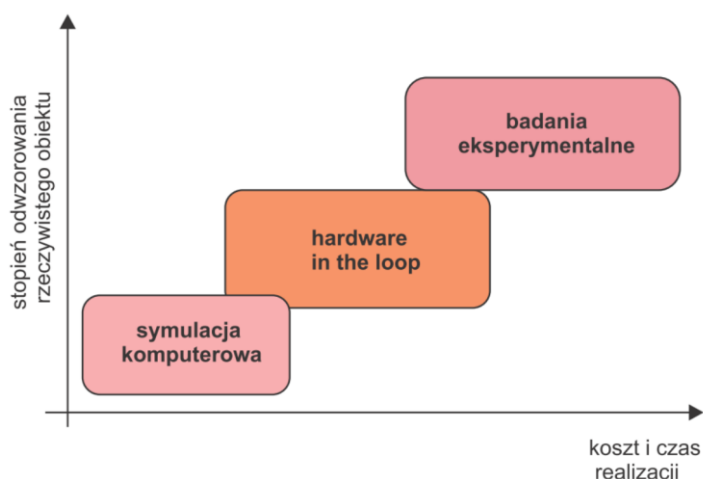
Metodę tę można traktować jako rozwiązanie pośrednie pomiędzy badaniami symulacyjnymi w jednolitym środowisku programowym (MIL), a badaniami doświadczalnymi z wykorzystaniem rzeczywistych: sterownika i obiektu.

may be prepared on the base of analytical studies or on the base of results of executed identification experiments. Software needed for simulating tests is usually installed on the designer's computer, but it depends on model's complication level. Such method for modelling the real effects is named as a Model-in-the-Loop (MIL) and is used for realisation of a control algorithm, a mathematical model of controlled object, and mathematical models of servo and measurement systems in the unified hardware-software environment on the grounds of theoretical analysis or experimental identification.

Mathematical models of measurement objects and systems can approximate real processes but cannot discover some effects having a negative influence into the operation of the overall system. Disclosure of these effects just at the stage of testing the final solution may demand serious amounts of time and costs, and even cause some threats to human health or life. Hence, there is an increasing meaning of Hardware-in-the-Loop (HIL) testing techniques using the real unit of a controller and the computer model of a controlled object.

The HIL simulation can use the model for reconstruction of hardware and environment offering the benefits concerning the costs and practicality. The HIL is aimed to execute the simulation in order to eliminate the errors before starting the experimental tests checking the correctness of a design (The MathWorks, 2021).

The method may be treated as an intermediate solution between the simulating tests in a unitary software environment (MIL) and experimental tests using a real controller and object.



Rys. 1. Etapy badania obiektów

Fig. 1. Stages of objects testing

Stopień odwzorowania rzeczywistego obiektu – *Level of real object reconstruction*

Koszt i czas realizacji – *Cost and time of realisation*

Symulacja komputerowa – *Computer simulation*

Badania eksperymentalne – *Experimental tests*

W badaniach lotniczych bomb kierowanych symulacja typu HIL nabiera szczególnie istotnego znaczenia, albowiem przeprowadzenie eksperymentu rzeczywistego każdorazowo prowadzi do zniszczenia obiektu badań.

Jest oczywiste, iż w podobnych przypadkach rzeczywiste badania eksperymentalne należy przeprowadzić dopiero po wykorzystaniu wszystkich dostępnych badawczych metod laboratoryjnych.

Celem pracy było zaproponowanie stanowiska typu HIL” do badań symulacyjnych lotniczej bomby korygowanej działającej w oparciu o metodę półaktywnego naprowadzania laserowego (SAL) oraz przeprowadzenie symulacji z jego wykorzystaniem.

2. Opis obiektu badań symulacyjnych

Jednym z najbardziej popularnych systemów naprowadzania bomb korygowanych jest półaktywna, laserowa metoda sterowania SAL (Semi-Active Laser). W metodzie tej obiekt jest podświetlany z niezależnego źródła laserowego (target designator), natomiast system sterowania bomby (SAL) automatycznie naprowadza się na odbite od obiektu echo sygnału oświetlacza laserowego (Eugene & Fleeman, 2022).

Powyższy system sterowania został za-

The simulation of HIL type is especially important at testing the aircraft guided bombs as any realisation of real experiment ends in destruction of tested objects.

It is obvious that in such cases the real experimental tests have to be performed only after all possible and accessible laboratory testing methods were carried out.

The objective of the paper was to present a HIL type setup for simulating tests of an aircraft corrected bomb operating on the method of a semi-active laser (SAL) guiding, and realisation of simulations with its use.

2. Description of Object of Simulating Tests

The semi-active laser method is one of the most common ones used in the systems for homing the corrected bombs. In the method an object is illuminated by an independent laser (target designator), whereas the system of (SAL) bomb control is automatically self-guided to the signal of laser designator reflected from the object (Eugene & Fleeman, 2022).

The above mentioned control system was

stosowany w lotniczej ćwiczebnej bombie korygowanej LBCw-10k, która została zaprojektowana i wykonana w Zakładzie Uzbrojenia Lotniczego ITWL.

Podstawowymi elementami systemu sterowania bomby jest detektor echa sygnału laserowego oraz układ wykonawczy w postaci serw elektrycznych poruszających sterami..

Zadaniem systemu sterowania jest odebranie echa oświetlacza laserowego, jego interpretacja i wypracowywanie sygnałów na stery w taki sposób, aby poprzez ich interakcje z otaczającym bombę strumieniem powietrza doprowadzić do pokrycia się osi podłużnej bomby z linią obserwacji celu LOC (Wijaszka, 2020).

2.1. Koncepcja hardware in the loop

Model ruchu bomby korygowanej składa się z części programowej i sprzętowej. Część programowa rozwiązuje matematycznie sformułowane równania ruchu bomby (Kowalczyk, 2018), natomiast zadaniem części sprzętowej jest odpowiednie dla ww. stanowiska odpracowanie zmiennych wektora stanu bomby w przestrzeni oraz detekcja echa sygnału oświetlacza laserowego.

Część sprzętową modelu ruchu bomby zrealizowano w oparciu o głowicę obrotową MSO-2/A (Pan/Tilt) posiadającą dwa stopnie swobody, która zapewniała odpowiednie kątowne położenie bomby w przestrzeni oraz oploter typu Roland DXY-1200, który odpowiadał za odpracowanie w czasie zamodelowanego położenia celu względem bomby. Taki dobór urządzeń wykonawczych ograniczał symulację ruchu bomby tylko do jednej płaszczyzny.

Imitację oświetlonego celu zapewniał imitator oświetlacza laserowego, a rzeczywisty detektor echa sygnału oświetlacza laserowego odbierał i przetwarzał sygnał odbierany

applied in the aircraft training corrected bomb LBCw-10k which was designed and produced in the Aircraft Weapons Workshop of the Air Force Institute of Technology (AFIT).

A detector of laser reflected signal and an executive mechanism in the form of electric servos driving the rudders belong to main components of the bomb control system.

The control system is aimed to receive the echo of the laser designator, and to interpret it, and to work out the signals for rudders, interacting with the air streams surrounding the bomb, in order to cover the bomb's main axis with the target line of vision (TLV) (Wijaszka, 2020).

2.1. Hardware in the Loop Conception

The model of corrected bomb movement consists of software and hardware parts. The software part solves mathematical equations of the bomb movement (Kowalczyk, 2018), whereas the hardware part is responsible for working out the variables of bomb status vector in the space and for detection of the laser designator echo signal adequately to the above mentioned setup.

The hardware part of the bomb movement model was prepared on the base of turning head MSO-2/A (Pan/Tilt) with two levels of freedom, providing suitable position of the bomb in space, and plotter of Roland DXY-1200 type which was responsible for reproduction in the time of modelled position of target against bomb. Such selection of executive devices has limited the simulation of the bomb movement only to one plane.

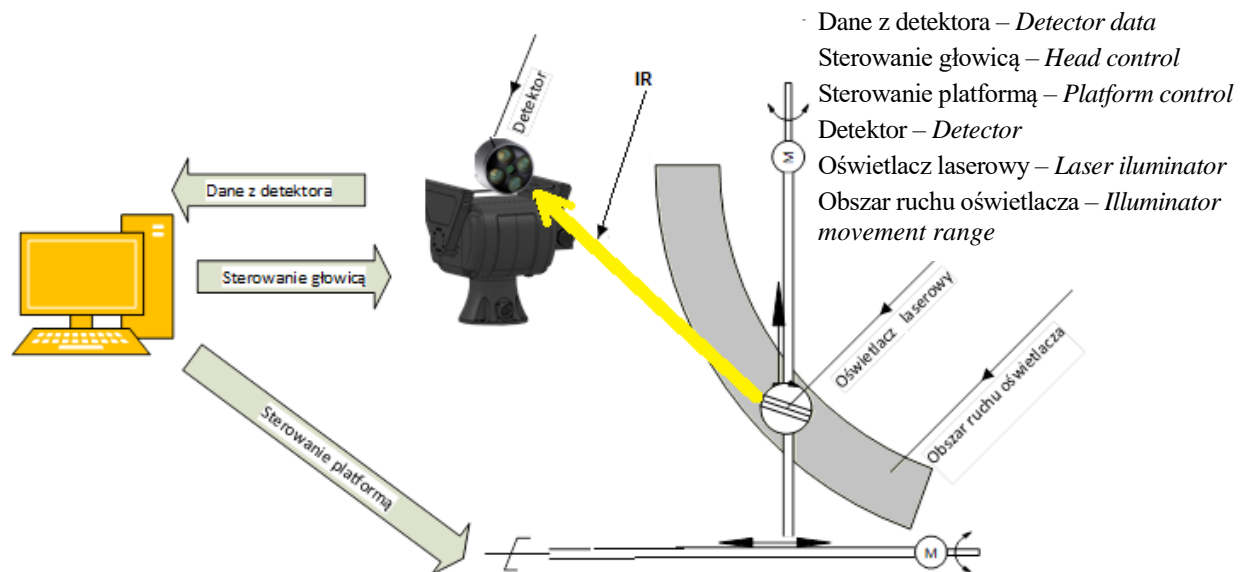
The illuminated target was simulated by an imitator of laser illuminator, whereas the real detector of the laser illuminator echo signal has received and processed the signal

z imitatora.

Schemat blokowy symulacji HIL został zamieszczony na rys. 2.

intercepted from the imitator.

Block diagram of HIL simulation is presented in Fig. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy HIL / Fig. 2. Block diagram of HIL

W sytuacji rzeczywistej, zrzucona bomba zbliża się do zazwyczaj nieruchomego celu. Wykonanie stanowiska, w którym to właśnie bomba, imitowana przez detektor umieszczony na głowicy obrotowej, zbliża się po symulowanej trajektorii do celu, wydaje się być nie tylko niemożliwe, co kompletnie nieracjonalne ze względu na stosunkowo duże masy głowic obrotowych (nawet w przypadku zastosowania 3-osiowych kardanowych platform do kamer). Aby możliwe było wykonanie takiego stanowiska należałoby użyć platformy, która jest w stanie stabilnie i z prędkością dochodzącą do 400 mm/s przemieszczać stosunkowo duże masy (co najmniej 500 g).

Dużo prościej jest wykonać urządzenie realizujące scenariusz zbliżającego się do bomby oświetlacza laserowego (detektor umieszczony na głowicy obrotowej), którego masa na potrzeby symulacji może wynosić nawet 10 g.

Taka metoda realizacji przedmiotowego zadania została zastosowana w stanowisku

In real situation the dropped bomb usually approaches to unmovable target. Preparation of a stand in which just the bomb, imitated by the detector placed on the rotating head, approaches along a simulated trajectory to the target seems to be not only impossible but rather unreasonable due to relatively high masses of turning heads (even if 3-axial camera platforms cardan joints are used). Such stand would require a platform allowing for stable displacements of relatively high masses (at least up to 500g) at velocities up to 400 mm/s.

It is much simpler to prepare a device executing a scenario of the laser illuminator approaching the bomb (detector integrated in a turning head) and having the mass of just 10 g.

Such a method was applied in the HIL simulating setup to perform the objective task.

do symulacji HIL.

Realizacja stanowiska do symulacji procesów zachodzących podczas lotu sterowanego bomby lotniczej wymagała opracowania następujących elementów:

1. Modelu ruchu bomby korygowanej;
2. Modelu oświetlacza laserowego;
3. Modelu detektora echa sygnału laserowego.

2.2. Model ruchu bomby korygowanej

Model matematyczny ruchu bomby korygowanej bazuje na następujących założeniach (Kowaleczko, 2018), (Wijaszka, 2020):

- bomba jest bryłą sztywną o sześciu stopniach swobody, stałej masie i momentach bezwładności oraz niezmiennym położeniu środka masy;
- bomba jest obiektem osiowo symetrycznym z płaszczyznami symetrii Oxy i Oxz, które są zarazem płaszczyznami symetrii geometrycznej, masowej i aerodynamicznej pokrywającymi się z płaszczyznami usterzenia;
- pomija się ruch wirowy Ziemi i krzywiznę jej powierzchni.

Wychodząc z drugiej zasady dynamiki Newtona zarówno dla ruchu postępowego jak i obrotowego oraz uwzględniając powyższe założenia stałej masy sformułowano układ dwunastu równań różniczkowych, którego forma macierzowa ma postać:

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f} \quad (1)$$

gdzie \mathbf{x} jest wektorem parametrów lotu:

$$\mathbf{x} = [U, V, W, P, Q, R, \Phi, \Theta, \Psi, x, y, z] \quad (2)$$

Ponieważ bomba zgodnie z przyjętymi na wstępie założeniami jest obiektem symetrycznym, niezerowe elementy macierzy \mathbf{A} występują tylko na jej diagonalnej i mają postać:

For preparation of the stand simulating the processes occurring at the controlled flight of the aircraft bomb following elements have to be developed:

1. Model of corrected bomb movement;
2. Model of laser illuminator;
3. Model of laser echo signal detector.

2.2. Model of Corrected Bomb Movement

Mathematical model of corrected bomb movement is based on following assumptions (Kowaleczko, 2018), (Wijaszka, 2020):

- The bomb is a solid body with six degrees of freedom, and constant mass and inertia moments, and unchangeable position of the mass centre;
- The bomb is an axially symmetrical object with the planes of symmetry Oxy and Oxz which are also the planes of geometric, mass, and aerodynamic symmetry identical with the planes of rudders;
- The rotation of the earth and the curvature of its surface are omitted.

Starting with Newton's second law of dynamics both for the advance and angular movements, and considering the above assumptions of constant mass, a system of twelve differential equations was formulated in following matrix form:

where \mathbf{x} is the vector of flight parameters:

Because the bomb, according to accepted assumptions, is a symmetric object then the nonzero elements of matrix \mathbf{A} exist only on its diagonal and have the form:

$$\begin{aligned} A_{11} &= A_{22} = A_{33} = m \\ A_{44} &= I_x, \quad A_{55} = A_{66} = I \\ A_{77} &= A_{88} = A_{99} = A_{1010} = A_{1111} = A_{1212} = 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Prawa strona równania wygląda następująco: | The right side of the equation has a form:

$$\begin{aligned} f_1 &= X + m(RV - QW) \\ f_2 &= Y + m(PW - RU) \\ f_3 &= Z + m(QU - PV) \\ f_4 &= L \\ f_5 &= M + (I - I_x)PR \\ f_6 &= N + (I_x - I)PQ \\ f_7 &= P + (R \cos \Phi + Q \sin \Phi) \tan \Theta \\ f_8 &= Q \cos \Phi - R \sin \Phi \\ f_9 &= (R \cos \Phi + Q \sin \Phi) / \cos \Theta \\ f_{10} &= U \cos \Psi \cos \Theta + V(\cos \Psi \sin \Theta \sin \Phi - \sin \Psi \cos \Phi) \\ &\quad + W(\cos \Psi \cos \Phi \sin \Theta + \sin \Psi \sin \Phi) \\ f_{11} &= U \sin \Psi \cos \Theta + V(\sin \Psi \sin \Phi \sin \Theta + \cos \Psi \cos \Phi) \\ &\quad + W(\sin \Psi \sin \Theta \cos \Phi - \cos \Psi \sin \Phi) \\ f_{12} &= -U \sin \Theta + V \cos \Theta \sin \Phi + W \cos \Theta \cos \Phi \end{aligned} \quad (4)$$

Aby rozwiązanie powyższego układu równań było możliwe należało wyznaczyć siły i momenty sił zewnętrznych działających na bombę. Powyższe wielkości zostały obliczone według wcześniej wyprowadzonych wzorów:

In order to solve the system of the above equations, the forces and moments of external forces acting against the bomb have to be established. The above mentioned values were calculated according with earlier derived formulae:

$$\left. \begin{aligned} X &= -mg \sin \Theta - C_x \frac{\rho |V_{aer}|^2}{2} S \\ Y &= mg \cos \Theta \sin \Phi + \frac{\rho |V_{aer}|^2}{2} S \left[C_{Na} \left(\frac{-V}{|V_{aer}|} \right) + C_{Nq} \left(\frac{Rd}{|2V_{aer}|} \right) + C_{Ndf} \delta_a \right] \\ Z &= mg \cos \Theta \cos \Phi + \frac{\rho |V_{aer}|^2}{2} S \left[C_{Na} \left(\frac{-W}{|V_{aer}|} \right) + C_{Nq} \left(\frac{-Qd}{|2V_{aer}|} \right) - C_{Ndf} \delta_e \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} L &= 0 \\ M &= \frac{\rho |V_{aer}|^2}{2} Sd \left[C_{ma} \left(\frac{W}{|V_{aer}|} \right) + C_{mq} \left(\frac{Qd}{|2V_{aer}|} \right) + C_{Ndf} \delta_e l_{F2} \right] \\ N &= \frac{\rho |V_{aer}|^2}{2} Sd \left[C_{ma} \left(\frac{-V}{|V_{aer}|} \right) + C_{mq} \left(\frac{Rd}{|2V_{aer}|} \right) + C_{Ndf} \delta_a l_{F2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

gdzie: / where:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} - \text{wektor prędkości postępowej} / \text{Vector of the advance velocity}$$

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} - \text{wektor prędkości kątowej} / \text{Vector of the angular velocity}$$

$$F = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \text{wypadkowa siła działająca na bombę} / \text{Resulting force acting against the bomb}$$

$$M = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} - \text{momenty sił zewnętrznych} / \text{Moments of external forces}$$

- Ψ – kąt odchylenia - kąt zawarty między rzutem osi Ox na płaszczyznę poziomą $Ox_g y_g$ i osią Ox_g ;
Angle of yaw – the angle between projection of Ox axis into horizontal plane $Ox_g y_g$ and Ox_g axis
- Θ – kąt pochylenia - kąt pomiędzy osią Ox i lokalną płaszczyznę poziomą $Ox_g y_g$;
Angle of pitch – the angle between axis Ox and a local horizontal plane $Ox_g y_g$;
- Φ – kąt przechylenia - kąt zawarty między osią Oz , a krawędzią płaszczyzn Oxz_g i Oyz_g ;
Angle of roll – the angle between axis Oz and the edge of planes Oxz_g and Oyz_g ;

C_x – współczynnik siły osiowej – *coefficient of axial force*

C_{Na} – pochodnia współczynnika siły normalnej względem kąta nutacji – *derivative of the coefficient of the force normal to the angle of nutation*

C_{Nq} – pochodnia współczynnika siły tłumiącej względem prędkości \bar{q} – *derivative of the coefficient of the attenuating force versus velocity \bar{q}*

$C_{N\alpha_f}$ – pochodnia współczynnika siły sterującej względem kąta wychylenia steru – *derivative of the controlling force versus the rudder declination angle*

C_{ma} – pochodnia współczynnika momentu pochylającego – *derivative of the pitching moment coefficient*

C_{mq} – współczynnik tłumiącego momentu pochylającego – *coefficient of the attenuating pitching moment*

Charakterystyki aerodynamiczne bomby zostały wygenerowane na podstawie jej charakterystyk geometrycznych i masowych przy wykorzystaniu komercyjnego programu Prodas (Arrow Tech Associates Inc., 2008) służącego do wykonywania symulacji balistycznych.

2.3. Model oświetlacza laserowego

Zadaniem oświetlacza laserowego jest emisja sygnału podświetlania celu o określonych parametrach energetycznych i czasowych. Odbite od celu echo sygnału oświetlacza laserowego odbierane jest przez detektor i dalej przetwarzane celem naprowadzenia bomby na cel. Ponieważ operacja naprowadzania bomby odbywa się na odległościach liczonych w kilometrach, potrzebny jest oświetlacz o mocach rzędu kilku megawatów w impulsie.

Aerodynamic characteristics of the bomb were generated on the grounds of its geometric and mass characteristics using commercial program Prodas (Arrow Tech Associates Inc., 2008) for execution of ballistic simulations.

2.3. Laser Illuminator Model

Laser illuminator is designed for emission of a target illuminating signal with specific energetic and time parameters. The echo of the laser illuminator signal reflected from the target is received by the detector and subject to further processing to guide the bomb into the target. As the guiding of the bomb is carried out at distances counted in kilometres the illuminator with power of a few megawatts in the pulse is needed.

Do symulacji HIL, dla której obszar działania oświetlacza liczony jest co najwyżej w dziesiątkach centymetrów wystarczy oświetlacz laserowy o mocy pojedynczych watów (moc sygnału zmniejsza się z kwadratem odległości), a nawet dioda IR LED o odpowiednim paśmie świecenia.

W związku z powyższym zaprojektowano imitator oświetlacza laserowego, którego elementem wykonawczym jest dioda IR LED emitująca falę o długości 1064 nm, zasilana impulsatorem prądowym generującym impulsy o długości 20 ns. Taka konstrukcja oświetlacza zapewnia uzyskanie odpowiedniej energii oświetlania, jednocześnie zapewniając wysokie bezpieczeństwo pracy dla obsługi stanowiska.

2.4. Model detektora echa sygnału laserowego

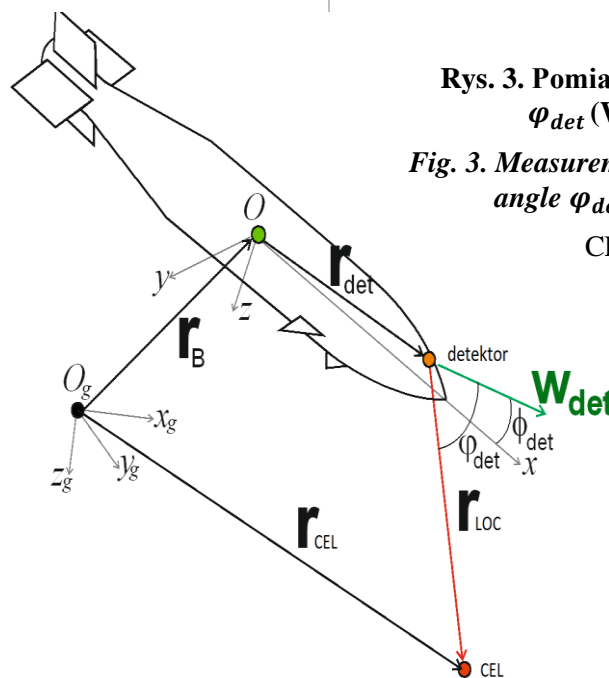
Detektor jest najważniejszym elementem systemu w symulacji HIL albowiem to właśnie działanie tego elementu oraz jego wpływu na proces naprowadzania najbardziej nas interesuje.

For HIL simulation the area of the illuminator operation is counted maximum in a few dozens of centimetres and the laser illuminator with power of individual watts (power of the signal decreases with the square of distance), or even an IR LED with suitable light band, can be sufficient.

Regarding the above, an imitator of laser illuminator was designed with IR LED as the operating element emitting the wavelength 1064 nm and powered by the current pulsator supplying 20 ns pulses. Such design of the illuminator provides demanded energy of illumination and high level of safety for the personnel handling the stand.

2.4. Laser Echo Signal Detector Model

Detector is the most important part of the system in HIL simulation as its operation and influence into the process of guiding is the most interesting to us.



Rys. 3. Pomiar kąta obserwacji celu φ_{det} (Wijaszką, 2020)

Fig. 3. Measurement of target observation angle φ_{det} (Wijaszką, 2020)

CEL - Target

Zadaniem detektora jest pomiar kąta obserwacji celu φ_{det} (rys. 3), który może być dokonany na przykład za pomocą fotodiody

The detector is designed to measure the target observation angle φ_{det} (Fig. 3) which can be performed for instance by a quadrant

kwadrantowej.

Wiązka światła padając na fotodiode (segment fotodiody kwadrantowej) powoduje generację fotoprądu. Kiedy echo wiązki laserowej pada dokładnie w środek detektora kwadrantowego oświetlając każdy segment kwadrantu taką samą ilością energii, to każdy segment generuje taką samą wartość fotoprądu (w praktyce występują rozbieżności wynikające z technologii wykonania elementu). Każde odchylenie echa wiązki laserowej od środka detektora kwadrantowego, powoduje nierównomierne oświetlenie poszczególnych segmentów kwadrantu, tym samym generowanie różnych wartości fotoprądów przez poszczególne segmenty detektora. Różnica wartości fotoprądów w kanałach tworzonych przez parę segmentów występujących w jednej płaszczyźnie symetrii bomby jest proporcjonalna do liniowego odchylenia echa wiązki laserowej od środka detektora kwadrantowego w kierunku zgodnym z osią rozmieszczenia segmentów, przy zachowaniu stałości mocy promieniowania padającego na detektor kwadrantowy.

Przykładowy, uproszczony schemat detektora przedstawia rys. 4.

photodiode.

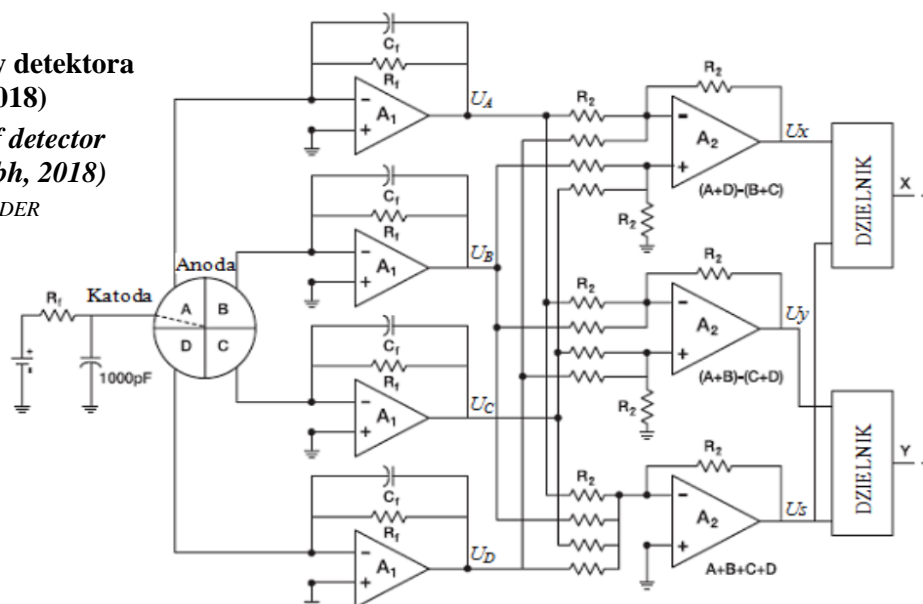
A beam of light hitting a photodiode (segment of the quadrant photodiode) generates an electric photocurrent. When the echo of laser beam falls exactly into the centre of the quadrant detector and illuminates each segment of the quadrant with the same portion of energy, then each segment generates identical value of the photocurrent (there are differences in practice due to element workmanship technology). Any declination of the laser beam echo from the centre of quadrant detector causes unequal illumination of the quadrant particular segments, and by the same different values of photocurrents are generated by particular segments of the detector. The difference of photocurrent values in the channels created by a couple of segments placed in one of the planes of bomb's symmetry is proportional to the linear deviation of the laser beam echo from the quadrant detector centre in the direction complying with the axis of segments positioning, assuming the same level of the radiating power hitting the quadrant detector.

An instance of detector simplified diagram is shown in Fig. 4.

Rys. 4. Zasada pracy detektora (oec-gmbh, 2018)

Fig. 4. Principle of detector operation (oec-gmbh, 2018)

DZIELNIK - DIVIDER



2.5. Program symulacyjny

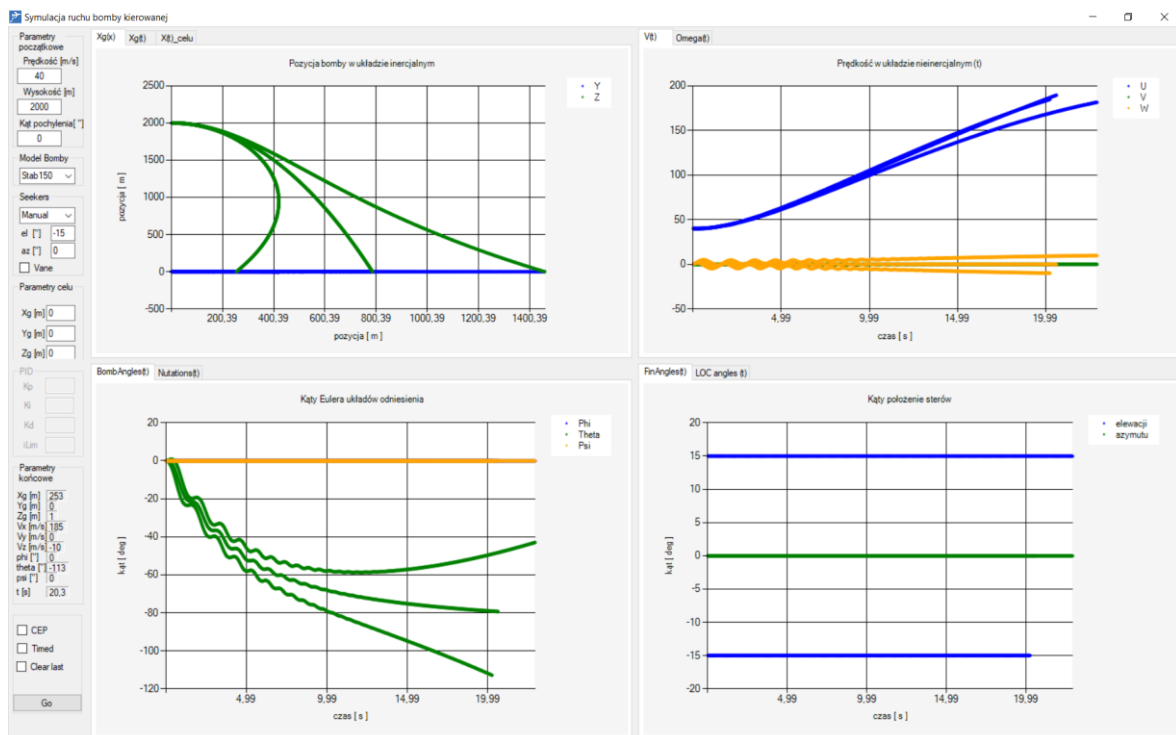
Na podstawie modelu matematycznego ruchu bomby korygowanej (Kowaleczko, 2018), oraz modelu układu detekcji echa sygnału laserowego (Wijaszka, 2020) zaimplementowano algorytm obliczeniowy. W ten sposób powstała aplikacja służąca do symulacji ruchu bomby korygowanej (MIL). Szatę graficzną aplikacji prezentuje rys. 5.

Z lewej strony ekranu występuje pasek menu sterującego. Za jego pomocą można zadać parametry początkowe zrzutu, wybrać model bomby, wybrać model detekcji echa sygnału laserowego, ustawić parametry położenia celu, wybrać parametry regulatora typu PID oraz po wykonaniu symulacji odczytać parametry bomby w momencie upadku.

2.5. Simulating Program

Calculating algorithms were implemented on the basis of mathematical model of the corrected bomb movement (Kowaleczko, 2018), and a model of the laser echo signal detecting system (Wijaszka, 2020). In this way an application was created for simulation of corrected bomb movement (MIL). Graphical illustration of the application is shown in Fig. 5.

A strip of controlling menu is on the left side of the screen. It can enter initial parameters of dropping, select a model of bomb, select a model of laser signal echo detection, set the parameter of target position, select the parameters of PID type controller, and read out the parameters of the bomb in the moment of falling.



Rys. 5. Program do symulacji MIL (Wijaszka, 2020)

Fig. 5. Program for simulation MIL (Wijaszka, 2020)

Powyższy program napisany został w celu wykonywania badań symulacyjnych typu MIL oraz zmodyfikowany w ramach niniej-

The above program was written to perform MIL simulating tests and was modified in the frame of present work in order

szego opracowania w celu przystosowania go do symulacji HIL. W tym celu zaimplementowano procedury obsługi:

- głowicy obrotowej MSO-2 pracującej z wykorzystaniem interfejsu Ethernet – imitacja kąтового położenia bomby w przestrzeni;
- platformy poruszającej oświetlaczem laserowym (RS232) – imitacja zmiany położenia środka masy bomby względem celu;
- detektora echa sygnału oświetlacza laserowego (RS232).

3. Wyniki symulacji

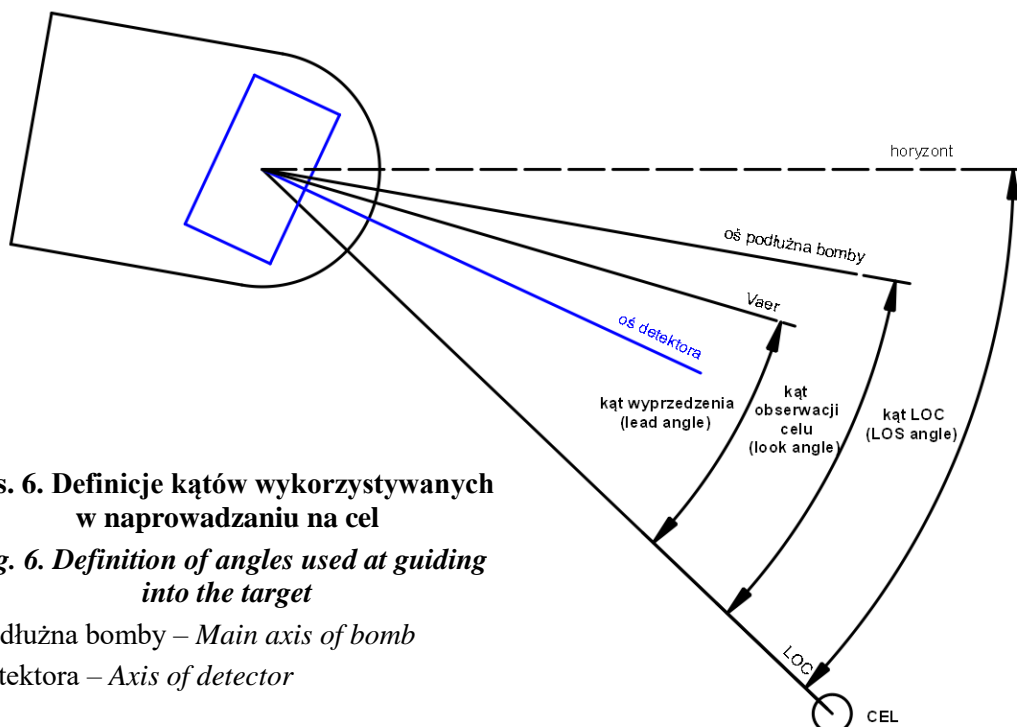
Na potrzeby artykułu stanowisko do symulacji typu HIL zostało wykorzystane do symulacji zrzutu bomby kierowanej z zastosowaniem metody naprowadzania bezpośredniego, dla której, pozycja celu określana jest względem osi podłużnej bomby (do naprowadzania bomby na cel wykorzystuje się tzw. kąt obserwacji celu (rys. 6). W praktyce zastosowanie tej metody jest rozwiązaniem najprostszym, ponieważ detektor jest na sztywno sprzężony z korpusem bomby.

to adapt it for HIL simulation. For this reason servicing procedures were implemented for:

- turning head MSO-2 operating with Ethernet interface – imitation of angular position of the bomb in space;
- platform for moving laser illuminator (RS232) – imitation of changes of the bomb mass centre position in reference to the target;
- detector of the laser illuminator signal echo (RS232).

3. Simulation Results

For the purpose of the paper the stand for the HIL type simulation was used to simulate the drop of the guided bomb using a method of direct guidance in which target's position is determined against the main bomb's axis (the so called angle of target observation – look angle – is used for the bomb guidance (Fig. 6)). In practice, the application of the method is a simplest solution as detector is rigidly fixed with the bomb's body.



Rys. 6. Definicje kątów wykorzystywanych w naprowadzaniu na cel

Fig. 6. Definition of angles used at guiding into the target

Oś podłużna bomby – *Main axis of bomb*

Oś detektora – *Axis of detector*

W przypadku zastosowanego modelu detektora, kąt obserwacji celu dla każdej z płaszczyzn symetrii bomby jest proporcjonalny do różnicy amplitud odbiorników rozmieszczonych w tej płaszczyźnie. Realizacja metody naprowadzania bezpośredniego polegać będzie na powiązaniu kąta wychylenia sterów w danej płaszczyźnie sterowania z kątem obserwacji celu w tej płaszczyźnie.

Przyjęto następujące warunki początkowe zrzutu:

- położenie $X=[0,0,-2000]$;
- prędkość $V=[40,0,0]$;
- pozostałe parametry zerowe.

Cel ustawiono w położeniu $X_c=[720,0,0]$. Ustawienie celu na danej pozycji wykonuje się przez umieszczenie głowicy MSO-2 na danej odległości liniowej (w osi x) od początkowej pozycji nadajnika.

Przebiegi wybranych parametrów lotu bomby dla symulacji wykonanych dla powyższych warunków początkowych zostały zaprezentowane na rysunkach o numerach od rys. 7 do rys. 13.

Upadek bomby nastąpił 24 m przed celem.

Rys. 13 przedstawia amplitudy poszczególnych odbiorników detektora. Z wykresu wynika, że w pierwszym okresie lotu bomby (do około 6 s) detektor nie widzi celu – amplitudy wszystkich odbiorników mają sygnały poniżej 300 mV. Zgodnie z oczekiwaniami, pierwszym z odbiorników, który zobaczył cel jest odbiornik dolny.

Dalszy przebieg lotu bomby pokazuje sukcesywne zwiększanie się amplitud odbiorników. Widać również wpływ zmian kątownego położenia bomby na amplitudy odbiorników oraz kąty wychylenia sterów – pojawiają się oscylacje zgodne z kątem natarcia bomby.

In the case of the applied detector model the target look angle for each plane of bomb's symmetry is proportional to the difference of amplitudes of receivers placed in this plane. Realisation of the direct guiding method is based on dependence between the angle of rudders declination for a specific plane of control and the target look angle in this plane.

Following initial conditions of the drop were accepted:

- position $X=[0,0,-2000]$;
- velocity $V=[40,0,0]$;
- remaining parameters on zero.

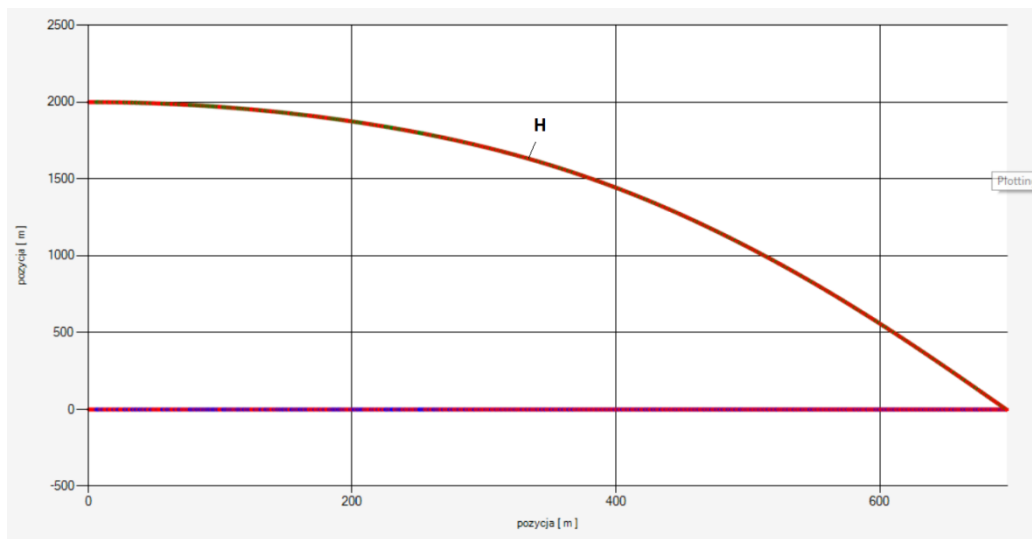
The target was set in position $X_c=[720,0,0]$. Localisation of the target on a specific position is made by placing the MSO-2 head at a given linear distance (in x axis) from transmitter original position.

Diagrams of selected bomb flight parameters for simulations performed under the above mentioned initial conditions were presented in figures numbered from Fig. 7 to 13.

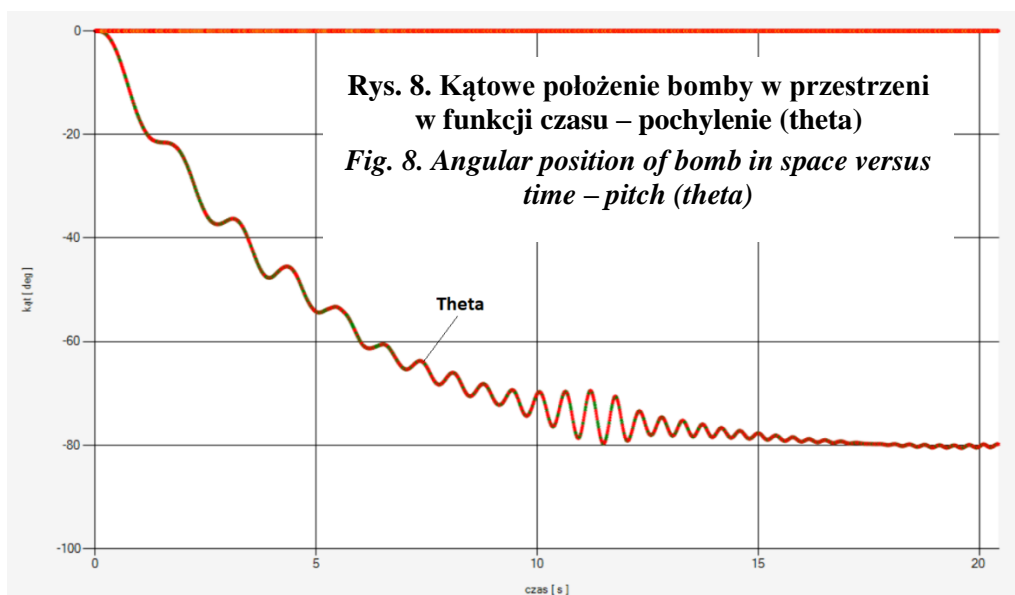
The fall of the bomb occurred 24 m before the target.

Fig. 13 shows the amplitudes of detector particular receivers. The diagram shows that in the first part of bomb flight (up to ca. 6 s) detector does not see the target – amplitudes of all receivers have the signals below 300 mV. According to expectations the lower receiver is a first one which sees the target.

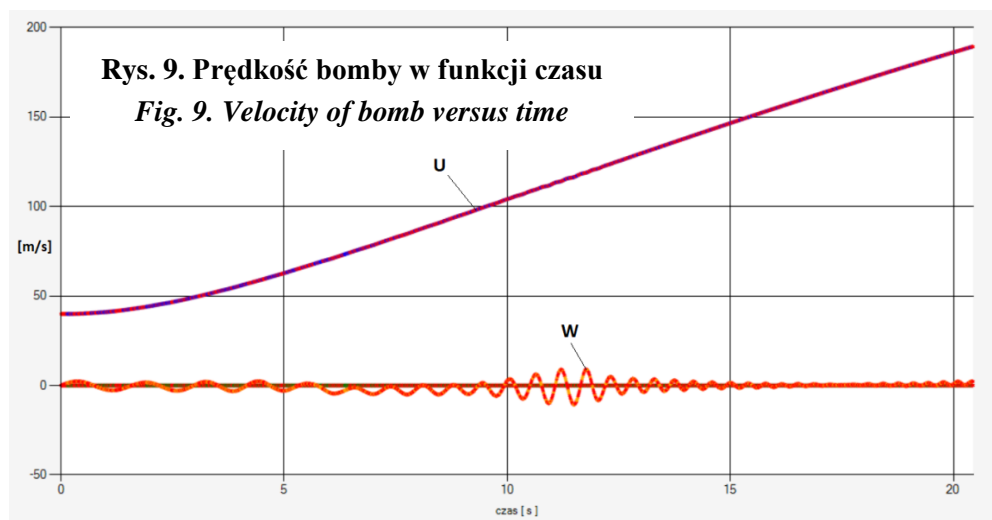
Further flight of the bomb shows a successful increase of receivers amplitudes. Changes of bomb angular position also affect the amplitudes of receivers and the declination angles of rudders – oscillations corresponding to the bomb incidence angle are present.



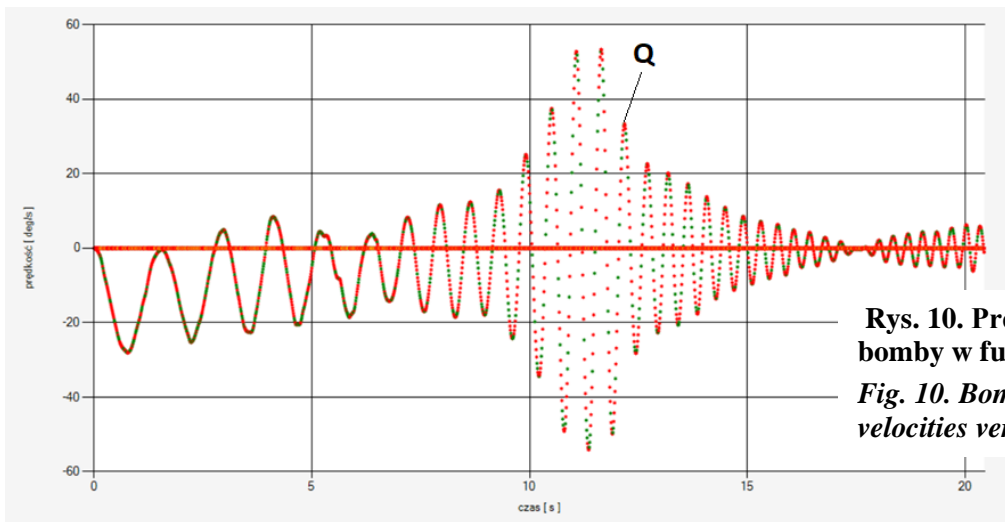
Rys. 7. Trajektoria lotu bomby w funkcji odległości liniowej do celu
Fig. 7. Trajectory of bomb flight versus linear distance to the target



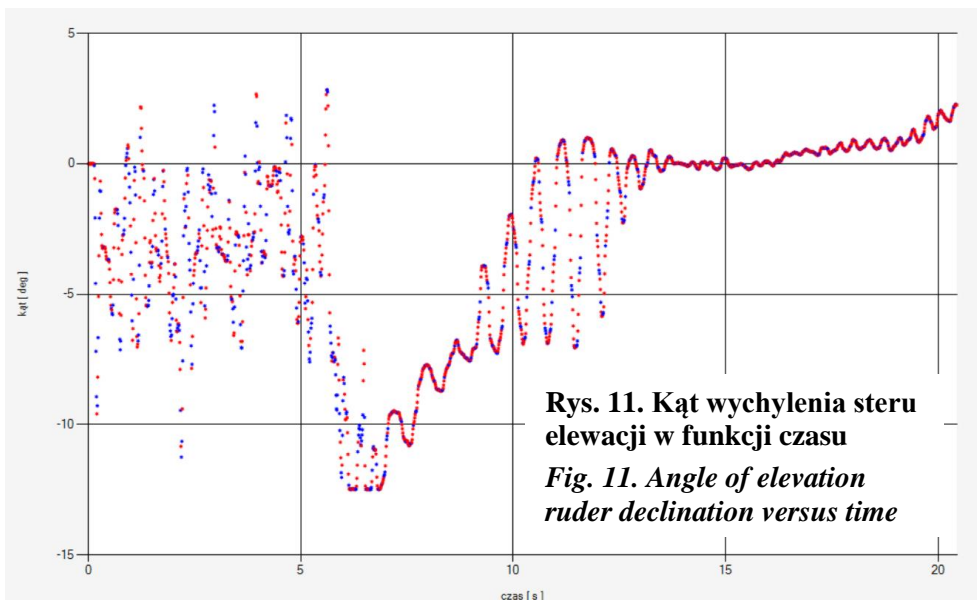
Rys. 8. Kątowe położenie bomby w przestrzeni w funkcji czasu – pochylenie (theta)
Fig. 8. Angular position of bomb in space versus time – pitch (theta)



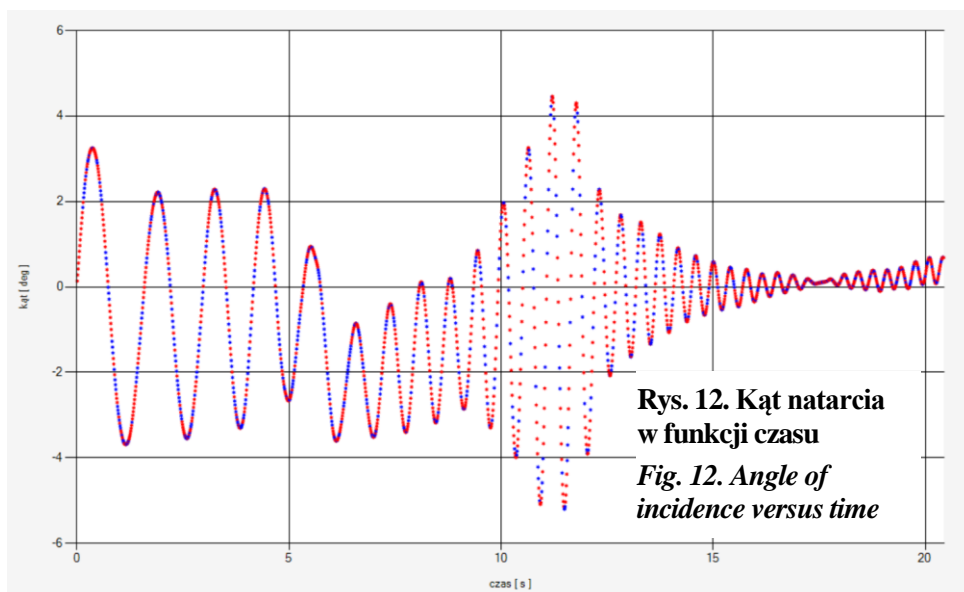
Rys. 9. Prędkość bomby w funkcji czasu
Fig. 9. Velocity of bomb versus time



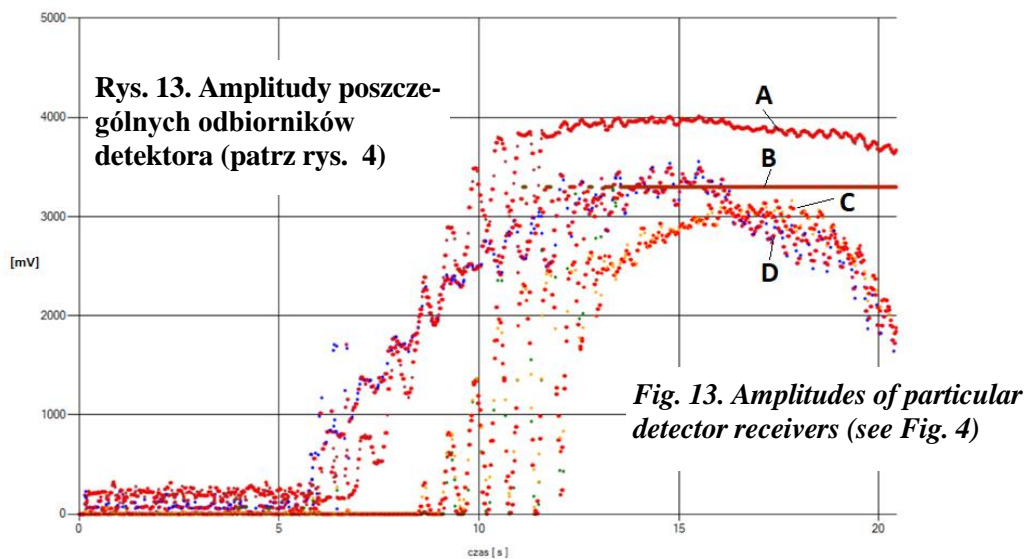
Rys. 10. Prędkości kątowe bomby w funkcji czasu
Fig. 10. Bomb angular velocities versus time



Rys. 11. Kąt wychylenia steru elewacji w funkcji czasu
Fig. 11. Angle of elevation ruder declination versus time



Rys. 12. Kąt natarcia w funkcji czasu
Fig. 12. Angle of incidence versus time

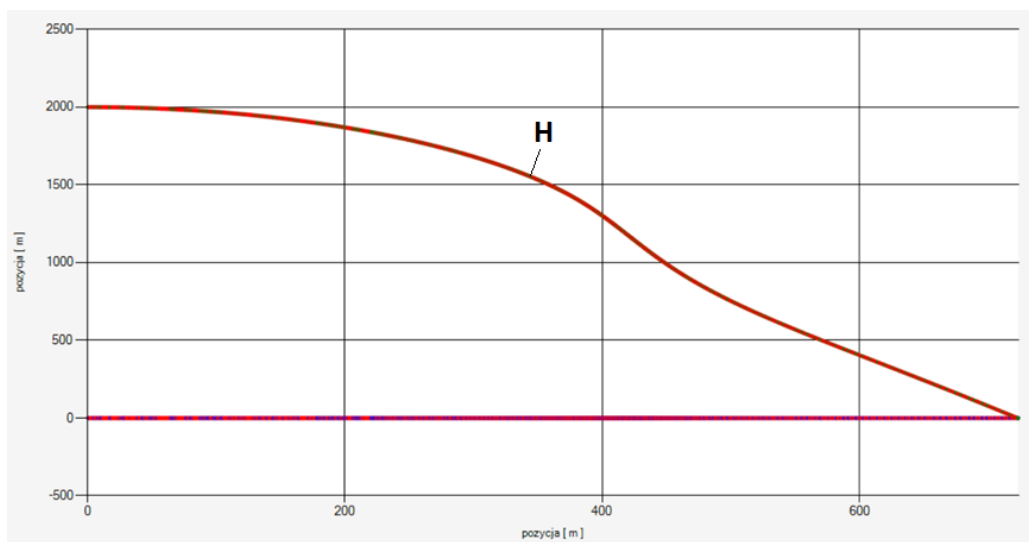


W symulacji typu MIL w celu zmniejszenia wpływu powyższych oscylacji zastosowano regulator typu PID. Doświadczenie zdobyte podczas tamtych prac pozwoliły na zastosowanie tej metody również w tym przypadku.

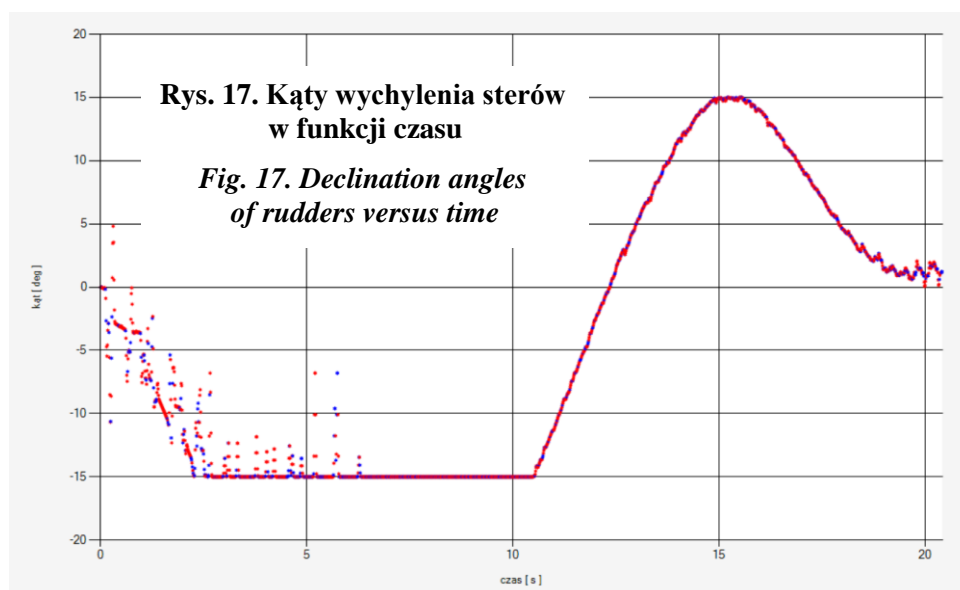
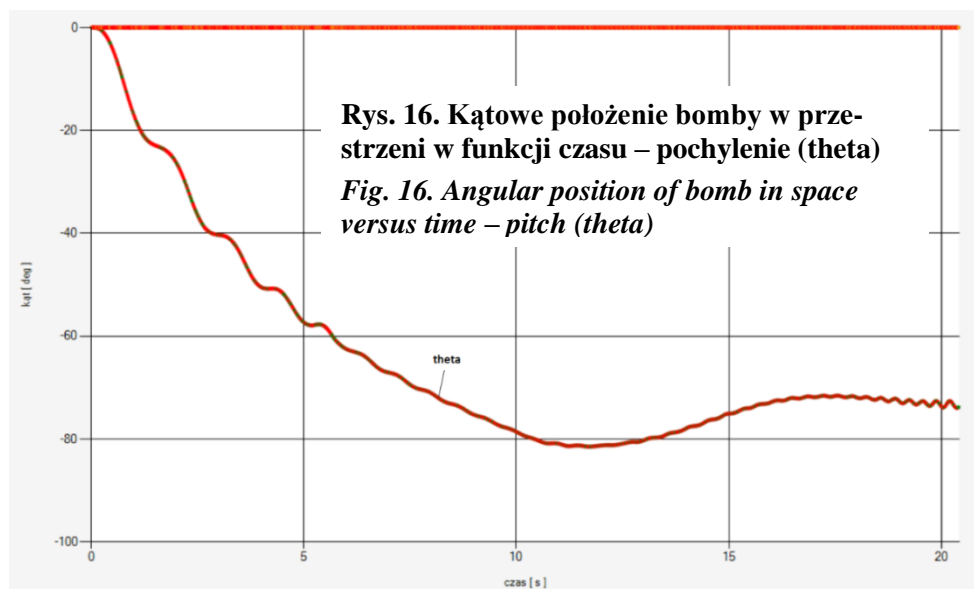
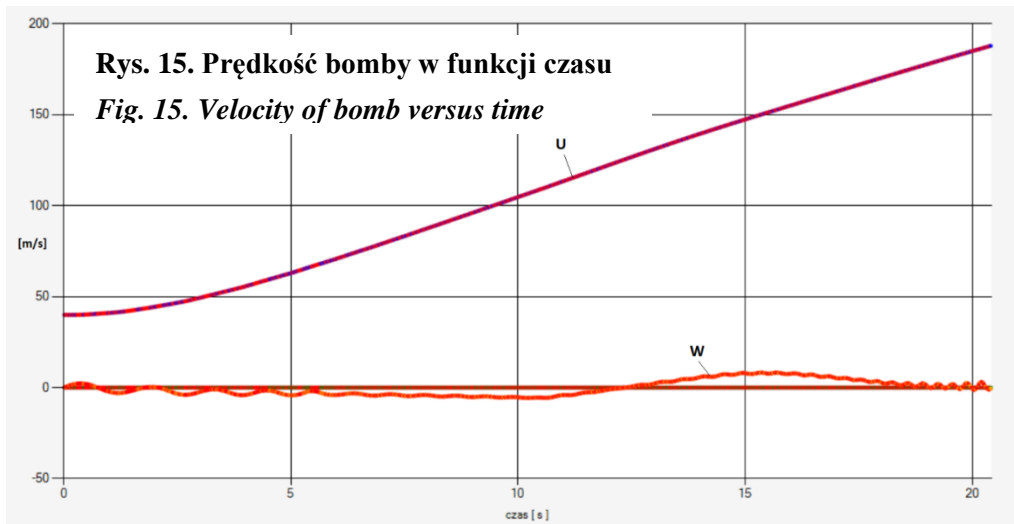
Wykresy od rys. 14 do rys. 19 przedstawiają wyniki symulacji HIL dla metody bezpośredniego naprowadzania z wykorzystaniem regulatora typu PID o parametrach $K_p = 0.66$; $K_i = 2.2$; $K_d = 0.05$.

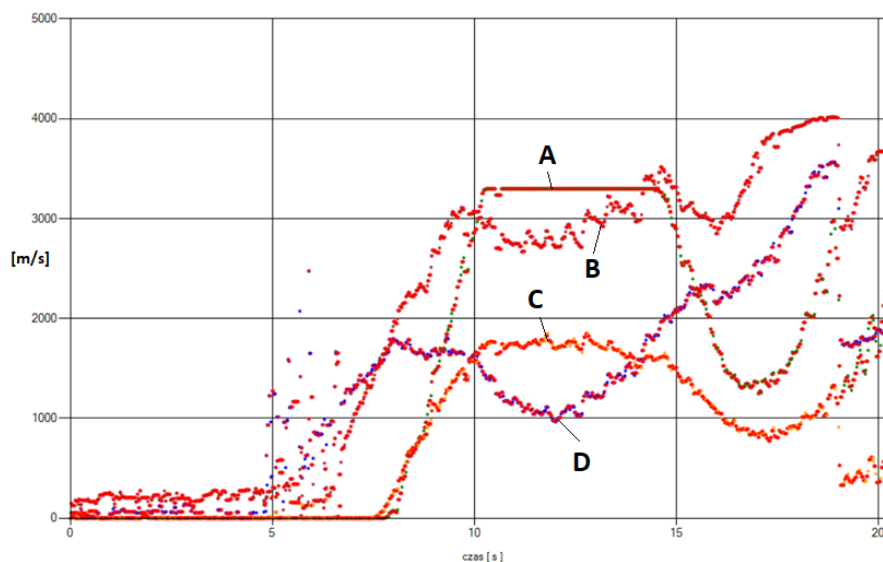
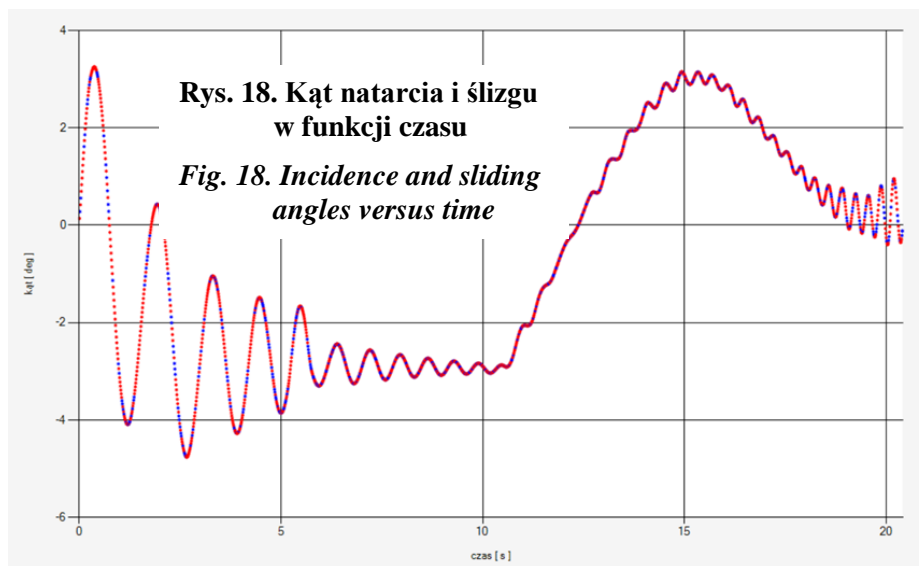
A controller of PID type was used in the MIL type simulation to reduce influence of the above mentioned oscillations. Experience gained with those experiments allowed for implementation of this method in this case, as well.

Diagrams shown in figures from 14 to 19 present HIL simulation results for the method of direct guidance using the PID type controller with parameters $K_p = 0.66$; $K_i = 2.2$; $K_d = 0.05$.



Rys. 14. Trajektoria lotu bomby w funkcji odległości liniowej do celu
Fig. 14. Trajectory of bomb flight in function of linear distance to the target





Rys. 19. Amplitudy poszczególnych odbiorników detektora (patrz rys. 4)

Fig. 19. Amplitudes of detector particular receivers (see Fig. 4)

Upadek bomby nastąpił 3 m za celem, a oscylacje z rys. 12 zostały wygładzone.

Obiecujące wyniki symulacji typu HIL uzyskane z wykorzystaniem metod zastosowanych w symulacji typu MIL pozwalają z optymizmem patrzeć na dalszy proces konstruowania własnej wersji bomby kierowanej.

4. Podsumowanie

Opracowanie miało na celu przedstawienie możliwości symulacji typu Hardware In the

The bomb fell 3 m behind the target and oscillations in Fig. 12 were smoothed.

Promising results of the HIL type simulation obtained at application of methods used in the MIL type simulation allow for optimistic approach to further design process of own version of a controlled bomb.

4. Summary

The paper was aimed to present capacities of the Hardware In the Loop type of

Loop w odniesieniu do bomby korygowanej laserowo. W opracowaniu przedstawiono podstawowe założenia projektowe stanowiska oraz sposoby realizacji urządzeń potrzebnych do wykonania przedmiotowego stanowiska oraz ich integracji z programem symulacyjnym uruchamianym na komputerze PC i realizującym program symulacji ruchu bomby w przestrzeni.

W ramach pracy przeprowadzono szereg symulacji, a wyniki najbardziej charakterystycznych z nich przedstawiono w artykule.

Najważniejszym wnioskiem ogólnym jaki wyciągnięto na podstawie wykonanych badań jest poprawność pracy skonstruowanego detektora oraz potwierdzenie schematu działania układu sterowania z tym, który uzyskano podczas wykonywania symulacji typu MIL.

Ograniczeniem przedstawionego stanowiska do symulacji typu HIL jest na pewno możliwość badania obiektów balistycznych jednocześnie tylko w jednej płaszczyźnie przestrzeni lotu. Należałoby podjąć działania zmierzające do stworzenia stanowiska do badań w przestrzeni trójwymiarowej.

Niewątpliwie stanowisko będzie jeszcze wykorzystywane w najbliższej przyszłości.

simulation relating to a laser corrected bomb. The paper presents basic designing specifications of the stand and the methods for realisation of devices needed for preparation of the subject stand and for their integration with simulating software installed in a PC, and executing the program simulating the movement of the bomb in space.

A series of simulations were carried out in the frame of the project and results of the most characteristic ones are presented in the paper.

The most important general conclusion drawn from the performed tests is the fact of correct work of the designed detector, and confirmation of the control system operational scheme with that one which was obtained during the MIL type simulation.

Presented stand for the HIL type simulation has a limitation as the ballistic objects can be tested at the same time only in one plane of the flight. It could be reasonable to undertake some actions for building a stand for testing in three dimensional space.

The stand will be undoubtedly still used in the nearest future.

Literatura / Literature

- [1] Arrow Tech Associates Inc. (2008), Prodas V3 Technical Manual, USA.
- [2] Eugene L. Fleeman ,(2022), Missile Design Guide
- [3] Kowaleczko G. (2018), Modelowanie dynamiki lotu obiektów latających, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa.
- [4] The MathWorks (2021), Perform Hardware-in-the-Loop Simulation with MATLAB and Simulink to Test and Validate Control Algorithms
- [5] Oec-gmbh, (2018), Pobrane z <https://www.oec-gmbh.de/wp-content/uploads/2018/08/Segmented-Photodiodes.pdf>
- [6] Wijaszka M. (2020), Analiza skuteczności sterowania bomby lotniczej z laserowym układem korekcji lotu, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa.

