

Wiesław Madej

Wydział Elektroniki I Informatyki
Politechnika Koszalińska
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin
wieslaw.madej@tu.koszalin.pl

Specjalizowany cyfrowy system predykcyjny ciągłym pomiarem odległości

Słowa kluczowe: moduł obliczeń balistycznych, system czasu rzeczywistego, system predykcyjny, przelicznik, warunki strzelania

Wstęp

Zadanie predykcji punktu wyprzedzonego należy do głównych zadań, jakie należy wykonać podczas przygotowywania danych do strzelania w artylerii przeciwlotniczej. Problem ten był dotychczas realizowany przez analogowe systemy predykcyjne oparte w większości na analogowych lampowych maszynach liczących. Systemy te stały się przestarzałe oraz bardzo zawodne. Dlatego powstała konieczność zaprojektowania nowych systemów predykcyjnych do istniejących zestawów przeciwlotniczych, co stanowi również podstawę do testowania rozwiązań umożliwiających projektowanie systemów predykcyjnych dla nowo powstających zestawów. Zagadnienia związane z projektowaniem artyleryjskich systemów predykcyjnych pojawiają się w literaturze od kilku lat. Różne aspekty związane z projektowaniem specjalizowanych cyfrowych systemów predykcyjnych przedstawione są w pracach [1–8]. W pracy [1] autor przedstawia wpływ braku uwzględnienia poprawek na dokładność pracy specjalizowanego systemu predykcyjnego. Prace [2, 3] dotyczą analizy konieczności zastosowania odpowiednich filtrów niezbędnych do poprawnego określenia prędkości wypracowania prawidłowych wyprzedzeń. W pracach [4, 5] autorzy omawiają wpływ zastosowania algorytmów o zmiennym okresie próbkowania i przyspieszonym algorytmie obliczeń. Jednakże w tych pracach nie przedstawiono konkretnych funkcji jakie powinny być uwzględnione w algorytmie obliczeń w celu dokładnego odwzorowania toru lotu pocisku do celu, a co za tym idzie poprawnego rozwiązania zagadnienia trafienia. Próbę przedstawienia takich funkcji zawarto w pracy [6], jednak autorzy rozpatrując pełny układ równań ruchu pocisku stwierdzają, że czas potrzebny do obliczeń jest zbyt długi aby można było zrealizować taki algorytm w komputerach przemysłowych lub sterownikach programowalnych. W pracy [8] autor przedstawił algorytm prac specjalizowanego cyfrowego systemu predykcyjnego, jednakże w swoich obliczeniach uwzględnił tylko prostą hipotezę o ruchu celu. W dobie manewrujących obiektów latających hipoteza taka jest mało użyteczna i praktycznie nieprzydatna. W związku z powyższym powstała konieczność opracowania takiego algorytmu, który uwzględni cele manewrujące. Umożliwi to w sposób dokładny przewidywać tor lotu celu, co jednocześnie wpłynie na poprawność rozwiązania zagadnienia trafienia, a także da możliwość zrealizowania funkcji i algorytmu w komputerze przemysłowym, sterowniku programowalnym PLC lub systemie mikroprocesorowym z procesorem sygnałowym.

1. Istota zadania predykcji punktu wyprzedzonego i ogólny algorytm jego rozwiązania.

Strzelanie do celów powietrznych poruszających się w przestrzeni z dużą prędkością i posiadających możliwości manewrowe wymaga uwzględnienia wyprzedzenia odpowiadającego przesunięciu się celu w czasie lotu pocisku do celu. Armatę wcelowuje się nie w punkt A_s (rys. 1), gdzie cel znajduje się w momencie wystrzału, lecz w pewien punkt A_w znajdujący się na przyszłej drodze celu, w którym według obliczeń pocisk powinien spotkać się z celem. Punkt ten nazywa się punktem wyprzedzonym. Aby skierować pocisk w punkt wyprzedzony, należy znać jego geometryczne współrzędne, na podstawie których określa się nastawy na działa.

W celu rozwiązania zadania spotkania należy znać bieżące współrzędne celu, wielkość i kierunek wektora prędkości celu, a także charakter ruchu celu w czasie lotu pocisku do punktu wyprzedzonego.

Bieżące współrzędne celu określa się w wyniku śledzenia go przez stację radiolokacyjną lub przyrządy optyczne. Określenie wielkości i kierunku wektora prędkości celu, rozwiązanie zadania spotkania oraz określenie nastaw na działa wykonuje w sposób ciągły przelicznik Wypracowane nastawy – azymut wyprzedzony i kąt podniesienia są przekazywane w sposób ciągły na działa, przez co skierowuje się je w punkt wyprzedzony.

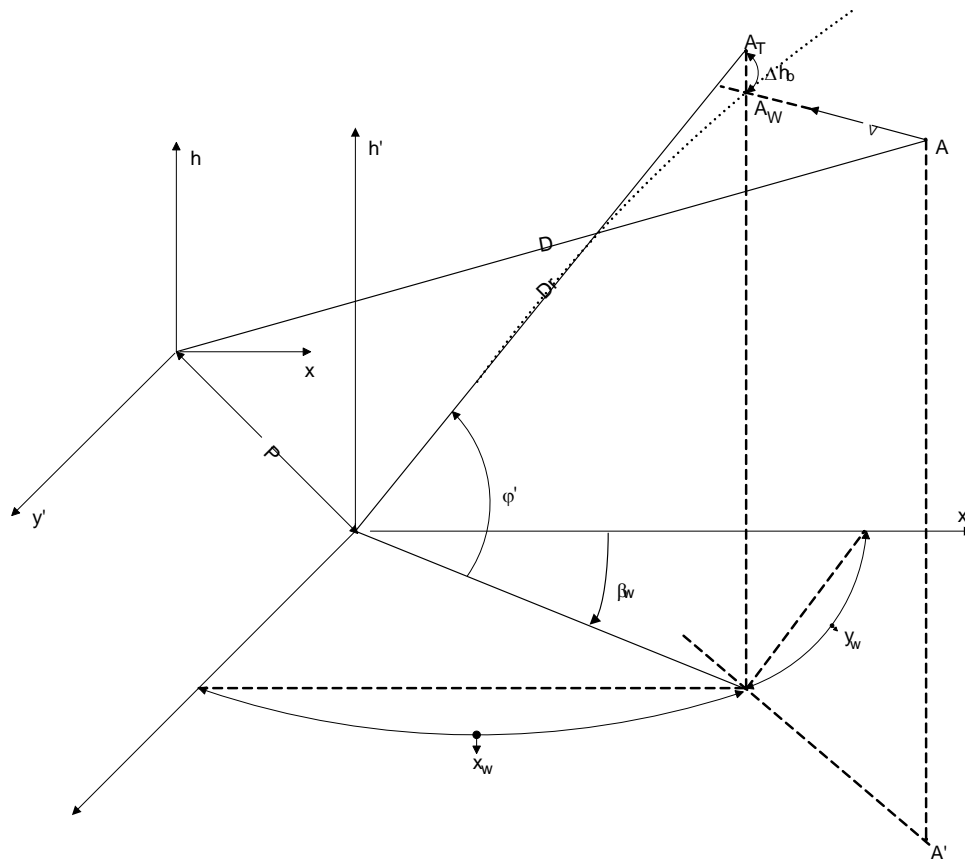
1.1. Hipotezy o ruchu celu.

Do rozwiązania zadania spotkania pocisku z celem w określonym punkcie przestrzeni oraz w określonym momencie czasu niezbędna jest znajomość praw ruchu obydwu ciał i możliwość kierowania jednym z nich, w naszym przypadku prawem ruchu pocisku. Prawo ruchu pocisku zostało opracowane przez balistykę i możemy z dowolną dokładnością znać drogę ruchu pocisku, jego prędkość w różnych punktach toru, czas lotu do różnych punktów w przestrzeni. Znany jest nam także wpływ balistycznych i meteorologicznych warunków na lot pocisku i jego położenie w funkcji czasu. Dlatego po odpowiednim wycelowaniu działa można otrzymać pożądaną trajektorię pocisku przechodzącą przez punkt wyprzedzony. Prawo ruchu celu dla danego wystrzału może być ustalone tylko do punktu w przestrzeni, w którym cel znajduje się w momencie oddania wystrzału – punktu A_s , przy ciągłym określaniu bieżących współrzędnych i czynników ruchu celu. Przy dalszym ruchu, to znaczy w czasie wyprzedzonym na odcinku $A_s A_w$ ustalone prawo ruchu celu może być naruszone, czy to z woli pilota (w postaci manewru), czy też z przyczyn od jego woli niezależnych. Możemy jednak zakładać, że cel w czasie wyprzedzenia zachowa poprzedni charakter ruchu. Im czas wyprzedzenia będzie mniejszy, tym bardziej prawdopodobne, że charakter ruchu celu w tym czasie będzie mniej się różnił od charakteru jego ruchu do momentu wystrzału. Z powyższego wynika konieczność zakładania pewnych hipotez ruchu celu w czasie wyprzedzenia.

1.2. Istota zadania predykcji punktu wyprzedzonego.

Predykcja punktu wyprzedzonego (rozwiązanie zadania spotkania) jest zasadniczym etapem przygotowania wystrzału, w czasie którego określa się geometryczne współrzędne punktu wyprzedzonego A_w , tj. punktu, w którym według obliczeń powinno nastąpić spotkanie się pocisku z celem. Skierowanie pocisku do punktu A_s nie ma sensu, ponieważ w czasie lotu pocisku cel przesunie się z tego punktu o odległość $v_c \cdot \tau$ (τ – czas lotu pocisku do punktu wyprzedzonego) i spotkanie pocisku z celem nie nastąpi. Z tego wynika, że aby nastąpiło spotkanie pocisku z celem, należy skierować pocisk do punktu A_w leżącego na kursie celu i oddalonego od punktu A_s o wartość $v_c \cdot \tau$.

Istota rozwiązania zadania spotkania pocisku z celem polega na uzgodnieniu w czasie dróg celu i pocisku, przebywanych z różnymi prędkościami (stała celu i zmienna pocisku), dających na przecięciu się punkt wyprzedzony A_w . Samo rozwiązanie polega na określeniu geometrycznych współrzędnych punktu wyprzedzonego w dowolnym układzie współrzędnych.



Rys. 1. Istota predykcji punktu wyprzedzonego, gdzie: x, y, z – układ współrzędnych związany z urządzeniem telemetrycznym, x', y', z' – układ współrzędnych związany z obiektem sterowania, P – wektor paralaksy, Δh_b – obniżenie balistyczne, A_w – predykowany punkt wyprzedzony

1.2.1 Predykcja punktu wyprzedzonego.

W przypadku prostej hipotezy o ruchu celu, tzn. że cel w czasie wyprzedzenia porusza się prostoliniowo, jednostajnie i w dowolnej płaszczyźnie, gdy znane są jego współrzędne prostokątne x, y, h i składowe prędkości v_x, v_y, v_h należy określić współrzędne punktu $A_w(\beta_w, D_w, \varepsilon_w)$.

Wyznaczanie współrzędnych punktu wyprzedzonego realizuje się według następującego algorytmu:

1. Oblicza się odległość poziomą celu z zależności

$$d_p = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

2. Oblicza się odległość rzeczywistą celu z zależności

$$D = \sqrt{d_p^2 + h^2} \quad (2)$$

3. Oblicza się czas lotu pocisku do celu według tabel strzelniczych jako funkcję balistyczną

$$\tau = f(D_T, h_w) \quad (3)$$

W pierwszym przybliżeniu jako odległość pozorną D_T traktuje się odległość rzeczywistą D , natomiast jako wysokość wyprzedzoną h_w traktuje się wysokość rzeczywistą h .

4. Oblicza się współrzędne wyprzedzone według zależności

$$\begin{aligned}x_w &= x + v_x \cdot \tau \\y_w &= y + v_y \cdot \tau \\h_w &= h + v_h \cdot \tau\end{aligned}\quad (4)$$

5. Oblicza się wysokość pozorną h_T według zależności

$$h_T = h_w + \Delta h_b \quad (5)$$

gdzie Δh_b – obniżenie balistyczne.

6. Oblicza się odległość wyprzedzoną poziomą d_{pw} i pozorną D_T celu według zależności

$$\begin{aligned}d_{pw} &= \sqrt{x_w^2 + y_w^2} \\D_T &= \sqrt{d_{pw}^2 + h_T^2}\end{aligned}\quad (6)$$

7. Oblicza się kąty azymutu β_w i podniesienia φ według zależności

$$\begin{aligned}\beta_w &= \arcsin \frac{x_w}{d_{pw}} \\ \varphi &= \arcsin \frac{h_T}{D_T}\end{aligned}\quad (7)$$

8. Powraca się do punktu 3.

2. Program modułu obliczeń balistycznych.

2.1. Opis ogólny algorytmu obliczeń.

2.1.1. Założenia projektowe.

Program obliczeń balistycznych dotyczy armaty przeciwlotniczej 35 mm OERLIKON. Podstawą algorytmu obliczeń są tabele strzelnicze dla amunicji o prędkości początkowej pocisku 1180 m/s .

Uwzględnia się następujące odchyłki od tabelarycznych warunków strzelania:

- odchyłkę prędkości początkowej pocisku $dV0$ [m/s];
- odchyłkę temperatury powietrza dT [deg];
- odchyłkę ciśnienia powietrza dP [mbar];
- wiatr balistyczny W [m/s] (jego składową podłużną i boczną);
- zjawisko derywacji pocisku;
- paralaksę strzelania P [m] (jej składowe prostokątne);

W efekcie do algorytmu obliczeń wprowadza się:

- poprawkę czasu lotu pocisku $dtV0$ [s] ze względu na odchyłkę prędkości początkowej pocisku od tabelarycznej;
- poprawkę czasu lotu pocisku dtT [s] ze względu na odchyłkę temperatury powietrza od tabelarycznej;
- poprawkę czasu lotu pocisku dtP [s] ze względu na odchyłkę ciśnienia powietrza od tabelarycznego;

- poprawkę czasu lotu pocisku $dtW[s]$ ze względu na oddziaływanie składowej podłużnej wiatru balistycznego;
- poprawkę przewyższenia balistycznego $dhW[m]$ ze względu na oddziaływanie składowej podłużnej wiatru balistycznego;
- poprawkę azymutu strzelania $dbW[rad]$ ze względu na oddziaływanie składowej bocznej wiatru balistycznego;
- poprawkę azymutu strzelania $dbD[rad]$ ze względu na zjawisko derywacji pocisku;
- poprawki współrzędnych prostokątnych punktu wyprzedzonego $P_x, P_y, P_z [m]$ ze względu na paralaksę strzelania.

Danymi wejściowymi do obliczeń są:

- współrzędne prostokątne celu – wygładzone;
- składowe wektora prędkości celu w układzie prostokątnym;
- składowe wektora przyspieszenia celu w układzie prostokątnym;
- kąty odchylenia, pochylenia i przechylenia osi transportera względem osi układu stabilizowanego;
- odchyłki od tabelarycznych warunków meteorologicznych i balistycznych;
- składowe wektora paralaksy strzelania;
- Danymi wyjściowymi modułu obliczeń balistycznych są – opcjonalnie:
- kąty wycelowania armaty w stabilizowanym układzie współrzędnych;
- kąty wycelowania armaty w niestabilizowanym układzie współrzędnych transportera;
- kąty wyprzedzenia i przewyższenia w stabilizowanym układzie współrzędnych;
- kąty wyprzedzenia i przewyższenia w niestabilizowanym układzie współrzędnych transportera;

Przyjęty został lewoskrętny układ współrzędnych stabilizowanych, w którym oś x skierowana jest na północ, oś y na wschód natomiast oś z w górę. W przyjętym układzie współrzędnych kąty poziome rosną w prawo a kąty pionowe w górę.

W układzie współrzędnych związanych z transporterem oś x skierowana jest wzdłuż transportera do przodu, oś y w stronę prawej burty natomiast oś z w górę.

Interpretacja kątów w układzie związanym z transporterem jest następująca:

- kąt odchylenia jest dodatni gdy oś transportera odchylona jest w prawo od kierunku północy;
- kąt pochylenia jest dodatni gdy oś transportera pochylona jest w dół od poziomu;
- kąt przechylenia jest dodatni gdy transporter przechylony jest na lewa burtę.

Kąty: odchylenia, pochylenia i przechylenia zawierają się w przedziałach $(0, 2\pi)$.

Do wyrażenia kątów w tysięcznych użyto tysięcznej zdefiniowanej jako $1/6400$ część kąta pełnego (jak w tabelach strzelniczych).

Przy konstrukcji modelu matematycznego procedury obliczeń czasu wyprzedzonego przyjęto opcjonalnie następujące dwie hipotezy o ruchu celu:

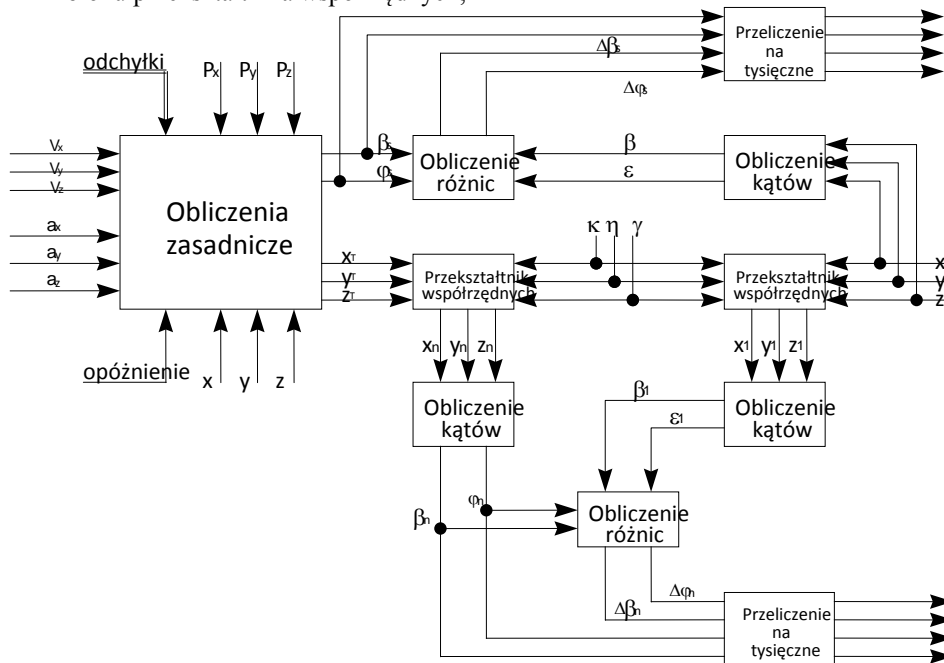
1. *W czasie lotu pocisku do celu cel przemieszcza się ruchem śrubowym po powierzchni walca pionowego ze stałą prędkością kątową oraz stałą prędkością wznoszenia (opadania).*
2. *W czasie lotu pocisku do celu cel porusza się po dowolnej trajektorii zachowując stałe wartości składowych prostokątnych wektora przyspieszenia.*

2.1.2. Schemat blokowy modułu balistycznego.

Moduł balistyczny składa się z siedmiu różnych bloków wywoływanych w odpowiedniej kolejności przez procedurę obliczeń (rys 2):

- bloku obliczeń zasadniczych - w pętli;
- bloku obliczania kątów;
- bloku obliczania poprawek donośności i wysokości;
- bloku obliczania poprawek kierunku;

- bloku obliczania różnic kątów;
- bloku przeliczania kątów na tysięczne;
- bloku przekształtnika współrzędnych;



Rys.2. Schemat blokowy modułu obliczeń balistycznych.

Danymi wejściowymi modułu balistycznego są:

- współrzędne prostokątne celu x, y, z ;
- składowe wektora prędkości celu V_x, V_y, V_z ;
- składowe wektora przyspieszenia celu a_x, a_y, a_z ;
- składowe wektora paralaksy P_x, P_y, P_z ;
- opóźnienie wprowadzane przez filtry wygładzające i różniczkujące;
- kąty przechylenia, pochylenia i odchylenia transportera κ, η, γ ;
- wektor odchyłek od tabelarycznych warunków strzelania.

Danymi wyjściowymi z modułu balistycznego są – opcjonalnie:

- kąty wycelowania armaty w stabilizowanym układzie współrzędnych β, φ ;
- kąty wyprzedzenia i przewyższenia w stabilizowanym układzie współrzędnych $\delta\beta, \delta\varphi$;
- kąty wycelowania armaty w niestabilizowanym układzie współrzędnych β_a, φ_a ;
- kąty wyprzedzenia i przewyższenia w niestabilizowanym układzie współrzędnych $\Delta\beta_a, \Delta\varphi_a$.

Wszystkie dane wejściowe z wyjątkiem kątów obrotu transportera doprowadzone są do bloku obliczeń zasadniczych. Na podstawie tych wielkości na wyjściu bloku obliczeń zasadniczych uzyskuje się współrzędne prostokątne punktu teoretycznego położonego nad punktem wyprzedzonym o wartość przewyższenia balistycznego d_{hb} (X_t, Y_t, Z_t) oraz kąty wycelowania lufy (β, φ) w stabilizowanym układzie współrzędnych.

Na podstawie bieżących wartości azymutu i kąta położenia celu oraz zapamiętanych wartości azymutu strzelania i kąta podniesienia lufy oblicza się bieżące wartości poziomego kąta wyprzedzenia i pionowego kąta przewyższenia ($\Delta\beta, \Delta\varphi$) jako różnice pomiędzy odpowiednimi kątami.

Ostateczne wartości wszystkich kątów mogą być odbierane z modułu balistycznego w radianach lub w tysięcznych artyleryjskich. Przeliczenia kątów z radianów na tysięczne dokonuje się w bloku obliczenia tysięcznych.

Współrzędne punktu teoretycznego oraz współrzędne celu przekazane zostają kolejno do przekształtnika współrzędnych.

Wielkościami parametrycznymi tego bloku są kąty odchylenia, pochylenia i przechylenia armaty. Powyższe kąty są skutkiem nierówności podłoża oraz niezgodności kierunku zorientowania i kierunku północy. Wielkościami wyjściowymi bloku przekształtnika są współrzędne prostokątne - punktu teoretycznego (X_{ta}, Y_{ta}, Z_{ta}) i celu (X_a, Y_a, Z_a) w układzie związanym z armatą.

W bloku obliczania kątów dokonuje się zamiany współrzędnych prostokątnych na kąty wycelowania (β_a, φ_a) i wizowania ($\beta_{ca}, \epsilon_{ca}$) w niestabilizowanym układzie współrzędnych.

Po obliczeniu różnic tych kątów w bloku różnic otrzymuje się kąty wyprzedzenia i przewyższenia ($\Delta\beta_a, \Delta\varphi_a$) dla armaty w jej własnym układzie współrzędnych. Całkowite kąty wycelowania oraz różnice kątów są następnie przeliczane z radianów na tysięczne w takim samym bloku obliczeń dla kanału stabilizowanego i niestabilizowanego.

Blokowa konstrukcja algorytmu modułu balistycznego umożliwi uzyskanie ostatecznych danych do wystereowania armaty w różnorodnej formie. Wybór potrzebnego kompletu danych wyjściowych zależeć będzie od przyjętej reguły sterowania armatą.

2.2. Uwzględnienie przyspieszeń liniowych celu w algorytmie obliczeń

2.2.1. Procedura pośredniego wyznaczania prędkości kątowej.

W programie wykorzystującym procedurę pośredniego wyznaczania prędkości nie wykorzystuje się danych o przyspieszeniach liniowych. W module balistycznym tego programu wykorzystuje się hipotezę, że cel porusza się po okręgu ze stałą prędkością. Położenie punktu wyprzedzonego wylicza się z zależności:

$$\begin{aligned}x_w &= x + v_x \cdot t_x - v_y \cdot t_y \\y_w &= y + v_y \cdot t_x + v_x \cdot t_y \\z_w &= z + v_z \cdot t\end{aligned}\tag{8}$$

gdzie:

$$\begin{aligned}t_x &= \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} \\t_y &= \frac{1 - \cos(\omega \cdot t)}{\omega}\end{aligned}$$

t - czas lotu pocisku do punktu wyprzedzonego.

Prędkość kątową ω , która niezbędna jest do wyznaczania położenia punktu wyprzedzonego, wyznacza się na podstawie zmian kąta kursu celu. Odbywa się to według następującej procedury:

- oblicza się różnicę Δ_q pomiędzy aktualnym a poprzednim kątem kursu;
- jeżeli moduł różnicy Δ_q jest większy niż π , to modyfikuje się tą różnicę poprzez zależność:

$$\Delta_q = \Delta_q - \frac{\Delta_q}{|\Delta_q|} \cdot 2 \cdot \pi$$

- następnie oblicza się prędkość kątową ω z zależności:

$$\omega = \left[2 \cdot \Delta_q + (2 - 1,02 \cdot \text{krok}) \cdot \omega_1 \right] / (2 + 1,02 \cdot \text{krok})$$

gdzie: krok - czas jaki upłynął od poprzedniego obliczenia prędkości kątowej;

ω_1 - poprzednia wartość prędkości kątowej.

2.2.2. Procedura bezpośredniego wyznaczania prędkości kątowej.

Program wykorzystujący tę procedurę różni się od poprzedniego tym, że prędkość kątowa niezbędna do prawidłowej pracy modułu balistycznego nie jest wyznaczana w sposób pośredni, lecz bezpośrednio na podstawie przyspieszeń liniowych (a_x, a_y) i prędkości liniowych (v_x, v_y) z następującej zależności:

$$\omega = \frac{a_y \cdot v_x - a_x \cdot v_y}{v_x^2 + v_y^2} \quad (9)$$

Zależność tą uzyskuje się poprzez zróżniczkowanie względem czasu równania

$$q_c = \arctg \frac{v_y}{v_x}, \quad (10)$$

które opisuje zależność pomiędzy kątem kursu celu a składowymi prędkościami celu.

2.2.3. Procedura obliczeń z rozkładu w szereg Taylora.

Oprócz dwóch poprzednich przypadków przetestowano również program, w którym zmieniono hipotezę ruchu celu na hipotezę o stałych przyspieszeniach. W hipotezie tej współrzędne punktu wyprzedzonego liczone są z rozwinięcia funkcji w szereg Taylora:

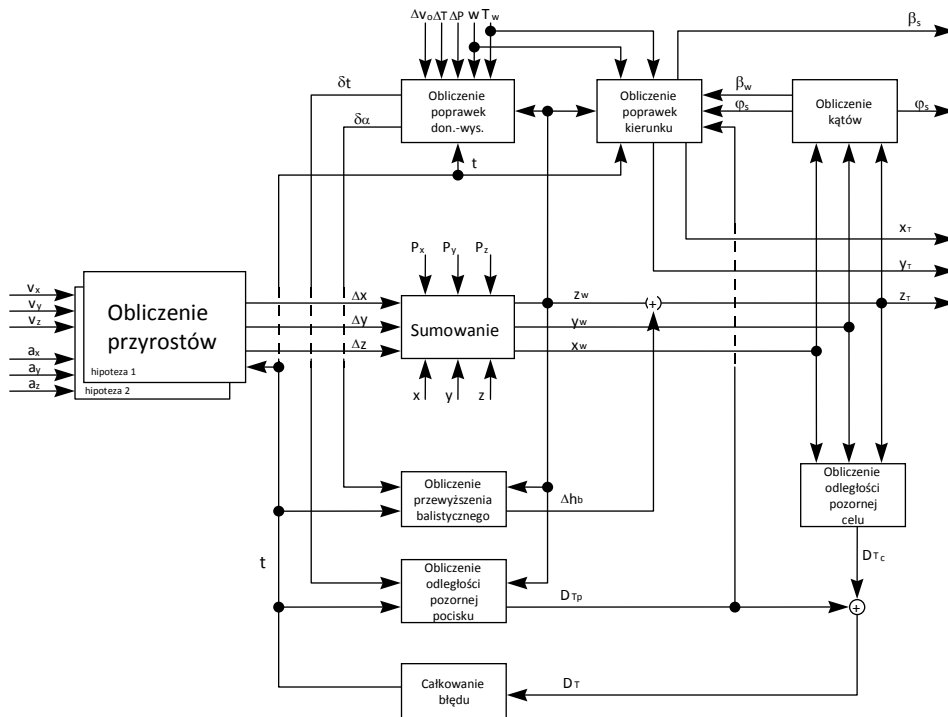
$$\begin{aligned} x_w &= x + v_x \cdot t + \frac{a_x \cdot t^2}{2} \\ y_w &= y + v_y \cdot t + \frac{a_y \cdot t^2}{2} \\ z_w &= z + v_z \cdot t + \frac{a_z \cdot t^2}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

2.3. Blok obliczeń zasadniczych z uwzględnieniem poprawek.

Ta część obliczeń odbywa się w pętli. Algorytm obliczeń tak długo jest powtarzany z tymi samymi danymi wejściowymi, aż spełniony będzie warunek równości odległości na jakiej znajdzie się punkt pozorny po upływie wyliczonego czasu (DTp) i odległości do punktu leżącego nad celem o wartość przewyższenia balistycznego (DTc) po upływie tego samego czasu od chwili strzału z błędem nie większym niż 1/1000 odległości do punktu pozornego:

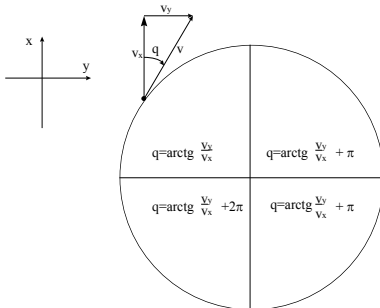
$$DTp - DTc \leq 0.001 DTp$$

Blokowy schemat algorytmu obliczeń przedstawiony jest na rys 3.



Rys. 3. Schemat blokowy obliczeń zasadniczych.

A. Jeżeli zakłada się pracę według pierwszej hipotezy to na początku oblicza się prędkość kątową celu, bowiem na stałości prędkości kątowej ruchu celu w czasie lotu pocisku opiera się konstrukcja matematyczna modułu obliczania przyrostów współrzędnych. Prędkość kątową celu oblicza się na podstawie składowych wektora prędkości v_x, v_y jako pochodną kąta drogi.



Rys. 4. Ilustracja do obliczenia wartości kąta drogi.

Bez względu na to w której ćwiartce aktualnie znajduje się cel, prędkość kątową jako pochodną kąta drogi wyraża się zależnością:

$$\omega = \frac{d}{dt} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{v_y}{v_x} \right) \right]$$

a to w konsekwencji daje prostą funkcję składowych prędkości i przyśpieszenia:

$$\omega = \frac{a_y \cdot v_x - a_x \cdot v_y}{v_x^2 + v_y^2}$$

Na podstawie składowych wektora prędkości oraz wyliczonej wcześniej prędkości kątowej obliczone zostają przyrosty współrzędnych Δx , Δy , Δz odpowiadające aktualnemu czasowi lotu pocisku t .

Rzeczywisty czas lotu pocisku musi być skorygowany o wartość opóźnienia wprowadzanego przez filtry współrzędnych celu i filtry składowych wektora prędkości.

W programie zasymulowana została ta korekcja lecz z zerową wartością opóźnienia ($op = 0$).

$$t_1 = t + op$$

Przyrosty współrzędnych w płaszczyźnie poziomej Δx , Δy są rzutami cięciwy okręgu, po którym według hipotezy porusza się cel na osie układu x, y .

Wyliczane są one według zależności:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{v_x \sin(\omega t_1)}{\omega} - \frac{v_y (1 - \cos(\omega t_1))}{\omega} \\ \Delta y &= \frac{v_y \sin(\omega t_1)}{\omega} + \frac{v_x (1 - \cos(\omega t_1))}{\omega} \end{aligned} \quad (12)$$

W przypadku szczególnym, gdy prędkość kątowa jest zerowa to ruch po powierzchni walca przechodzi w ruch w płaszczyźnie pionowej. Przyrosty współrzędnych przyjmują wówczas wartości jakby z wyrażen:

$$\Delta x = v_x t$$

$$\Delta y = v_y t$$

Gdy prędkość kątowa dąży do nieskończoności to wartości przyrostów współrzędnych dążą do zera co jest teoretycznie zrozumiałe, gdyż oznaczałoby to, że cel zawsze znajduje się w tym samym punkcie. Wobec czego wyprzedzenia nie są potrzebne.

Przyrost trzeciej współrzędnej jest funkcją liniową i liczony jest z zależności:

$$\Delta z = v_z t$$

Gdy cel jest nieruchomy to składowe jego prędkości są zerowe a zatem i wyprzedzenia zerują się.

B. Jeżeli zakłada się pracę według drugiej hipotezy to przyrosty współrzędnych oblicza się według zależności:

$$\begin{aligned} \Delta x &= v_x t_1 + a_x \frac{t_1^2}{2} \\ \Delta y &= v_y t_1 + a_y \frac{t_1^2}{2} \\ \Delta z &= v_z t_1 + a_z \frac{t_1^2}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

Sumy bieżących współrzędnych x, y, z oraz odpowiadających im przyrostów i składowych paralaksy strzelania są współrzędnymi wyprzedzonymi punktu trafienia (X_w, Y_w, Z_w).

Wysokość wyprzedzona, aktualny czas lotu pocisku t oraz poprawki czasu lotu pocisku δt i δt_w są danymi wejściowymi do obliczenia przewyższenia balistycznego Δhb oraz odległości pozornej pocisku DTp .

Te dwie wielkości jako rezultat aproksymacji zasadniczych tabel strzelniczych i przyjętego modelu oddziaływania odchyłek od warunków tabelarycznych na trajektorię pocisku oblicza się według zależności:

$$\begin{aligned}
t_p &= t + \delta t \\
t_b &= t_p - \delta t w_1 \\
DTp &= \frac{1180t_p}{1 + \frac{1180t_p}{8860 + 0,36z_w} - \frac{t_p^2}{1180}} \\
DTw &= \frac{1180t_b}{1 + \frac{1180t_b}{8860 + 0,36z_w} - \frac{t_b^2}{1180}} \\
dhw &= (DTp - DTw)(\sin \varphi - 0,14 \cos \varphi) \\
\Delta hb &= (2,1 + 0,25 \cdot 10^{-3} z_w) t + \pi^2 + dhw
\end{aligned} \tag{14}$$

Czas t_p jest poprawionym czasem lotu pocisku uwzględniającym wpływ wszystkich czterech czynników. Czas t_b jest poprawionym czasem lotu pocisku nie uwzględniającym wpływu składowej podłużnej wiatru.

Na podstawie tych czasów liczone są odpowiednio odległości pozorne DTp oraz DTw . Odcinek będący różnicą tych odległości nachylony jest do poziomu pod kątem takim jak lufa armaty. Poprawka przewyższenia balistycznego dhw spowodowana wpływem wiatru jest nieco mniejsza niż składowa pionowa tego odcinka.

Funkcja przewyższenia balistycznego musi być ograniczona od góry ze względu na odporność algorytmu na zakłócenia impulsowe danych wejściowych. W przypadku braku tego ograniczenia w stanach nieustalonych mogłoby się zdarzyć, że przewyższenie balistyczne byłoby większe od odległości pozornej. To z kolei spowodowałoby awarię algorytmu. Opisana sytuacja wynika wyłącznie z charakteru funkcji przyjętych do aproksymacji tabel strzelniczych.

Ograniczenia dokonuje się na poziomie, który w rzeczywistości nigdy nie będzie osiągnięty według zależności:

$$\text{jeżeli } (\Delta hb > 5000) \text{ to } \Delta hb := 5000;$$

Suma przewyższenia i wysokości wyprzedzonej to wysokość pozorna celu Zt . Pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów współrzędnych wyprzedzonych poziomych oraz kwadratu wysokości pozornej jest odległością DTc do punktu położonego nad celem o wartość Δhb .

$$DTc = \sqrt{Xw^2 + Yw^2 + Zw^2} \tag{15}$$

Różnica ΔDt pomiędzy odległościami DTp i DTc jest wyznacznikiem błędu czasu lotu pocisku. Dopuszczalny błąd czasu lotu pocisku wynosi 0.01[s] a to odpowiada w przybliżeniu około 0.001 odległości do celu. Dlatego też przed następnym powtórzeniem algorytmu obliczeń poprawia się czas lotu pocisku o wartość $\Delta t = 0.001 * \Delta Dt$.

Proces jest szybko i zawsze zbieżny, pod warunkiem poprawnie dobranego współczynnika w wyrażeniu na poprawkę czasu Δt oraz dozwolonej wartości czasu t w chwili startu programu. Wspomnianą wartość współczynnika dobrano doświadczalnie, natomiast czas t w chwili startu programu może być dowolny z przedziału 0 do 30 sekund. Dla prostoty wskazane jest przyjmować czas zerowy.

Blok obliczeń zasadniczych wywołuje blok obliczania kątów, a także procedury obliczania poprawek donośności i wysokości oraz obliczania poprawek kierunku.

Te dwa bloki i dwie procedury tworzą zamkniętą pętlę obliczeń aż do chwili spełnienia założonego warunku wyjścia z pętli.

Współrzędne prostokątne punktu pozornego X_w, Y_w, Z_t są podstawą do obliczenia kątów wycelowania armaty. Na ich podstawie otrzymuje się na wyjściu bloku obliczania kątów bieżącą wartość azymutu punktu wyprzedzonego, przed uwzględnieniem poprawki kierunku oraz bieżącą wartość kąta podniesienia lufy w płaszczyźnie pionowej.

2.3.1. Procedura obliczania poprawek donośności i wysokości.

Procedura uaktywniana jest tylko przy czasach lotu pocisku mieszczących się w granicach przewidzianych w tabelach strzelniczych. Poza przedziałem rzeczywistości np. w stanach przejściowych algorytmu obliczeń, poprawki mogłyby niepotrzebnie wydłużać czas ustalania się procesów.

Najpierw dokonuje się obliczenia składowych wiatru balistycznego.

Rozkład wiatru na składowe wykonuje się według zależności:

$$W_b = W \sin(\beta_w - T_w)$$

$$W_l = W \cos(\beta_w - K_w)$$

gdzie K_w jest kątem wiatru dla składowej podłużnej obliczanym według zależności:

$$K_w = T_w + \pi \quad \text{dla } T_w \leq \pi$$

$$K_w = T_w - \pi \quad \text{dla } T_w > \pi$$

przy czym T_w jest topograficznym azymutem wiatru.

Następnie procedura oblicza cztery poprawki czasu lotu pocisku jako funkcje tabelarycznego czasu lotu, wysokości wyprzedzonej oraz odpowiednich odchyłek od warunków tabelarycznych:

$$\delta t_{V_0} = (4t^2 + 94t + 30 \cdot 10^{-6} z_w^2 - 2,58 \cdot 10^{-3} z_w - 4,5) \cdot 10^{-5} dV_0 [s]$$

$$\delta t_{T_0} = (-2,2 \cdot 10^{-3} z_w + 34) \cdot 10^{-5} t^2 dT_0 [s]$$

$$\delta t_{P_0} = -11,5 \cdot 10^{-5} t^2 dP_0 [s]$$

$$\delta t_{W_1} = (29t^2 - 32t - 64 \cdot 10^{-6} z_w^2 + 102 \cdot 10^{-3} z_w + 63,5) \cdot 10^{-5} W_1 [s]$$

Do bloku obliczeń zasadniczych przekazywana jest sumaryczna poprawka czasu δt oraz dodatkowo poprawka czasu δt_{W_l} .

$$\delta t = \delta t_{V_0} + \delta t_{T_0} + \delta t_{P_0} + \delta t_{W_1} [s]$$

2.3.2. Procedura uwzględnienia poprawek kierunku.

W procedurze oblicza się i uwzględnia poprawkę kierunku wywołaną derywacją pocisku oraz poprawkę kierunku wywołaną wiatrem balistycznym. Poprawkę na derywację pocisku oblicza się według formuły uwzględniającej czas lotu pocisku do celu oraz wysokość punktu wyprzedzonego.

$$\delta \beta_{der} = (0,105t^2 + 0,883t - 0,3927 \cdot 10^{-6} z_w^2 + 0,1343 \cdot 10^{-3} z_w - 0,1212) \cdot 10^{-4} [rad]$$

Poprawkę kierunku strzelania ze względu na oddziaływanie składowej bocznej wiatru balistycznego oblicza się według następującej zależności będącej rezultatem aproksymacji tabel poprawek:

$$\delta \beta_w = 0,105 \cdot 10^{-3} t \cdot w_b [rad]$$

przy czym czynnik w_b jest wartością składowej bocznej wiatru w [m/s] uzyskiwaną z rozkładu wiatru na składowe.

Ostatecznie poprawiony azymut strzelania jest sumą kąta wyliczonego w procedurze obliczeń kąta oraz obydwu poprawek kierunku:

$$\beta = \beta_w + \delta \beta_{wt} + \delta \beta_{der} [rad]$$

Ponieważ w dalszych obliczeniach potrzebne są składowe prostokątne zawierające w sobie obliczone powyżej poprawki kierunku dlatego w tym miejscu dokonuje się ich wyznaczenia według zależności:

$$X_t = DT_p \cos\varphi \cos\beta \text{ [m]}$$

$$Y_t = DT_p \cos\varphi \sin\beta \text{ [m]}$$

Trzecia współrzędna tj. Z_t obliczona została już wcześniej.

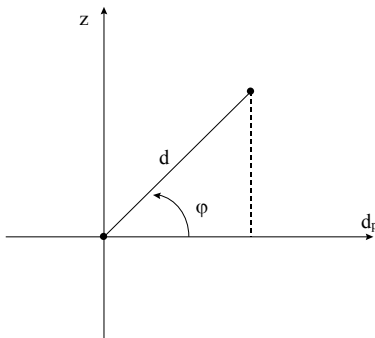
2.3.3. Blok obliczenia kątów.

W bloku obliczane są dwa kąty:

- kąt w płaszczyźnie pionowej – na podstawie wysokości oraz odległości poziomej;
- azymut w płaszczyźnie poziomej – na podstawie współrzędnych x, y ;

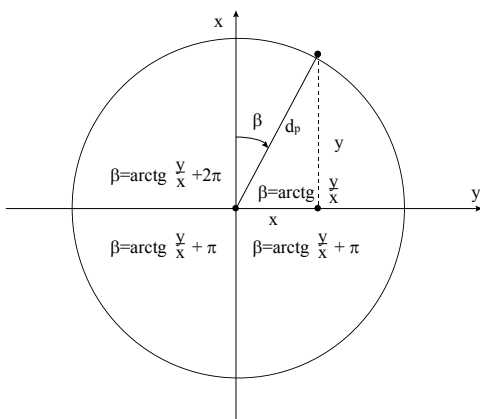
Kąt w płaszczyźnie pionowej oblicza się dla podstawowego przedziału zmienności funkcji tangens według wyrażenia:

$$\varepsilon = \arctg\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$



Rys. 5. Obliczenie kąta podniesienia lufy.

W zależności od wartości i wzajemnych relacji pomiędzy współrzędnymi x, y azymut oblicza się według wyrażen wpisanych w odpowiednie ćwiartki koła.



Rys. 6. Obliczenie azymutu.

Aby uniknąć dwóch różnych wartości azymutu dla tego samego kierunku wprowadzona została instrukcja przypisująca kątowi pełnemu wartość zerową.

jeżeli kąt = 2π to kąt := 0

2.4. Bloki obliczeń pomocniczych.

Obliczanie różnic kątów – kąt wyprzedzenia obliczany jest jako różnica pomiędzy azymutem kierunku strzelania i azymutem celu.

$$\Delta\beta = \beta - \beta_c$$

W celu uniknięcia impulsu prostokątnego dużego kąta wyprzedzenia przy przechodzeniu przez zero wprowadzona została instrukcja:

$$\text{jeśli } |\Delta\beta| > \pi \text{ to } \Delta\beta := \Delta\beta - \text{sign}(\Delta\beta) * 2\pi$$

Kąt przewyższenia oblicza się jako różnicę pomiędzy obliczonym kątem podniesienia lufy i kątem położenia celu:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varepsilon_c$$

Przeliczanie kątów na tysięczne – całkowite kąty wycelowania oraz kąty wyprzedzenia i przewyższenia przelicza się z radianów na tysięczne poprzez mnożenie przez współczynnik będący ilorazem liczby tysięcznych i liczby radianów w kącie pełnym:

$$\text{mnożnik} = 3200/\pi$$

$$\text{kąt w tysięcznych} = \text{kąt w radianach} * \text{mnożnik};$$

Przekształtnik współrzędnych – to równanie macierzowe o postaci:

$$[w2] = [M][w1],$$

w którym:

- [w1] to trójelementowy wektor współrzędnych prostokątnych przed przekształceniem;
- [w2] to trójelementowy wektor współrzędnych prostokątnych po przekształceniu;
- [M] to dziewięcioelementowa macierz współczynników zależnych od wartości kątów odchylenia, pochylenia i przechylenia armaty.

Elementy macierzy współczynników obliczone zostają przed rozpoczęciem pracy modułu balistycznego jako początkowe warunki startowe programu.

Obliczeń dokonuje się według zależności:

$$m[1,1] := \cos\gamma \cos\kappa;$$

$$m[1,2] := \cos\gamma \sin\kappa;$$

$$m[1,3] := -\sin\gamma;$$

$$m[2,1] := \sin\eta \sin\gamma \cos\kappa - \cos\eta \sin\kappa;$$

$$m[2,2] := \sin\eta \sin\gamma \sin\kappa + \cos\eta \cos\kappa;$$

$$m[2,3] := \sin\eta \cos\gamma;$$

$$m[3,1] := \cos\eta \sin\gamma \cos\kappa + \sin\eta \sin\kappa;$$

$$m[3,2] := \cos\eta \sin\gamma \sin\kappa - \sin\eta \cos\kappa;$$

$$m[3,3] := \cos\eta \cos\gamma;$$

gdzie:

κ - kąt odchylenia;

γ - kąt pochylenia;

η - kąt przechylenia;

3. Testowanie systemu.

Testowanie systemu odbyło się dwuetapowo. Pierwszy etap polegał na badaniu symulacyjnym w laboratorium.

Na podstawie przeprowadzonych testów laboratoryjnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- dla lotu po okręgu najmniejsze błędy uzyskuje się przy bezpośrednim wyznaczaniu prędkości kątowej;
- dla celu manewrującego najmniejsze błędy uzyskuje się przy hipotezie o ruchu celu ze stałymi przyspieszeniami.

Należy zastanowić się nad sposobem wyboru hipotezy o ruchu celu, jaki należy przyjąć w programie obliczeń, gdyż jeżeli założymy, że nie będziemy prowadzić ognia do celu bardzo manewrującego, wystarczy zastosować hipotezę o ruchu po okręgu i bezpośrednim wyznaczaniu prędkości kątowej, jednakże przy mocno manewrujących celach konieczne jest zastosowanie hipotezy o stałych przyspieszeniach (z rozwinięciem w szereg Taylora).

Drugi etap testów został przeprowadzony na poligonie i polegał na realizacji strzelań do celów imitowanych przez komputer z oceną strzelania przez stację radiolokacyjną sterowaną przez ten sam komputer. Wyniki testów były zadowalające.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono procedurę postępowania przy projektowaniu specjalizowanego cyfrowego systemu predykcyjnego przeznaczonego dla artylerii przeciwlotniczej. Wyznaczono funkcje balistyczne dla 35-mm armaty Oerlikon oraz przedstawiono algorytm pracy modułu balistycznego. Algorytm został sprawdzony i przetestowany dla różnych przypadków lotu celu. Jego poprawność została zbadana i stwierdzono, że użycie tego algorytmu z wyznaczonymi funkcjami balistycznymi i funkcjami poprawek gwarantuje poprawne rozwiązanie zagadnienia trafienia z dopuszczalnymi błędami i w czasie wystarczającym do realizacji zadania.

Bibliografia

1. Borowczyk W., Kaczmarek W.: „Badanie wpływu poprawek na dokładność wyliczania nastaw działowych w oparciu o uproszczone tabele balistyczne”, Biuletyn WAT, Vol. LIV, nr 9, 2005, pp. 39-48
2. Borowczyk W.: „Analiza przydatności różnego rodzaju filtrów do wyznaczania wyprzedzeń współrzędnych celu oraz metody ich opracowania”, Biuletyn WAT, Vol. LIV, nr 9, 2005, pp. 23-37.
3. Borowczyk W.: „Analiza wpływu rzędu zastosowanych filtrów cyfrowych, przeznaczonych do wyznaczania wyprzedzeń, na dokładność rozwiązania zagadnienia trafienia”, Biuletyn WAT, Vol. LIV, nr 9, 2005, pp. 5-21.
4. Borowczyk W., Kaczmarek W.: „Analiza błędów obliczania nastaw działowych przy zastosowaniu algorytmu zmiennego w czasie”, Biuletyn WAT, Vol. LVII, nr 1, 2008, pp 7–18
5. Borowczyk W., Kaczmarek W.: „Analiza i ocena błędów wyliczania nastaw działowych w przelicznikach przeciwlotniczych zestawów artyleryjskich bliskiego zasięgu”, Biuletyn WAT, Vol. LVII, nr 1, 2008, pp. 19–30
6. Machowski, B. ; Motyl, K.: „Analiza możliwości opracowania przelicznika dla systemu artyleryjskiego na podstawie równań ruchu pocisku”, Biuletyn WAT, nr 4 [548], 1998, pp. 109-117
7. Borowczyk W., Kaczmarek W.: „Obliczanie bieżących współrzędnych celu powietrznego w oparciu o współrzędne mierzone przez odległe urządzenia śledzące”, Biuletyn WAT, Vol. LVI, nr 3, 2007, pp. 211–228
8. Madej W.: „Specjalizowany cyfrowy system predykcyjny z prostą hipotezą o ruchu celu”, Zeszyty Naukowe WEiI, nr 2, 2010, pp. 15–36
9. Madej W., Drabarek J.: „Realizacja odczytu współrzędnych w specjalizowanym cyfrowym systemie predykcyjnym z wykorzystaniem reprogramowalnych układów cyfrowych”, Elektronika, nr 11, 2008, pp. 189–190
10. Bartkiewicz S., Madej W. „Błędy strzelania jako miara jakości zintegrowanego systemu uzbrojenia”, KKM Warszawa 2001, pp. 577 – 580
11. Bartkiewicz S., Ociepa Z., Boroń S., Madej W.: „Cyfrowa realizacja łącza selsynowego”, V Krajowa Konferencja „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1995
12. Boroń S., Madej W., Bartkiewicz S., Ociepa Z.: „Artyleryjski przelicznik cyfrowy”, V Krajowa Konferencja „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1995
13. Madej W., Boroń S., Bartkiewicz S., Ociepa Z.: „Możliwości zwiększenia skuteczności artyleryjskiego zestawu przeciwlotniczego”, V Krajowa Konferencja „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1995

14. Ociepa Z., Bartkiewicz S., Boroń S., Madej W.: „Cyfrowe sterowanie napędami armaty”, V Krajowa Konferencja „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1995

Streszczenie

Specjalizowane cyfrowe systemy predykcyjne są niezbędnym elementem zautomatyzowanego systemu kierowania ogniem artylerii przeciwlotniczej. Stanowią one podstawowy podsystem, który realizuje zadania modułu balistycznego. Moduł ten odpowiada za wypracowanie odpowiednich nastaw do wykonania zadania ogniowego. W pracy przedstawiono algorytm obliczeń oraz niezbędne funkcje do prawidłowego działania specjalizowanego systemu predykcyjnego realizującego predykcję punktu wyprzedzonego dla małokalibrowej artylerii przeciwlotniczej. Algorytm ten może być zaimplementowany w komputerze przemysłowym, systemie mikroprocesorowym

z procesorem sygnałowym lub w sterowniku programowalnym PLC, który posiada możliwość programowania w języku C.

Abstract

Specialized digital prediction systems are necessary elements of the automated system of the fire control of anti-aircraft artillery. They constitute the basic subsystem which realizes tasks of the ballistic module. This module is responsible for working out appropriate settings for performance of the fire task. In the paper the algorithm of computations and necessary functions for the proper operating of the specialized prediction system realizing prediction of the meeting point. i.e. coordinates of the point in which, according to the computations, the meeting of the target and the missile should take place, for small caliber anti-aircraft artillery are presented. This algorithm can be implemented using industrial computers, microprocessor systems containing a signal processor or a programmable logic controller (PLC) which can be programmed in the C programming language.