



Symulacyjne badania algorytmu bombardierskiego współczesnego samolotu bojowego

MIROSŁAW WRÓBLEWSKI, MARIUSZ WAŻNY

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W referacie przedstawiono podstawowe problemy związane z identyfikacją i symulacją algorytmów obliczeniowych stosowanych w systemach nawigacyjno-celowniczych współczesnych samolotów bojowych na przykładzie samolotu Su-22M4. Symulacja algorytmów prowadzona jest pod kątem analitycznej oceny efektywności (skuteczności) użycia lotniczych środków bojowych. Problem rozpatrzony został w sposób modelowy, na bazie jednego z najbardziej reprezentatywnych algorytmów dla samolotu Su-22M4, tj. algorytmu celowania podczas bombardowania z lotu poziomego nieruchomego celu naziemnego. W referacie przedstawione zostały także rezultaty weryfikacji skuteczności zamodelowanego do badań symulacyjnych konkretnego algorytmu bombardierskiego.

Słowa kluczowe: mechanika, system nawigacyjno-celowniczy, równania celownicze

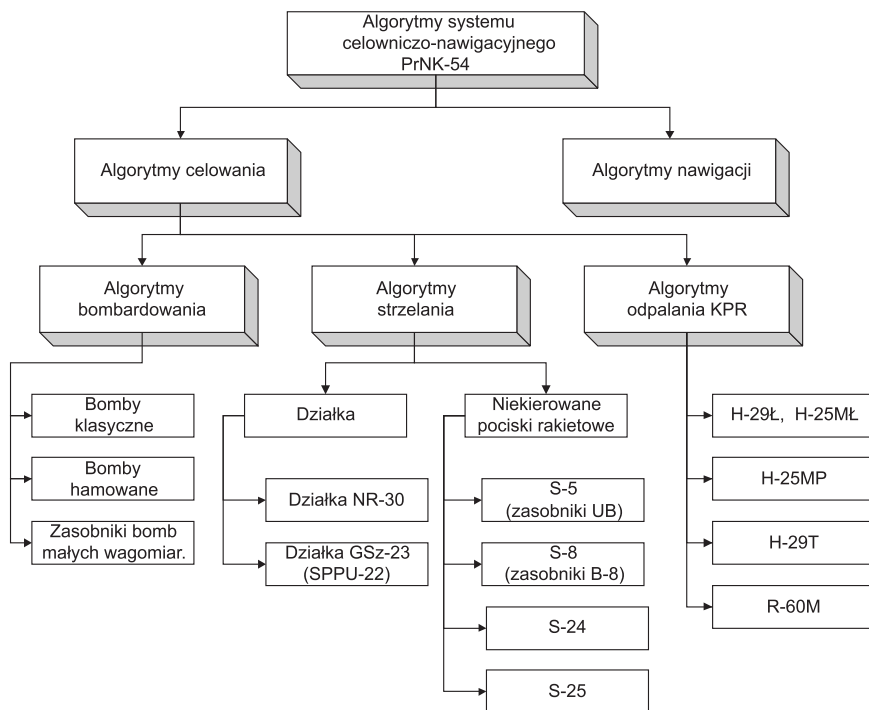
Symbole UKD: 623.746.09

1. Wstęp

Analityczna ocena skuteczności zastosowań bojowych narzuca konieczność szczegółowego poznania rzeczywistych procedur wykorzystania samolotu w celu dokonania ich komputerowej symulacji. Proces poznania wiąże się z identyfikacją i weryfikacją schematów logiki działania wykorzystywanych systemów i urządzeń pokładowych, a także z odwzorowaniem odpowiednich procedur obliczeniowych stosowanych do wyznaczania wielkości stanowiących parametry sterowania. Problem oceny skuteczności konkretnego, rzeczywistego statku powietrznego, np. Su-22M4, wymaga dokonania szczegółowej analizy funkcjonowania jego systemu nawigacyjno-celowniczego (w tym przypadku systemu PrNK-54).

Efektywne wykorzystanie lotniczych środków rażenia poprzedza realizacja zadania celowania, w które zaangażowane są zarówno środki techniczne, tzn. konkretne urządzenia systemu PrNK-54, jak i pilot. Zadania te charakteryzują się pewną specyfiką. Ich cechą jest algorytmizacja działań operatorskich i procedur obliczeniowych adekwatnych do wykorzystywanych środków rażenia i sposobów ich zastosowania.

Pokładowy system nawigacyjno-celowniczy PrNK-54 samolotu Su-22M4, zapewnia możliwość stosowania lotniczych środków rażenia, których wykaz przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys. 1. Wykaz lotniczych środków rażenia przewidzianych dla samolotu Su-22M4 i odpowiadających im algorytmów celowania

2. Ogólna charakterystyka algorytmów celowania i problematyki ich symulacji

Przyjmując semantyczne wyjaśnienie pojęcia „algorytm” — definiowanego jako zespół reguł charakterystycznych dla pewnych czynności lub obliczeń, symulacyjne badanie tego typu problematyki sprowadza się do:

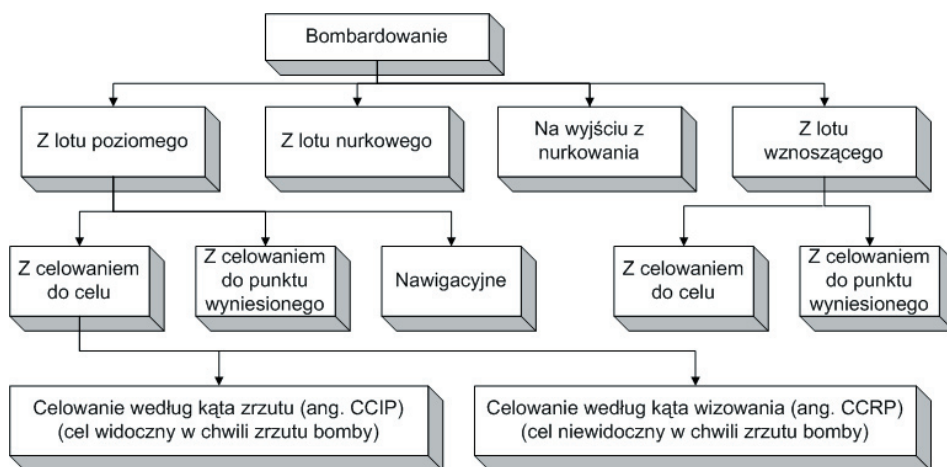
- opracowania schematów sieci działań operatorskich użytkownika (pilota) adekwatnych dla danego zakresu pracy systemu celowniczego;

- odwzorowania rzeczywistych algorytmów i procedur obliczeniowych stosowanych w systemie;
- zamodelowania przyjętych schematów działań i algorytmów obliczeniowych zgodnie z wymaganiami;
- weryfikacji modelu poprzez prowadzone symulacje i obliczenia.

Opracowanie schematów odzwierciedlających logikę działań operatorskich nie następuje trudności. Ich identyfikacja odbywa się bowiem na podstawie jawnie określonej i dostępnej w formie dokumentów normatywnych metodyki pilotażu samolotu. Jak wykazuje praktyka, istotnym problemem — zwłaszcza w sytuacji kiedy realizacja projektu symulatora odbywa się bez udziału producenta samolotu — jest precyzyjna identyfikacja algorytmów obliczeniowych stanowiących oprogramowanie komputerów pokładowych. Często dane zawarte w tego typu algorytmach są wręcz chronione. W związku z powyższym problem zidentyfikowania algorytmów obliczeniowych, czyli ustalenia konkretnych zestawów równań i zależności jest zagadnieniem pierwszoplanowym.

W referacie przedstawiono w pełni zidentyfikowany i zweryfikowany algorytm obliczeniowy realizowany przez system PrNK-54 samolotu Su-22M4 w trakcie bombardowania z lotu poziomego nieruchomych celów naziemnych. Algorytm ten odtworzono następnie w formie oprogramowania komputerowego (platforma PC), za pomocą którego wykonane zostały stosowane symulacje i obliczenia.

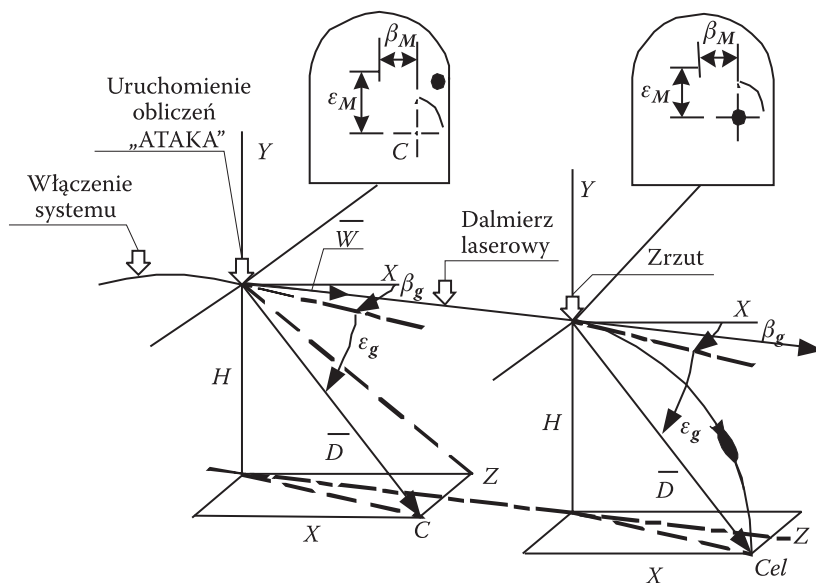
Algorytmy bombardierskie zastosowane w systemie PrNK-54 są reprezentatywne dla nowoczesnych celowników bombardierskich montowanych na pokładach samolotów specjalizowanych do wykonywania zadań związanych z użyciem niekierowanych bomb lotniczych. Możliwe warianty bombardowań z samolotu Su-22M4 ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Możliwe warianty bombardowań z samolotu Su-22M4

3. Identyfikacja algorytmu obliczeniowego dla bombardowania

Zawarte w algorytmie obliczeniowym systemu PrNK-54 równania i zależności są reprezentatywne dla nowoczesnych celowników bombardierskich montowanych na pokładach samolotów specjalizowanych do wykonywania zadań bombardierskich. W praktyce najczęściej stosowanym wariantem bombardowania, realizowanym w ramach wykorzystania bojowego samolotu Su-22M4, jest bombardowanie z lotu poziomego nieruchomego celu naziemnego w warunkach wzrokowej jego widoczności. Proces celowania i ataku oparty jest w tym przypadku na metodzie CCIP¹, zwanej również potocznie bombardowaniem według kąta zrzutu. Schemat bombardowania według CCIP przedstawiony jest na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat bombardowania z lotu poziomego celu widocznego wzrokowo z celowaniem według CCIP

Algorytm obliczeniowy sprowadza się do wyznaczenia wartości dwóch liniowych parametrów celowania, tj. parametru p (sterowanie według odległości) oraz parametru \tilde{q} (sterowanie według kierunku). Ich odpowiednikami wyrażonymi w mierze kątowej są kąty wychylenia ruchomego znacznika celowniczego (kąty ε_M i β_M) na wskaźniku przejernym znajdującym się w kabinie pilota. Na podstawie

¹ CCIP (ang. Continuous Computation of Impact Point) — ciągle wyliczanie miejsca upadku bomby.

położenia znacznika celowniczego pilot realizuje proces celowania (poprzez manewr samolotem), pokrywając znacznik celowniczy z widocznym celem.

Równania określające parametry celowania mają postać:

$$p = x - X, \tag{1}$$

$$\tilde{q} = y - Y, \tag{2}$$

gdzie:

x, y — współrzędne celu określone względem bieżącej pozycji samolotu (tzw. faktyczne współrzędne celu);

X, Y — współrzędne wyliczanego w czasie rzeczywistym punktu upadku bomby (tzw. wymagane współrzędne celu);

przy czym

$$x = x_1 \cos \vartheta + y_1 \sin \vartheta \sin \gamma - z_1 \sin \vartheta \cos \gamma,$$

$$y = y_1 \cos \gamma + z_1 \sin \gamma,$$

ϑ, γ — kąty odpowiednio pochylenia i przechylenia samolotu;

$Y = W_y T$ — dla bomb bez układów hamujących;

$Y = W_y T - \Delta \beta_{sl}$ — dla bomb ze spadochronowymi układami hamującymi;

$$X = A + U_x T + \frac{1}{2} \tau_{ser} W_x,$$

$A, T, \Delta \beta$ — kolejno zasięg, czas opadania i zwłoka bomby;

β_{sl} — kąt ślizgu samolotu;

$\Delta \tau$ — parametr zależny od wyboru wariantu zrzutu bomb;

W_x, W_y — składowe prędkości podróży W samolotu;

U_x — składowa prędkości wiatru;

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -z_1 \operatorname{ctg} \varepsilon \cos \beta \\ y_1 &= z_1 \operatorname{ctg} \varepsilon \sin \beta \\ z_1 &= -H \cos \vartheta \cos \gamma - x \sin \vartheta \sin \gamma + y \sin \gamma \end{aligned} \right\} \text{ bez dalmierza laserowego;}$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= D \cos \varepsilon \cos \beta \\ y_1 &= -D \cos \varepsilon \sin \beta \\ z_1 &= -D \sin \varepsilon \cos \vartheta \cos \gamma - x \sin \vartheta \sin \gamma + y \sin \gamma \end{aligned} \right\} \text{ z dalmierzem laserowym;}$$

H — wysokość lotu samolotu w chwili zrzutu bomby;

D — odległość do celu;

$$\beta = f + \frac{1}{6}f^3,$$

$$\varepsilon = d + \frac{1}{6}d^3,$$

gdzie:

$$f = \sin \gamma \sin \vartheta \cos \varepsilon_g \cos \beta_g + \sin \gamma \cos \vartheta \sin \varepsilon_g + \cos \gamma \sin \beta_g \cos \varepsilon_g$$

$$d = \cos \gamma \sin \vartheta \cos \varepsilon_g \cos \beta_g + \cos \gamma \cos \vartheta \sin \varepsilon_g - \sin \gamma \sin \beta_g \cos \varepsilon_g,$$

przy czym:

$$\beta_g = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X},$$

$$\varepsilon_g = \operatorname{arctg} \frac{H}{X} \cos \beta_g.$$

Kąty wychylenia ruchomego znacznika celowniczego ustalone są zależnościami:

$$\varepsilon_M = \varepsilon + \varepsilon_{ust}, \quad (3)$$

$$\beta_M = \beta + \beta_{ust}, \quad (4)$$

gdzie: ε_{ust} i β_{ust} — kąty ustawienia celownika względem osi podłużnej samolotu.

Do wyliczania parametrów balistycznych, tj. zasięgu bomby A w spokojnym powietrzu i czasu T opadania bomby, wykorzystywana jest metoda iteracyjna, w której sumowane są przyrosty odległości Δx_i i czasu Δt_i na kolejnych (i -tych) odcinkach trajektorii lotu bomby, dla których funkcja oporu κ_i nie zmienia się². Równania pozwalające wyznaczyć zasięg A i czas opadania bomby T mają postać:

$$\Delta x_i = u_i B^* \Delta t_i, \quad (5)$$

$$\Delta z_i = w_i B^* \Delta t_i - g C^* \Delta t_i^2, \quad (6)$$

gdzie:

Δx_i — przyrost drogi przebytej przez bombę na i -tym odcinku trajektorii jej lotu;

Δz_i — przyrost wysokości lotu bomby;

² W systemie PrNK-54 $\Delta t_i = 0,01$ [s].

- Δt_i — czas dyskretyzacji obliczeń iteracyjnych;
 u_i — składowa pozioma prędkości powietrznej lotu bomby;
 w_i — składowa pionowa prędkości powietrznej lotu bomby.

$$u_i = u_{i-1} A^*; \quad w_i = w_{i-1} A^* - g B^* \Delta t_i;$$

$$A^* = e^{-B_0}; \quad B^* = \frac{e^{-B_0} - 1}{-B_0}; \quad C^* = \frac{e^{-B_0} + B_0 - 1}{B_0^2}; \quad B_0 = E_i \Delta t_i,$$

przy czym:

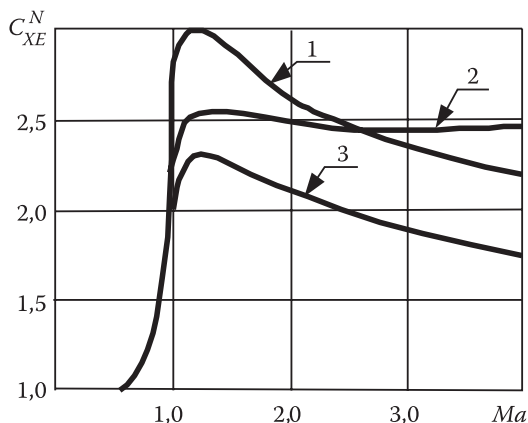
$$E_i = c_0 H(H) C_{XE}^N(Ma) C_{XE}(Ma = 0,4) \text{ — jest funkcją oporu powietrza,}$$

gdzie: c_0 — tzw. umowny współczynnik balistyczny równy:

$$\left. \begin{aligned} c_0 &= \frac{\left[a_1 (\Theta - a_2)^2 + a_3 \right] (\Theta - a_4)}{0,529} \\ c_0 &= \frac{78,48}{V_\Theta^2} \end{aligned} \right\}$$

- Θ — czas charakterystyczny bomby;
 V_Θ — prędkość charakterystyczna bomby;
 $a_1 \dots a_4$ — stałe współczynniki;
 $H(H)$ — tzw. funkcja wysokości (równa stosunkowi gęstości powietrza na wysokości H do gęstości na poziomie morza);
 $C_{XE}(Ma = 0,4)$ — współczynnik oporu przy prędkości $Ma = 0,4$;
 $C_{XE}^N(Ma)$ — znormalizowany współczynnik oporu;
 Ma — liczba Macha.

Znormalizowane współczynniki oporu $C_{XE}^N(Ma)$ wykorzystywane do wyliczenia funkcji oporu κ dane są w postaci graficznej prezentowanej na rysunku 4. Zasięg bomby A oraz czas jej opadania T wyliczane są jako sumy, odpowiednio:



Rys. 4. Wykresy wykorzystywane do wyznaczania (poprzez aproksymację) wartości współczynnika $C_{XE}^N(Ma)$: **krzywa 1** — dotyczy bomb o „zaostrożonej” części czołowej (np.: FAB-250M-62, FAB-500T, OFAB-250T), **krzywa 2** — dotyczy bomb o spłaszczonej części czołowej (np.: OFAB-100NW, OFAB-100-120, OA-50-100M), **krzywa 3** — dotyczy bomb o normalnej części czołowej (np.: FAB-250M-46, FAB-250M-54, FAB-500TS)

$$A = \sum_{i=1}^n \Delta x_i, \quad (7)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (8)$$

gdzie: n — ilość cykli obliczeniowych.

Obliczenia iteracyjne prowadzone są do chwili gdy:

$$\sum_{i=1}^n \Delta z_i = H - H_{CA}, \quad (9)$$

gdzie:

H — wysokość lotu samolotu w chwili zrzutu bomby;

H_{CA} — wysokość celu względem położenia lotniska startu (wartość wprowadzana do pamięci komputera samolotu przed wylotem);

Δ_h — zadana wysokość wybuchu bomby (zadziałania zapalnika).

Zwłoka bomby Δ_B wyznaczana jest z zależności:

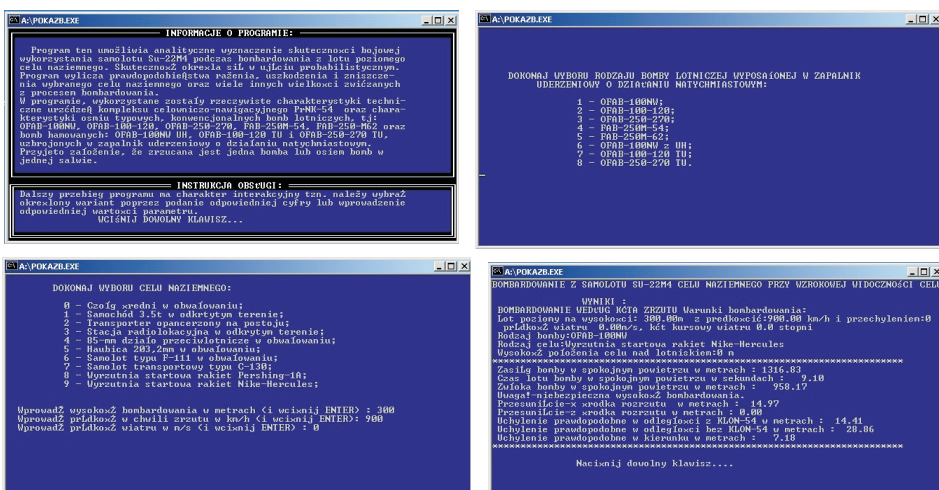
$$\Delta_B = V_1 \cdot T - A, \quad (10)$$

gdzie V_1 — prędkość powietrzna samolotu w chwili zrzutu bomby.

4. Weryfikacja algorytmu i badania symulacyjne

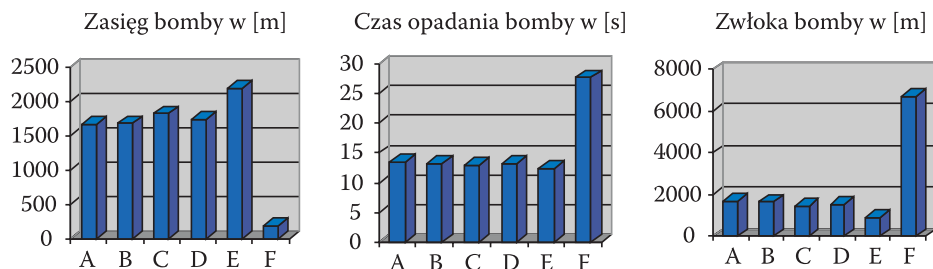
Weryfikację poprawności i badania symulacyjne przeprowadzono w opraciu o program komputerowy, w którym odtworzono procedury obliczeniowe stosowane w rzeczywistym algorytmie celowniczym samolotu Su-22M4 oraz zamodelowano warunki do symulacji (wybór warunków lotu, rodzaj bomb, typ celu itp.)

Przykładowe zrzuty ekranowe z aplikacji komputerowej przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Aplikacja komputerowa do weryfikacji algorytmu i badań symulacyjnych

Na rysunku 6 przedstawione zostały rezultaty obliczeń parametrów balistycznych, tj. zasięgu, czasu opadania i zwłoki dla różnych bomb lotniczych, wyliczanych zgodnie z algorytmem stosowanym w systemie PrNK-54. Uzyskane wyniki pozytywnie weryfikują zidentyfikowane procedury obliczania wyżej wymienionych parametrów balistycznych związanych z trajektoria lotu bomby.



Rys. 6. Wyniki symulacji algorytmu bombardierskiego systemu PrNK-54 w zakresie wyznaczania zasięgu, czasu lotu i zwłoki bomb lotniczych, gdzie kolejnymi literami alfabetu oznaczone są następujące typy rozpatrywanych bomb lotniczych: **A** — bomba OFAB-100NW, **B** — bomba OFAB-100-120, **C** — bomba OFAB-250-270, **D** — bomba FAB-250M-54, **E** — bomba FAB-250M62 **F** — bomba OFAB-100NW z UH (ze spadochronowym układem hamującym)

Pełne wykorzystanie symulatora w procesie szkolenia, zwłaszcza w przypadku symulacji lotów na zastosowanie bojowe, powinno zapewnić możliwość oceny uzyskanych rezultatów w zakresie skuteczności rażenia imitowanych obiektów stanowiących cele ataku. Miarą skuteczności wykonywanych ataków może być prawdopodobieństwo P rażenia celu wyliczane na podstawie zależności:

$$P = \iint_C \phi(x, y) dx dy, \quad (11)$$

gdzie:

$\phi(x, y)$ — tzw. prawo rozrzutu;

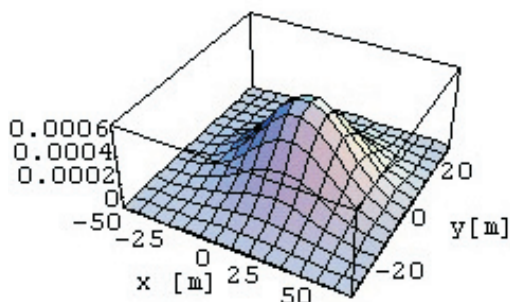
C — płaski obszar reprezentujący imitowany w symulacji cel naziemny.

Należy zaznaczyć, że w zależności od wielkości tego obszaru ustalony może być stopień rażenia celu określany jako uszkodzenie, obezwładnienie i zniszczenie. Prawo rozrzutu, a ściślej funkcja $\phi(x, y)$, jest gęstością dwuwymiarowego rozkładu normalnego zmiennej losowej, której realizacjami są położenia punktu upadku bomby. Jej jawną postać analityczną można wyznaczyć w oparciu o prawo przenoszenia błędów — wyrażone poprzez linearyzację sumarycznego błędu w wyliczeniu parametrów celowania p i \tilde{q} względem błędów zmiennych wykorzystywanych do ich wyliczenia. Losowy charakter błędów w ustaleniu rzeczywistych wartości zmiennych stosowanych w algorytmie obliczeniowym jest naturalnym zjawiskiem charakteryzującym funkcjonowanie nadajników pokładowych stanowiących źródła informacji w systemie.

Pomijając w tym miejscu opis aparatu matematycznego stosowanego do analitycznego wyznaczenia funkcji gęstości w oparciu o prawo przenoszenia błędów³, na

³ Stanowi to odrębne zagadnienie wykraczające poza ramy tego referatu.

rysunku 7 zaprezentowana jest ona w formie graficznej, przy czym problem dotyczy ustalenia rozrzutu bomb OFAB-100NW zrzucanych z wysokości $H = 600$ m przy prędkości lotu $V_1 = 900$ km/h.



Rys. 7. Graficzna postać funkcji rozkładu prawdopodobieństwa położenia punktów trafień dla bomby OFAB-100NW zrzucanej z samolotu Su-22M4 (zmienna x oznacza uchyb w odległości, a zmienna y — uchyb w kierunku)

W ramach oceny rezultatów symulowanego lotu bojowego Su-22M4, a także weryfikacji poprawności zidentyfikowanego algorytmu bombardowania, wyznaczone zostały odpowiednie wartości skuteczności użycia bomb lotniczych. Warunki symulowanego lotu na zadanie bojowe były następujące:

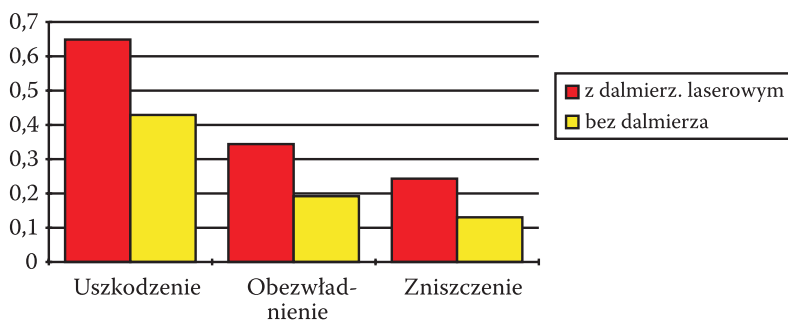
- zadanie bojowe: bombardowanie z lotu poziomego nieruchomego celu naziemnego w warunkach wzrokowej widoczności celu;
- cel: wyrzutnia startowa rakiet przeciwlotniczych klasy Nike-Hercules;
- brak przeciwdziałania ze strony nieprzyjaciela;
- lot poziomy bez przechylenia na wysokości 600 m z prędkością 900 km/h⁴;
- atmosfera bezwietrzna;
- osiem⁵ bomb zrzucanych jednoczesną salwą;
- bomby uzbrojone w zapalnik o działaniu natychmiastowym;
- średni błąd celowania popełniony przez pilota 0,5 stopnia.

Na rysunku 8 przedstawione zostały w formie graficznej wyliczone wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia, obezwładnienia oraz zniszczenia celu naziemnego, odzwierciedlające skuteczność użycia bomb OFAB-100NW z uwzględnieniem

⁴ Zgodnie z metodyką wykonywania lotów bojowych na bombardowanie dla Su-22M4 są to wartości zalecane.

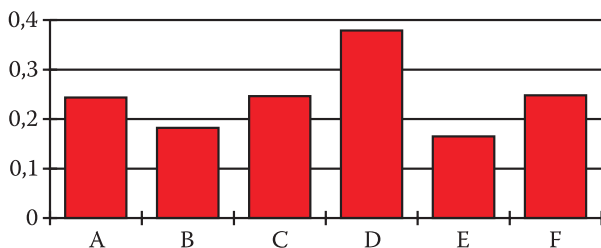
⁵ Ze względu na ilość możliwych do wykorzystania węzłów mocowania bomb lotniczych dla samolotu Su-22M4.

własności pokładowego systemu nawigacyjno-celowniczego w zakresie bombardowania. Prawdopodobieństwa te wyznaczone zostały dla dwóch alternatywnych wariantów wykorzystania pokładowego systemu nawigacyjno-celowniczego, związanych z różnym sposobem pomiaru tzw. nachylonej odległości do celu⁶.



Rys. 8. Prawdopodobieństwa uszkodzenia, obezwładnienia i zniszczenia stanowiska startowego rakiet plot. salwą ośmiu bomb odłamkowo-burzących OFAB-10NW

Na rysunku 9 przedstawione zostały rezultaty symulowanego procesu bombardowania tego samego celu przy tych samych warunkach początkowych, lecz dla różnych bomb lotniczych. Bombardowanie symulowane było w zakresie podstawowym działania pokładowego systemu nawigacyjno-celowniczego, tj. z wykorzystaniem dalmierza laserowego.



Rys. 9. Prawdopodobieństwa zniszczenia wybranego celu naziemnego salwą ośmiu różnych bomb lotniczych. Kolejnymi literami alfabetu oznaczone są następujące typy rozpatrywanych bomb lotniczych: **A** — bomby OFAB-100NW, **B** — bomby OFAB-100-120, **C** — bomby OFAB-250-270, **D** — bomby FAB-250M-54, **E** — bomby OFAB-100-120 TU, **F** — bomby OFAB-250-270 TU

⁶ Wariant z użyciem dalmierza laserowego jest wariantem podstawowym.

5. Podsumowanie

W oparciu o przedstawiony materiał można stwierdzić, że istotną kwestią w realizowaniu opisywanych badań symulacyjnych jest dysponowanie wiarygodnymi modelami równań celowniczych. Podejmując opisywaną tematykę, natrafiono na poważne trudności związane z identyfikacją określonych zależności wykorzystywanych w schemacie obliczeniowym systemu nawigacyjno-celowniczego podczas realizacji zadania celowania. Ich przezwyciężenie wymagało przeprowadzenia pracy analitycznej opartej zarówno na strukturze systemu nawigacyjno-celowniczego, jak i na schemacie funkcjonowania całego systemu oraz jego poszczególnych elementów. W oparciu o powyższą wiedzę dokonano weryfikacji równań celowniczych zaimplementowanych w systemie nawigacyjno-celowniczym samolotu Su-22M4.

Możliwość numerycznego modelowania rozwiązania równań celowniczych pozwala na opracowanie analitycznego sposobu oceny zastosowania bojowego statku powietrznego. W oparciu o ten sposób można dokonać oceny użycia różnych środków bojowych, co może stanowić wstępną weryfikację przyjętych wariantów uzbrojenia do realizacji analizowanego zadania bojowego.

Przedstawiony materiał jest punktem wyjścia do analizy przyczynowo-skutkowej występowania błędów destrukcyjnych w trakcie użycia systemu nawigacyjno-celowniczego.

Artykuł wpłynął do redakcji 6.11.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2007 r.

LITERATURA

- [1] *PrNK-54. Dane informacyjne*, DWLot, Poznań, 1989.
- [2] *PrNK-54 Wiadomości ogólne*, DWLot, Poznań, 1990.
- [3] *Su-22 Metodyka szkolenia. Zastosowanie bojowe*, DWLot, Poznań, 1989.

M. WRÓBLEWSKI, M. WAŻNY

Simulation of a bombing algorithm for modern combat aircraft

Abstract. In this paper, simulation investigations of the computational bombing algorithm for deck aiming-navigation system called PrNK-54 are presented. The identification and verification were made to simulate Su-22 aircraft mission activities. Especially, basic problems of CCIP bombing are considered. The paper provides also many examples of calculated and received solutions.

Keywords: mechanics, navigation-sight system, sight equations

Universal Decimal Classification: 623.746.09

