



## **Analiza i ocena błędów wyliczania nastaw działowych w przelicznikach przeciwlotniczych zestawów artyleryjskich bliskiego zasięgu**

WŁODZIMIERZ BOROWCZYK, WOJCIECH KACZMAREK

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

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono problematykę związaną z badaniem możliwości zmniejszenia czasu reakcji przeciwlotniczych zestawów artyleryjskich poprzez zastosowanie algorytmu zmiennego w czasie. Szczególną uwagę zwrócono na analizę błędów wyliczania nastaw działowych spowodowanych skróceniem czasu obserwacji celu. Ponadto przeprowadzono ocenę błędów obliczania nastaw działowych spowodowanych wydłużeniem okresu dyskretyzacji pomiaru bieżących współrzędnych celu.

**Słowa kluczowe:** przeciwlotnicze zestawy artyleryjskie, nastawy działowe, okres dyskretyzacji, czas obserwacji

**Symbole UKD:** 623.418.2

### **1. Wstęp**

Przeciwlotnicze zestawy artyleryjskie (PZA) charakteryzują się stosunkowo małym zasięgiem rażenia ogniem (np. dla 35 mm armat Oerlikon zasięg wynosi około 4000 m) i przeznaczone są głównie do niszczenia nisko lecących celów powietrznych. Zasięg wykrywania takich celów przez radary śledzące jest również niewielki i zależy od wysokości lotu celu (np. dla celu lecącego na wysokości 100 m i położenia anteny radaru na wysokości  $H = 5$  m w stosunku do poziomu, kącie zakrycia  $\alpha_{zakr} = 0^\circ$  wynosi około 41 km, a przy  $\alpha_{zakr} = 1^\circ$  wynosi 6 km) [7]. W efekcie, od momentu wykrycia celu do znalezienia się go w strefie ognia zestawu pozostaje niewiele czasu.

$$t_{\text{przyg}} = \frac{D_{\text{wykr}} - D_{\text{Str.Og}}}{v_c}, \quad (1.1)$$

gdzie:  $D_{\text{wykr}}$  — odległość wykrycia celu powietrznego;  
 $D_{\text{Str.Og}}$  — odległość do dalszej strefy otwarcia ognia;  
 $v_c$  — prędkość celu powietrznego.

Dalsza strefa otwarcia ognia jest równa

$$D_{\text{Str.Og}} = D_{d.\text{Str.raz}} + v_c \cdot \tau_{d.\text{Str.raz}}, \quad (1.2)$$

gdzie:  $D_{d.\text{Str.raz}}$  — dalsza strefa rażenia celu ogniem armatnim;  
 $\tau_{d.\text{Str.raz}}$  — czas lotu pocisku do dalszej strefy rażenia.

Czas lotu pocisku na odległość skutecznego rażenia armaty 35 mm Oerlikon (tj. ok. 4000 m) wynosi około 6 s. Dla celu lecącego z prędkością 250 m/s, zgodnie z zależnością (1.2) dalsza strefa otwarcia ognia wynosi 5500 m. Z powyższych wyliczeń widać, że na ostrzelenie celu, znajdującego się na dalszej strefie otwarcia ognia nie pozostaje dużo czasu.

W celu wyznaczenia nastaw działowych należy przez określony czas, zwany czasem obserwacji  $T$ , mierzyć bieżące współrzędne celu. Dokładność wyznaczenia nastaw działowych zależy od czasu obserwacji  $T$  [3]. Im mniejszy czas obserwacji, tym większe błędy wyznaczania nastaw działowych. Dla „przeciwlotnika” istnieje problem: czy wcześniej otwierać ogień, mniej skuteczny, czy później bardziej skuteczny. W przypadkach późnego wykrycia celu może nie być czasu na ogień skuteczny. Należy pamiętać, że w przypadku atakujących samolotów wykonanie zadania niekoniecznie musi polegać na jego zestrzeleniu. W wyniku prowadzonego ognia pilot może odstąpić od wykonania zadania lub wykona go z małą skutecznością. Inaczej wygląda sprawa z celami bezpilotowymi. Takie cele będą wykonywać zadanie zgodnie z wcześniej opracowanym programem lub zgodnie z wolą prowadzącego jego zdalne naprowadzanie. W takim przypadku zadanie przeciwlotniczego zestawu artyleryjskiego będzie polegało na jego zestrzeleniu.

## 2. Analiza błędów wyliczania nastaw działowych spowodowanych zmniejszaniem czasu obserwacji celu

Błędy wyliczania wyprzedzeń, a tym samym nastaw działowych zależą od:

- manewru celu;
- zastosowanego filtru, wyliczającego współrzędne wyprzedzone;
- okresu dyskretyzacji bieżących współrzędnych celu;

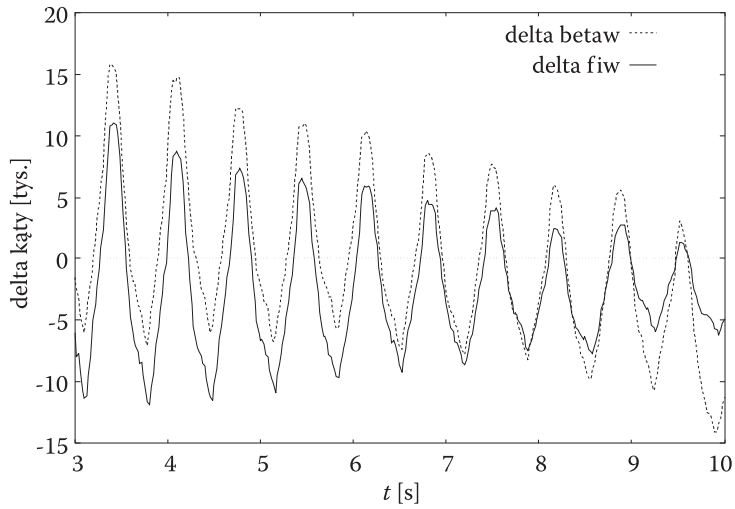
- błędów wyznaczania bieżących współrzędnych celu;
- czasu obserwacji  $T$ ;
- czasu predykcji  $\tau$ , zależnego od odległości bieżącej do celu i parametrów jego ruchu.

Przedział czasu, w którym realizowane jest „wygładzanie” nazywa się czasem obserwacji  $T$  urządzenia wygładzającego. Czas obserwacji jest ważną charakterystyką, określającą w znacznym stopniu jakość wygładzania błędów wejściowych, czułość przelicznika na manewr celu i czas wejścia przelicznika w normalny reżim pracy (czas reakcji zestawu).

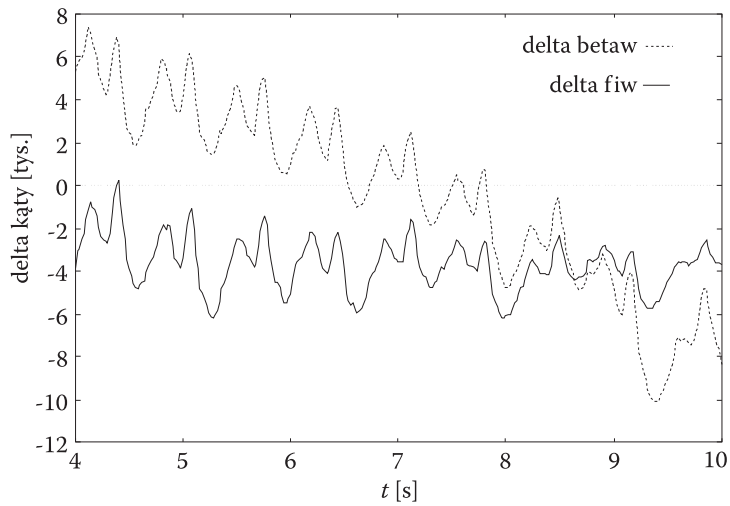
Zmniejszanie czasu obserwacji celu przy określonych pozostałych czynnikach prowadzi do zwiększenia błędów wyliczania wyprzedzeń i tym samym błędów wyliczania nastaw działowych. Przy wyznaczaniu wyprzedzeń stosuje się filtry cyfrowe [1, 2, 4, 5], które uwzględniają jedną, dwie lub trzy pochodne bieżącej współrzędnej celu. Przy krótkim czasie obserwacji błędy obliczania wyprzedzeń, a tym samym nastaw działowych, są tym większe im wyższy jest stopień uwzględnianych pochodnych każdej ze współrzędnych. Stosowanie filtrów uwzględniających wysokie pochodne bieżących współrzędnych celu dla małych czasów obserwacji  $T$  i dużych odległości do celu (duże czasy predykcji równe czasowi lotu pocisku do punktu wyprzedzonego) prowadzi z kolei do strzelania mało efektywnego (duże błędy wyliczania nastaw działowych).

Do badania wpływu czasu obserwacji celu na dokładność wyliczania nastaw działowych wykorzystano model przelicznika cyfrowego uwzględniający w pierwszym przypadku pierwszą i drugą pochodną bieżących współrzędnych celu, w drugim przypadku pierwszą, drugą i trzecią pochodną bieżących współrzędnych. Symulacje zrealizowano dla celu manewrującego w dwóch płaszczyznach ( $v_c = 250 \div 340$  m/s,  $n = 3$ ) z uwzględnieniem zakłóceń pomiaru bieżących współrzędnych celu i stałym okresie dyskretyzacji współrzędnych celu  $dt = 0,02$  s. Wyniki symulacji dla pierwszego przypadku przedstawiono na rysunkach 2.1-2.3, natomiast dla drugiego przypadku — na rysunkach 2.4-2.5.

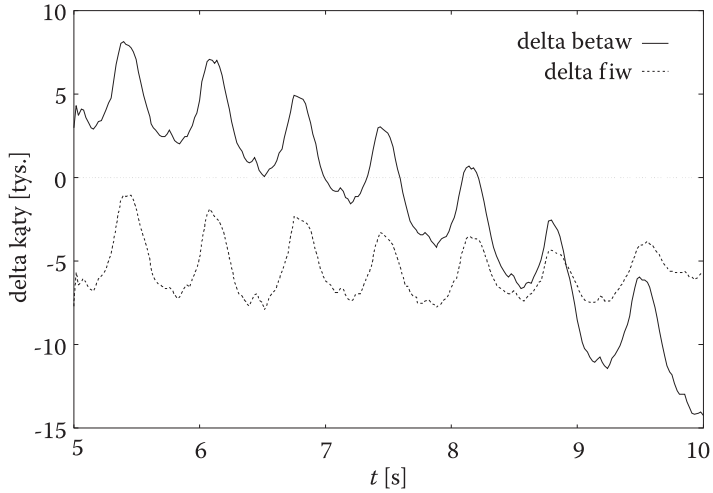
Z analizy wyników symulacji przedstawionych na rysunkach 2.1-2.3 wynika wniosek: dla przypadku celów manewrujących powstają błędy dynamiczne spowodowane nie uwzględnianiem wszystkich pochodnych występujących we współrzędnych bieżących celu. Błędy tego typu będą narastały wraz ze zwiększaniem się przyspieszeń z jakimi manewruje cel.



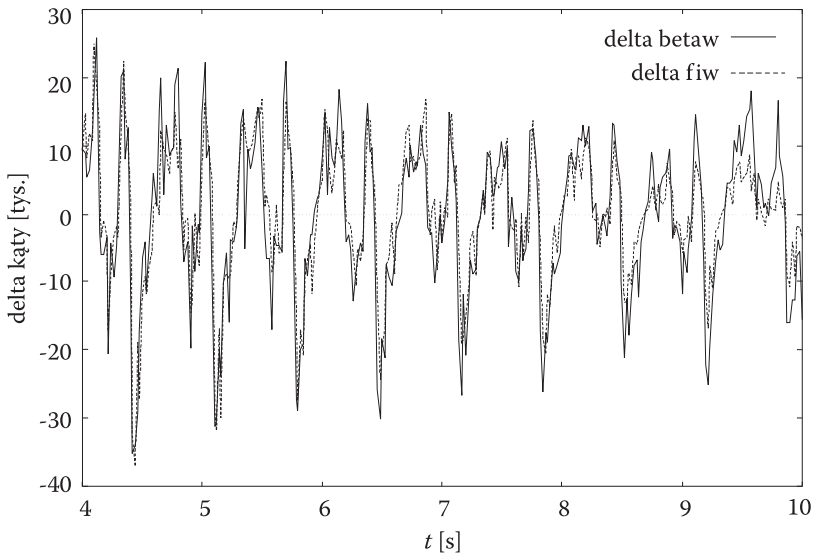
Rys. 2.1. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra II rzędu dla czasu obserwacji  $T = 3$  s i okresu dyskretyzacji  $dt = 0,02$  s



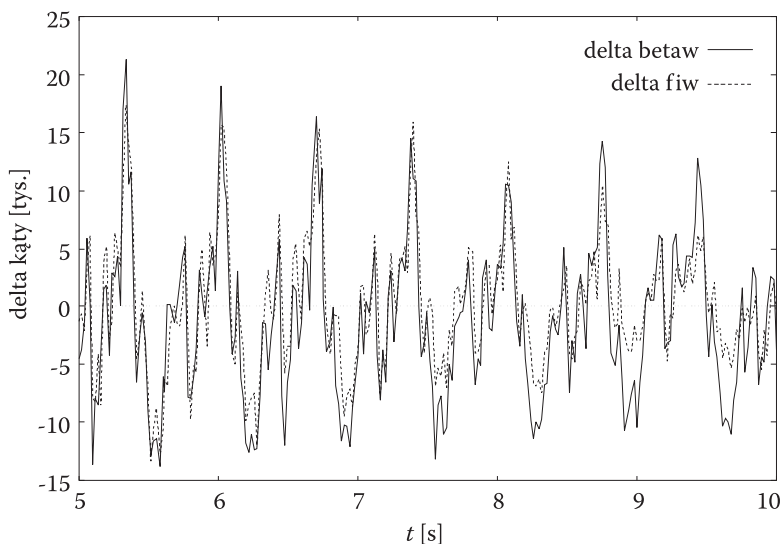
Rys. 2.2. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra II rzędu dla czasu obserwacji  $T = 4$  s i okresu dyskretyzacji  $dt = 0,02$  s



Rys. 2.3. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra II rzędu dla czasu obserwacji  $T = 5$  s i okresu dyskretyzacji  $dt = 0,02$  s



Rys. 2.4. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra III rzędu dla czasu obserwacji  $T = 4$  s i okresu dyskretyzacji  $dt = 0,02$  s



Rys. 2.5. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra III rzędu dla czasu obserwacji  $T = 5$  s i okresu dyskretyzacji  $dt = 0,02$  s

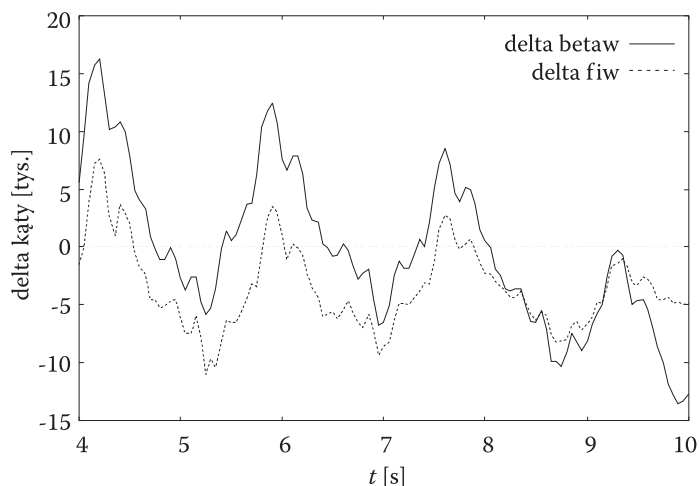
Z analizy wykresów przedstawionych na rysunkach 2.4-2.5 wynikają następujące wnioski:

- dla założonego toru lotu celu (manewr w dwóch płaszczyznach) widać, że trzecia pochodna współrzędnych prostokątnych jest dosyć znaczna, bowiem wyniki uzyskane przy pomocy filtra II rzędu zawierają stały błąd, natomiast przy pomocy filtra III rzędu oscylują wokół wartości zero (większe prawdopodobieństwo trafienia celu);
- wraz ze zmniejszaniem czasu obserwacji rosną błędy wyliczania nastaw działowych — nie udaje się uzyskać małych błędów wyliczania nastaw działowych przy zmniejszeniu czasu reakcji — rozwiązanie sprzecznych wymagań jest niemożliwe i dlatego należy wybrać rozwiązanie kompromisowe lub zastosować algorytm zmieniający swoją strukturę w czasie trwania śledzenia i strzelania do celu.
- dla filtrów III rzędu czasy obserwacji mniejsze od 4 s nie są do przyjęcia ze względu na duże błędy losowe (oscylacje), które mogą utrudniać realizację procesu iteracyjnego przy wyznaczaniu odległości wyprzedzonej;
- w celu zmniejszenia czasu reakcji zestawu przeciwlotniczego należałoby dla małych czasów obserwacji stosować prostsze filtry, wyznaczające wyprzedzone współrzędne celu, dla małych czasów obserwacji.

### 3. Ocena błędów wyliczania nastaw działowych spowodowanych zwiększaniem okresu dyskretyzacji pomiaru bieżących współrzędnych celu

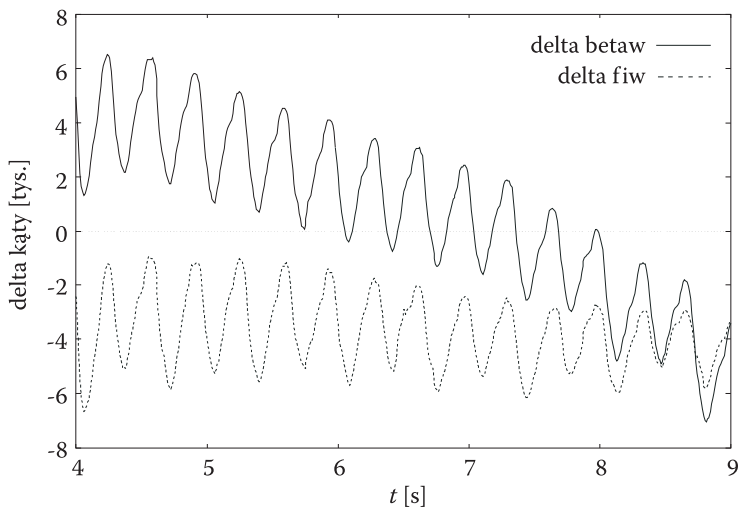
Bardzo ważnym parametrem urządzeń śledzących cel (optoelektronicznych dalmierzy laserowych) w przeciwlotniczych zestawach artyleryjskich jest **okres dyskretyzacji  $dt$** , czyli czas określający częstotliwość odnowy informacji o bieżących współrzędnych celu. Dla niektórych filtrów, przeznaczonych do predykcji współrzędnych lub estymacji pochodnych danej współrzędnej, maksymalna do osiągnięcia we współczesnych urządzeniach pomiarowych częstotliwość odnawiania bieżących współrzędnych celu, a zwłaszcza częstotliwość pomiaru odległości przez dalmierz laserowy może być niewystarczająca (przy zakłóceniach pomiarowych błędy predykcji są zbyt duże). W takim przypadku odległość do celu pomiędzy kolejnymi pomiarami musi być ekstrapolowana. Współczesne dalmierze dokonują pomiaru odległości z częstotliwością 20 Hz. Częstotliwość powyższa nie jest wystarczająca do wyliczania nastaw działowych z oczekiwaną dokładnością (im większa częstotliwość odnawiania informacji przy stałym czasie obserwacji, tym większa dokładność wyliczania nastaw działowych). Przy pomiarze współrzędnych kątowych z częstotliwością 50 Hz, korzystnie jest aproksymować uzyskiwaną odległość.

Do badania wpływu okresu dyskretyzacji na dokładność wyliczania nastaw działowych wykorzystano model przelicznika cyfrowego dla 35 mm armaty Oerlikon, uwzględniający w pierwszym przypadku pierwszą i drugą pochodną bieżących współrzędnych celu (rys. 3.1-3.2) oraz w drugim przypadku uwzględniający

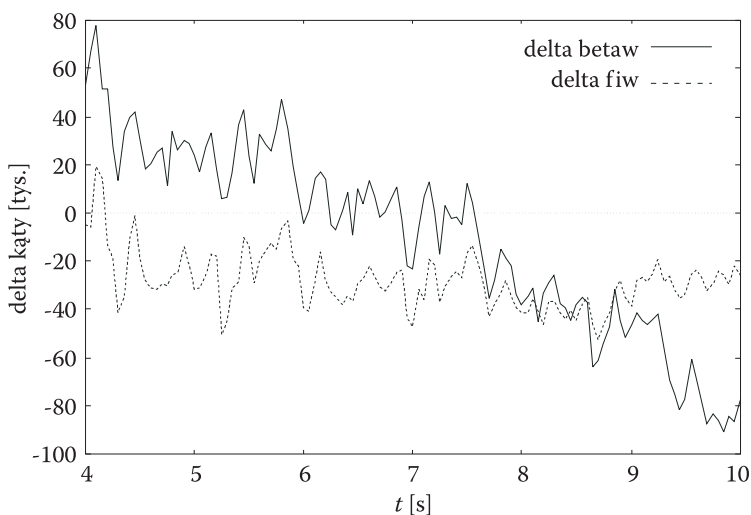


Rys. 3.1. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra II rzędu dla okresu dyskretyzacji  $dt = 0,05$  s i czasu obserwacji  $T = 4$  s

pierwszą, drugą i trzecią pochodną współrzędnych (rys. 3.3-3.4). Symulacje zrealizowano dla celu manewrującego w dwóch płaszczyznach ( $v_c = 250$ - $340$  m/s,  $n = 3$ ) z uwzględnieniem losowych zakłóceń pomiaru bieżących współrzędnych celu oraz stałego czasu obserwacji  $T$ .

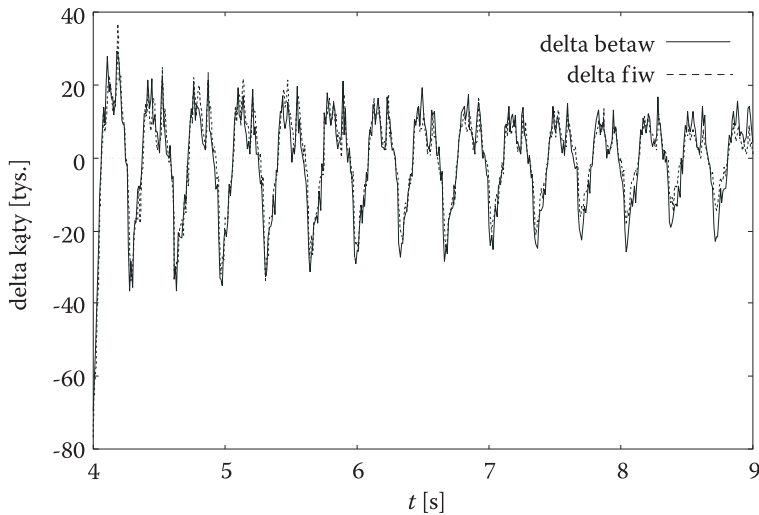


Rys. 3.2. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra II rzędu dla okresu dyskretyzacji  $dt = 0,01$  s i czasu obserwacji  $T = 4$  s



Rys. 3.3. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra III rzędu dla okresu dyskretyzacji  $dt = 0,05$  s i czasu obserwacji  $T = 4$  s





Rys. 3.4. Wykres błędów wyliczania nastaw działowych z wykorzystaniem filtra III rzędu dla okresu dyskretyzacji  $dt = 0,01$  s i czasu obserwacji  $T = 4$  s

Z wykresów przedstawiających błędy wyznaczania nastaw działowych dla różnych okresów dyskretyzacji i stałego czasu obserwacji  $T$  (rys. 3.1-3.4) wynika, że wraz ze wzrostem okresu dyskretyzacji rosną błędy wyznaczania nastaw działowych. Przy okresie dyskretyzacji równym  $dt = 0,05$  s powstają duże błędy predykcji — częstotliwość odnowy informacji o współrzędnych celu 20 Hz nie jest wystarczająca do wyliczania nastaw działowych z oczekiwaną dokładnością — minimalna dopuszczalna częstotliwość powinna wynosić 50 Hz [3]. Przy pomiarze odległości z częstotliwością 20 Hz należy ją ekstrapolować w celu uzyskania częstotliwości odnowy równej 50 Hz).

#### 4. Wnioski końcowe

Coraz to nowe możliwości manewrowe celów latających powodują, że badanie coraz bardziej złożonych algorytmów przeliczników do przeciwlotniczych zestawów artyleryjskich staje się ważnym elementem na etapie projektowania i konstruowania ich nowych rozwiązań. Rozwój technologiczny świata sprawia, iż do wykrywania i śledzenia celów możliwe staje się zastosowanie coraz bardziej dokładnych urządzeń (np. szybkich dalmierzy laserowych), a do wyliczania nastaw — coraz szybszych komputerów.

Przedstawione w artykule wyniki symulacji komputerowych (rys. 2.1-2.3) dowodzą, że dla celów manewrujących nieuwzględnianie wszystkich pochodnych występujących we współrzędnych bieżących celu powoduje pojawienie się błędów

dynamicznych oraz że błędy te narastają wraz ze zwiększaniem się przyspieszeń, z jakimi manewruje cel.

Ponadto, z rysunków 2.4-2.5 widać, że dla założonego toru lotu celu (manewr w dwóch płaszczyznach) trzecia pochodna współrzędnych prostokątnych jest dosyć znaczna i zastosowanie filtru III rzędu znacznie poprawia prawdopodobieństwo trafienia celu. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, iż takie rozwiązanie daje poprawne rezultaty wówczas, kiedy czas obserwacji jest dłuższy od 4 s (poniżej tej granicy występują duże błędy losowe). Oczywiście jest, że wraz ze zmniejszaniem czasu obserwacji rosną błędy wyliczania nastaw działowych (przelicznik ma niewystarczającą ilość informacji do poprawnego rozwiązania zagadnienia spotkania z celem), dlatego najbardziej efektywne wydaje się zastosowanie algorytmu, który zmieniałby swoją strukturę w czasie trwania śledzenia i strzelania do celu.

Z analizy wykresów przedstawiających błędy wyznaczania nastaw działowych dla różnych okresów dyskretyzacji i stałego czasu obserwacji  $T$  (rys. 3.1-3.4) wynika, że wraz ze wzrostem okresu dyskretyzacji rosną błędy wyznaczania nastaw działowych. Przy okresie dyskretyzacji równym  $dt = 0,05$  s powstają duże błędy predykcji — częstotliwość odnowy informacji o współrzędnych celu 20 Hz nie jest wystarczająca do wyliczania nastaw działowych z oczekiwaną dokładnością — minimalna dopuszczalna częstotliwość powinna wynosić 50 Hz [3]. Przy pomiarze odległości z częstotliwością 20 Hz należy ją ekstrapolować w celu uzyskania częstotliwości odnowy równej 50 Hz).

Artykuł wpłynął do redakcji 21.05.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w styczniu 2008 r.

#### LITERATURA

- [1] W. BOROWCZYK, *Analiza dokładności rozwiązania zagadnienia trafienia dla przypadku pomiaru odległości do celu za pomocą dalmierza laserowego*, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna CRAAS, 2005, 142-155.
- [2] W. BOROWCZYK, *Analiza przydatności różnego rodzaju filtrów do wyznaczania wyprzedzeń współrzędnych celu oraz metody ich wyznaczania*, Biul. WAT, 54, 9, Warszawa, 2005.
- [3] W. BOROWCZYK, *Analiza wpływu rzędu zastosowanych filtrów cyfrowych na dokładność rozwiązania zagadnienia trafienia*, Biul. WAT, 54, 9, Warszawa, 2005.
- [4] W. BOROWCZYK, *Synteza optymalnego filtru liniowego spełniającego warunek minimum wariancji błędu losowego, przeznaczonego do wygładzania i predykcji*, Postępy Cybernetyki, 1988.
- [5] W. BOROWCZYK, *Wpływ przyjętej hipotezy ruchu celu na dokładność wyznaczenia nastaw działowych artylerii przeciwlotniczej*, Materiały Konferencji nt. Kierowanie ogniem naziemnych systemów obrony powietrznej (przeciwlotniczej), w m. Koszalin–Wicko Morskie, 2000.
- [6] W. BOROWCZYK, A. WOCHNA, W. KACZMAREK, *Badanie wpływu czasu obserwacji i okresu dyskretyzacji na dokładność wyliczania nastaw działowych w armatach przeciwlotniczych*, Materiały III Międzynarodowej Konferencji Uzbrojenia nt. Naukowe aspekty techniki uzbrojenia, Waplewo, 2000.

- 
- [7] W. BOROWCZYK, W. KACZMAREK, *Badanie wpływu poprawek na dokładność wyliczania nastaw działowych w oparciu o uproszczone tablice balistyczne*, Biul. WAT, 54, 9, Warszawa, 2005.
- [8] C. Z. KUZMIN, *Osnovy projektowanija sistem cifrowoj obrabotki radiolokacjonnoj informaczi*, Radio i Swiaź, Moskwa, 1986.
- [9] F. K. NIEUPOKOJEW, *Strielba zenitnymi raketami*, Wojennoje izdatelstwo, Moskwa, 1970.

W. BOROWCZYK, W. KACZMAREK

**Analysis and calculation gun-setting errors in sights  
of anti-aircraft artillery systems of close range**

**Summary.** The paper presents the problems of reducing the time of anti-aircraft systems reaction by the use of time-variable algorithm. Special attention was paid to the analysis of enumerating gun-setting errors caused by the reduced time of target observation. Moreover, enumerating gun-setting errors caused by extended period of measurement digitization of current co-ordinates of a target are estimated.

**Keywords:** anti-aircraft artillery systems, observation time, gun-setting errors, gun-setting

**Universal Decimal Classification:** 623.418.2

