

Mgr inż. Waldemar Malesa
Mgr inż. Arkadiusz Zgoła
Wojskowa Akademia Techniczna
Zakład Systemów Sterowania Uzbrojeniem

CYBERNETYCZNY MODEL CZOŁGOWEGO SYSTEMU KIEROWANIA OGNIEM

W referacie przedstawiono cybernetyczny model czołgowego systemu kierowania ogniem oraz przeanalizowano wpływ zastosowania systemu na uzyskanie największej wartości prawdopodobieństwa trafienia pierwszym strzałem. Rozwiązanie zadania trafienia stanowi jeden z elementów oceny walorów bojowych czołgu. W referacie uwzględniono również parametry taktyczno-techniczne systemu kierowania uzbrojeniem i obiektów stanowiących przewidywany cel ataku

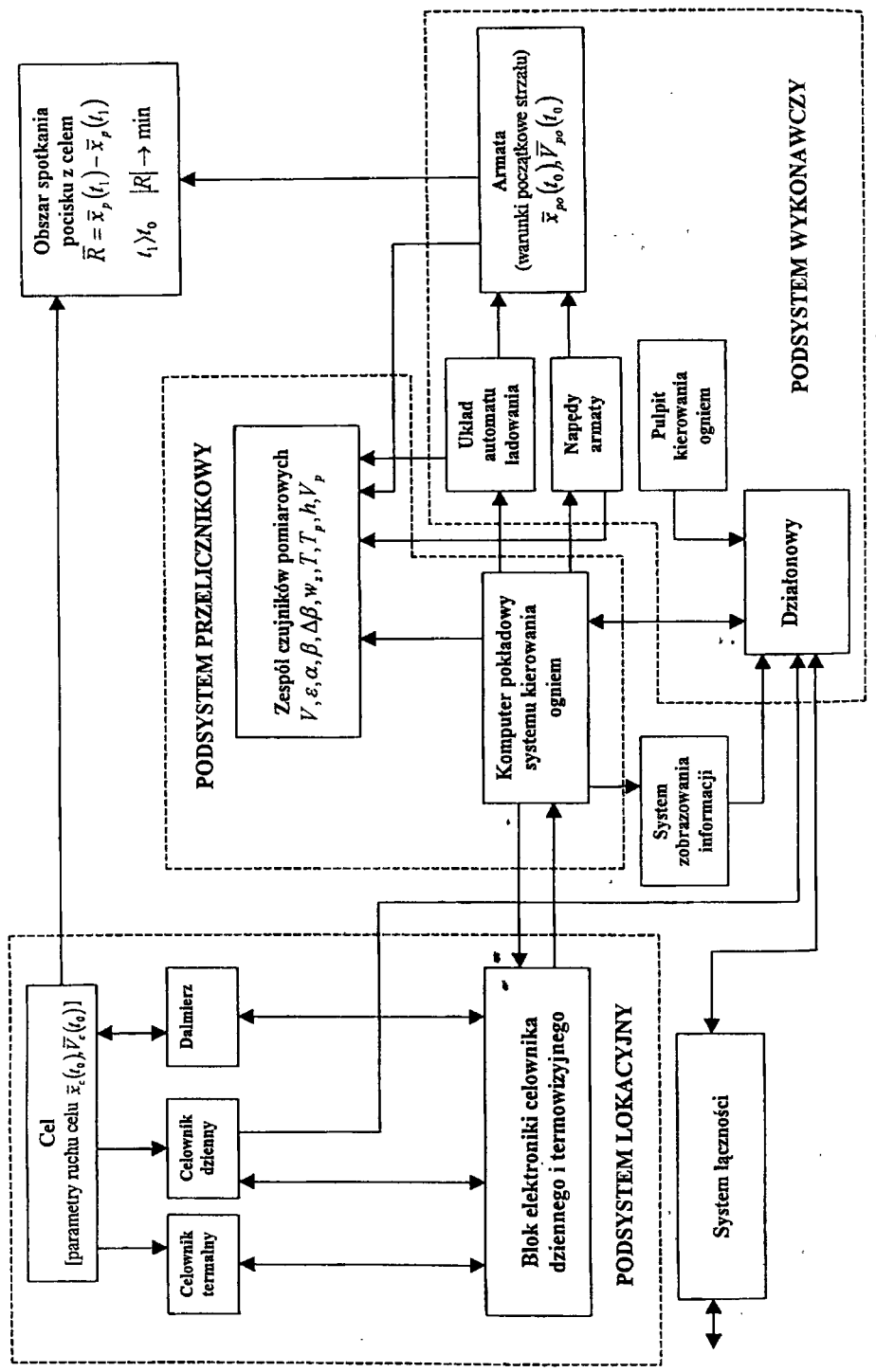
THE CYBERNETIC MODEL OF TANK FIRE CONTROL SYSTEM

This paper presents the cybernetic model of tank fire control system. There are also the results of analysis of system application effect, on receiving of the maximum value of probability of hit the target by the first shot. The paper includes also tactical and technical parameters of main armament control system and object that is expected target of attack.

1. MODEL CZOŁGOWEGO SYSTEMU KIEROWANIA OGNIEM.

Głównym celem rozwoju uzbrojenia jest zwiększenie jego walorów bojowych. Obserwowany obecnie kierunek tego rozwoju charakteryzuje się coraz wyższym stopniem mechanizacji i automatyzacji, który wynika z postępu techniki i technologii, szczególnie w dziedzinie mikroelektroniki. Możliwość szybkiego zbierania, przekazywania i przetwarzania informacji pozwala na aplikacje wielu prac teoretycznych, które dotychczas nie mogły być wykorzystane ze względów technicznych. Należy przy tym zaznaczyć, że technika szybkiego zbierania, przetwarzania i przesyłania informacji znajduje zastosowanie nie tylko w samym sprzęcie uzbrojenia, lecz także w procesie jego projektowania, produkcji i eksploatacji. W referacie zawarta jest analiza czołgowego systemu kierowania ogniem (SKO) pod kątem uzyskania największej wartości prawdopodobieństwa trafienia w jednym strzale. Wartość tego prawdopodobieństwa stanowi jeden z elementów oceny walorów bojowych czołgu. W analizie uwzględniono parametry taktyczno-techniczne: systemu kierowania ogniem, uzbrojenia głównego i obiektów stanowiących przewidywany cel ataku. Schemat blokowy cybernetycznego modelu czołgowego SKO przedstawiono na rys. 1 Schemat ten ilustruje także zadanie kierowania ogniem obejmujące wiele zadań cząstkowych do których należą między innymi:

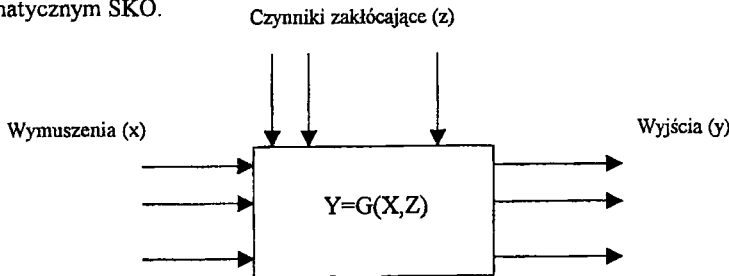
- a) wykrywanie i rozpoznawanie (swój-obcy) obiektów znajdujących się w obszarze działania czołgu;
- b) dokonanie wyboru celu;
- c) śledzenie wybranego celu wraz z określeniem parametrów jego ruchu (wektorów położenia i prędkości);
- d) podjęcie decyzji o otwarciu ognia.



Rys.1 Schemat blokowy cybernetycznego modelu czolowego systemu kierowania ogniem.

- e) bieżące zbieranie i przetwarzanie informacji o:
- warunkach atmosferycznych (ciśnienie, temperatura, prędkość i kierunek wiatru),
 - temperaturze amunicji (ładunków miotających),
 - parametrach ruchu czołgu (wektory prędkości i położenia),
 - parametrach ruchu osi przewodu lufy armaty czołgowej,
- f) cykliczne rozwiązywanie zadania trafienia oraz określenie adekwatnego azymutu i elewacji osi przewodu lufy armaty czołgowej,
- g) proces naprowadzania osi przewodu lufy armaty na wymagany azymut i elewację,
- h) proces stabilizowania osi przewodu lufy armaty czołgowej i osi optycznej przyrządów obserwacyjno-celowniczych, jeżeli czołg znajduje się w ruchu.[7]

Należy przy tym pamiętać, że w zakres zadania cząstkowego obejmującego rozwiązanie zadania trafienia oraz określenie azymutu i elewacji osi przewodu lufy armaty czołgowej, wchodzi także rozwiązanie problemu głównego balistyki zewnętrznej. Poza tym istotną rolę w zadaniu kierowania ogniem odgrywa hipoteza o ruchu celu w czasie lotu pocisku, od której zależy algorytm SKO jak również czynności algorytmów strzeleckich. Stosownie do wymienionych zadań cząstkowych zadania kierowania ogniem zbudowany jest algorytm SKO, który jest realizowany przez wiele układów typu nadążnego (śledzącego), stabilizującego, programowego itd. Trudności w klasyfikacji i wydzielaniu poszczególnych układów wynikają z wysokiego stopnia integracji SKO, który zaciera ostre granice podziału. Cały SKO można by zaliczyć do układów sterowania adaptacyjnego w którym zachodzi sterowanie optymalne. Kryterium wg którego przebiega proces sterowania, jest osiągnięcie wartości minimalnej przez długość wektora \bar{R} , stanowiącego różnicę wektorów określających położenie pocisku \bar{x}_p i celu \bar{x}_c w obszarze spotkania celu i pocisku. Zadanie osiągnięcia wymienionego celu sterowania wymaga rozwiązania zadania trafienia, to jest określenia wektora położenia punktu trafienia. Wielkości mierzone przez czujniki i systemy pomiarowe są obciążone błędami pomiarowymi. Ruch pocisku jest przypadkowy z uwagi na losowy charakter warunków początkowych i sił aerodynamicznych. Zatem parametry tego ruchu będą opisywały dwa wektorowe procesy stochastyczne. Wykonywanie zadania kierowania ogniem podczas ruchu czołgu jest związane ze stochastycznymi zakłóceniami których źródłem są kinematyczne wymuszenia powodowane przez nierówności terenu. W rozwiązaniu zadania trafienia jedynie hipoteza ruchu celu w czasie lotu pocisku, to jest od chwili t_0 , gdy pocisk opuszcza przewód lufy, do chwili t_1 , gdy pocisk znajduje się w najmniejszej odległości od celu, ma zazwyczaj charakter zdeterminowany. Zatem rozwiązując zadanie trafienia należy mieć na uwadze jego stochastyczny charakter, co sprawia, iż analiza powinna obejmować pewien obszar przestrzeni, a nie ograniczać się jedynie do punktu trafienia. Wymieniony obszar przestrzeni określamy mianem obszaru spotkania pocisku z celem. Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy algorytmu SKO, który w istocie jest modelem matematycznym SKO.



Rys.2. Model matematyczny SKO.

W ogólnym przypadku funkcja $G(X,Z)$ będzie nieliniowym probabilistycznym operatorem SKO przekształcającym procesy stochastyczne opisujące wymuszenia X i zakłócenia Z w procesy stochastyczne opisujące wielkości wyjściowe Y . Zgodnie z modelem cybernetycznym SKO przedstawionym na rys.1. do procesów stochastycznych opisujących wymuszenia X można zaliczyć między innymi:

- warunki atmosferyczne takie, jak ciśnienie, temperatura, prędkość i kierunek wiatru,
- wektory położenia i prędkości celu,
- komendy wydawane przez operatorów.

Przykładami procesów stochastycznych opisujących zakłócenia Z będą wymuszenia kinematyczne powodowane nierównościami terenowymi podczas jazdy czołgu, zaś przykładami procesów stochastycznych opisujących wielkości wyjściowe Y będą azymut i elewacja osi przewodu lufy. Z punktu widzenia analizy dokładności SKO wystarczającym jest określenie wartości przeciętnych i wariancji procesów stochastycznych Y . Daje to bowiem możliwość określenia błędu celowania na drodze rozwiązania problemu głównego balistyki zewnętrznej. Należy przy tym pamiętać, że ruch pocisku także ma charakter losowy i jest opisywany przez dwa wektorowe procesy stochastyczne charakteryzujące jego prędkość i położenie. Jak już wspomniano, w ogólnym przypadku probabilistyczny operator SKO, to jest funkcja $G(X,Z)$, będzie nieliniowy, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia dokładną analizę dokładności SKO. Jedną z częściej stosowanych metod analizy dokładności jest metoda linearyzacji. Zawsze jednak w pełni obiektywnym i miarodajnym kryterium oceny dokładności SKO jest wartość prawdopodobieństwa trafienia pierwszym strzałem.[7]

2.PRAWDOPODOBIEŃSTWO TRAFIENIA PIERWSZYM STRZAŁEM.

Przedmiotem analizy są zjawiska zachodzące wewnątrz obszaru spotkania pocisku z celem, który porusza się w przestrzeni z prędkością równą prędkości celu. Można zatem przyjąć hipotezę, że każdy strzał będzie charakteryzowany wektorową zmienną losową \bar{R} będącą sumą dwóch wektorowych zmiennych losowych:

- błędu celowania \bar{R}_r lub poprawionego błędu celowania \bar{R}_{rp} ,
- rozrzutu balistycznego \bar{R}_b . Hipotezę tą wyraża następujący wzór:

$$\bar{R} = \bar{R}_r + \bar{R}_b \quad (1)$$

Problem określenia wartości prawdopodobieństwa trafienia sprowadza się więc do wyznaczenia łącznej gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej \bar{R} i wykonania całkowania w granicach charakteryzujących wymiary geometryczne celu. Istnieją dwa sposoby modelowania geometrycznego celu, a mianowicie:

- traktowanie celu jako bryły,
- traktowanie celu jako figury płaskiej.

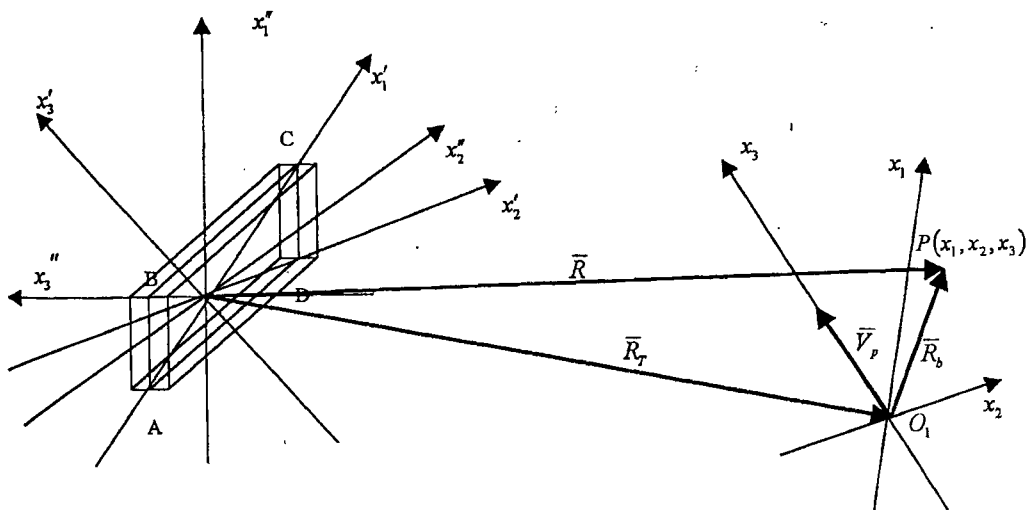
Niech cel w kształcie prostopadłościanu porusza się z pewną prędkością \bar{V}_c w kierunku wyznaczonym przez najdłuższą krawędź prostopadłościanu. Z celem jest związany prawoskrętny kartezjański układ współrzędnych $Ox_1^c x_2^c x_3^c$ którego osie pokrywają się z osiami symetrii prostopadłościanu, a oś Ox_1^c ma kierunek i zwrot wektora prędkości celu \bar{V}_c . Powyższe zależności przedstawione są na rys.3. Niech punkt O_1 będzie środkiem rozrzutu balistycznego. Położenie tego punktu w układzie odniesienia $Ox_1^c x_2^c x_3^c$ określa wektor błędu celowania \bar{R}_r o współrzędnych (m, n, s) . Ponadto wiadomo, że punkt O_1 leży na przeciętnym torze pocisku i porusza się z prędkością równą przeciętnej prędkości pocisku na torze \bar{V}_p . Z punktem O_1 związany jest prawoskrętny kartezjański układ współrzędnych

$O_1x_1x_2x_3$, którego oś Ox_3 ma kierunek i zwrot zgodny z kierunkiem i zwrotem wektora przeciętnej prędkości pocisku \bar{V}_p . Położenie pocisku w układzie odniesienia $O_1x_1x_2x_3$ określa wektor rozrzutu balistycznego \bar{R}_b i błędu celowania \bar{R}_r będą określone wzorami:

$$f_b(x_1, x_2, x_3) = N(0, \delta_1) * N(0, \delta_2) * N(0, \delta_3) \quad (2)$$

$$f_r(x_1'', x_2'', x_3'') = N(0, \delta_{r1}) * N(0, \delta_{r2}) * N(0, \delta_{r3}) \quad (3)$$

gdzie: $N(0, \delta_i)$ - gęstość rozkładów normalnych o zerowych wartościach przeciętnych i odchyleniach standardowych δ_i .



Rys.3. Jedno z możliwych położen pocisku względem celu.[7]

W celu określenia prawdopodobieństwa trafienia w jednym strzale pod warunkiem, że współrzędne błędu celowania \bar{R}_r są równe (m, n, s) , należy wyznaczyć związki pomiędzy współrzędnymi punktu w układach $Ox_1''x_2''x_3''$ i $O_1x_1x_2x_3$, ponieważ dalsze rozważania wygodniej jest prowadzić w układzie odniesienia $Ox_1''x_2''x_3''$. Korzystając z przekształcenia dla przestrzeni trójwymiarowej otrzymuje się:

$$\begin{cases} x_1'' = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + c_{13}x_3 + m \\ x_2'' = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + c_{23}x_3 + n \\ x_3'' = c_{31}x_1 + c_{32}x_2 + c_{33}x_3 + s \end{cases} \quad (4)$$

gdzie przez c_{ij} oznaczono cosinusy kierunkowe osi układu $Ox_1''x_2''x_3''$ w układzie $O_1x_1x_2x_3$, oraz

$$\begin{cases} x_1 = c'_{11}x_1'' + c'_{12}x_2'' + c'_{13}x_3'' - m \\ x_2 = c'_{21}x_1'' + c'_{22}x_2'' + c'_{23}x_3'' - n \\ x_3 = c'_{31}x_1'' + c'_{32}x_2'' + c'_{33}x_3'' - s \end{cases} \quad (5)$$

gdzie przez c_{ij} oznaczono cosinusy kierunkowe osi układu $O_1x_1'x_2'x_3'$ w układzie $Ox_1^*x_2^*x_3^*$. Jeżeli cel będzie traktowany jako bryła to prawdopodobieństwo trafienia będzie wyrażone wzorem:

$$p = \int_{-a-b-c}^{+a+b+c} \int \int f_b(x_1, x_2, x_3) dx_1^* dx_2^* dx_3^* \quad (6)$$

gdzie jako x_i podstawiamy odpowiednie zależności zgodnie z (5). Zaś całkowite prawdopodobieństwo trafienia obliczymy ze wzoru:

$$P = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int \int \int p * f_T(m, n, s) dm dn ds \quad (7)$$

Dla przypadku szczególnego gdy występuje jedynie przesunięcie współrzędnych $Ox_1^*x_2^*x_3^*$ względem układu $O_1x_1x_2x_3$ (cosinusy kierunkowe $c_{ij}=1$ dla $i=j$ oraz $c_{ij}=0$ dla $i \neq j$ wzór (6) można przekształcić do postaci:

$$p = \int_{-a-b-c}^{+a+b+c} \int \int f_w(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3 \quad (8)$$

gdzie przez $f_w(x_1, x_2, x_3)$ oznaczono gęstość trójwymiarowego rozkładu normalnego:

$$f_w(x_1, x_2, x_3) = N(0, \delta_{w_1}) * N(0, \delta_{w_2}) * (0, \delta_{w_3}) \quad (9)$$

w którym odchylenia standardowe δ_{w_i} są wyrażone wzorem:

$$\begin{cases} \delta_{w_1} = (\delta_1^2 + \delta_{r_1}^2)^{0,5} \\ \delta_{w_2} = (\delta_2^2 + \delta_{r_{22}}^2)^{0,5} \\ \delta_{w_3} = (\delta_3^2 + \delta_{r_3}^2)^{0,5} \end{cases} \quad (10)$$

Jeżeli cel będzie traktowany jako figura płaska, to można przyjąć, że warunkowe prawdopodobieństwo trafienia jednym strzałem będzie równe prawdopodobieństwu pojawienia się punktu trafienia w prostokącie zaznaczonym na rys. 3.

Niech w chwili $t=0$ pocisk znajduje się w punkcie P o współrzędnych (x_1, x_2, x_3) w układzie $Ox_1^*x_2^*x_3^*$ współrzędne punktu P określają zależności (4). Przyjmujemy hipotezę, że w obszarze spotkania celu i pocisku, prędkość pocisku jest równa przeciętnej prędkości pocisku \bar{V}_p , to położenie punktu trafienia spowodowane tym pociskiem w obszarze prostokąta ABCD jest określone wzorem (11)

$$\begin{cases} x_{p1}^* = x_1^* - \frac{x_1^*}{V_{p3}^*} V_{p1}^* \\ x_{p2}^* = x_2^* - \frac{x_2^*}{V_{p3}^*} V_{p2}^* \\ x_{p3}^* = 0 \end{cases} \quad (11)$$

gdzie składowe przeciętnej prędkości pocisku \bar{V}_p w układzie $Ox_1^*x_2^*x_3^*$ są wyrażone wzorem (12)

$$\begin{cases} V_{p1}^* = c_{13}V_{p3} \\ V_{p2}^* = c_{23}V_{p3} - V_c \\ V_{p3}^* = c_{33}V_{p3} \end{cases} \quad (12)$$

Drugi składnik we wzorze (11) uwzględnia ruch pocisku względem układu $Ox_1^*x_2^*x_3^*$. Podstawiając do wzoru (11) zależności (4) i (12) można wyznaczyć współrzędne punktu trafienia x_1, x_2 w funkcji współrzędnych: $x_{p1}^*, x_{p2}^*, x_3, V_{p3}, V_c$. Wówczas uzyskamy:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{(x_{p1}^* - c)b_1 - (x_{p2}^* - c_1)b}{a * b_1 - a_1 * b} \\ x_2 = \frac{1}{b_1} \left\{ x_{p2}^* - a \frac{(x_{p1}^* - c)b_1 - (x_{p2}^* - c_1)b}{a * b_1 - a_1 * b} - c_{11} \right\} \end{cases} \quad (13)$$

W zależności (13) przyjęto następujące oznaczenia:

$$a = c_{11} - c_{31}A, \quad (14)$$

$$b = c_{12} - c_{32}A, \quad (15)$$

$$c = c_{13}x_3 + m - (c_{33}x_3 + s)A, \quad (16)$$

$$A = \frac{c_{13}}{c_{33}}, \quad (17)$$

$$a_1 = c_{21} - c_{31}A_1, \quad (18)$$

$$b_1 = c_{22} - c_{32}A_1, \quad (19)$$

$$c_1 = c_{23}x_3 + n - (c_{33}x_3 + s)A_1, \quad (20)$$

$$A_1 = \frac{c_{23}V_{p3} - V_c}{c_{33}V_{p3}}. \quad (21)$$

Dokonując zamiany zmiennych x_1, x_2 zgodnie z zależnością (13) można określić prawdopodobieństwo trafienia w prostokąt $ABCD$ pod warunkiem, że środek rozrzutu balistycznego został przesunięty do O_1 w chwili $t=0$ i cosinusy kierunkowe są równe c_{ij} :

$$p = \int_{-l-h}^{+l+h} \int_{-l-h}^{+l+h} \int_{-l-h}^{+l+h} f_b(x_{p1}^*, x_{p2}^*, x_3, V_{p3}, V_c, m, n, s) dx_{p1}^* dx_{p2}^* dx_3 \quad (22)$$

gdzie:

h - długość boku prostokąta $ABCD$ z rys. 3,

l - długość boku prostokąta $ABCD$ z rys. 3.

Całkowite prawdopodobieństwo trafienia wyrażone będzie wzorem (23):

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p * f_T(m, n, s) dm dn ds, \quad (23)$$

gdzie p wyrażone jest wzorem (22). I tym samym zostało określone prawdopodobieństwo trafienia jednym strzałem celu traktowanego jako bryła (7) oraz dla celu traktowanego jako figura płaska (23).

Z uwagi na złożoność problemu bardzo często rozpatrywany jest przypadek szczególny polegający na strzelaniu do celu nieruchomego gdy ($V_c = 0$), którym jest tarcza umieszczona w płaszczyźnie prostopadłej do stycznej do toru pocisku ($c_{ij} = 1$ dla $i = j$ oraz $c_{ij} = 0$ dla $i \neq j$), wówczas wzór (23) przekształca się do postaci:

$$P = \int_{-l-h}^{+l+h} \int f_w(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (24)$$

gdzie gęstość dwuwymiarowego rozkładu normalnego $f_w(x_1, x_2)$ wyrażona jest wzorem:

$$f_w(x_1, x_2) = N(0, \delta_{w1}) * N(0, \delta_{w2}) \quad (25)$$

w którym odchylenia standardowe δ_{wi} są wyrażone zależnością:

$$\begin{cases} \delta_{w1} = (\delta_1^2 + \delta_{r1}^2)^{0.5} \\ \delta_{w2} = (\delta_2^2 + \delta_{r2}^2)^{0.5} \end{cases} \quad (26)$$

Oczywiście wartości prawdopodobieństwa trafienia jednym strzałem co celu nieruchomego mogą stanowić kryterium oceny w analizach porównawczych, należy jednak pamiętać o tym, iż porównywane wielkości dotyczą jedynie szczególnego przypadku strzelania do celu nieruchomego. Współczesne pole walki charakteryzuje się bowiem dużą dynamiką i strzelanie do celu będzie należało do rzadkości. W pewnym uproszczeniu można powiedzieć że tak przeprowadzona analiza dokładności SKO obejmuje dokładność statyczną, pomija zaś całkowicie dokładność dynamiczną [7]

Literatura:

- [1] Zespół IEK WAT Sprawozdanie z badań poligonowych SKO DRAWA czołgu T-72. Warszawa 1991r.
- [2] Zespół IEK WAT. Ekspertyza dotycząca armat 125 mm i wnioski eksploatacyjne Warszawa 1991r.
- [3] Zespół IEK WAT Pomiary i analiza zakłóceń emitowanych przez SKO DRAWA. Warszawa 1992r
- [4] Zespół IEK WAT „Instrukcja obsługi dla czołgu T-72M wyposażonego w SKO-1M DRAWA Warszawa 1992r
- [5] Zespół IEK WAT Sprawozdanie z badań kwalifikacyjnych (państwowych) SKO DRAWA Warszawa 1992r.
- [6] Zespół IEK WAT Sprawozdanie z badań kwalifikacyjnych wyrobu DRAWA - strzelania na zgodność z ZTT. Warszawa 1993r.
- [7] M. Radomski „ Analiza czołgowego SKO pod kątem uzyskania największej wartości prawdopodobieństwa trafienia w jednym strzale”. Politechnika Warszawska IMIK, Warszawa 1993r
- [8] Zespół IEK WAT Badanie strzelaniem armat 2A46. Warszawa 1993r.
- [9] Zespół IEK WAT Instrukcja eksploatacji SKO DRAWA M1/T. Warszawa 1994r.
- [10] Zespół IEK WAT Sprawozdanie z uruchomienia SKO DRAWA M1/T z celownikiem termowizyjnym na czołgu T-72. Warszawa 1994r.