

Modelowanie pola walki z zastosowaniem koncepcji dynamiki systemowej

R. HOFFMANN, T. PROTASOWICKI
romuald.hoffmann@wat.edu.pl

Instytut Systemów Informatycznych
Wydział Cybernetyki WAT
ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

W artykule autorzy przedstawili problem modelowania procesów pola walki z zastosowaniem koncepcji dynamiki systemowej. Zaproponowane przez autorów wykorzystanie modelu Lanchestera pozwala na rozpoczęcie zaawansowanych badań z zakresu symulowania złożonych procesów współczesnego pola walki. Zrozumienie tej złożoności ułatwiają różnego rodzaju modele systemowe. Celem badań, których wyniki omówiono w ramach tego artykułu, było zbudowanie dynamicznego modelu walki opartego na równaniach Lanchestera. Intencją autorów nie było jednak zbudowanie kompletnego modelu opisującego w sposób kompleksowy zjawiska zachodzące na nowoczesnym polu walki, a jedynie zaproponowanie nowego spojrzenia na znane od dawna prawa Lanchestera i umożliwienie dalszego rozwoju badań w tym obszarze. Autorzy zaproponowali kierunek dalszych prac badawczych zmierzających m.in. do uwzględnienia wpływu czynników losowych oraz interakcji i sprzężeń zwrotnych zachodzących pomiędzy innymi parametrami mającymi wpływ na przebieg współczesnych działań bojowych.

Słowa kluczowe: symulacja, dynamika systemowa, model walki, równania Lanchestera.

1. Wprowadzenie

Złożoność procesów walki związana jest z ich silnym powiązaniem z otoczeniem, w którym się odbywają. Występują w nich elementy o wysokiej skali złożoności, takie jak m.in. posiadane przez dowódców zdolności przywódcze, morale żołnierzy, poziom ich wykształcenia, niezawodność używanych środków technicznych itd. Rozumienie takich złożonych struktur ułatwiają różnego rodzaju modele systemowe, stanowiące próbę ich uproszczonego odwzorowania.

Celem niniejszego artykułu było zbudowanie dynamicznego modelu walki opartego na równaniach Lanchestera, przy wykorzystaniu koncepcji dynamiki systemowej. Model Lanchestera może w ocenie autorów stanowić dobrą podstawę do rozpoczęcia zaawansowanych badań z zakresu symulowania bardziej złożonych procesów współczesnego pola walki. Intencją autorów nie było jednak zbudowanie kompletnego modelu opisującego w sposób kompleksowy zjawiska zachodzące na nowoczesnym polu walki, a jedynie zaproponowanie nowego spojrzenia na znane od dawna prawa Lanchestera i umożliwienie dalszego rozwoju badań w tym obszarze.

2. Charakterystyka metody dynamiki systemowej

Wykorzystana w niniejszej pracy metoda dynamiki systemowej (ang. *system dynamics*) jest metodą budowy modeli symulacji ciągłej umożliwiającą modelowanie struktury i dynamiki złożonych systemów. Została ona zaproponowana w latach 60. XX wieku przez Jaya Forrestera, który opracował zasady leżące u jej podstaw podczas swojej pracy w Sloan School of Management i przedstawił je w swoich licznych pracach [6–9]. Stanowią one fundament teoretyczny, na którym swoje rozważania opierali kolejni autorzy prowadzący badania w tej dziedzinie [3, 10, 11, 14, 19].

Metoda dynamiki systemowej jest przeznaczona do modelowania złożonych systemów, w których występują tzw. sprzężenia zwrotne, opisujące zależności przyczynowo-skutkowe pomiędzy elementami systemu. Fundamentalnym założeniem metody jest rozpatrywanie badanego systemu jako spójnej całości w kontekście jego dynamiki [3, 6, 14, 19]. W konsekwencji nie ma możliwości niezależnego badania poszczególnych elementów systemu, ich wzajemnego wpływu na siebie i wyciągania na tej podstawie wniosków odnośnie do przyszłego zachowania się modelowanego systemu. Stanowi to zatem podejście całkowicie odmienne od tradycyjnego

w świecie nauki rozkładu złożonych problemów na podzbiory mniej skomplikowanych problemów cząstkowych i ich rozłącznego analizowania.

Metoda dynamiki systemowej wykorzystuje w procesie modelowania złożonych systemów dwie główne struktury:

- pętle przyczynowo-skutkowe oparte na występujących w systemie sprzężeniach zwrotnych
- zapasy i przepływy – zmienne obrazujące stan systemu w wybranej chwili.

Umożliwiają one czytelne i łatwe do zrozumienia odwzorowanie w budowanych modelach nawet bardzo skomplikowanych relacji o nieliniowym charakterze [19].

Kolejną ważną cechą proponowanej metody jest możliwość szybkiego dokonywania adaptacji modelu do bieżących potrzeb, m.in. w celu sprawdzenia kolejnych hipotez lub nowych scenariuszy działań np. poprzez dodawanie do zbudowanej struktury nowych pętli przyczynowo-skutkowych lub zmiennych stanu.

Wymienione właściwości metody dynamiki systemowej sprawiają, że może ona być z powodzeniem stosowana w analizie różnych klas złożonych zagadnień z zakresu niemalże dowolnej dziedziny problemowej. W kolejnych punktach niniejszej publikacji zaproponowano jej zastosowanie do budowy modelu symulacyjnego odwzorowującego ciągły charakter procesów walki.

3. Wprowadzenie do problematyki modelowania pola walki

Większość rozważań dotyczących modelowania i symulacji procesów zachodzących na współczesnym polu walki [1, 4, 16] opiera się na koncepcjach zaproponowanych przez angielskiego matematyka F.W. Lanchestera [13]. Lanchester w 1914 roku sformułował kilka modeli znanych pod nazwą praw Lanchestera (ang. *Lanchester Laws*), na podstawie których w sposób analityczny można określić przebieg walki. Równania te pozwalają oszacować w każdej chwili liczebność poszczególnych stron konfliktu oraz poziom poniesionych strat. Ich obszernie omówienie przedstawia w swojej pracy MacKay [15].

Współcześnie spotyka się również postulaty proponujące odejście od stosowania modeli Lanchestera [5]. Powodem takiego stanu rzeczy jest powoływanie się krytyków na nieadekwatność tych modeli do problemów i zjawisk występujących na arenie

współczesnych konfliktów zbrojnych. Jednak dokonany przegląd literatury w przedmiotowej dziedzinie wskazuje na duży potencjał i dalsze możliwości rozszerzania i uogólniania równań Lanchestera, umożliwiające ich skuteczne wykorzystanie jako solidnej podstawy do budowy modeli opisujących złożone procesy nowoczesnego pola walki [12, 17, 18].

4. Równania Lanchestera

W swojej podstawowej formie model Lanchestera zakłada istnienie dwóch sił walczących: sprzymierzonych oraz wrogich oznaczonych odpowiednio jako A i B . Dane są współczynniki strat obydwu stron konfliktu oznaczone odpowiednio jako S_A dla sił sprzymierzonych oraz S_B dla sił wrogich. W chwili t liczba walczących jednostek strony A jest równa $a(t)$, natomiast liczba walczących jednostek strony B wynosi $b(t)$. Początkowa liczebność obydwu stron wynosi a_0 dla strony A oraz b_0 dla strony B . Równania Lanchestera opisujące stan walki przybierają zatem postać następujących układów równań różniczkowych:

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = -S_A \\ \frac{db}{dt} = -S_B \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = -S_A ab \\ \frac{db}{dt} = -S_B ab \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = -S_A b \\ \frac{db}{dt} = -S_B a \end{cases} \quad (3)$$

z następującymi warunkami początkowymi:

$$\begin{cases} a(0) = a_0 \\ b(0) = b_0 \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:

$$\begin{cases} S_A > 0 \\ S_B > 0 \end{cases} \quad (5)$$

Współczynnik S_A jest zdeterminowany przez szeroko pojęte zdolności sił B do niszczenia jednostek sił A , analogicznie współczynnik S_B jest zdeterminowany przez zdolności sił A do niszczenia jednostek sił B .

Równanie (1) jest znane jako pierwsze liniowe prawo Lanchestera. Odpowiada ono

homogenicznej walce typu „jeden na jeden” (np. piechota atakująca piechotę), w której dwie przeciwstawne siły dysponują analogicznym uzbrojeniem, posiadającym równorzędną siłę rażenia przeciwnika, a teren operowania poszczególnych jednostek jest znany. Równanie (2) jest znane jako drugie liniowe prawo Lanchestera. Odpowiada ono sytuacji, w której teren walki, na którym rozmieszczone są wrogie jednostki jest znany, lecz dokładna lokalizacja wrogich jednostek jest nieokreślona, co przy błędach rozpoznania może prowadzić do mylnego eliminowania jednostek własnych. Równanie (3) jest znane jako kwadratowe prawo Lanchestera odzwierciedlające znany z ekonomii efekt skali związany z wpływem liczebności walczących sił A i B na ich potencjał w zakresie niszczenia przeciwnika.

Do dziś powstało wiele modyfikacji przedstawionych równań Lanchestera (1), (2) i (3), które dostosowują bazowy model do specyfiki spotykanych współcześnie różnorodnych form walki.

5. Modelowanie procesów pola walki metodą dynamiki systemowej

Działania bojowe toczące się na współczesnych polach walki charakteryzują się wysokim stopniem skomplikowania i złożoności. Rozpatrywane w kategoriach systemowych dają się one postrzegać jako:

- dynamiczne – stan systemu zmienia się w czasie wielokrotnie. Zmiany te mogą zachodzić gwałtownie, przy czym ich zakres jest nieokreślony i nie wyklucza wartości skrajnych. Jest to przyczyną powstawania trudności przewidywania jego przyszłych zachowań i ich skutków
- ściśle powiązane – zmiany poszczególnych elementów silnie oddziałują na zachowanie pozostałych, nie mogą więc one wpływać niezależnie na zachowanie się całego układu
- sprzężone – akcje podejmowane przez poszczególnych uczestników działań mają wpływ nie tylko na pozostałych, ale także na nich samych
- nieliniowe – efekty rzadko są proporcjonalne do podjętych działań, co wiąże się z silnymi sprzężeniami zwrotnymi, występującymi w systemie
- chaotyczne – występujące zmiany aperiodyczne połączone z dużą wrażliwością systemu na zmiany, mogą powodować destabilizację układu

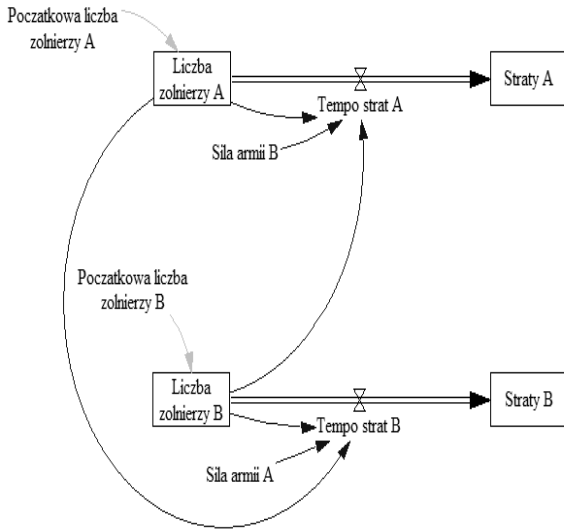
- zależne od historii – taktyki i strategię działań budowane są na podstawie analizy przeszłych konfliktów zbrojnych. Wykształcenie w zakresie doktryn dotyczących działań przeszłych może wprowadzać ograniczenia w postrzeganiu działań nowoczesnych
- samoorganizujące się – dynamika systemu wywodzi się spontanicznie z jego struktury i zachodzących w niej sprzężeń zwrotnych
- adaptacyjne – umiejętności uczestników działań i reguły podejmowania przez nich decyzji są zmienne w czasie i ewoluują wraz z rozwojem sytuacji
- nieintuicyjne – przewidywanie przyszłego zachowania się układu jest niezwykle trudne, ponieważ skutki są oddalone w czasie od wywołującej je przyczyny, co stwarza trudności analityczne w tym zakresie.

Postrzeganie nowoczesnego pola walki jako systemu o dużej skali złożoności i nieprzewidywalności wynikającej z dynamiki jego zachowań powoduje konieczność doboru odpowiednich narzędzi do prowadzenia analiz i eksperymentów obliczeniowych w tej dziedzinie. Metoda dynamiki systemowej została wybrana jako podstawowe narzędzie badawcze, ze względu na jej właściwości umożliwiające łatwą budowę modeli skomplikowanych zjawisk i dostępne liczne narzędzia pozwalające na prowadzenie symulacji przy użyciu zbudowanych modeli.

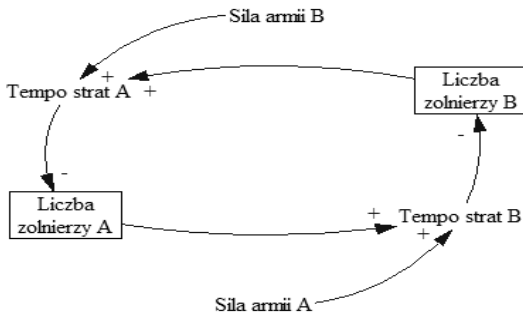
6. Dynamiczny model Lanchestera

Podstawowa forma układu równań Lanchestera (3) zasadza się na obserwacji, że w pewnym odcinku czasu $\Delta t \rightarrow 0$, dla homogenicznych sił walczących, straty armii A są proporcjonalne do iloczynu siły oraz liczebności strony B i vice versa. Siła stron jest w tym przypadku zagregowanym wskaźnikiem efektywności, który może się odnosić do wyposażenia, sprawności jednostek, panującego morale, skuteczności dowodzenia itp.

Poniżej (rysunek 1) przedstawiono model walki Lanchestera (3) opracowany z wykorzystaniem metody dynamiki systemowej oraz zaprezentowano diagram przyczynowo-skutkowy dla zjawisk opisanych przez prezentowany model (rysunek 2).



Rys. 1. Dynamiczny model Lanchestera;
Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Diagram przyczynowo-skutkowy zbudowany na podstawie modelu Lanchestera;
Źródło: opracowanie własne

Opracowany model opisany jest w języku Vensim® przez następujący układ równań różniczkowo-algebraicznych:

$$\frac{dLiczba\text{żołnierzy}A(t)}{dt} = -TempostratA(t) \quad (6)$$

$$\frac{dLiczba\text{żołnierzy}B(t)}{dt} = -TempostratB(t) \quad (7)$$

$$\frac{dStratyA(t)}{dt} = +TempostratA(t) \quad (8)$$

$$\frac{dStratyB(t)}{dt} = +TempostratB(t) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Liczba\text{żołnierzy}A(t_0 = 0) &= \\ &= Początkowaliczba\text{żołnierzy}A \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Liczba\text{żołnierzy}B(t_0 = 0) &= \\ &= Początkowaliczba\text{żołnierzy}B \end{aligned} \quad (11)$$

$$StratyA(t_0 = 0) = 0 \quad (12)$$

$$StratyB(t_0 = 0) = 0 \quad (13)$$

$$Początkowaliczba\text{żołnierzy}A = const \quad (14)$$

$$Początkowaliczba\text{żołnierzy}B = const \quad (15)$$

$$SiłaarmiiA = const \quad (16)$$

$$SiłaarmiiB = const \quad (17)$$

$$TempostratA(t) = MIN(MAX(SiłaarmiiB \times Liczba\text{żołnierzy}B(t), 0), Liczba\text{żołnierzy}A(t)) \quad (18)$$

$$TempostratB(t) = MIN(MAX(SiłaarmiiA \times Liczba\text{żołnierzy}A(t), 0), Liczba\text{żołnierzy}B(t)) \quad (19)$$

Na podstawie zbudowanego modelu przeprowadzono symulacje, których wyniki omówione zostały w kolejnym punkcie niniejszego artykułu.

7. Wyniki eksperymentu symulacyjnego

Po zbudowaniu modelu zostały przeprowadzone dwa eksperymenty symulacyjne, których rezultaty omówiono w niniejszym punkcie artykułu.

W pierwszym etapie eksperymentu przeprowadzono symulację z wykorzystaniem zbudowanego przez autorów dynamicznego modelu Lanchestera, przy założeniu, że:

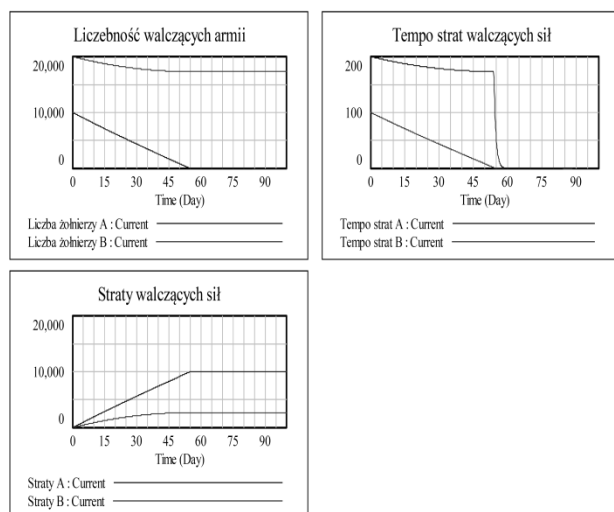
$$\begin{aligned} Początkowaliczba\text{żołnierzy}A &= 10000 = \\ &= const \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} Początkowaliczba\text{żołnierzy}B &= 20000 = \\ &= const \end{aligned} \quad (21)$$

$$SiłaarmiiA = 0,01 = const \quad (22)$$

$$SiłaarmiiB = 0,02 = const \quad (23)$$

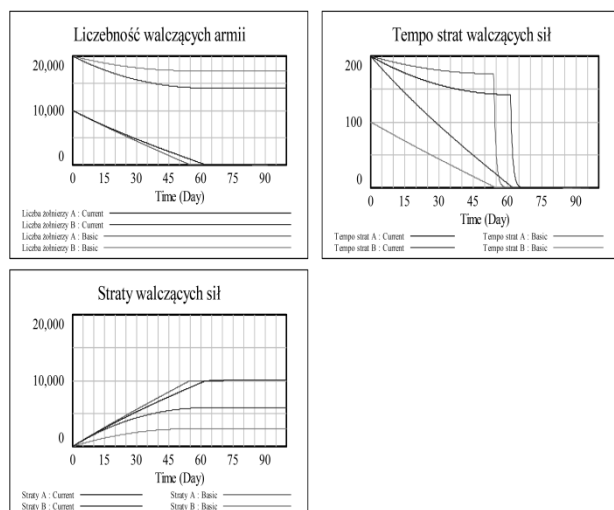
Wyniki uzyskane w trakcie symulacji przedstawiono na rysunku zamieszczonym poniżej (rysunek 3). Na podstawie uzyskanych wyników symulacji można wywnioskować nie tylko, kto zostanie zwycięzcą, ale również kiedy dojdzie do zakończenia walki w wyniku unicestwienia jednej ze stron. Ponadto można oszacować stan strat stron w poszczególnych momentach potyczki oraz ocenić, ile jednostek pozostanie zwycięzcy w chwili jej zakończenia.



Rys. 3. Przykładowe wyniki symulacji modelu Lanchestera;

Źródło: opracowanie własne

Zbudowany model można również wykorzystać do oceny wyników zmian warunków początkowych. Sytuację taką zbadano w drugim etapie eksperymentu poprzez przeprowadzenie symulacji dla zmienionego parametru Siła armii $B = 0,02$. Uzyskane w tym etapie rezultaty, zestawione z wynikami pierwszej symulacji przedstawiono poniżej (rysunek 4).



Rys. 4. Przykładowe wyniki symulacji modelu Lanchestera;

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie analizy powyższych wykresów można stwierdzić, że nawet dwukrotny wzrost siły armii B (Siła armii $B = 0,02$) w stosunku do słabszej (Siła armii $A = 0,01$), ale liczniejszej armii A nie wpływa istotnie na wyniki walki. Potwierdza to występowanie kwadratowego prawa Lanchestera.

8. Podsumowanie

Większość współczesnych modeli symulacji procesów walki stanowią złożone modele stochastyczne, które dają wyniki zdecydowanie lepsze niż model Lanchestera. Dzieje się tak, jeśli zostanie spełnionych wiele spośród ich licznych założeń, a ich parametry zostaną poprawnie oszacowane.

Przedstawiony w niniejszym artykule dynamiczny model Lanchestera pomimo licznych uproszczeń pozwala na osiągnięcie zadowalających wyników. Liczebność walczących stron i współczynniki strat stanowią najważniejsze czynniki mające wpływ na odwzorowanie przebiegu walki w modelu Lanchestera. Główną zaletą tego modelu jest jego prostota i łatwość rozwiązywania układów równań. Wadę stanowi brak odzwierciedlenia w nim wpływu czynników losowych oraz interakcji i sprzężeń zwrotnych zachodzących pomiędzy innymi parametrami mającymi wpływ na przebieg współczesnych działań bojowych. Model nie uwzględnia również wpływu na proces walki wielu istotnych parametrów, takich jak m.in.:

- doświadczenie dowódców
- jakość szkolenia wojskowego
- morale żołnierzy
- warunki środowiskowe (np. pogoda, ukształtowanie terenu itp.).

Model Lanchestera może w ocenie autorów stanowić dobrą podstawę do symulowania bardziej złożonych procesów współczesnego pola walki. W związku z tym konieczne jest w toku dalszych prac badanie założeń i ograniczeń modelu Lanchestera, aby poprzez wprowadzenie niezbędnych zmian osiągnąć jego lepszą i bardziej adekwatną do rzeczywistości formę.

9. Bibliografia

- [1] K.C. Bowen, K.R. McNaught, "Mathematics in warfare: Lanchester theory", in: J. Fletcher (ed.), *The Lanchester Legacy, A Celebration of Genius*, Vol. 3, Coventry University Press, Coventry, 1996.
- [2] X. Caiquan, M. Lele, Wu. Minghu, "A Lanchester Equation and its Solution Considering the Factor of Terrain", *Intelligent Computation Technology and Automation*, International Conference ICICTA 2010, Vol. 1, 134–137 (2010).
- [3] R. Coyle, "The practice of system dynamics: Milestones, lessons and ideas from 30 years of experience",

- System Dynamics Review*, Vol. 14, 343–365 (1998).
- [4] P.K. Davis, "Distributed interactive simulation in the evolution of DoD warfare modeling and simulation", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 8, 1138–1155 (1995).
- [5] J. M. Epstein, *The calculus of conventional war: dynamic analysis without Lanchester theory*, Brookings Institution, Washington, 1985.
- [6] J.W. Forrester, *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge, 1961.
- [7] J.W. Forrester, *The collected papers of Jay W. Forrester*, Wright-Allen Press, 1975.
- [8] J.W. Forrester, *Urban Dynamics*, MIT Press, Cambridge, 1969.
- [9] J.W. Forrester, *World Dynamics*, Wright-Allen Press, 1971.
- [10] E. Kasperska, *Dynamika systemowa. Symulacja i optymalizacja*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
- [11] E. Kasperska, D. Słota, *Metody matematyczne w zarządzaniu w ujęciu dynamiki systemowej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
- [12] B. Koyuncu, E. Bostanci, "Using Lanchester Combat Models to aid battlefield visualization", *Computer Science and Information Technology*, 290–292 (2009).
- [13] F.W. Lanchester, *Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm*, Constable and Co. Ltd., London, 1916.
- [14] R. Łukaszewicz, *Dynamika systemów zarządzania*, PWN, Warszawa, 1975.
- [15] N. Mackay, "Lanchester combat models", *Mathematics Today*, No. 42, 170–173 (2006).
- [16] J. Moffat, "Mathematical modelling of information age conflict", *Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences*, Vol. 2006, (2006).
- [17] J. Nan, C. Xiangyong, H. Chunming, J. Yuanwei, "Warfare command decision making analysis of information support based on Lanchester equation", *Control and Decision Conference (CCDC)*, 1351–1353 (2010).
- [18] W. Shi-Hui, Y. Jian-Jun, "Optimal military strength allocation for campaign between single-kind arms and multi-kind arms", *Management Science and Engineering*, ICMSE 2009 International Conference, 303–308 (2009).
- [19] J. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin McGraw-Hill, Boston, 2000.

The system dynamics approach to combat modeling

R. HOFFMANN, T. PROTASOWICKI

This paper presents application of the system dynamics approach to solve the problem of modeling the processes of modern battlefield. Authors proposed Lanchester model as a starting point to launch advanced research in the area of simulation of complex processes of modern warfare. To understand this complexity the system models might be very helpful tool. The aim of research discussed in this paper, was to build a dynamic warfare model based on Lanchester equations. The intention of the authors, was not to build a complete model that describes in a comprehensive manner the phenomena occurring on the modern battlefield, but rather to offer a new perspective on application of the Lanchester equations in this field of research. The authors suggested further research to reflect the impact of random factors and the interactions and feedbacks that occurs between the different parameters affecting the course of modern warfare.

Keywords: simulation, system dynamics, combat model, Lanchester equations.