

УДК 623.451.4



Д. Є. Хаустов



Я. Є. Хаустов



В. В. Соколовський

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИКОНАННЯ ВОГНЕВИХ ЗАДАЧ ЕКІПАЖЕМ ТАНКА НА ПОЛІ БОЮ

*Розроблено математичну модель виконання вогневих задач на полі бою екіпажем танка, який оснащений багатоканальним прицільно-спостережним комплексом. Наведена аналітична модель Маркова дозволяє моделювати виконання вогневих задач екіпажем танка, оснащеного багатоканальним прицільно-спостережним комплексом, за етапами розвідки цілі, її розпізнавання та ідентифікації як окремими станами ланцюга Маркова та передбачає можливість розвитку моделі з метою врахування впливу природних та штучних завад.*

*Ключові слова: математична модель, виконання вогневих задач, багатоканальний прицільно-спостережний комплекс.*

**Постановка проблеми.** Розвідка та ураження ворожих цілей на полі бою залежить від технічних характеристик приладів спостереження та прицілювання, причому важливим є забезпечення їхньої ефективної роботи як вдень, так і вночі, особливо у несприятливих метеорологічних умовах. В області модернізації та створення приладів спостереження і прицілювання у світі останні роки спостерігається основна тенденція зі створення багатоканальних цілодобових всепогодних прицільно-спостережних комплексів (БКПСК) на зразках бронетанкового озброєння [1–7].

Для визначення раціональних параметрів БКПСК зразків бронетанкового озброєння необхідна математична модель, яка б урахувала весь процес розвідки цілі, давала можливість визначати очікуваний приріст бойової ефективності зразків озброєння, а також вплив повного спектра природних та штучних завад на процес розвідки цілі та її ураження, що на даний час є не вирішеною науковою проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У теорії бойової ефективності танків розроблено науково-методичний апарат, що дозволяє оцінювати ефективність танка в різних видах бою та з урахуванням впливу основних природних завад, що виникають під час розвідки та ураження цілі [8]. В основу науково-методичного апарату покладено математичні моделі, створені на основі положень теорії Марківських процесів [9] за припущення, що процес бою можливо описати обмеженою кількістю відомих станів.

В останні роки з'явилися наукові праці, у яких зроблені спроби вирішити цю проблему. Так, у статті [10] розроблена математична модель функціонування зразка бронетанкового озброєння з урахуванням інформаційних процесів. Таку модель неможливо використати для оцінювання ефективності роботи БКПСК під впливом зовнішніх метеорологічних умов. Інша модель [11] також не враховує процеси розпізнавання та ідентифікації ворожих цілей і вплив зовнішніх факторів на розвідку та знищення цілі.

Відзначимо аналітичну модель Маркова для опису функціонування комплексу озброєння танка [12, 13]. У цих працях автори зазначають, що їхня модель є базовою, тобто такою, яку можна розвивати, деталізуючи певні стани та переходи моделі. Також зауважимо, що дана модель виконання вогневих задач явно не враховує процеси виявлення, розпізнавання та ідентифікації ворожих цілей та вплив на них факторів зовнішнього середовища, хоча передбачає можливість врахування ймовірностей відповідних подій в межах виділених в моделі станів. А саме, ефективність збирання даних можна подати як ефективну ймовірність, що є добутком ймовірностей виявлення,

розпізнавання та ідентифікації. Така можливість є інтуїтивно очікуваною, однак, не є очевидною і потребує відповідного доведення з використанням математичного апарату ланцюгів Маркова, який використовується у працях [12, 13].

**Метою статті** є розроблення математичної моделі виконання вогневих задач екіпажем танка з багатоканальним прицільно-спостережним комплексом під впливом зовнішніх метеорологічних та інших умов для подальшого визначення раціональної структури та параметрів БКПСК.

**Виклад основного матеріалу.** В загальному вигляді виконання вогневої задачі на ураження цілі сучасним танком можна подати у вигляді трьох етапів: 1) збирання даних (data acquisition в англійській літературі), який включає пошук, виявлення розпізнавання, ідентифікацію цілі; 2) підготовка до пострілу; 3) бойове зіткнення із застосуванням зброї, яке включає політ снаряда до цілі, ураження цілі, корегування вогню. Події, що приводять до послідовних переходів від етапу до етапу мають ймовірнісний характер, тому можуть бути змодельовані в рамках теоретичного підходу до ланцюгів Маркова [14].

Слід зазначити, що дана модель розробляється для виконання вогневої задачі екіпажем окремого танка і не потребує великих потоків статистичних даних як, наприклад, в теорії масового обслуговування. Основною відмінністю є те, що збирання даних розглядається як послідовність трьох складових процесів: виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілі, кожен з яких описується відповідною ймовірністю. Ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації визначаються за відомими методиками Джонсона [15] або більш сучасною методикою Targeting Task Performance (ТТР) [16]. У рамках цих методик згадані три ймовірності визначаються за даними про розмір і контраст конкретної цілі в окулярі чи на моніторі спостережного приладу.

Розглянемо процес виконання вогневої задачі на ураження цілі екіпажем танка, який оснащений БКПСК, та побудуємо аналітичну модель виконання завдання на ураження цілі екіпажем танка на базі моделей, наведених у працях [13, 17].

Модель включає такі стани:  $E_{bc}$  – знаходження танка на вогневій позиції, вихідний стан; нульовий (0-й) стан;  $E_{nc}$  – початок спостереження (1-й стан);  $E_{vvc}$  – виявлення ворожої цілі (2-й стан);  $E_{rvvc}$  – розпізнавання ворожої цілі (3-й стан);  $E_{ivvc}$  – ідентифікація ворожої цілі (4-й стан);  $E_{bz}$  – бойове зіткнення, використання зброї (5-й стан);  $E_{uvvc}$  – ураження ворожої цілі, завдання виконано (6-й стан);  $E_{nvvc}$  – неуразення ворожої цілі, відмова (наказ на припинення) від виконання завдання (7-й стан).

Ймовірність переходу із одного стану в інший позначатимемо символом  $W_i$ , де індекс  $i$  – відповідний перехід. Він стає можливим завдяки одній чи декільком певним подіям, тому величина  $W_i$  визначається факторами, що супроводжують (роблять можливим чи унеможливають) ці події. Ймовірність переходу із одного стану в інший є більш загальним поняттям, порівнюючи з ймовірністю конкретної події, яка супроводжує перехід зі стану в стан. Щоб відрізнити ці два поняття ймовірність конкретної події позначатимемо символом  $P_j$ , де  $j$  вказує на конкретну подію. Зокрема ймовірність  $W_0$  переходу зі стану  $E_{bc}$  у стан  $E_{nc}$  визначається ймовірністю  $P_{nc}$  постановки завдання старшим командиром команди танка на початок спостереження у визначеному секторі, тобто

$$W_{01} = W_{bc \rightarrow nc} = P_{nc}. \quad (1)$$

У загальному випадку ймовірність  $W_{01}$  доповнює до одиниці ймовірність  $W_{07}$  неможливості переходу зі стану  $E_{bc}$  у стан  $E_{nc}$ . У даному випадку неможливість переходу зі стану  $E_{bc}$  у стан  $E_{nc}$  еквівалентна неуразенню ворожої цілі, тобто відповідає переходу з 0-го стану  $E_{bc}$  у 7-й стан  $E_{nvvc}$ . Тому

$$W_{07} = W_{bc \rightarrow nvvc} = 1 - W_{01}. \quad (2)$$

Ймовірність переходу з 1-го стану  $E_{\text{пс}}$  у 2-й стан  $E_{\text{ввц}}$  визначається ймовірністю виявлення ворожої цілі

$$W_{12} = W_{\text{пс} \rightarrow \text{ввц}} = P_{\text{ввц}}. \quad (3)$$

Відповідно неможливість переходу з 1-го стану  $E_{\text{пс}}$  у 2-й стан  $E_{\text{ввц}}$  еквівалентна переходу з 1-го стану  $E_{\text{пс}}$  у 7-й стан  $E_{\text{нвц}}$ , тобто

$$W_{17} = W_{\text{ввц} \rightarrow \text{нвц}} = 1 - P_{\text{ввц}}. \quad (4)$$

Ймовірність переходу з 2-го стану виявлення ворожої цілі  $E_{\text{ввц}}$  у 3-й стан її розпізнавання  $E_{\text{рвц}}$  позначатимемо  $P_{\text{рвц}}$ , а  $P_{\text{івц}}$  – відповідно ймовірність переходу з 3-го стану розпізнавання ворожої цілі  $E_{\text{рвц}}$  у 4-й стан її ідентифікації  $E_{\text{івц}}$ . Ймовірності обох цих переходів та доповнюючих до них переходів у 7-й стан, що відповідає неможливості цих переходів, визначаються технічними характеристиками системи управління вогнем танка. Таким чином,

$$W_{23} = W_{\text{ввц} \rightarrow \text{рвц}} = P_{\text{рвц}}, \quad (5)$$

$$W_{27} = W_{\text{рвц} \rightarrow \text{нвц}} = 1 - P_{\text{рвц}}, \quad (6)$$

$$W_{34} = W_{\text{рвц} \rightarrow \text{івц}} = P_{\text{івц}}, \quad (7)$$

$$W_{37} = W_{\text{івц} \rightarrow \text{нвц}} = 1 - P_{\text{івц}}. \quad (8)$$

Ймовірність переходу з 4-го стану ідентифікації ворожої цілі  $E_{\text{івц}}$  у 5-й стан бойового зіткнення  $E_{\text{бз}}$  визначається технічною надійністю механізму заряджання, гармати, системи управління вогнем, що у сукупності визначає ймовірність використання зброї, тоді

$$W_{45} = W_{\text{івц} \rightarrow \text{бз}} = P_{\text{бз}}, \quad (9)$$

$$W_{47} = W_{\text{бз} \rightarrow \text{нвц}} = 1 - P_{\text{бз}}. \quad (10)$$

У подальшому ймовірність переходу з 5-го стану бойового зіткнення  $E_{\text{бз}}$  у 6-й стан ураження ворожої цілі  $E_{\text{увц}}$  чи в 7-й стан неуразення ворожої цілі  $E_{\text{нвц}}$  визначається ймовірністю ураження ворожої цілі  $P_{\text{увц}}$ , тобто ймовірністю влучання у ціль:

$$W_{56} = W_{\text{бз} \rightarrow \text{увц}} = P_{\text{увц}}, \quad (11)$$

$$W_{57} = W_{63 \rightarrow \text{нвц}} = 1 - P_{\text{увц}}. \quad (12)$$

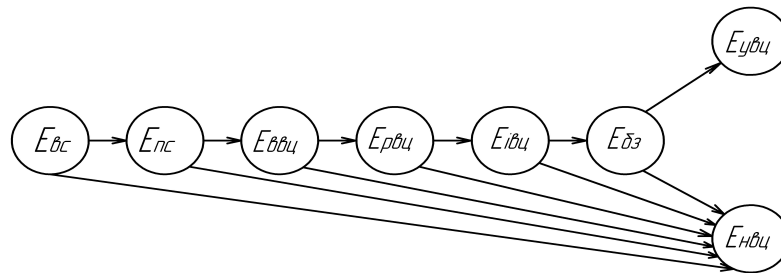
Стани ураження і неуразення ворожої цілі зв'язані співвідношенням

$$W_{67} = 1 - W_{57} = 1 - W_{63 \rightarrow \text{нвц}} = 1 - P_{\text{увц}}. \quad (13)$$

Дана модель описує послідовність подій, які на мові теорії ймовірностей утворюють ланцюг Маркова, що містить так звані поглинаючі стани, тобто стани, після переходу в які система вже не зможе повернутися до попереднього стану. Поглинаючими станами в даній моделі є 6-й стан  $E_{\text{увц}}$  та 7-й стан  $E_{\text{нвц}}$ . Зауважимо, що не слід відкидати хоча й малої, але ненульової ймовірності  $\alpha$  переходів відразу із 0-го стану  $E_{\text{вс}}$  у 6-й стан  $E_{\text{увц}}$  ураження ворожої цілі чи в 7-й стан  $E_{\text{нвц}}$  неуразення ворожої цілі. В такому разі самопоглинаючі переходи із 6-го стану  $E_{\text{увц}}$  у самого себе та з 7-го стану  $E_{\text{нвц}}$  у самого себе будуть відповідати ймовірності  $1 - \alpha$ . Такий спосіб уникнення зациклення системи в поглинаючих станах запропоновано у праці [18]. Таким чином,

$$\begin{cases} W_{06} = W_{\text{вс} \rightarrow \text{увц}} = \alpha, \\ W_{66} = W_{\text{увц} \rightarrow \text{увц}} = 1 - \alpha, \\ W_{07} = W_{\text{вс} \rightarrow \text{нвц}} = \alpha, \\ W_{77} = W_{\text{нвц} \rightarrow \text{нвц}} = 1 - \alpha. \end{cases} \quad (14)$$

Ймовірності всіх інших переходів вважаємо рівними нулю та побудуємо матрицю переходів, граф ланцюга Маркова якої зображено на рисунку.



Граф ланцюга Маркова, який моделює процес виконання завдання на ураження ворожої цілі із застосуванням танка

Вектор-рядок  $\vec{\pi}(\alpha) = [\pi_0(\alpha), \pi_1(\alpha), \pi_2(\alpha), \pi_3(\alpha), \pi_4(\alpha), \pi_5(\alpha), \pi_6(\alpha), \pi_7(\alpha)]$ , що відповідає граничному розподілу, знаходимо з рівняння на власні значення і власні вектори матриці  $W$  для значення, що дорівнює одиниці:

$$\vec{\pi}(\alpha) = \vec{\pi}(\alpha)W. \quad (15)$$

Підставляючи рівняння (15) в рівняння (16), отримуємо компоненти вектора  $\vec{\pi}(\alpha)$  у вигляді

$$\vec{\pi}(\alpha) = \begin{bmatrix} \pi_0(\alpha) = \alpha(\pi_6(\alpha) + \pi_7(\alpha)), \\ \pi_1(\alpha) = \pi_0(\alpha)W_{01}, \\ \pi_2(\alpha) = \pi_1(\alpha)W_{12}, \\ \pi_3(\alpha) = \pi_2(\alpha)W_{23}, \\ \pi_4(\alpha) = \pi_3(\alpha)W_{34}, \\ \pi_5(\alpha) = \pi_4(\alpha)W_{45}, \\ \pi_6(\alpha) = \pi_5(\alpha)W_{56} + (1-\alpha)\pi_6(\alpha), \\ \pi_7(\alpha) = \pi_0(\alpha)W_{07} + \pi_1(\alpha)W_{17} + \pi_2(\alpha)W_{27} + \pi_3(\alpha)W_{37} + \\ + \pi_4(\alpha)W_{47} + \pi_5(\alpha)W_{57} + (1-\alpha)\pi_7(\alpha). \end{bmatrix}^{Tr} \quad (16)$$

Верхній індекс  $Tr$  у рівнянні (16) відповідає операції транспонування, що вказує на те, що  $\vec{\pi}(\alpha)$  є вектором-рядком.

Із системи рівнянь (16) отримуємо

$$\pi_6(\alpha) = (\pi_6(\alpha) + \pi_7(\alpha))W_{01}W_{12}W_{23}W_{34}W_{45}W_{56}. \quad (17)$$

Враховуючи, що

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} (\pi_6(\alpha) + \pi_7(\alpha)) = 1, \quad (18)$$

отримуємо для граничної ймовірності ураження цілі

$$\pi_6 = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \pi_6(\alpha) = W_{01}W_{12}W_{23}W_{34}W_{45}W_{56}. \quad (19)$$

Підставивши рівняння (1), (3), (5), (7), (9) та (11) у рівняння (20), отримуємо

$$\pi_6 = P_{пс} P_{ввц} P_{рвц} P_{івц} P_{бз} P_{увц}. \quad (20)$$

### Висновки

Розроблено аналітичну модель Маркова виконання вогневих задач екіпажем танка з багатоканальним прицільно-спостережним комплексом з урахуванням етапів виявлення, розпізнавання та ідентифікації ворожої цілі як окремих станів ланцюга Маркова. Модель дозволяє моделювати виконання вогневих задач екіпажем танка під впливом природних та штучних завад. У подальшому для оцінювання ефективності кожного з каналів БКПСК та в цілому планується визначити кількісний показник оцінки його ефективності для порівняння різних за структурою комплексів.

### Перелік джерел посилання

1. Лазарев Л. А. Боевая эффективность танков : лекции. Москва : ВАТБЗ, 1975.126 с.2. “General Dynamics” показала новий легкий танк для армії США. URL: <https://www.ukrmilitary.com/2020/04/general-dynamics-griffin2.html> (дата звернення: 01.06.2020).

3. Танк “Армата”. URL: <http://bastion-opk.ru/t-14-armata-170507/> (дата звернення: 15.06.2020).

4. Бойова машина піхоти Т-15 69. URL: <http://bastion-karpenko.ru/t-14-t-15-armata-uvz-150525/> (дата звернення: 03.05.2020).

5. Reding D. F. Science & Technology Trends 2020–2040. *Office of the Chief Scientist NATO Headquarters*. Belgium, 2020. P. 153.
6. Сучасний стан і перспективи розвитку прицільних комплексів зразків бронетанкового озброєння / Я. Є. Хаустов та ін. *Військово-технічний збірник*. Львів, 2019. Вип. 2 (31). С. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.48-57> (дата звернення: 15.06.2020).
7. Васьківський М. І. Покращення інформативності бронетанкового озброєння за рахунок використання власних розвідувально-спостережних засобів. *Військово-технічний збірник*. Львів : НАСУВ ЗСУ, 2011. Вип. 2 (5). С. 7–11.
8. Лосик О. А. *Танки (основы теории, конструкции и боевой эффективности)* : учеб., кн. 2. Москва : ВАБТВ, 1983. 157 с.
9. Васьковский М. И. Подход к моделированию парного и группового боя в интересах оценки эффективности бронетанкового вооружения. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. Киев : ЦНДИ ОВТ ЗСУ, 2010. Вип. 4. С. 22–27.
10. Васьковский М. И. Математическая модель функционирования образца бронетанкового вооружения, оснащенного информационно-управляющей системой. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. Киев : ЦНДИ ОВТ ЗСУ, 2011. Вип. 1 (38). С. 6–11.
11. Мочерад В. С. Математична модель вирішення вогневих задач екіпажем танка. *Системи озброєння та військова техніка*. Харків, 2015. Вип. № 1 (41). С. 41–45.
12. Анипко О. Б., Борисюк М. Д., Бусяк Ю. М. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники : монография. Харьков : НТУ “ХПИ”, 2008. 196 с.
13. Анипко О. Б., Бусяк Ю. М., Бирюков И. Ю. Аналитическая Марковская модель функционирования комплекса вооружения танка. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків, 2012. Вип. № 2 (31). С. 78–81.
14. Meyn S. P., Tweedie R. L. *Markov Chains and Stochastic Stability*. London : Springer-Verlag, 1993. ISBN 0-387-19832-6.
15. Johnson John. *Analysis of image forming systems* : Technical report. U. S. Army Engineer Research and Development Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, 1958.
16. Richard H. Vollmerhausen, Eddie Jacobs. The Targeting Task Performance (TTP) Metric. A New Model for Predicting Target Acquisition Performance. Technical Report AMSEL-NV-TR-230, Revision 20 April 2004. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a422493.pdf> (дата звернення: 19.06.2020).
17. Раскин Л. Г. Оценивание параметров Марковских моделей функционирования сложных систем. Москва : Науч. совет по комплекс. проблеме “Кибернетика”, 1980. С. 143–145.
18. Раскин Л. Г. Математическое моделирование функционирования сложных систем. Харьков : ВИРТА, 1988. 178 с.

*Стаття надійшла до редакції 30.06.2020 р.*

**УДК 623.451.4**

**Д. Е. Хаустов, Я. Е. Хаустов, В. В. Соколовский**

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ОГНЕВЫХ ЗАДАЧ ЭКИПАЖЕМ ТАНКА НА ПОЛЕ БОЯ**

*Разработана математическая модель выполнения огневых задач на поле боя экипажем танка, который оснащен многоканальным прицельно-наблюдательным комплексом. Представленная аналитическая модель Маркова позволяет моделировать выполнение огневых задач экипажем танка, оснащенного многоканальным прицельно-наблюдательным комплексом, по отдельным этапам разведки цели, ее распознавания, идентификации как отдельных состояний цепи Маркова и предусматривает возможность развития модели с целью учета воздействия природных и искусственных препятствий.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* математическая модель, выполнение огневых задач, многоканальный прицельно-наблюдательный комплекс.

UDC 623.451.4

**D. Khaustov, Ya. Khaustov, V. Sokolovskij**

**MATHEMATICAL MODEL OF IMPLEMENTATION OF FIRE TASKS  
BY TANK CREW ON THE BATTLEFIELD**

*Reconnaissance and defeat of enemy targets on the battlefield depends on the technical characteristics of surveillance and sighting devices, and it is important to ensure their effective operation, during both the day and night, especially in adverse weather conditions. Therefore, in the field of modernization and development of surveillance and sighting devices, by both domestic and foreign manufacturers, in recent years there has been a major trend towards the development of multi-channel sighting systems on armored vehicles.*

*To determine the optimal parameters of the sighting systems of armored vehicle samples, it is necessary to develop a mathematical model that would take into account the entire process of target reconnaissance, including the impact of full range of natural and man-made obstacles, to determine the ways for the improvement of combat effectiveness of weapons samples.*

*In this work, a mathematical model is developed for description of fire tasks execution on the battlefield by a tank crew, which is equipped with a multi-channel sight-monitoring system, to assess the work of the sighting system as whole as well as of each of its channels. The analysis of the functional scheme of solving the combat task shows that the stage of data acquisition should be divided into, at least three, separate states, namely: detection, recognition and identification such that the transitions between these states will be described by the corresponding probabilities. The developed model describes the sequence of events that in terms of probability theory form a Markov chain. The proposed analytical Markov model allows for modeling the solution of fire tasks by the tank crew equipped with a multi-channel sighting and observation system with separate consideration of the stages of target reconnaissance, its recognition and identification, which in turn are considered as separate states of the Markov chain. The model opens a possibility for the development of an extended model to determine a quantitative indicator to assess the effectiveness of a given sighting system in comparison with its analogs.*

*Key words: mathematical model, execution of fire tasks, multichannel sighting and observation complex.*

**Хаустов Дмитро Євгенович** – кандидат технічних наук, докторант штатний науково-організаційного відділу Національної академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного.

<http://orcid.org/0000-0001-5542-2831>

**Хаустов Ярослав Євгенович** – ад'юнкт штатний науково-організаційного відділу Національної академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного.

<http://orcid.org/0000-0003-4553-0702>

**Соколовський Володимир Васильович** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри вогневої підготовки Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0002-3930-4541>