

ВОЙТКО Олександр Володимирович,

кандидат військових наук, доцент,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<http://orcid.org/0000-0002-4610-4476>

БАЗАРНИЙ Сергій Васильович,

доктор філософії,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0001-9545-1960>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВОЄННИХ ІГОР ПІД ЧАС ПІДГОТОВКИ ВІЙСЬКОВИХ ФАХІВЦІВ

В умовах широкомасштабної збройної агресії російської федерації проти України актуальним завданням є дослідження ефективних методів підготовки військових фахівців до сучасних викликів та загроз. У статті розглянуто роль воєнних ігор у системі військової освіти та їхній вплив на підготовку військових фахівців.

***Метою статті** є розроблення комплексної математичної моделі, що формалізує процес використання воєнних ігор під час підготовки військових фахівців, на основі проведення аналізу та прогнозування їх поведінкових змін під час ухвалення рішень.*

***Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний методологічний підхід, що включає математичне моделювання та емпіричне спостереження. Використано методи стохастичних ігор, марківських процесів, Баєсівського оновлення та Q-навчання, що дало змогу здійснити детальний аналіз вибору математичного опису процесу підготовки військових фахівців.*

***Отримані результати дослідження.** Проаналізовано історичний розвиток воєнних ігор, проведено їх класифікацію, що містить поділ на настільні, комп'ютерні та гібридні моделі, які використовуються на різних рівнях підготовки, забезпечуючи інтерактивність і реалістичність, відповідно до методів застосування у навчальному процесі. Розглянуто особливості настільних, комп'ютерних і гібридних військових симуляцій, визначено їхні переваги та обмеження. Запропоновано блок-схему, яка відображає послідовність п'ятиетапного процесу використання воєнних ігор під час підготовки військових фахівців, що охоплює когнітивний, емоційний і поведінковий рівні навчання. Досліджено підходи до моделювання бойових сценаріїв, зокрема, застосування методів операційного дослідження для оптимізації процесу навчання. Визначено напрями нормативного регулювання військових симуляцій у межах партнерства НАТО та України.*

***Елементами наукової новизни.** Науковою новизною є обґрунтований та описаний математичний апарат для математичного моделювання процесу сприйняття військовослужбовцями навчального матеріалу за допомогою воєнних ігор.*

***Теоретична й практична значущість.** На основі проведеного дослідження зроблено висновок, що поєднання традиційних і сучасних цифрових методів воєнних ігор сприяє ефективнішій підготовці військових командирів та підвищенню рівня ухвалення стратегічних рішень. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на адаптації військових симуляцій до реалій сучасних бойових дій, їхній класифікації та вдосконаленні існуючих навчальних підходів, інструментів та методик. Обґрунтовано важливість застосування таких сучасних технологій, як штучний інтелект, віртуальна реальність і доповнена реальність для подальшого розвитку подібних моделей у наукових дослідженнях, що є підґрунтям для підвищення рівня проведення підготовки військових фахівців.*

***Ключові слова:** воєнні ігри, військова освіта, моделювання, математична модель, військові фахівці.*

Вступ

Використання воєнних ігор (далі – ВІ) для підготовки військових фахівців різних рівнів має історичне коріння, починаючи від Kriegsspiel XIX століття [1], в яких моделюються сценарії бойових дій, що дає змогу військовослужбовцям аналізувати хід бойових дій та прогнозувати результати ухвалених рішень. Упродовж XX століття ВІ еволюціонували та набули широкого використання під час підготовки офіцерів для роботи у штабах, зокрема під час Другої світової війни. США та Великобританія, застосовували

їх для розроблення стратегій морських і наземних операцій, тестування планів висадки десанту та оцінювання ймовірних дій противника. Наприклад, аналітики ВМС США активно використовували симуляційні сценарії під час підготовки до битви за Мідвей [2]. Окрім традиційних викликів військової підготовки, ВІ мають важливе значення у підвищенні адаптивності військовослужбовців до бойових дій та інших загроз з боку російської федерації. Це особливо актуально для Збройних Сил України, які стикаються з прямими бойовими діями, з асиметричними загрозами,

кіберопераціями та інформаційно-психологічними впливами з боку противника. Розвиток сучасних симуляційних систем дає змогу покращити підготовку, моделювати складні сценарії операцій та ухвалення рішень у стресових умовах.

Постановка проблеми. Незважаючи на широке застосування воєнних ігор різного типу в освітньому процесі, що проваджується у військових навчальних закладах, залишається відкритим питання стосовно оптимального поєднання традиційних методів підготовки з інтерактивними симуляціями. Тому питання дослідження впливу, воєнних ігор ВІ на процес ухвалення рішень у реальному бойовому середовищі в системі підготовки військових фахівців є важливим науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Воєнні ігри відіграють важливу роль у підготовці військових фахівців, забезпечуючи середовище для практичного навчання та стратегічного аналізу. У дослідженні [3] підкреслено, що ВІ не є простою симуляцією військових конфліктів, а забезпечують функцію глибшого формування професійних знань через практику та взаємодію. Використовуючи підхід Вітгенштейна до концепції «мовної гри», автор доводить, що процес навчання у ВІ сприяє відтворенню тактичних сценаріїв та впливає на зміну самого способу мислення майбутніх військових. Це підтверджується реальними випадками, коли військові навички, здобуті через навчання та моделювання, допомогли команді ефективно реагувати на терористичну загрозу. Важливою особливістю ВІ є моделювання складних сценаріїв, дозволяючи командирам випрацьовувати навички ухвалення рішень у ситуації невизначеності. Це вказує на те, що вони сприяють підвищенню рівня професійної компетентності та кращому розумінню реальності проведення військових операцій.

Обґрунтований аналіз використання комп'ютерних ігор у військовій підготовці наведено у дослідженні [4], в якому зосереджено увагу на їх ефективності та впливі на мотивацію військовослужбовців. Дослідження демонструє, що інтерактивні ігрові симуляції сприяють активному навчанню, дозволяючи військовим занурюватися в реалістичні бойові сценарії, що стимулюють ухвалення рішень у реальному часі. Важливим фактором є можливість багаторазового повторення сценаріїв, що сприяє більш якісному засвоєнню навичок. Одним із ключових ризиків є негативне перенесення навичок, коли гравці можуть формувати помилкові моделі поведінки, які не відповідають реальним бойовим умовам. Крім того, навчання з використанням ігор потребує значного часу системи на освоєння, що може знизити його ефективність у короткостроковій перспективі. Автор підкреслює, що максимальна ефективність досягається за умови залучення кваліфікованих інструкторів та проведення детального аналізу (зворотного зв'язку), для коригування набутих знань та вмінь з метою подальшого адаптування їх до реальних завдань (умов).

У дослідженні [5] розглядаються ВІ як ефективний інструмент стратегічного планування та прогнозування. Автори аналізують співпрацю між військовими

колегами США та Бразилії, демонструючи успішне впровадження військових симуляцій у процесі ухвалення рішень. Таким чином, дослідження підкреслює важливість моделювання сценаріїв бойових дій, що дозволяє військовим (командирам, начальникам) випробовувати альтернативні стратегії без реальних ризиків. Важливим аспектом є те, що ігрове моделювання забезпечує можливість тестування нових варіантів дій до їх впровадження у практику. Автори також звертають увагу на порівняльну ефективність цифрових та аналогових методів моделювання, на розвиток високотехнологічних комп'ютерних симуляцій. Дослідження показує, що традиційні аналогові ВІ можуть бути не менш ефективними у розвитку стратегічного мислення та візуалізації сценаріїв. Простота аналогових методів дозволяє учасникам швидше адаптуватися до процесу гри, зосереджуючись на аналізі та плануванні, а не на технічних аспектах цифрових симуляцій. У дослідженні наголошується на необхідності наукового підходу до оцінювання результатів військового планування, що включає системний аналіз отриманих даних та здатність військових адаптуватися до нової інформації в процесі ухвалення рішень.

У роботі [6] підкреслено роль ВІ у Другій світовій війні, зокрема використання моделювання для аналізу підводної тактики німецьких субмарин та розробки ефективних заходів. Дослідники вказують на переваги як традиційних настільних ВІ, так і сучасних комп'ютерних симуляторів, таких як Squad та Arma III, які дозволяють відпрацьовувати тактичну взаємодію та приймати рішення в реалістичному багатокористувальному середовищі. Припущення, що ВІ мають значний психологічний вплив на гравців, наведено у дослідженні [7] сприяючи розвитку когнітивних навичок, зокрема ситуаційної обізнаності, стратегічного мислення, управління ресурсами та швидкого ухвалення рішень у складних умовах. У дослідженні, наголошено на необхідності інтеграції ігрових технологій у навчальні процеси, що сприяє створенню ефективніших методів навчання та розвитку професійних навичок. Одним із ключових аспектів, є впровадження ігрових методик у систему військової освіти. Використання ігор дозволяє моделювати реальну ситуацію, підвищуючи стресостійкість військовослужбовців та їхню здатність до адаптації в умовах бойових дій. Крім того, автори підкреслюють, що такі ігри ефективні для командної роботи, сприяють покращенню комунікативних навичок та координації між учасниками. Важливою перевагою є можливість багаторазового повторення сценаріїв без ризику для життя, що дозволяє відпрацьовувати різні стратегії та тактики безпечного у середовищі.

В керівних документах, зокрема у Законах України «Про вищу освіту» № 1556-VII від 01.07.2014 [8] та «Про освіту» № 2145-VIII від 05.09.2017 [9] врегульоване питання, щодо підготовки військових фахівців, встановлюючи державні стандарти та підходи, які сприяють інтеграції інноваційних методів навчання, таких як воєнні ігри. Ці закони забезпечують методологічну базу для адаптації сучасних підходів до військової освіти, зокрема використання симуляцій для розвитку стратегічного мислення та тактичних навичок.

ВІ активно інтегруються до системи військової освіти країн НАТО, відповідно до STANAG 2519 [10], які визначають сумісність військових симуляцій у багатонаціональних навчаннях, що гарантують єдину методологію їх проведення та НАТО AJP-3.2 [11] (Об'єднана доктрина союзницьких сухопутних операцій), в якій встановлено принципи використання для підготовки командного складу, що забезпечують підвищення ефективності операцій. В Україні використання військових симуляцій регламентується документами [12,13], в яких визначено ключові напрями модернізації навчального процесу, зокрема інтеграцію цифрових симуляційних технологій для підвищення якості підготовки військових кадрів.

Проведений аналіз керівних документів та наукових досліджень свідчить про те, що існуючі підходи підготовки військовослужбовців не в повній мірі враховують потенціал ВІ, який забезпечує економічну ефективність їх використання, впливає на зменшення витрат на фізичне навчання, використання техніки та боеприпасів.

Метою статті є розроблення комплексної математичної моделі, що формалізує процес використання воєнних ігор під час підготовки військових фахівців на основі проведення аналізу та прогнозування їх поведінкових змін під час ухвалення рішень.

Виклад основного матеріалу дослідження

Воєнні ігри можна класифікувати на три основні види: *настільні*, *комп'ютерні* та *симуляційні*, які мають різні підходи та методики у військовій підготовці, кожен із яких має переваги та обмеження. Настільні ігри (tabletop wargames), залишаються ефективним інструментом навчання офіцерів завдяки розвитку стратегічного та тактичного мислення. Вони дозволяють командирам аналізувати бойові сценарії, тестувати оперативні плани та покращувати навички ухвалення рішень. Перевагою настільних ігор є їхня гнучкість, доступність та можливість оперативної адаптації сценаріїв під конкретні навчальні завдання. Недоліком настільних ігор є їхня обмежена здатність до реалістичного відображення складних бойових умов та необхідність значного часу для проведення аналізу.

Комп'ютерні ВІ є невід'ємною частиною сучасної військової підготовки завдяки високій точності симуляції бойових дій та можливості створення інтерактивного бойового середовища. Платформи, такі як: *Virtual Battlespace 3*, *Joint Theater Level Simulation ma Command: Professional Edition*, широко застосовуються в Об'єднаних центрах бойового моделювання НАТО, що дозволяє аналізувати оперативні дії, відпрацьовувати сценарії ведення бойових дій та покращувати координацію спільних операцій [14]. Основними перевагами цих симуляторів є можливість проведення багаторівневого аналізу, використання реалістичних даних, а також інтеграція з іншими системами бойового управління, що забезпечує комплексну підготовку командного складу. Водночас їхнє впровадження пов'язане з високою вартістю розробки та забезпеченням спеціалізованого технічного забезпечення. В Україні розвиток подібних технологій регламентується

документами [15;16], в яких передбачено активну інтеграцію цифрової навчальної платформи в систему військової освіти. Процес спільного цілевказання визначається як інтеграційна функція, що поєднує застосування всього спектра доступних спроможностей для досягнення визначених військових цілей. У цьому контексті використання циклу спільного цілевказання у ВІ дає змогу відпрацьовувати етапи ухвалення рішень, зокрема, формування намірів командира, розвідку та розвиток цілей, аналіз доступних засобів ураження, синхронізацію дій та оцінку ефективності операцій. Особливу роль у ВІ відіграє моделювання інформаційно-психологічного впливу (з англ. мови психологічні операції – *psychological operations*) та операцій у кіберпросторі (з англ. мови, кібероперації – *cyberspace operations*), що є невід'ємними складовими сучасних збройних конфліктів. Включення до симуляцій методів оцінювання наслідків бойових дій, таких як оцінювання бойових пошкоджень та оцінка оперативної ефективності, сприяє формуванню комплексного підходу до підготовки командирів і штабів.

Гібридні ВІ, що поєднують настільні та комп'ютерні симуляції, активно використовуються в країнах НАТО та Україні. Вони дають змогу командирам використовувати гнучкість настільних ігор із реалістичністю цифрових платформ. Наприклад, використання комплексних симуляцій у ЗСУ дозволяє комбінувати традиційні методи аналізу бойових дій із сучасними алгоритмами моделювання, для адаптації навчальних програм до актуальних бойових умов. У навчальних програмах НАТО дедалі більше уваги надається поєднанню воєнних ігор із концепціями (*Joint All-Domain Command and Control*), що сприяє інтеграції інформаційних потоків із різних військових доменів для підвищення ефективності управління військовими операціями.

Використання методів *операційного дослідження* у ВІ. Операційне дослідження (з англійської мови – *operational research*, далі – ОД) є фундаментальною науковою дисципліною, для вирішення стратегічних і тактичних завдань військового характеру [17]. Сьогодні ОД зберігає свою ключову роль у військовому плануванні, управлінні ресурсами та моделюванні бойових дій шляхом застосування ВІ. Зокрема широкий спектр методів, таких як: математичне моделювання, програмування, теорія ігор, стохастичне моделювання та симуляційні підходи, ОД дає змогу аналізувати та прогнозувати можливі сценарії розвитку збройних конфліктів. Застосування ОД у ВІ сприяє розробці оптимізаційних моделей розподілу військових ресурсів, а також аналізу ефективності стратегічних і тактичних рішень. Наприклад, методи лінійного програмування та евристичні алгоритми активно використовуються для вирішення завдань логістичного забезпечення підрозділів, зокрема щодо постачання пального, боеприпасів та інших критично важливих ресурсів. Крім того, симуляційне моделювання дозволяє оцінювати ризики в умовах невизначеності, що є важливим елементом підготовки військових кадрів до реальних бойових ситуацій. Сучасне ОД приділяє значну увагу поведінковим аспектам ухвалення рішень командирами та начальниками, що особливо актуально у ВІ, де

мінімізується вплив людського фактору та психологічних аспектів бойових дій. Використання методів імітації ухвалення рішень дозволяє оцінити вплив командирів на динаміку змін у бойовому середовищі, а також дослідити, як когнітивні упередження можуть впливати на стратегічні рішення. Тому, методи ОД забезпечують науково обґрунтований підхід до моделювання військових конфліктів, планування операцій та аналізу військових стратегій. Інтеграція методів ОД у військові симуляції підвищує точність прогнозування результатів бойових дій і ефективність операцій, що, впливає на покращення процесу підготовки військових фахівців.

Засвоєння матеріалу ВІ у процесі військової підготовки відбувається на трьох основних рівнях, серед яких можливо визначити наступні, а саме: *когнітивний*; *емоційний*; *поведінковий*. Для більш детального дослідження процесу підготовки розподілимо цей процес на п'ять рівнів, які відображають послідовність

сприйняття, обробки інформації, емоційного залучення, формування вмінь та навичок та їх корегування (за необхідності). Взаємозв'язок між рівнями забезпечує поетапне засвоєння матеріалу та процесу ухвалення рішень в умовах, що визначені грою.

Для візуалізації зазначеного процесу підготовки авторами сформовано Блок-схему процесу сприйняття та засвоєння військовослужбовцями матеріалу воєнних ігор під час їх підготовки (рис. 1). Деталізуємо зазначені у блок-схемі рівні сприйняття. На I-му, сенсорно-перцептивному рівні, відбувається ознайомлення з правилами, механікою та умовами проведення ВІ. На II-му рівні військовослужбовець структурує отриману інформацію, аналізує тактичні можливості та прогнозує ймовірний розвиток ситуації. На наступному, III-му рівні відіграють ключову роль зацікавленість військовослужбовця до ігрового процесу та розуміння важливості колективних рішень.

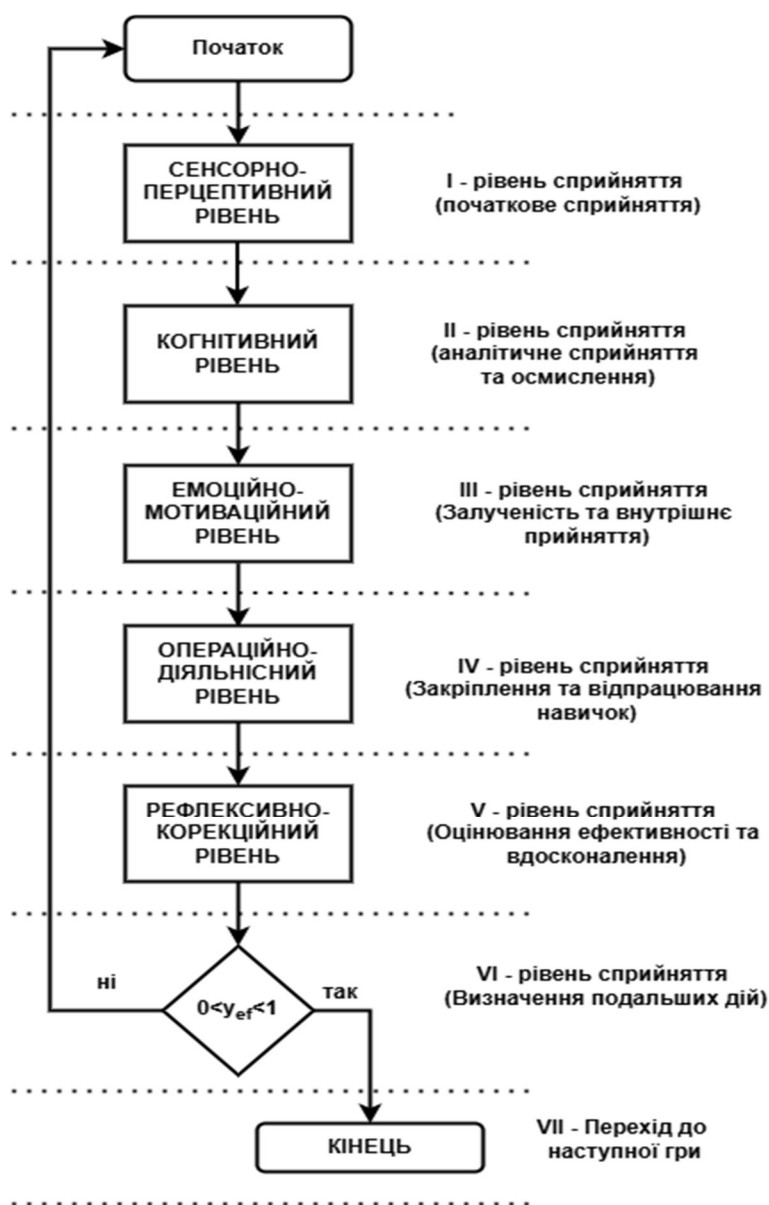


Рисунок 1 – Блок-схема процесу сприйняття та засвоєння військовослужбовцями матеріалу воєнних ігор під час їх підготовки

Формування алгоритмів ухвалення рішень та вдосконалення навичок для управління ресурсами відбувається вже на IV-му рівні. Аналіз помилок, дебрифінг та зворотній зв'язок, це вже V-й рівень ВІ. На VI-му рівні відбувається визначення ступеню засвоєння військовослужбовцем навчального матеріалу ВІ та визначається керівником проведення ВІ наступні дії: перехід до наступного VII-го рівня гри, за умови ($0,5 \leq y_{ef} \leq 1$), де y_{ef} - коефіцієнт засвоєння матеріалу. У разі не засвоєння матеріалу ($0 \leq y_{ef} \leq 0,5$) то повернення на початковий рівень (I-й) для повторювання матеріалу.

Математичне моделювання. У роботі [18] запропонована методика оцінювання ефективності ВІ,

де навчальні сценарії оцінюються за критеріями: час ухвалення рішень, точність виконання завдань та адаптація до змінених факторів бойової обстановки. Ймовірнісні моделі прогнозування, які використовуються у дослідженні [19], дають змогу адаптувати навчальні сценарії в межах ВІ та підкреслює важливість врахування стохастичних процесів у військових симуляціях, зокрема для моделювання змінених факторів, таких як оперативна обстановка, рівень підготовки особового складу, погодні умови та непередбачувані дії противника.

У таблиці 1 наведено обґрунтування вибору методів для побудови комплексної математичної моделі використання ВІ під час підготовки військових фахівців.

Таблиця 1

Методи комплексної математичної моделі використання воєнних ігор

№	Математичний апарат	Пояснення
1.	Марківські процеси ухвалення рішень	Використовуються для динамічного планування операцій (дій) з урахуванням імовірнісних змін бойової обстановки
2.	Стохастичні ігри (stochastic game)	Враховують реакцію противника та його дії як невизначений фактор, що впливає на порядок дій команди
3.	Баяєвське оновлення	Дає змогу адаптивно оцінювати ймовірності дій противника на основі розвідувальних даних
4.	Операційне дослідження (лінійне програмування)	Використовується для оптимального розподілу ресурсів (пальне, боєприпаси, техніка) під час бойових дій
5.	Q-навчання (Reinforcement Learning)	Забезпечує адаптацію військовослужбовців залежно від отриманого досвіду

Враховуючи вищезазначені методи, формалізуємо комплексну математичну модель використання ВІ у процесі підготовки військових фахівців наступним чином. Математичний вираз, який описує оптимізацію процесу ухвалення рішень на основі марковських процесів, що дає змогу команді реагувати на зміни у бойовій обстановці, розраховується рекурсивно за рівнянням *Балмана* та має наступний вигляд:

$$V(s) = \max_{a \in A} [R(s, a) + \gamma \sum_{s'} P(s'|s, a) V(s')], \quad (1)$$

де $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – множина станів бойового середовища (наприклад, наступ, оборона);

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – множина рішень командира (наприклад, перейти до контрнаступу, тощо);

$P(s'|s, a)$ – ймовірність переходу в стан (s') після виконання дії (a);

$R(s, a)$ – функція заохочення для обраної стратегії у грі;

γ – коефіцієнт дисконтування;

$V(s)$ – оптимальне значення функції виграшу в стані (s).

Врахування ймовірних дій противника на дії командира (начальника) відобразимо моделлю стохастичних ігор, в якій кожен командир намагається максимізувати свій «виграш» та

одночасно мінімізувати «виграш» противника наступним чином:

$$a^* = \arg \max_{a \in A} \min_{o \in O} \sum_{s'} P(s'|s, a, o) U(a, o, s') \quad (2)$$

де $O = \{o_1, o_2, \dots, o_k\}$ – множина ймовірних дій противника;

$U = \{a, o, \dots, s\}$ – функція виграшу для дії (a) у стані (s);

$P(s'|s, a, o)$ – ймовірність зміну стану (s') в залежності від дій командира та противника.

Адаптацію стратегії дій командира на основі розвідувальних даних відобразимо за допомогою *Баяєвської* моделі наступним чином:

$$P(o_i|E) = \frac{P(E|o_i)P(o_i)}{\sum_j P(E|o_j)P(o_j)}, \quad (3)$$

де $P(o_i|E)$ – ймовірність вибору противником стратегії (o_i) після отримання розвід.даних (E);

$P(E|o_i)$ – ймовірність отримання розвід.даних (E), у разі дій противником за стратегією (o_i).

Лінійне програмування забезпечення оптимального використання виділених ресурсів на виконання бойового завдання визначається вирішенням задачі:

$$\max \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (4)$$

за умов:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij}x_i \leq b_j, \forall j, \quad (5)$$

де x_i – обсяг ресурсу, виділеного на виконання завдання (i);

c_i – коефіцієнт ефективності виконання завдання;

a_{ij} – витрати ресурсу (j) на виконання завдання (i);

b_j – доступний обсяг ресурсу (j).

Метод Q-навчання дає змогу адаптуватися учасникам ВІ через симуляції змін у бойовій обстановці, з урахуванням набутого досвіду, визначається рівнянням:

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \left[R + \gamma \max_a Q(s, a) - Q(s, a) \right] \quad (6)$$

де $Q(s, a)$ – оцінювання ефективності виконання дії (a) у стані (s);

a – коефіцієнт швидкості навчання;

$\max_a Q(s, a)$ – найвигідніша стратегія у наступному стані.

Наведене вище комплексне моделювання зазначених методів забезпечує математичне моделювання сценаріїв бойових дій, що дозволяє оптимізувати процес навчання, прогнозування ефективності ухвалення рішень.

Аналіз підходів у воєнних іграх. Етичні аспекти військових симуляцій набувають все більшого значення у військовій освіті, особливо з огляду на використання настільних ігор, таких як This War of Mine та ін. Ця гра відтворює реалії життя цивільного населення в умовах війни та застосовується для формування професійних компетенцій військових керівників, сприяючи усвідомленню викликів, що виникають у збройних конфліктах. Аналіз сучасних досліджень підтверджує, що окрім розвитку когнітивних навичок, ВІ виконують важливу роль у стратегічному прогнозуванні та оцінюванні різних варіантів розвитку бойових дій. Ефективність їх застосування значною мірою залежить від коректного вибору моделі симуляції, що визначає рівень інформаційної відкритості, реалістичність відтворення ситуацій та обмеження, які накладені на учасників.

У науковій літературі розрізняють три основні підходи до військових симуляцій: *відкрита гра*, в якій передбачено повний доступ учасників до всієї наявної інформації та використовується для стратегічного планування; *закрита гра*, де інформація про оперативну обстановку обмежена, що моделює реальні умови військових операцій; та модель «*туману війни*» (англ. мовою – fog of war), яка додає елемент невизначеності та випадкових змін, імітуючи реалії бойового середовища, в якому військові приймають рішення на основі обмежених і часто суперечливих даних. Використання ВІ у військовій освіті покращує рівень професійної

підготовки офіцерів, та забезпечує комплексний підхід до оцінки бойових сценаріїв, інтегруючи етичні, тактичні, оперативні, стратегічні та ситуаційні аспекти ухвалення рішень [20].

Відкрита гра передбачає повну прозорість інформації між усіма учасниками. У такій моделі всі гравці мають доступ до загальних даних про стан противника, розташування військових та стратегічні наміри. Цей підхід є корисним у навчальних симуляціях, де необхідно розвивати стратегічне мислення та здатність довгострокового планування. Однак головним недоліком відкритої гри є те, що вона не відображає реальних умов бойових дій, де завершені рішення приймаються в умовах невизначеності.

Закрита гра характеризується обмеженим доступом до інформації. Кожна сторона володіє недостатньою інформацією, яка є доступною в межах її розвідувальних можливостей та тактичного спостереження. Ця модель наближена до реальних бойових умов, де команди приймає рішення на основі неповних або неточних даних. Закриті ігри часто використовують для оцінки ефективності військових операцій та тестування реакцій на несподівані зміни в сценарії.

Модель «*туману війни*» є найскладнішою та найреалістичнішою з боку військового моделювання. До неї входять елементи випадковості та обмеженої інформації, що імітує ефект невизначеності на полі бою. Учасникам не відома чисельність, наміри та розташування супротивника, а також можуть отримувати неповні розвідувальні дані. Ця модель використовується в професійних військових симуляціях, таких як (Joint Theater Level Simulation) та (Command: Modern Operations), що дає змогу аналізувати складні сценарії та перевіряти нудність ухвалення рішень у критичних ситуаціях. Вибір моделі оцінювання у ВІ залежить від цілей дослідження: *відкрита гра* підходить для стратегічного аналізу, *закрита гра* допомагає тестувати тактичні рішення в реалістичних умовах, а «*туман війни*» забезпечує найбільш достовірну імітацію реального бойового середовища. Інтеграція цих моделей у військові симуляції покращує процес планування, навчання військових фахівців. Тому, можна виокремити наступне: напрями розвитку воєнних симуляцій як інструменту стратегічного планування військових операцій, у контексті розширення партнерства України та НАТО є також пріоритетним завданням.

Враховуючи викладене, зазначимо, що розроблена модель може бути застосована до моделювання засвоєння навчального матеріалу та загальну адаптацію категорії, що навчається. Також може використовуватися для прогнозування поведінкових реакцій з урахуванням індивідуальних психологічних особливостей військовослужбовців. ВІ є ключовим елементом сучасної професійної

військової освіти, що дозволяє моделювати бойові сценарії, аналізувати оперативні рішення та вдосконалювати навички командного управління в умовах, максимально наближених до реальних.

Проаналізовані дослідження у сфері військових симуляцій підкреслюють важливість інтеграції наукового підходу та інноваційних технологій у навчальні процеси, що сприяє створенню адаптивних методик підготовки військовослужбовців та інших фахівців, які працюють у стресових умовах. Використання різних типів ВІ – від настільних стратегічних моделей до цифрових симуляторів та гібридних платформ – забезпечує комплексний підхід до навчання. *Настільні ігри* є ефективними у відпрацюванні аналітичного мислення, *комп'ютерні симуляції* забезпечують високий рівень деталізації та інтерактивності, а *комбіновані методи* інтегрують найкращі практики обох підходів.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Отже, у статті вперше розроблено математичну модель навчання військовослужбовців через «воєнні ігри», яка враховує всі рівні сприйняття та складові

під час підготовки військових фахівців, що є важливим елементом в умовах широкомасштабної збройної агресії російської федерації проти України. Розроблена модель відрізняється від аналогічних адаптивністю до змін в бойовому середовищі, що робить її гнучким інструментом, придатним для прогнозування поведінкових змін осіб, що навчаються. Запропонована блок-схема процесу сприйняття та засвоєння військовослужбовцями матеріалу воєнних ігор під час їх підготовки відображає послідовність рівнів сприйняття інформації військовими фахівцями.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розроблення моделі, що інтегрує нейропсихологічні дані осіб, які навчаються. Такий підхід сприятиме підвищенню рівня ефективності підготовки військових фахівців для Збройних Сил України. Подальший розвиток воєнних ігор може бути зосереджений на моделюванні складних тактичних ситуацій, підвищення рівня інтерактивності навчального середовища та адаптації симуляцій до умов сучасного бойового простору, що зробить їх актуальним інструментом у підготовці військових фахівців в Україні та в країнах НАТО.

Список бібліографічних посилань

1. Osborn W. A Quick Introduction to Kriegsspiel. *The Cove, Australian Army*. 2017. URL: <https://cove.army.gov.au/article/quickintroductionkriegsspiel> (accessed: 15.02.2025).
2. Caffrey M. B. Jr. «On Wargaming». *The Newport Papers*. 2019. № 43. URL: <https://digitalcommons.usnwc.edu/newport-papers/43> (accessed: 15.02.2025).
3. Enstad K. Professional Knowledge through Wargames and Exercises. *Scandinavian Journal of Military Studies*. 2022. Т. 5. № 1. С. 233–243. DOI: <https://doi.org/10.31374/sjms.130>.
4. Temby P. Using Computer Games for Military Training. *Conference Paper Defence Human Factors Special Interest Group*, 2005. DOI: 10.13140/RG.2.2.21789.59364.
5. McConnell R. A., Simões C. H. B., de Sousa R. M., da Silva T. C. A Wargaming Collaboration between U.S. and Brazilian Army Command and General Staff Colleges. *Military Review*, 2024. URL: <https://www.armyupress.army.mil/journals/militaryreview/online-exclusive/2024-ole/wargaming-the-laboratory-ofmilitary-planning/> (дата звернення: 15.02.2025).
6. Ryan M. Australia's Intellectual Edge for Conflict and Competition in the 21st Century. *Centre of Gravity Series*. 2019. № 48. Canberra: Center for Strategic and Defense Studies, Australian National University. URL: <https://sdsc.bellschool.anu.edu.au/ourpublications/centreofgravityseries> (accessed: 15.02.2025).
7. De Freitas S., Liarokapis F. Serious Games: A New Paradigm for Education? *Studies in Computational Intelligence*. 2011. Т. 1073. С. 9–23. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2161-9_2.
8. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 № 1556-VII. Київ: Верховна Рада України, 2014. 68 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18> (дата звернення: 10.01.2025).
9. Про освіту : Закон України від 05.09.2017 № 2145-VIII. Київ: Верховна Рада України, 2017. 42 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19> (дата звернення: 07.02.2025).
10. NATO STANAG 2519 – Standards for Interoperability of Military Simulations in Multinational Exercises. Brussels : NATO, 2016. 22 с. URL: <https://nso.nato.int>

- (дата звернення: 17.02.2025).
11. NATO AJP-3.2 – Joint Doctrine of Alliance Land Operations. – Brussels: NATO, 2015. 58 с. URL: <https://nso.nato.int> (дата звернення: 17.02.2025).
12. Концепція військової освіти в Україні : Наказ Міністерства оборони України від 04.11.2020 № 606. Київ: Міністерство оборони України, 2020. 32 с.
13. Про затвердження Порядку організації та проведення військового стажу, навчальної, виробничої, ремонтної, корабельної та інших видів практики курсантів та слухачів вищих військових навчальних закладів, військових навчальних підрозділів закладів вищої освіти та закладів фахової передвищої військової освіти : Наказ Міністерства оборони України від 12.01.2024 № 23. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0155-24> (дата звернення: 13.01.2025).
14. Paul C., Wong Y. H., Bartels E. M. Opportunities for Including the Information Environment in U.S. Marine Corps Wargames. – Santa Monica: RAND Corporation, 2020. URL: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2997 (accessed: 13.01.2025).
15. Про затвердження концепції розвитку військових симуляцій у ЗСУ : Наказ Міністерства оборони України від 21.03.2023 № 164. Київ: Міністерство оборони України, 2023. 18 с.
16. NATO AJP-3.9 – Allied Joint Doctrine for Joint Targeting. Edition B, Version 1. – Brussels: NATO Standardisation Office, 2021. URL: <https://nso.nato.int> (accessed: 17.02.2025).
17. Petropoulos F., Laporte G., Aktas E., Alumur S. A., Archetti C., Ayhan H. et al. Operational Research: methods and applications. *Journal of the Operational Research Society*. 2023. Т. 75. № 4. С. 423–617. DOI: <https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2253852>.
18. Pekař O., Šlouf V., Šotnar J., Potužák L., Havlík T. War Game as a Method of Training, as a Method of Analysis. *Proceedings of the 16th European Conference on Games-Based Learning*. – Brno: University of Defence, 2022. С. 651–654. DOI: 10.34190/ecgbl.16.1.656.
19. Nakonechnyi O., Petrov M., Sidorov A. et al. Predictive Estimates in Population Models with

Variable Dynamics Under Uncertainties. *Proceedings of CND CGS-2024, National Defence University*. – Kyiv, Ukraine, 2024. C. 312–320. URL: <https://forum.lka.lt/wpcontent/uploads/2024/09/ABSTRACTBOOKofthe4thINTERNATIONALCONFERENCECND CGS-2024.pdf> (accessed: 17.02.2025).

20. Tingstad A., Wong Y. H., Savitz S. How Can the Coast Guard Use Gaming? – Santa Monica: RAND Corporation, 2020. URL: <https://www.rand.org/pubs/perspectives/PEA148-1> (дата звернення: 17.02.2025).

MATHEMATICAL MODELLING OF THE USE OF WAR GAMES IN THE TRAINING OF MILITARY SPECIALISTS

VOITKO Oleksandr, candidate of military sciences, associate professor, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-4610-4476>

BAZARNYI Serhii, doctor of philosophy, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-9545-1960>

Formulation of the problem in general. In the context of large-scale armed aggression by the Russian Federation against Ukraine, the urgent task is to explore effective methods for preparing military specialists to address contemporary challenges and threats. The article examines the role of war games in the military education system and their impact on the training of military personnel. The study's primary goal is to develop a comprehensive mathematical model that formalises the process of using war games in military training based on an analysis and prediction of behavioural changes in decision-making.

Research methods. A comprehensive methodological approach was applied to achieve the set objective, incorporating mathematical modelling and empirical observation. The study employed methods of stochastic games, Markov decision processes, Bayesian updating, and Q-learning, which facilitated an in-depth analysis of the mathematical description of the military training process.

Analysis of recent research and publications. The historical development of war games was analysed, leading to their classification into tabletop, computer-based, and hybrid models used at various training levels to ensure interactivity and realism in the educational process. The study examines these models' features, advantages, and limitations and presents a block diagram illustrating a five-stage process for implementing war games in military training. This process covers cognitive, emotional, and behavioural learning levels. Additionally, approaches to modelling combat scenarios were explored, with particular attention given to applying operational research methods to optimise training. The study identifies regulatory directions for military simulations within the NATO-Ukraine partnership framework.

Elements of scientific novelty. The scientific novelty lies in the substantiated and described mathematical apparatus for modelling military personnel's perception of educational material through war games. The proposed mathematical model formalises decision-making and behavioural adaptation, integrating cognitive and operational factors to enhance training efficiency.

Theoretical and practical significance of the article. The research contributes to the theoretical foundation of military training by providing a structured methodology for implementing war games in professional education. Practically, the findings support the integration of war games as an effective tool for improving strategic decision-making skills among military officers. The proposed approach also emphasises the importance of adapting training methods to modern combat realities and regulatory frameworks.

Conclusion and the perspectives of future research. The study concludes that the combination of traditional and modern digital war game methods enhances the effectiveness of military commanders' training and improves strategic decision-making skills. Future research may focus on adapting military simulations to the realities of modern warfare, refining their classification, and improving existing training methodologies, tools, and techniques. The importance of incorporating advanced technologies, such as artificial intelligence, virtual reality, and augmented reality, is substantiated, as these innovations will further develop war game-based training models and enhance the preparation of military specialists.

Keywords: war games, military education, modelling, mathematical model, military specialists.

References

1. Osborn, W., (2017). *A Quick Introduction to Kriegsspiel*. The Cove, Australian Army, [online]. Available at: <https://cove.army.gov.au/article/quickintroductionkriegsspiel> [Accessed: 15 February 2025]. 2. Caffrey, M. B. Jr., (2019). *On Wargaming*. The Newport Papers, 43. Newport: Naval War College Press [online]. Available at: <https://digitalcommons.usnwc.edu/newport-papers/43> [Accessed: 15 February 2025]. 3. Enstad, K., (2022). Professional Knowledge through Wargames and Exercises.

Scandinavian Journal of Military Studies. 5(1), 233–243. DOI: <https://doi.org/10.31374/sjms.130>. 4. Temby, P., (2005). Using Computer Games for Military Training. In: *Proceedings of the Defence Human Factors Special Interest Group*, [online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/351353944_Using_Computer_Games_for_Military_Training [Accessed: 15 February 2025]. 5. McConnell, R. A., Simões, C. H. B., de Sousa, R. M., da Silva, T. C., (2024). A Wargaming Collaboration between the U.S. and Brazilian Army Command and General Staff Colleges. *Military Review*, [online]. Available at:

- <https://www.armyupress.army.mil/journals/militaryreview/online-exclusive/2024-ole/wargaming-thelaboratoryofmilitary-planning/> [Accessed: 15 February 2025].
- 6. Ryan, M.**, (2019). *Australia's Intellectual Edge for Conflict and Competition in the 21st Century*. Centre of Gravity Series, 48. Canberra: Centre for Strategic and Defence Studies, Australian National University, [online]. Available at: <https://sdsc.bellschool.anu.edu.au/our-publications/centreof-gravity-series>. [Accessed: 15 February 2025].
- 7. De Freitas, S., Liarokapis, F.**, (2011). Serious Games: A New Paradigm for Education? *Studies in Computational Intelligence*, 1073, 9–23. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2161-9_2.
- 8. About higher education** [online], (2014). Zakon Ukrainy № 1556-VII, 1 July. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18>. [Accessed: 10 January 2025].
- 9. About education** [online], (2017). Zakon Ukrainy № 2145-VIII, 5 September. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19>. [Accessed: 07 February 2025].
- 10. NATO** [online], (2016). *NATO STANAG 2519 – Standards for Interoperability of Military Simulations in Multinational Exercises*. Brussels: NATO. Available at: <https://nso.nato.int> [Accessed: 17 February 2025].
- 11. NATO** [online], (2015). *NATO AJP-3.2 – Joint Doctrine of Alliance Land Operations*. Brussels: NATO. Available at: <https://nso.nato.int> [Accessed: 17 February 2025].
- 12. Concept of Military Education in Ukraine** [online], (2020). Nakaz Ministerstva oborony Ukrainy № 606, 4 November.
- 13. On Approval of the Procedure for Organizing and Conducting Military Service, Training, Production, Repair, Shipboard and Other Types of Practice for Cadets and Students of Higher Military Educational Institutions, Military Training Units of Higher Education Institutions and Institutions of Professional Higher Military Education** Order of the Ministry of Defence of Ukraine [online], (2024). Nakaz Ministerstva oborony Ukrainy № 23, 12 January. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0155-24>. [Accessed: 13 January 2025].
- 14. Paul, C., Wong, Y. H., Bartels, E. M.**, (2020). *Opportunities for Including the Information Environment in U.S. Marine Corps Wargames*. Santa Monica: RAND Corporation, [online]. Available at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2997.html [Accessed: 13 January 2025].
- 15. Order of the Ministry of Defence of Ukraine** [online], (2023). Nakaz Ministerstva oborony Ukrainy № 164, 21 March. *On the Approval of the Concept for the Development of Military Simulations in the Armed Forces of Ukraine*. Kyiv: Ministry of Defence of Ukraine.
- 16. NATO AJP-3.9**, [online], (2021). *NATO AJP-3.9 – Allied Joint Doctrine for Joint Targeting. Edition B, Version 1*. Brussels: NATO Standardisation Office. Available at: <https://nso.nato.int>. [Accessed: 17 February 2025].
- 17. Petropoulos, F., Laporte, G., Aktas, E., Alumur, S. A., Archetti, C., Ayhan, H. et al.**, (2023). Operational Research: methods and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 75(4), pp. 423–617. DOI: <https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2253852>.
- 18. Pekař, O., Šlouf, V., Šotnar, J., Potužák, L., Havlík, T.**, (2022). War Game as a Method of Training, as a Method of Analysis. *Proceedings of the 16th European Conference on Games-Based Learning*. Brno: University of Defence, 651–654. DOI: 10.34190/ecgbl.16.1.656.
- 19. Nakonechnyi, O., Petrov, M., Sidorov, A. et al.**, (2024). Predictive Estimates in Population Models with Variable Dynamics Under Uncertainties. *Proceedings of CND CGS-2024, National Defence University*. Kyiv, Ukraine, pp. 312–320, [online]. Available at: <https://forum.lka.lt/wp-content/uploads/2024/09/ABSTRACT-BOOK-of-the-4th-INTERNATIONAL-CONFERENCE-CND CGS-2024.pdf> [Accessed: 17 February 2025].
- 20. Tingstad, A., Wong, Y. H., Savitz, S.**, (2020). *How Can the Coast Guard Use Gaming?* Santa Monica: RAND Corporation, [online]. Available at: <https://www.rand.org/pubs/perspectives/PEA148-1.html> [Accessed: 17 February 2025].

Рукопис надійшов до редакції	26.02.2025
Рукопис прийнято до друку після рецензування	04.03.2025
Дата публікації	30.04.2025