

УДК 623.4.05; 004.932.72

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.28-43>

Т.М. Стах¹, Р.І. Сідор¹, Д.Є. Хаустов¹, Я.Є. Хаустов¹, О.А. Киричук¹, В.Г. Мудрик²,
Ю.А. Настишин¹

¹ Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

² Національна академія Національної гвардії України, Харків

Article history: 10 February 2025; Revised 25 February 2025; Accepted 04 March 2025

УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ЖИВУЧОСТІ ЗРАЗКІВ БРОНЕТАНКОВОГО ОЗБРОЄННЯ І ТЕХНІКИ

Новітні виклики, пов'язані із появою ефективних високотехнологічних протитанкових засобів, вимагають удосконалення моделі живучості бронетанкового озброєння і техніки (БТОТ) для можливості застосування їх у сучасних бойових умовах. На сьогодні немає єдиного, затвердженого на рівні стандарту, підходу до кількісної оцінки живучості зразків БТОТ. Наявні в літературі моделі живучості відрізняються кількістю компонент, які визначають суть поняття живучості залежно від типу військової техніки та умов її застосування. Проведений аналіз літератури вказує на те, що до таких компонент живучості БТОТ відносять як мінімум такі: 1) скритність; 2) здатність усунути загрозу власними засобами; 3) захищеність; 4) відновлюваність; 5) мобільність; 6) стійкість до перекидання; 7) стійкість до спонтанних експлуатаційних пошкоджень чи власних дефектів. Для врахування внеску компонент живучості у загальний показник живучості БТОТ в роботі розроблено теоретичні основи їхньої класифікації як випадкових адитивних/мультиплікативних статистичних подій. Запропонований покроковий алгоритм класифікації компонент живучості як випадкових подій дає можливість визначити правило, за яким їхні ймовірності компонується у загальний показник живучості. У наявних інформаційних джерелах перераховані вище сім компонент живучості розглядаються у різних комбінаціях, однак одночасне врахування усіх семи компонент ще не проводилося. Крім того, не розробленим залишається алгоритм врахування нових компонент живучості, якщо такі виникнуть у перспективі. Робота присвячена розробці узагальненої моделі оцінки живучості з врахування семи відомих компонент живучості та з можливістю внесення нових компонент на основі класифікації компонент живучості як випадкових подій. Запропонована узагальнена модель живучості зразка розробляється у два етапи. Перший етап полягає у створенні базової моделі живучості, яка враховуватиме сім загальноприйнятих компонент. Те, що семикомпонентна модель є базовою, означає можливість врахування нових компонент живучості. На другому етапі розробки узагальненої моделі пропонуємо нову компоненту живучості, яку називаємо активністю загрози, та на її прикладі ілюструємо, як нові компоненти можуть надбудовуватися до базової моделі. Для кількісної оцінки ефективності моделі живучості та ефективності інноваційних заходів з підвищення конкретних компонент живучості запропоновано відповідні кількісні показники.

Ключові слова: живучість бронетанкового озброєння і техніки; експлуатаційна та бойова живучість військової техніки; компоненти живучості військової техніки; адитивні та мультиплікативні випадкові події і.

Аналіз відомостей з літератури та постановка проблеми

В ході широкомасштабного вторгнення росії в Україну та подій на полі бою на Сході та Півдні нашої держави очевидними стали факти, які свідчать про те, що технічний рівень зразків бронетанкового озброєння та техніки (БТОТ) Збройних Сил України (ЗСУ) суттєво дисонує із рівнем новітніх загроз від засобів їхнього ураження. Як наслідок, навіть найсучасніші зразки БТОТ світових виробників фізично та морально застаріли та практично

не здатні виконувати оперативно-тактичні завдання, які донедавна традиційно покладалися на них.

Завдяки їхній мобільності та бойовій моці танкові війська традиційно вважалися гарантом забезпечення поставлених перед сухопутною складовою Сил оборони завдань на різних театрах воєнних дій, проте аналіз сучасних способів ураження танків та розвитку протитанкових засобів [1–5] вказує на те, що потужний броньовий захист, який донедавна вважався визначальною компонентою його захищеності, а відтак і живучості, не в змозі ефективно протидіяти як відносно дороговартісним високотехнологічним

іноземним (Javelin) і вітчизняним (Стугна-П) переносним протитанковим комплексам, так і суттєво дешевшим, хоча і не менш високотехнологічним безпілотним літальним засобам ураження: дронам-бомберам; дронам-камікадзе, FPV-дронам (від англ. First Person View – вид від першої особи) тощо.

Сучасний досвід застосування БТОТ у воєнних діях на полях російсько-Української війни свідчить про те, що захищеність танка перестала бути домінантною компонентою його живучості [6]. Справді, якщо танк виявлено ворогом і він знаходиться у зоні досяжності протитанкових засобів, то власна захищеність танка практично, нівелюється сучасними засобами та способами ураження (рис. 1). Причому ураження відбувається протягом суттєво короткого проміжку часу – 3–5 хв., який, як правило, виявляється надто коротким для відбиття атаки системою активного захисту танка [7].

Як наслідок, замість класичного повноцінного використання танкових підрозділів як броньованого кулака частіше практикується використання окремих

танків чи їхніх невеликих груп як мобільних вогневих засобів, які ведуть вогонь за принципом самохідних артилерійських систем із спеціально обладнаних або природно існуючих укриттів, які і забезпечують їхню захищеність та скритність. Проте, коли бойові завдання вимагають від танків мобільності на полі бою з подоланням мінних перешкод та прориву переднього краю противника, то на передній план виходять дві інші компоненти живучості: скритність і здатність усунути загрозу власними засобами. У свою чергу, для того, щоб уникнути чи відвернути ураження від ворожого протитанкового засобу (ПТЗ) власними засобами, потрібно як мінімум виявити його, а як максимум – зібрати дані про загрозу як ціль та знешкодити її ще до того, як ворожий ПТЗ активується (здійснить постріл чи підрив). Фраза “знешкодити загрозу ще до того, як ворожий ПТЗ активується” у фізичних термінах означає, що час, необхідний для виявлення загрози як цілі, повинен бути меншим, ніж час, потрібний для здійснення пострілу чи підриву ворожим ПТЗ.



Рис. 1. Приклади сучасних протитанкових засобів ураження

Виходячи із особливості застосування БТОТ в сучасних бойових умовах, постає нагальна проблема щодо адекватності оцінки живучості існуючих та проєктованих зразків, яка необхідна для оптимального оперування способами їхнього використання в умовах виконання різноманітних бойових завдань.

Нижче (у пункті 1.1) проводимо аналіз сучасних підходів до кількісної оцінки живучості БТОТ. Проведений аналіз вказує на те, що наявні в літературі підходи є радше частковими рішеннями, тобто такими, що фокусуються на факторах, які в розглядуваних умовах бойового застосування техніки є визначальними, при цьому абстрагуючись від інших факторів, які для конкретного виду техніки в конкретних умовах застосування можуть вважатися

несуттєвими. Такі часткові підходи, звичайно, є виправданими, наприклад, при розгляді живучості броньованих транспортних засобів для виконання завдань з охорони державного кордону [8, 9], бойових броньованих машин (ББМ), у тому числі броньованих колісних машин (БКМ) [10–13], автомобільної техніки [14–16] у вузькоспеціалізованих місіях (логістики, патрулювання і тощо), а також при розгляді специфічних проблем – підвищення живучості ББМ за рахунок покращення їхньої захищеності з використанням систем виявлення електромагнітного випромінювання [17] чи за рахунок покращення їхнього протимінного захисту [18]. Часткові підходи до опису живучості також мали сенс у більш ранніх роботах, коли захищеність була

домінантною компонентою живучості БТОТ [19, 20]. Справді, за відсутності у ворога ПТЗ, здатних пробити броню при лобовій чи боковій атаках, без можливості атаки зверху та за низької ймовірності прямого влучання у рухомі елементи ходової частини (гусеницю чи колеса), ББМ, і насамперед танки, у багатьох випадках залишались би неушкодженими після ворожих пострілів, а відтак інші компоненти живучості, такі як скритність, здатність усунути загрозу штатним озброєнням та відновлюваність, могли вважатися неважливими. У таких випадках упродовж деякого періоду кількох десятків років аж до початку ХХІ століття, живучість БТОТ у бойових умовах резонно обмежувалась її захищеністю.

Натомість в умовах сучасних бойових реалій скритність та здатність усунути загрозу штатним озброєнням як складових компонент живучості БТОТ набувають не менш важливого, або найважливішого значення у порівнянні із традиційною компонентою живучості – захищеністю. На сьогодні в літературі немає узагальненої моделі, яка враховувала б внески від усіх загальноприйнятих компонент живучості БТОТ. Тому нижче (у пункті 1.2) формуємо теоретичні основи узагальненої моделі оцінки живучості БТОТ із врахуванням внесків семи загальноприйнятих компонент живучості: 1) скритності; 2) здатності усунути загрозу власними засобами; 3) захищеності; 4) відновлюваності; 5) мобільності; 6) стійкості до перекидання; 7) стійкості до спонтанних експлуатаційних пошкоджень та власних дефектів.

Мета роботи

Мета роботи полягає в аналізі сучасних концепцій живучості БТОТ, розробці теоретичних основ узагальненої моделі визначення індексу живучості БТОТ.

Виклад основного матеріалу

1.1. Сучасні підходи до кількісної оцінки живучості БТОТ. Рівень живучості бойових броньованих машин (ББМ) закладається ще на стадії їхнього проєктування. Тенденції розвитку концепцій проєктування ББМ розглянуто у роботах [21–27].

На сьогодні немає єдиного, затвердженого на рівні стандарту, підходу до кількісної оцінки живучості зразків БТОТ. Зокрема, в роботах [28, 29] проведення оцінки живучості зразків полягає у порівняльному аналізі тактико-технічних характеристик машин з комплексними показниками відповідних бойових властивостей військово-технічного рівня та оцінці їх за критеріями “ціна–якість”.

Запропонований у роботі [8] так званий “альтернативний” підхід до емпіричної оцінки живучості зразків транспортних засобів та бойових броньованих машин полягає в експертній оцінці їхньої

стійкості проти засобів виявлення та ураження противника. А саме, експертам пропонується заповнити анкети, виставивши оцінки властивостей зразка, що визначають його конструктивну живучість, серед яких захист корпусу від куль (стрілецької зброї, крупнокаліберних кулеметів), уламків гранат (проти-піхотних, мінометних) та ударних хвиль від них, корпусу і днища від мін (фугасних і осколкових), динамічний захист корпусу, а також захист від артилерійських боєприпасів калібру 122 мм. Крім того, експерти оцінюють захист від засобів виявлення противником, можливостей виявлення засобів ураження противника та їхнього ураження штатним озброєнням. Таким чином, за альтернативним підходом [8] живучість зразка оцінюється як стан таких її визначальних компонент – захищеності, здатності виявити загрозу та знищити її штатним озброєнням. Попри очевидне обмеження застосування до зразків на стадії їхнього проєктування та нових, які ще не є широко використовуваними на момент оцінки, а також суб’єктивний характер оцінки альтернативний метод [8] може бути корисним інструментом для оцінки живучості техніки, яка уже пройшла випробування воєнними діями, коли метою оцінки є розробка рекомендацій для покращення живучості зразка.

На базі альтернативного підходу [8] в роботі [9] розвинено методику підтримання живучості автомобільної та бронетанкової техніки і раціонального вибору зразка автомобільної чи бронетанкової техніки для комплектування підрозділів Державної прикордонної служби. Варто зазначити, що із врахуванням особливостей з таким же успіхом цей підхід може бути використаний для потреб інших підрозділів ЗСУ.

Найбільш адекватними, на нашу думку, є підходи до кількісного опису живучості бойових машин з врахуванням факторів, що її визначають. Фактори, які впливають на живучість ББМ, можна умовно поділити на дві групи. До однієї з них відносять ті, що зумовлюють експлуатаційні відмови (ЕВ) машини навіть в небойових умовах та фактори, що визначаються бойовими умовами (БУ), які бачають деструктивні, уражаючі дії противника. Такий підхід розглядається в роботі [11], де пропонується оцінювати живучість (Ж) машин імовірністю її збереженості (ЗБ)

$$P_{ЗБ} = P_{Ж} = 1 - P_{Е} , \quad (1)$$

Імовірність $P_{Е}$ відмови (Е) машини в [11] пропонується визначати як ймовірність настання хоча б однієї з подій експлуатаційних чи бойових відмов або одночасного настання їх обох [30]

$$P_{Е} = P_{ЕВ} + P_{ЕБ} - P_{ЕВ}P_{ЕБ} , \quad (2)$$

де $P_{ев}$ та $P_{бв}$ – ймовірності експлуатаційних та бойових відмов, відповідно. Переписавши вираз (2) у формі

$$P_e = 1 - (1 - P_{ев})(1 - P_{бв}), \quad (3)$$

підставимо його у вираз (1) і отримаємо ймовірність збереження машини, тобто її живучості з урахуванням ймовірностей експлуатаційних та бойових відмов у вигляді

$$P_{жс} = (1 - P_{ев})(1 - P_{бв}). \quad (4)$$

Зверніть увагу, що множники в дужках у виразі (4) – не що інше, як ймовірності експлуатаційної невідмови, тобто ймовірності експлуатаційної надійності, чи експлуатаційної живучості ($еж$)

$$P_{еж} = 1 - P_{ев} \quad (5)$$

та ймовірності бойової невідмови, бойової живучості ($бж$) в термінології [11]

$$P_{бж} = 1 - P_{бв}. \quad (6)$$

Підставивши вирази (5) та (6) у вирази (3) та (1), отримаємо ймовірність живучості машини з урахуванням експлуатаційних та бойових відмов у формі

$$P_{жс} = P_{еж} P_{бж}. \quad (7)$$

Вираз (7) вказує на те, що в рамках моделі [11] експлуатаційна та бойова компоненти живучості – незалежні події, які обов'язково повинні виникати одночасно для того, щоб живучість $P_{жс}$ з урахуванням обох компонент була ненульовою. Справді, якщо хоча б одна із двох компонент живучості зразка, експлуатаційна чи бойова, настільки низького рівня, що відповідні ймовірності у виразі (7) $P_{еж} = 0$ чи $P_{бж} = 0$, то живучість такого зразка $P_{жс} = 0$. Іншими словами, умова $P_{жс} \neq 0$ виконується тільки при виконанні обох умов $P_{еж} \neq 0$ та $P_{бж} \neq 0$ одночасно.

Подібно вираз (3) описує ймовірність відмови машини при настанні хоча б однієї із незалежних подій: експлуатаційної чи бойової відмови машини чи обох одночасно. Хоча подальший розгляд експлуатаційної живучості та бойової живучості в роботі [11] зведено до врахування специфічних особливостей БКМ та абстрагування від більш загального розгляду, який включав би і БТОТ, ці два

твердження про експлуатаційну та бойову компоненти живучості, які ґрунтуються на виразах (3) та (7), залишаються справедливими і в узагальненій моделі оцінки живучості з урахуванням різних компонент живучості у підрозділі статті (пункт 1.2).

Моделі бойової та експлуатаційної живучості. У [11] бойова живучість полягає в ймовірності неуразнення БКМ

$$P_{бжс}^{[11]} = \left(1 - \frac{P_{вл}}{N_{кр}}\right)^n, \quad (8)$$

в умовах, якщо противник здійснив n пострілів з ПТЗ, ймовірність влучення з якої у нашу машину дорівнює $P_{вл}$, а критична кількість влучень, необхідних для виведення нашої машини з працездатного стану, складає $N_{кр}$. Тут і надалі верхній індекс у квадратних дужках вказує на модель живучості, у якій отримано цей вираз для ймовірності (наприклад, у формулі (8) посилання на літературне джерело [11]). За своїм фізичним змістом величина $N_{кр}$ опосередковано визначає захищеність машини певного типу від певного типу зброї, але для дуже обмеженого набору практичних випадків. Такий підхід може бути корисним, наприклад, при використанні стрілецької зброї проти бойових колісних машин (БКМ), що є предметом розгляду у статтях [10–12].

Для використання стрілецької зброї проти БТОТ за визначеним підходом призведе до $N_{кр} \rightarrow \infty$, оскільки пробити броню танка, наприклад, стрілецькою зброєю неможливо жодною кількістю пострілів, тобто у цьому випадку із виразу (8) отримуємо екстремальне значення $P_{бжс}^{[11]} \Big|_{N_{кр} \rightarrow \infty} \rightarrow 1$. Якщо ж йдеться про використання ПТЗ проти БКМ, то $N_{кр} = 1$ і тоді один влучний постріл відповідає вірогідній події влучення з $P_{вл} = 1$ та означає нульову живучість БКМ $P_{бжс}^{[11]} \Big|_{N_{кр}=1, P_{вл}=1} = 0$ на відміну ПТЗ.

У [31] живучість ОВТ розглядається через ймовірність справного стану зразків ОВТ з урахуванням відмов, що виникли від вогневого впливу противника за можливості їхнього відновлення:

$$P_{бжс}^{[31]} = [1 - k_y (1 - k_{вдн})]^t, \quad (9)$$

де k_y – частка уражених зразків; $k_{вдн}$ – частка відновлених зразків; t – час ведення операції в одиницях діб.

З часів перших застосувань БТОТ, коли ПТЗ практично ще не було, і аж до недавнього часу підхід, при якому бойова живучість полягає в захищеності, не потребував альтернативи та залишався найбільш популярним, коли удосконалення системи захисту за рахунок динамічного та активного захисту ще дозволяло підтримувати ймовірність захисту від ураження ворожими ПТЗ ненульовою. В інформаційних джерелах існують численні моделі показника захищеності. Ранні класичні моделі [19, 20], які фокусуються на пасивному захисті за рахунок броні, стали базовими для врахування більш новітніх можливостей, як-от динамічний та активний захист [6, 32–34].

Експлуатаційну живучість в літературі прийнято характеризувати коефіцієнтом готовності. В [11] ймовірність експлуатаційної живучості, заданої виразом (5), називають коефіцієнтом K_{oe} оперативної готовності машини, який визначають як добуток стаціонарного коефіцієнта готовності

$$K_e = \frac{T_0}{T_0 + T_{вдн}}, \quad (10)$$

де T_0 – середній час безвідмовної роботи; $T_{вдн}$ – середній час на відновлення (вдн) після експлуатаційних відмов та часового фактора готовності, тобто ймовірності

$$P_T(t) = e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (11)$$

безвідмовної роботи протягом часу t за умови $T_{вдн} \ll T_0$, яка, у свою чергу, еквівалентна умові $K_e|_{T_{вдн} \ll T_0} \rightarrow 1$. Таким чином, коефіцієнт оперативної готовності машини за відсутності бойових дій набуває форми [11]

$$P_{еж}^{[11]} = K_{oe} = \frac{T_0}{T_0 + T_{вдн}} e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (12)$$

Дещо складніший вираз для експлуатаційної живучості, отриманий на основі рівнянь Колмогорова, наведено в роботі [31] з урахуванням коефіцієнта часу роботи зразків упродовж доби.

У роботі [15] живучість автомобільної техніки автор обмежує коефіцієнтом живучості як добутку ймовірності безвідмовної роботи ($P_{бвр}$) машини та ймовірності відновлення ($P_{вдн}$) боєздатного стану машини після виникнення відмовлення, тобто

$$P_{жс}^{[15]} = P_{бвр} P_{вдн}. \quad (13)$$

Однак такий вигляд виразу (13) для живучості зразка є суперечливим, бо передбачає, що при нульовій ймовірності відновлення живучість зразка

за моделлю [15] дорівнює нулю $P_{жс}^{[15]}|_{P_{вдн}=0} = 0, \forall P_{бвр}$

для будь-якого значення ($\forall P_{бвр}$) ймовірності безвідмовної роботи, навіть, якщо безвідмовна робота є вірогідною подією з ймовірністю, рівною $P_{бвр} = 1$, тобто із (13) випливає, що

$$P_{жс}^{[15]}|_{P_{вдн}=0, P_{бвр}=1} = 0. \quad (14)$$

Насправді, вірогідність безвідмовної роботи з $P_{бвр} = 1$ означає неможливість будь-яких, (відповідно до моделі [15]) як експлуатаційних, так і бойових критичних пошкоджень зразка. За умови вірогідності події відсутності пошкоджень живучість зразка є вірогідною подією для будь-яких значень ймовірності відновлення, у тому числі для $P_{вдн} = 0$, бо якщо пошкодження неможливі, то відновлюваність взагалі немає жодного значення. Тобто доходимо висновку, що для ймовірності живучості $P_{жс}$ повинна виконуватись умова

$$P_{жс}|_{P_{вдн}=0, P_{бвр}=1} = 1, \quad (15)$$

що суперечить виразу (14), який випливає із виразу (13).

У роботі [15] визначення ймовірності живучості зразка як добутку ймовірностей безвідмовної роботи та відновлення ґрунтується на твердженні, що ці події є незалежними. Однак це твердження є лише *необхідною умовою* справедливості виразу (13), але не є *достатньою*. Нижче у підрозділі 1.2.2 проведемо аналіз моделі [15] в рамках запропонованої нами парадигми мультиплікативності/адитивності подій і покажемо, що для того, щоб вираз (13) був справедливим *необхідно і достатньо*, щоб події безвідмовної роботи та відновлення машини були *мультиплікативними* між собою подіями, але, натомість, вони виявляються *адитивними*.

У роботі [13] для врахування як експлуатаційних, так і бойових властивостей зразка вводиться поняття комплексного показника боєздатності ($бзд$) бойових броньованих колісних машин

$$K_{бзд}^{[13]} = K_{над} K_{стійк} K_{зах} K_{озбр} K_{вдн}, \quad (16)$$

як добуток коефіцієнтів, що визначають надійність ($над$), стійкість ($стійк$) до перекидання, захищеність ($зах$), озброєність ($озбр$) та відновлюваність ($вдн$). Аналізуючи коефіцієнт боєздатності $K_{бзд}^{[13]}$, заданий виразом (16), доходимо висновку, що хоча множники-коефіцієнти у виразі (16) визначаються як відповідні ймовірності, за своїм фізичним змістом $K_{бзд}^{[13]}$ не є показником живучості. Справді, якщо коефіцієнти надійності та захищеності набувають максимального

значення $K_{nad} = 1$, $K_{zax} = 1$, то це означає, що жодні експлуатаційні відмови (несправності, дефекти) чи бойові ушкодження неможливі, а відтак, у такому випадку, відновлюваність взагалі не повинна мати значення навіть при $K_{вдн} = 0$. Натомість, із виразу

$$(16) \text{ випливає, що } K_{вдн}|_{K_{вдн}=0} = 0, \forall K_{вдн}, K_{zax}$$

навіть при $K_{nad} = 1$, $K_{zax} = 1$, що є очевидною суперечливістю, подібною до того, що обговорювалось у попередньому абзаці для моделі [15]. З іншого боку, якщо відновлюваність набуде максимального значення $K_{вдн} = 1$, то це означає, що зразок моментально відновлюється при виникненні будь-якої несправності чи при будь-якому ураженні, а тоді надійність і захищеність взагалі не повинні мати значення, навіть при $K_{nad} = 0$, $K_{zax} = 0$. Проблема полягає у тому, що, оскільки множники-коефіцієнти у виразі (16) є ймовірностями відповідних подій, то незалежність цих подій є лише *необхідною*, але не є *достатньою* умовою для того, щоб ймовірність результуючої події була добутком ймовірностей усіх п'яти компонент.

Серед ряду висновків стосовно визначення живучості у [15] зокрема зазначається, що через велику кількість випадкових факторів різної природи поняття живучості важко піддається кількісному опису єдиним показником. На нашу думку, у такій ситуації, прогресу можна досягнути, врахувавши, що фактори, які впливають на живучість, мають характер випадкових статистичних подій. У такому разі ці фактори можна прокласифікувати за їхніми визначальними ознаками так, як це прийнято у теорії ймовірностей, визначивши їх як залежні/незалежні, сумісні/несумісні, сприятливі/несприятливі події та такі, що можуть реалізуватися окремо чи мусять реалізуватися одночасно для настання результуючої події.

Саме такий класифікаційний підхід до кількісного опису живучості і лежить в основі запропонованої у статті моделі узагальненої оцінки живучості зразків БТОТ.

1.2. Модель узагальненої оцінки живучості зразків БТОТ.

1.2.1. Поняття про адитивні та мультиплікативні події.

Серед усіх можливих факторів як випадкових подій, які визначають живучість зразків БТОТ, виділимо дві незалежні сумісні множини G та H подій, які є наслідками їхніх складових (*внутрішніх компонент*) незалежних сумісних подій. При цьому незалежність подій, у тому числі, означає, що вони не є наслідками одна одної.

До множини G віднесемо події G_i (з $i = 1, 2 \dots n$) такі, що для виникнення події G достатньо, щоб

настала будь-яка із подій $G_i \in G$ (читається G_i з множини G), або якщо кілька подій G_i виникнуть у сукупності. Загальною важливою властивістю подій $G_i \in G$ є те, що вони є *сприятливими* для настання події G . Будь-яка подія G_i як внутрішня компонента множини G не обов'язково мусить бути елементарною подією; вона може бути наслідком інших подій $G_{ij} \in G_i$. Ймовірність настання події $G_i \in G$ позначатимемо відповідно P_i^G , а через P_{ij}^G , відповідно, позначатимемо ймовірність настання j -ї події $G_{ij} \in G_i \in G$, що необхідна для настання події G_i . Якщо події G_i вважатимемо сприятливими для настання події G , то протилежні їм, *несприятливі події*, позначатимемо $\bar{G}_i$ так, що їхньою сумою є вірогідна подія $\Omega = G_i + \bar{G}_i$ з ймовірністю $P^\Omega = P_i^G + \bar{P}_i^G = 1$.

Ймовірність настання події G визначається виразом [30]

$$P^G = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i^G). \quad (17)$$

Для двох сприятливих подій G_1 та G_2 матимемо $n=2$ і тоді вираз (17) набуде форма $P^G|_{n=2} = 1 - (1 - P_1^G)(1 - P_2^G)$ і після розкриття дужок може бути переписаний у вигляді

$$P^G|_{n=2} = P_1^G + P_2^G - P_1^G P_2^G. \quad (18)$$

Тут і далі по тексту позначення $X|_Y$ означає величину X за умови Y , тобто у виразі (18) символічний запис $P^G|_{n=2}$ читається як значення

P^G при $n=2$.

До множини H віднесемо незалежні, сумісні події H_l (з $l = 1, 2 \dots m$), такі, що для виникнення події H усі події $H_l \in H$ мусять виникати одночасно. Знову ж таки, важливо зазначити, що загальною властивістю подій $H_l \in H$ є те, що усі вони є *незалежними* між собою і *сприятливими* для настання події H . У такому разі ймовірність виникнення події H визначається виразом [30]

$$P^H = \prod_{l=1}^m P_l^H. \quad (19)$$

Для двох подій H_1 та H_2 матимемо $m = 2$ і тоді вираз (19) набуває форми

$$P^H \Big|_{m=2} = P_1^H P_2^H. \quad (20)$$

Відповідно до виразів (17), (18), з одного боку, та виразів (19), (20) – з іншого, події $G_i \in G$ називатимемо *адитивними*, а події $H_l \in H$ – *мультиплікативними*. Із виразу (17) видно, що ідентифікаційною особливістю події G є те, що для того, щоб вона стала *вірогідною* (також називають *достовірною*), з $P^G = 1$ достатньо, щоб хоча б одна із *адитивних* подій G_i стала *вірогідною* ($P_i^G = 1$), тобто

$$P^G \Big|_{P_i^G=1} = 1, \quad \forall i, \quad (21)$$

де символ $\forall$ означає для *будь-якого значення*.

Натомість ідентифікаційною особливістю події H є те, що вона стає *неможливою* з $P^H = 0$, як тільки одна із *мультиплікативних* подій H_l стає *неможливою* з $P_l^H = 0$, тобто

$$P^H \Big|_{P_l^H=0} = 0, \quad \forall l. \quad (22)$$

Правила (17) та (19), за якими враховуються внески ймовірностей P_i^G компонентних подій G_i у подію G та, відповідно, ймовірностей P_l^H компонентних подій H_l у подію H разом із умовами їхньої *сприятливості* (21) та (22) для настання відповідно подій G чи H є критеріями для того, щоб класифікувати певну компонентну подію як *адитивну* чи *мультиплікативну* відносно інших компонентних подій.

Стосовно сприятливості та несприятливості подій важливо зазначити наступне. Якщо, наприклад, подія $\bar{G}$ з ймовірністю настання $\bar{P}_i^G$ є несприятливою для настання події G , то її анти-подія $G_i = \Omega - \bar{G}_i$ з ймовірністю настання $P_i^G = 1 - \bar{P}_i^G$ є сприятливою для настання події G . Зрозуміло, що якщо подія G_i є антиподією для події $\bar{G}_i$, то так само як подія $\bar{G}_i$ є антиподією для G_i . Те саме стосується і подій та антиподій H_l та $\bar{H}_l$. Із виразів (9) та (11) випливає важливе твердження:

Теорема: Якщо події G_i є адитивними і сприятливими для події G , то їхні антиподії $\bar{G}_i$ є мультиплікативними для антиподії $\bar{G}$, і, навпаки, якщо події

H_l є сприятливими для події H і є мультиплікативними, то їхні антиподії $\bar{H}_l$ є адитивними для антиподії $\bar{H}$.

Доведення: Справді, із виразу (17) отримуємо

$$1 - P^G = \prod_{i=1}^n \bar{P}_{G_i}^G, \quad \text{звідки}$$

$$\bar{P}^G = \prod_{i=1}^n \bar{P}_{G_i}^G, \quad (23)$$

що і потрібно було довести. Подібно із виразу (11) маємо

$$\bar{P}^H = 1 - \prod_{l=1}^m (1 - \bar{P}_{H_l}^H), \quad (24)$$

що і потрібно було довести.

Сприятливі та несприятливі події називатимемо антиподними одна відносно одної. Для того, щоб події можна було розглядати за ознакою адитивності або мультиплікативності, вони не повинні бути антиподними. Наприклад, якщо подія K є сприятливою, а подія L – несприятливою для настання події M , то критерії адитивності або мультиплікативності слід застосовувати до подій K та антиподії $\bar{L} = \Omega - L$, або антиподії $\bar{K} = \Omega - K$ та події L для настання антиподії $\bar{M} = \Omega - M$.

Оскільки компоненти G_i та H_l подій G і H не обов'язково є елементарними, то вони, у свою чергу, можуть бути наслідками кількох інших подій G_{ij} чи H_{lk} . Не обов'язково, що компоненти G_{ij} події G_i є адитивними між собою. Те саме стосується і внутрішніх компонент H_{lk} події H_l . Внутрішні компоненти H_{lk} не обов'язково є мультиплікативними між собою. Оскільки компонент G_{ij} (чи H_{lk}) може бути більше, ніж дві, то розглядати їх за *адитивністю* або *мультиплікативністю*, зручніше попарно як це проведено в нашій попередній роботі [6] при розгляді внесків компонент бойової живучості у індекс S бойової живучості.

Понятійний апарат, введений в цьому підрозділі використаємо для кількісного опису живучості зразка БТОТ з урахуванням усіх семи (відомих на сьогодні) компонент живучості. А правила (17) та (19) разом з умовами (21) та (22) їхньої сприятливості використовуватимемо для класифікації внутрішніх компонент живучості як адитивних або мультиплікативних та сприятливих або несприятливих випадкових подій.

Схема класифікації компонент живучості. Для того, щоб встановити, за яким із правил адитивності (17) чи мультиплікативності (19) компонується відповідні їм ймовірності, необхідно провести класифікацію

компонент живучості за схемою, яку можна структурувати у формі трьох послідовних кроків:

Крок 1. Перевірка подій, що відповідають компонентам живучості на незалежність та сприятливість. Компонентні події, наслідком яких є живучість як подія, не повинні бути антиподними. Усі події повинні бути незалежними та сприятливими для результуючої події живучості. Умови незалежності та сприятливості компонентних подій є *необхідними* умовами для того, щоб їх можна було класифікувати як адитивні або мультиплікативні.

Незалежність компонентних подій означає, що їхні ймовірності не залежать одна від одної, що, у свою чергу, означає, що вони не є наслідками одна одної.

Компонентні події є сприятливими, якщо вони відповідають наступним критеріям, які впливають із виразів (17) та (19):

зростання ймовірностей компонентних подій приводить до зростання ймовірності результуючої події живучості;

одночасна вірогідність компонентних подій забезпечує вірогідність результуючої події.

Зауважимо, що обидва критерії сприятливості подій задовольняють як умові (21), так і умові (22). Якщо компонентна подія $\bar{L}$ виявиться *несприятливою* для живучості, то замість неї слід розглядати протилежну їй *сприятливу* подію $L = \Omega - \bar{L}$.

Крок 2. Класифікація компонентних подій живучості як адитивних або мультиплікативних.

Компонентні події є адитивними, якщо вірогідність кожної із компонентних подій (окремо або у сукупності з іншими подіями) забезпечує вірогідність результуючої події, тобто якщо вони задовольняють умові (21). Але, якщо, натомість, виконується умова (22), то компонентні події є мультиплікативними. Виконання умови (21) чи умови (22) є достатньою умовою для класифікації компонентних подій як адитивних чи мультиплікативних.

Крок 3. Визначення правила, за яким компонується ймовірності компонентних подій.

Ймовірність результуючої події живучості визначається за формулою (17), якщо компонентні події адитивні, або за правилом (19), якщо вони мультиплікативні між собою.

Застосування цих кроків до конкретних подій, які визначають живучість зразка БТОТ, проілюструємо нижче.

1.2.2. Класифікація компонент живучості як сприятливих / несприятливих адитивних / мультиплікативних випадкових подій. З аналізу моделі [15] живучість розглядається як результат двох сумісних незалежних подій *безвідмовної роботи* та *відновлення*. Для того, щоб встановити, за яким із правил (17) чи (19), компонуються відповідні їм ймовірності відповідно до Кроків 1–3, визначених

вище, проведемо аналіз цих подій на, сприятливість або несприятливість відносно результуючої події живучості, незалежність та адитивність або мультиплікативність одна відносно одної.

Відповідно до Кроку 1 перевіряємо компонентні події *безвідмовної роботи* та *відновлення* у моделі [15] на *незалежність* і *сприятливість*. Немає жодних підстав стверджувати, що події безвідмовної роботи та відновлення якимось чином залежать одна від одної чи є наслідками одна одної, а тому вони є *незалежними* подіями. Очевидно, що зростання значень ймовірностей обох подій, як *безвідмовної роботи* $P_{\text{обр}}$, так і *відновлення* $P_{\text{вдн}}$, приводить до

зростання значення ймовірності живучості $P_{\text{жс}}$. Якщо обидві події одночасно стають вірогідними з максимальними значеннями $P_{\text{обр}} = 1$ та $P_{\text{вдн}} = 1$, то результуюча подія живучості також стає вірогідною з максимальним значенням $P_{\text{жс}} = 1$. Таким чином, доходимо висновку, що події *безвідмовної роботи* та *відновлення* є *сприятливими* для результуючої події *живучості*, а, отже, до них можна застосувати наступний крок.

Відповідно до Кроку 2 класифікуємо компонентні події як адитивні чи мультиплікативні. Очевидно, що якщо ймовірність безвідмовної роботи $P_{\text{обр}} = 1$ за будь-яких (бойових та небойових) умов, то ймовірність виживання $P_{\text{жс}} = 1$ для будь-якого значення ймовірності відновлення максимальна і дорівнює 1 для будь-якого значення ймовірності відновлення.

Істинним є і твердження про те, що, якщо ймовірність відновлення $P_{\text{вдн}} = 1$ для будь-якого ушкодження (бойового чи небойового), то $P_{\text{жс}} = 1$. Таким чином, доходимо висновку

$$\begin{cases} P_{\text{жс}}|_{P_{\text{обр}}=1} = 1, \forall P_{\text{вдн}}; \\ P_{\text{жс}}|_{P_{\text{вдн}}=1} = 1, \forall P_{\text{обр}} \end{cases}, \quad (25)$$

що, у свою чергу, означає, що якщо хоча б одна із двох подій *безвідмовної роботи* та *відновлення* чи обидві одразу є вірогідною подією, то як наслідок живучість стає вірогідною подією. Поведінка ймовірностей компонентних подій, що задовольняє умові (25), відповідає критерію (21), який дозволяє класифікувати компонентні події *безвідмовної роботи* та *відновлення* як *адитивні*.

Оскільки компонентні події є *адитивними*, то у Кроці 3 відповідні їм ймовірності компонуються за правилом (17), що для випадку двох подій зводиться

до вигляду (18). Таким чином, доходимо висновку, що живучість зразка БТОТ визначається через компонентні події *безвідмовної роботи* та *відновлення* за виразом

$$P_{жс} = P_{обр} + P_{вдн} - P_{обр}P_{вдн}, \quad (26)$$

а не за виразом (13), як це стверджується в роботі [15].

Компоненти живучості. На сьогодні немає єдиноприйнятого стандарту, який би визначав перелік складових факторів (компонент), що визначають суть поняття живучості зразка БТОТ. Кількість і суть компонент, які враховуються у різних роботах, різний і визначається типом зразка БТОТ та умовами його застосування.

Проведений нами аналіз літератури вказує на те, що до таких компонент живучості БТОТ відносять як мінімум такі: 1) скритність; 2) здатність усунути загрозу власними засобами; 3) захищеність; 4) відновлюваність; 5) мобільність; 6) стійкість до перекидання та 7) стійкість до спонтанних експлуатаційних пошкоджень чи власних дефектів. Важливо зазначити, що перераховані вище сім компонент у наявних інформаційних джерелах розглядаються у різних комбінаціях між собою, однак одночасне врахування усіх семи компонент ще не проводилося. Крім того, не розробленим залишається алгоритм врахування нових компонент живучості, якщо такі з'являться у перспективі. Розробці узагальненої моделі оцінки живучості з врахуванням усіх семи відомих компонент живучості та з можливістю внесення нових компонент і присвячена ця робота.

Запропонована узагальнена модель живучості зразка БТОТ розробляється у два етапи. Перший етап полягає у створенні базової моделі живучості, яка враховуватиме сім компонент (модель $Z^{(7)}$).

Те, що модель $Z^{(7)}$ є базовою, означає можливість врахування нових компонент живучості. На другому етапі розробки узагальненої моделі пропонуємо нову компоненту живучості, яку називатимемо *активністю загрози* та на її прикладі проілюструємо, як нові компоненти можуть надбудовуватися до базової моделі. Оновлену восьмикомпонентну модель відповідно позначатимемо $Z^{(8)}$.

Усі сім перерахованих вище властивостей зразка БТОТ як компонент його живучості є незалежними сумісними подіями. Подію виживання (здатності виконувати штатні функції) БТОТ в умовах деструктивних дій противника (на полі бою) будемо називати *бойовою живучістю*. Подію збереження штатних функцій БТОТ за відсутності дій противника будемо називати *експлуатаційною живучістю*.

Перші чотири з вищеперерахованих семи компонент: 1) скритність; 2) здатність усунути загрозу власними засобами; 3) захищеність; 4) відновлюваність є протидією діям противника, а тому є компонентами *бойової живучості (бж)*. Інші три – 5) мобільність; 6) стійкість до перекидання; 7) стійкість до спонтанних експлуатаційних пошкоджень та власних дефектів – конструкційні властивості, які характеризують зразок БТОТ, у тому числі, за відсутності дій з боку противника, а тому визначають *експлуатаційну живучість (еж)* зразка. Відповідне поняття, яке враховує бойову та експлуатаційну компоненти живучості, тобто усі сім компонент із можливістю врахування нових компонент, називатимемо *узагальненою живучістю*.

Семикомпонентна модель живучості. Очевидно, що експлуатаційна та бойова живучості є мультиплікативними подіями, бо для того, щоб БТОТ могли виконувати свої штатні функції на полі бою, обидві складові – бойова та експлуатаційна компоненти живучості – повинні одночасно реалізуватися з ненульовими ймовірностями. Справді, якщо ймовірність реалізації експлуатаційної живучості зразка дорівнює нулю, то ймовірність виживання такого зразка в бойових умовах, очевидно, дорівнює нулю. З іншого боку, навіть якщо експлуатаційна живучість була б вірогідною подією, то нульове значення ймовірності бойової живучості не залишає шансів для виживання такого зразка в умовах активного бою. Саме до такого висновку приводить вираз (7), що і дозволяє, враховуючи вирази (19), (20), класифікувати експлуатаційну та бойову компоненти живучості як мультиплікативні події одна відносно одної. Для зручності позначимо індекс експлуатаційної живучості через E , індекс бойової живучості – через S , а індекс узагальненої живучості, яка включає сім вищеперерахованих компонент (4 – бойові та 3 – експлуатаційні) через $Z^{(7)}$ так, що

$$Z^{(7)} = ES. \quad (27)$$

Індекс експлуатаційної живучості. У виразі (26) індекс експлуатації живучості E – це ймовірність збереження штатних функцій зразка БТОТ в небойових умовах. В рамках моделі [11] ймовірність збереження штатних функцій зразка БТОТ визначається виразом (12). Надійність та ефективність техніки – це окрема галузь технічних наук, яка має потужну теоретичну базу, що розпочала свій розвиток в рамках схемотехніки [35], але очікувано вийшла далеко за її межі і зараз активно поширюється на усі технічні засоби [36], у тому числі, озброєння і військову техніку (ОВТ) [37], загалом і транспортних засобів у бойових умовах, зокрема [10]. Надійність та ефективність БТОТ з врахуванням їхніх

специфічних особливостей, у тому числі з огляду на новітні засоби ураження, потребує подальшого розвитку теоретичної бази та практичних рекомендацій.

Індекс бойової живучості. В роботі [6] ми показали, що бойова живучість БТОТ визначається чотирма компонентами (1–4) за виразом

$$S = 1 - \prod_{i=1}^{n=4} (1 - P_i^S), \quad (28)$$

де P_1^S – індекс (ймовірність) скритності зразка БТОТ; P_2^S – індекс (ймовірність) уразливості загрози; P_3^S – індекс (ймовірність) захищеності зразка БТОТ; P_4^S – індекс (ймовірність) відновлюваності зразка БТОТ; S – індекс бойової живучості зразка БТОТ. Порівнюючи вирази (17) та (28), доходимо висновку, що події 1–4 є адитивними між собою. Справді, по-перше, якщо б зразок БТОТ мав індекс скритності $P_1^S = 1$, тобто скритність зразка відповідала б вірогідній події, то це означало б, що його неможливо помітити, Непомітний зразок неможливо уразити, а відтак його бойова живучість максимальна $S|_{P_1=1} = 1$. По-друге, якщо б наш зразок був оснащений озброєнням, яке б забезпечувало йому стовідсоткове ураження загрози за будь-яких умов ще до атаки ворожого ПТЗ, то це відповідало б умові $S|_{P_2=1} = 1$. По-третє, якщо б наш зразок мав захист, який неможливо пробити жодним наявним у ворога засобом, то це відповідало б значенню $S|_{P_3=1} = 1$. І, по-четверте, ідеальний гіпотетичний випадок моментального відновлення зразка БТОТ після будь-якого ураження відповідав би значенню $S|_{P_4=1} = 1$. Кожна із цих чотирьох умов максимальних значень $P_i^S = 1$ індексів компонент живучості окремо чи в сукупності з іншими означає максимальну бойову живучість зразка. Тому відповідно до виразу (28) маємо

$$S|_{P_i=1} = 1; \quad \forall i = 1, 2, 3, 4 \quad (29)$$

Відповідно до виразу (21) виконання умови (29) підтверджує, що події 1–4 як внутрішні компоненти бойової живучості є між собою адитивними подіями. Важливо пам'ятати при цьому, що усі події 1–4 є незалежними між собою і сприятливими для бойової живучості.

Враховуючи те, що індекси E та S є ймовірностями подій, які не обов'язково є елементарними,

а включають у себе інші компонентні події, наслідками яких вони є, важливо зазначити, що вираз (27) має характер відкритого коду щодо врахування інших нових компонент, які необхідно буде врахувати. Про одну із таких компонент, якої немає у переліку загальноприйнятих семи компонент, перерахованих вище, і про те, як цю 8-му компоненту врахувати в узагальненій живучості $Z^{(8)}$, буде йтися нижче. Тому будемо називати вираз (27) базовою семикомпонентною моделлю $Z^{(7)}$ узагальненої живучості БТОТ, а величину $Z^{(N)}$ – індексом узагальненої (N-компонентної) живучості. У виразі (27) значення $N = 7$ у позначенні $Z^{(7)}$ вказує, що ця модель враховує сім компонент живучості. Відповідно у моделі, яка враховуватиме ще одну 8-му компоненту, позначатимемо індекс узагальненої живучості через $Z^{(8)}$.

Індекс активності загрози. Важливо зазначити, що усі чотири компоненти бойової живучості, а саме: 1) скритність; 2) здатність усунути загрозу власними засобами; 3) захищеність; 4) відновлюваність, передбачають, що загроза для нашого зразка БТОТ бути ураженим уже існує. Іншими словами, вважається, що загроза ураження з боку противника, за замовчуванням є вірогідною подією. Однак, загроза ураження може вважатися вірогідною подією тільки за умови, якщо ворожий ПТЗ здатний стати активною загрозою. Мовою теорії ймовірностей це означає, що активність загрози є випадковою подією, незалежною від семи вищеперахованих компонент живучості та сумісною з ними. Серед чинників, які можуть стати на заваді активності загрози, можна назвати як мінімум такі: ворожий ПТЗ є: а) ураженим нашими засобами; б) зіпсованим внаслідок експлуатаційних дефектів, а тому має обмежені вогневі можливості; якщо ворожий ПТЗ – це БПЛА, то його активація суттєво залежить від стану сигналу управління ним, що не пов'язано із заходами РЕБ з нашого боку, а є наслідком власне експлуатаційних чи бойових проблем БПЛА (низький заряд батарей приймача чи передавача, фізичні перешкоди для роботи оператора тощо); в) наш зразок знаходиться поза зоною вогневої досяжності ворожим ПТЗ; г) ворожий ПТЗ має обмежені можливості прицілювання внаслідок природних чинників і таке інше.

Оскільки подія активації ворожого ПТЗ є випадковою подією з певною ймовірністю її настання, то індекс активності загрози $\bar{A}$ визначатимемо як ймовірність її активації з урахуванням відповідних чинників. Оскільки компонента активності загрози

виникає лише у бойових умовах, то її можна було б розглядати як складову бойової живучості. Однак, слід зауважити, що усі компоненти 1–4 бойової живучості, які визначають індекс бойової живучості S , відповідають матеріальним властивостям нашого зразка БТОТ, у той час як індекс активності загрози $\bar{A}$ ніяк не залежить від стану нашого зразка, а натомість є матеріальною властивістю ворожого ПТЗ. Тому компоненту активності загрози слід розглядати як незалежну подію, сумісну з бойовою живучістю нашого зразка.

Восьмикомпонентна модель живучості. Для того, щоб врахувати цю додаткову компоненту активності загрози у базовій моделі (27), слід встановити, якою є подія, що відповідає компоненті $\bar{A}$: сприятливою/несприятливою стосовно живучості нашого зразка та адитивною або мультиплікативною стосовно інших компонент живучості. Очевидно, що на відміну від компонент E та S реалізація компоненти $\bar{A}$ є несприятливою подією для живучості $Z^{(8)}$. Саме тому цю компоненту позначаємо буквою з ризикою над нею. У такому разі, для того, щоб продовжити розгляд щодо адитивності або мультиплікативності відносно компонент E та S , які є сприятливими для подій $Z^{(7)}$ та $Z^{(8)}$, замість несприятливої події $\bar{A}$ слід розглядати її антипод $A = \Omega - \bar{A}$, яка за своїм фізичним змістом є подією *неактивності* ворожого ПТЗ. Очевидно, що, якщо ймовірність неактивності загрози $p_A = 1$, то живучість нашого зразка з урахуванням восьмої компоненти $\bar{A}$ активності загрози є вірогідною подією, тобто

$$Z^{(8)} \Big|_{p_A=1} = 1. \quad (30)$$

Вираз (30) відповідає умові (21), яка визначає адитивність подій. Таким чином, доходимо висновку, що подія A є адитивною стосовно події $Z^{(7)}$. У такому разі відповідно до виразу (18) для двох адитивних подій $Z^{(7)}$ та A маємо

$$Z^{(8)} = Z^{(7)} + A - AZ^{(7)}, \quad (31)$$

що можна переписати у формі

$$Z^{(8)} = 1 - (1 - A)(1 - Z^{(7)}), \quad (32)$$

а відтак у формі

$$Z^{(8)} = 1 - \bar{A}(1 - Z^{(7)}). \quad (33)$$

Підстановка виразу (27) у вираз (33) приводить до виразу

$$Z^{(8)} = 1 - \bar{A}(1 - ES). \quad (34)$$

Підставивши вираз (16) у вираз (22), отримуємо

$$Z^{(8)} = 1 - \bar{A} \left(1 - E \left(1 - \prod_{i=1}^{n=4} (1 - P_i) \right) \right). \quad (35)$$

Вираз (35) визначає індекс живучості зразка БТОТ у восьмикомпонентній моделі.

Ефективність удосконалення моделі живучості. У загальному випадку ефективність удосконалення моделі живучості за рахунок врахування нових компонент можна обчислювати як

$$\delta Z = \frac{|Z^{(N)} - Z^{(N-\delta N)}|}{Z^{(N-\delta N)}} \times 100\%, \quad (36)$$

де $Z^{(N)}$ – індекс живучості зразка БТОТ в рамках удосконаленої N -компонентної моделі живучості, а $Z^{(N-\delta N)}$ – індекс живучості цього ж зразка за попередньою моделлю із меншою на величину δN кількістю врахованих компонент живучості.

Із виразу (35) видно, що у випадку, коли індекс активності загрози $\bar{A} \rightarrow 1$, то восьмикомпонентна модель $Z^{(8)}$ зводиться до семикомпонентної моделі, тобто

$$Z^{(8)} \Big|_{\bar{A} \rightarrow 1} \rightarrow Z^{(7)}. \quad (37)$$

Ефективність заходів з підвищення живучості можна визначити за формулою

$$\eta^{(N)} = \frac{Z_y^{(N)} - Z_0^{(N)}}{Z_0^{(N)}} \times 100\%, \quad (38)$$

де $Z_0^{(N)}$ – індекс живучості до моменту здійснення даних заходів для підвищення живучості; $Z_y^{(N)}$ – індекс живучості після здійснення даних заходів для підвищення живучості. Зрозуміло, що заходи для підвищення живучості спрямовані не безпосередньо на живучість як таку, а на конкретну компоненту живучості. Шляхи підвищення живучості БТОТ в умовах сучасного бою будуть предметом нашої наступної публікації, в якій на конкретних прикладах проведемо чисельну оцінку ефективності удосконалення моделі живучості та інноваційних заходів для підвищення конкретних компонент живучості.

Висновки

Аналіз світових воєнних конфліктів протягом останніх десятиліть свідчить про те, що зразки бронетанкового озброєння і техніки, особливо танки, які за своїм призначенням мали б відігравати роль щита та броньованого кулака для основних підрозділів армій світу, із розвитком сучасних підходів, способів та засобів ураження, самі стають вкрай вразливими і слабозахищеними, що врешті-решт призводить до багатовартісних втрат, насамперед як серед особового складу, так і зразків в цілому. Таким чином, моделі їхньої живучості потребують удосконалення з огляду на сучасний стан засобів ураження.

Аналіз літератури вказує, що загальноприйнятими можна вважати як мінімум сім компонент живучості БТОТ: 1) скритність; 2) здатність усунути загрозу власними засобами; 3) захищеність; 4) відновлюваність; 5) мобільність; 6) стійкість до перекидання; 7) стійкість до спонтанних експлуатаційних пошкоджень чи власних дефектів. На сьогодні в літературі немає узагальненої моделі, яка враховувала б внески усіх загальноприйнятих компонент живучості БТОТ. У наявних інформаційних джерелах кількість та суть компонент, які враховуються у різних роботах, різні і визначаються типом зразка БТОТ та умовами його застосування так, що перераховані вище сім компонент живучості розглядаються у різних комбінаціях, однак одночасне врахування усіх семи компонент ще не проводилося. До того ж, нерозробленим залишається алгоритм врахування нових компонент живучості, якщо такі з'являться у перспективі.

Для розроблення алгоритму врахування внесків компонент живучості у кількісний показник живучості БТОТ у роботі розроблено теоретичні основи їхньої класифікації як випадкових адитивних чи мультиплікативних статистичних подій. Запропонований покроковий алгоритм класифікації компонент живучості як випадкових подій дає можливість визначити правило, за яким компонується їхні ймовірності у загальний показник живучості. На конкретних прикладах проілюстровано, як класифікувати загальноприйняті компоненти живучості за їхнім внеском у кількісний показник живучості. Розроблений алгоритм класифікації компонент живучості дає можливість не тільки перевірити справедливості уже існуючих виразів для кількісного показника живучості, а й визначити, за яким правилом слід компонувати нові компоненти живучості.

Запропонований теоретичний підхід у роботі використано для розробки узагальненої моделі оцінки живучості БТОТ з урахування семи відомих

компонент живучості. Показано, що загальноприйняті сім компонент живучості можна згрупувати у дві більш загальні компоненти, які відповідають експлуатаційній та бойовій компонентам живучості. До бойової живучості віднесено чотири компоненти: 1) скритність; 2) здатність усунути загрозу власними засобами; 3) захищеність; 4) відновлюваність. Три інші компоненти – 5) мобільність; 6) стійкість до перекидання; 7) стійкість до спонтанних експлуатаційних пошкоджень чи власних дефектів – формують експлуатаційну компоненту живучості. Використовуючи запропонований алгоритм класифікації компонент живучості, обґрунтовано, що експлуатаційна та бойова компоненти живучості класифікуються як незалежні, сприятливі, *мультиплікативні* випадкові події, а тому узагальнений індекс живучості БТОТ з урахуванням обох компонент є добутком ймовірностей їхньої одночасної реалізації. У свою чергу внутрішні компоненти 1–4 бойової живучості класифіковано як незалежні, сприятливі, *адитивні* випадкові події, що й визначає правило, за яким ймовірності їхньої реалізації компонуються у індекс бойової живучості. Внутрішні компоненти 5–7 експлуатаційної живучості ґрунтовно вивчалися у рамках напрямку технічних наук, який називають "надійністю та ефективністю техніки". Аналіз внутрішніх компонент експлуатаційної живучості як адитивних/мультиплікативних подій потребує окремої уваги і буде предметом розгляду у наших наступних публікаціях.

Розроблена в цій роботі семикомпонентна модель живучості БТОТ є базовою моделлю для врахування нових компонент живучості, які можуть виникнути у процесі розвитку БТОТ та засобів їхнього ураження. На прикладі нової компоненти живучості, яку називаємо "активністю загрози", ілюструємо: як нові компоненти можуть надбудовуватися до базової семикомпонентної моделі, таким чином трансформуючи семикомпонентну модель у восьмикомпонентну модель живучості БТОТ. Для кількісної оцінки ефективності моделі живучості та ефективності інноваційних заходів на підвищення ефективності конкретних компонент живучості запропоновано відповідні кількісні показники.

Список літератури

1. Греков В. П., П'янков А. А., Ткаченко Ю. А. Підхід до обґрунтування параметрів бойового оснащення боеприпасів, що використовуються для ураження броньованих цілей з активним захистом. *Системи озброєння і військова техніка*. № 1, 2016. С. 118–120.
2. Чепков І. Б., Мосійчук С. Я., Коленніков А. П., Лапицький С. В. Аналіз існуючих засобів захисту від керованих артилерійських снарядів. 2018. Київ. 56 с.

3. Чирак М. Шляхи підвищення бойових спроможностей військових частин за рахунок оптимізації застосування ударних БпЛА. *Повітряна міць України*, № 1 (6), 2024. С. 99–104.
4. Оленів В. М., Гончарук А. А., Шлапак В. О., Дідик В. О., Оленів М. В. Визначення перспективного складу системи ураження (стрілецька зброя, засоби ближнього бою) у складі комплексів бойового екіпірування військовослужбовців підрозділів військової розвідки Збройних Сил України. *Збірник наукових праць Військової академії. Технічні науки*. № 2, м. Одеса, 2018. С. 42–48.
5. Голуб В. А., Хома В. В., Курбан В. А., Седов С. Г. Щодо визначення концепції побудови системи озброєння для потреб Збройних Сил України. *Наука і оборона*, № 3, 2019. С. 31–35.
6. Стах Т. М., Баган В. Р., Киричук О. А., та ін. Тема закрыта. *Військово-технічний збірник*. № 31 (т). НАСВ. Львів. 2024. С. 97–118.
7. Гість Підсумків на Мілітарному. M1A1 Abrams в Україні, як показали себе Leopard 1A5, найкращі БМП у війні. URL: <https://www.patreon.com/posts/m1a1-abrams-v-u-104919412?l=it> та www.youtube.com/live/1fjn2U6ZHQs (дата звернення 10.12.2024).
8. Сівак В. А. Альтернативний підхід до оцінки живучості зразків транспортних засобів та бойових броньованих машин. *Озброєння та військова техніка*. № 11 (3), 2016. С. 30–34.
9. Сівак В., Кулик П. Окремі аспекти методики підтримання живучості автомобільної та бронетанкової техніки при експлуатації в особливих умовах. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки*, № 2(80), 2019. С. 336–346.
10. Кудімов С. А., Табуненко В. О. Методика визначення рівня бойової живучості броньованих колісних машин при виконанні підрозділами національної гвардії України завдань за призначенням. *Системи управління, навігації та зв'язку*, випуск 2 (64), 2021. С. 34–38.
11. Кайдалов Р. О., Біленко О. І., Кудімов С. А. Показники та критерії бойової живучості броньованих колісних машин. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Вип. 2 (40), 2022. С. 35–42.
12. Р. О. Кайдалов, О. І. Біленко, С. А. Кудімов. Методика забезпечення заданого рівня бойової живучості броньованих колісних машин ISSN 2409-7470. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Вип. 1 (41), 2023. 71 с.
13. Кудімов С. А., Дем'янишин В. М., Літвінов О. В., Шабатура С. О. Підхід до визначення показника боєздатності бойових броньованих колісних машин. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Вип. 2(42), 2023. С. 52–57.
14. Ковба М. В., Рій В. Б. Обґрунтування технічних рішень щодо підвищення живучості автомобільної техніки Збройних Сил України. *Системи управління, навігації та зв'язку*, вип. 1, 2020. С. 54–59.
15. Купін С. П. Математична модель визначення показника живучості автомобільної техніки при веденні бойових дій. *Young Scientist* № 4 (128), 2024. С. 125–129.
16. Дунь С. В., Кайдалов Р. О. Підвищення рівня захисту автомобілів КраЗ з метою забезпечення виконання логістичних, патрульних, миротворчих та бойових функцій. *Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: збірник тез VI науково-практичної конференції (Харків, 9 квітня 2015 р.)*. Харків, 2015. С. 96–97.
17. Глебов В. В. Основные проблемы и направления развития защиты боевых бронированных машин с использованием систем обнаружения электромагнитного излучения. *Механіка та машинобудування*. № 2, 2012. С. 84–98.
18. Бронемашины с усиленной противоминной защитой: URL: <http://www.militaryinformer.narod.ru/MRAP-text.html> (дата звернення: 10.01.2023).
19. Танки (основы теории, конструкции и боевой эффективности): учебн., кн. 1, под ред. О.А. Лосика. М.: ВА БТВ, 1983. 568 с.
20. Теория и конструкция танка, под. ред. П. П. Исакова, т. 10, книга 2. Комплексная защита. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
21. Куприненко О. Н., Голуб В. А. Синтез вариантов проектных гипотез технического облика перспективных типов боевых бронированных машин. *Військово-технічний збірник* Львів:АСВ № 2 (9), 2013. С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.9.2013.36-42>
22. Куприненко О. Н., Голуб В. А. Выбор рационального варианта проектной гипотезы технического облика перспективных типов боевых бронированных машин. *Системи озброєння і військова техніка*. № 3 (35), 2013. С. 24–28.
23. Кузнецов Ю. Основные направления развития боевых колесных машин зарубежных стран. *Зарубежное военное обозрение*. № 4, 2013. С. 46–51.
24. Куприненко О. М. Обґрунтування принципів формування перспективних типів бойових броньованих машин. *Системи озброєння і військова техніка*. № 4 (32), 2012. С. 40–46.
25. Бісик С. П., Бойко Г. О. Деякі дані сучасного стану й тенденцій розвитку колісних бойових броньованих машин. *Озброєння та військова техніка*. № 3 (3), 2014. С. 20–24.
26. Elwell A. Global armoured vehicles market report 2013. URL: <http://www.defenceiq.com/armouredvehicles/articles/summary-of-global-armoured-vehicle-market-report-2> (дата звернення: 12.01.2023).
27. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хоменко В. П. Дослідження конструктивних особливостей та тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин типу MRAP. URL: <https://www.ukrmilitary.com/2018/05/mrap.html> (дата звернення: 12.01.2023).
28. Кузнецов Ю. С. Применение методов сравнительного анализа для оценки бронированных машин [Текст]. *Зарубежное военное обозрение*. № 4, 2013. С. 46–51.
29. Субчев Н. И. Повышение живучести пронируемых боевых машин легкой категории [Текст]. *Вооруженные силы и военно-промышленный потенциал*. ВИНТИ. № 9, 2004. С. 30–48.
30. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва. Наука, 1973. 832 с.

31. Рій В. Б. Комплексна методика прогнозування втрат зразків озброєння та військової техніки в операціях. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. № 3, 2020. С. 25–29.

32. Кривизюк Л. П., Юрчук О. О. Танки і танкові війська: вчора, сьогодні, завтра. Монографія. Львів: Ліга Нова, 2014. 362 с.

33. Армія США терміново захистила танки M1 Abrams комплексом активного захисту Trophy. Defense Express. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/armiya_ssha_terminovo_zahistila_tanki_m1_abrams_kompleksom_aktivnogo_zahistu_trophy-2547.html (дата звернення: 24.11.2023).

34. Перспективные разработки. Сталь и огонь: современные и перспективные танки. URL: <http://btvt.info/2futureprojects/2futureprojects.htm> (дата звернення: 24.11.2023).

35. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Ред. совет: В. С. Авдеевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1986.

36. Надежность в технике: Справочник в 10 т. Ред. совет: В. С. Авдеевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1992.

37. Москалец С. В., Жирний В. А., Кузін С. Є., Рудик А. В. Оцінювання надійності військової техніки при обмеженій кількості зразків. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Вип. 2(4), 2020. С. 75–82.

References

1. Grekov V. P., Pyankov A. A. and Tkachenko Y. A. (2016), "Pidkhd do jbruntuvannia parametriv bojovogo osnashchennia boieprupasiv, shcho vukorustovuietsia dlia uragennia broniovanykh tcileii z aktivnym zakhustom" [An Approach to Substantiating the Parameters of Combat Equipment of Ammunition Used to Defeat Armoured Targets with Active Protection]. *Weapons systems and military equipment*. № 1. pp. 118–120. [in Ukrainian]
2. Chepkov I. B., Mosiychuk S. Y., Kolennikov A. P. and Lapitskyi S. V. (2018), "Analiz isnuichykh zasobiv zakhystu vid kerovanykh artyleriiskykh snariadiv" [Analysis of existing means of protection against guided artillery shells]. Kyiv. 56 p. [in Ukrainian]
3. Chirak M. (2024), "Shliakhy pidvyshchennia spromozhnosti viiskovykh chastun za rakhunok optymizatsii zastosuvannia udarnukh BpLA" [Ways to improve the combat capabilities of military units by optimising the use of strike UAVs]. *Air Power of Ukraine*, 1(6). Pp. 99–104. [in Ukrainian]
4. Olenev V. M., Goncharuk A. A., Shlapak V. O., Didyk V. O. and Olenev M. V. (2018), "Vyznachennia perspektynogo skladu systemy uragennia (striletska zbroia, zasoby blygniogo boiu) u skladi kompleksiv boiovogo ekipiruvannia viiskovoslugbovtiv pidrozdiliv viiskovoi rozvidky Zbroinykh syl Ukrainy" [Determination of the prospective composition of the destruction system (small arms, melee weapons) as part of the combat equipment of military personnel of the military intelligence units of the Armed Forces of Ukraine]. *Collection of scientific works of*

the Military Academy. Technical Sciences. № 2, Odesa. pp. 42–48. [in Ukrainian]

5. Golub, V.A., Khoma V.V., Kurban V.A. and Sedov S.G. (2019), "Shchodo vyznachennia kontseptsii pobudovy systemy ozbroennia dlia potreb Zbroinykh syl Ukrainy" [On determining the concept of building a weapons system for the needs of the Armed Forces of Ukraine]. *Science and Defence*, № 3. pp. 31–35. [in Ukrainian]

6. Stakh T. M., Bagan V. R., Kirichuk O. A., et al. (2024), "Tema zakryta" [The topic is closed]. *Military and technical collection*. № 31 (т). NAA. Lviv. pp. 97–118. [in Ukrainian]

7. Guest of the Results on Militarnyi TV channel. M1A1 Abrams in Ukraine, as Leopard 1A5s have proven to be the best IFVs in the war. <https://www.patreon.com/posts/m1a1-abrams-v-u-104919412?l=it> and www.youtube.com/live/1fjn2U6ZHQs (accessed 10.12.2024).

8. Sivak V. A. (2016), "Alternatyvnyi pidkhd do otsinky zhyvuchosti zrazkiv transportnykh zasobiv ta bojovykh broniovanykh mashyn" [An alternative approach to assessing the survivability of vehicle and armoured combat vehicle samples]. *Arms and military equipment*. № 11 (3). pp. 30–34. [in Ukrainian]

9. Sivak V. and Kulyk P. (2019), "Okremi aspekty metodyky pidtrymannia zhyvuchosti avtomobilnoi ta bronetankovoi takhnyky pry ekspluatatsii v osoblyvykh umovakh" [Some aspects of the methodology for maintaining the survivability of automotive and armoured vehicles during operation in special conditions]. *Collection of scientific works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine*. Series: Military and Technical Sciences, No. 2(80). Pp. 336–346. [in Ukrainian]

10. Kudimov and V. Tabunenko (2021), "Metodyka vyznachennia rivnia bojovoi zhyvuchosti bronyovanykh mashyn pry vykonanni pidrozdilamy natsionalnoi gvardii Ukrainy zavdan za pryznachenniam" [Methodology for determining the level of combat survivability of armoured wheeled vehicles in the performance of assigned tasks by units of the National Guard of Ukraine]. *Control, navigation and communication systems*. Issue 2 (64). pp. 34–38. [in Ukrainian]

11. (2022), "Pokaznyky ta kryterii bojovoi zhyvuchosti broniovanykh kolisnykh mashyn" [Indicators and criteria of combat survivability of armoured wheeled vehicles]. *Collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*. Issue 2 (40). pp. 35–42. [in Ukrainian]

12. Kaidalov R. O., Bilenko O. I. and Kudimov S. A. (2023), "Metodyka zabezpechennia zadanogo rivnia bojovoi zhyvuchosti broniovanykh kolisnykh mashyn" [Methodology for ensuring a given level of combat survivability of armoured wheeled vehicles ISSN 2409-7470]. *Collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*. Issue 1 (41). 71 p. [in Ukrainian]

13. Kudimov S. A., Demianyshyn V. M., Litvinov O. V. and Shabatura S. O. (2023), "Pidkhd do vyznachennia pokaznyka boezdatnosti bojovoi zhyvuchosti broniovanykh kolisnykh mashyn" [An approach to determining the combat capability of armoured wheeled combat vehicles]. *Collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*. Issue 2 (42). pp. 52–57. [in Ukrainian]

14. Kovba M. V. and Riy V. B. (2020), "Obgruntuvannya takhnichnykh rishen shchodo pidvyshchennia zhyvuchosti avtomobilnoi tekhniki Zbroinykh Syl Ukrainy" [Substantiation of technical solutions to increase the survivability of automotive vehicles of the Armed Forces of Ukraine]. *Control, navigation and communication systems*. Issue 1. pp. 54–59. [in Ukrainian]
15. Kupin S. P. (2024), "Matematychna model vyznachennia pokaznyka zhyvuchosti avtomobilnoi tekhniki pry vedenni bojovykh dii" [Mathematical model for determining the survivability of automotive vehicles in combat operations]. *Young Scientist*. No. 4 (128). pp. 125–129. [in Ukrainian]
16. Dun S. V. and Kaidalov R. O. (2015), "Pidvyshchennia rivnia zakhystu avtomobiliv KrAZ z metoiu zabezpechennia vykonannia logistychnykh, patrylnykh, myrotvorchykh ta bojovykh funktsii" [Increasing the level of protection of KrAZ vehicles in order to ensure the performance of logistics, patrol, peacekeeping and combat functions]. *Scientific support of service and combat activities of the National Guard of Ukraine: collection of abstracts of the VI scientific and practical conference* (Kharkiv, 9 April 2015). Kharkiv. pp. 96–97. [in Ukrainian]
17. Glebov V. V. (2012), "Osnovnye problemy y napravleniia razvitiia boevykh bronirovanykh mashyn s ispolzovaniem system obnaruzheniia elektromagnitnogo izlucheniia" [Main problems and directions of development of protection of armoured combat vehicles using electromagnetic radiation detection systems]. *Mechanics and engineering*. № 2. pp. 84–98. [in Russian]
18. "Bronemashyny s usilennoi protivominnoi zashchitoi" [Armoured vehicles with enhanced mine protection]: URL: <http://www.militaryinformer.narod.ru/MRAP-text.html> (accessed 10.01.2023). [in Russian]
19. (1983), "Tanky (osnovy teorii konstruktivnoi y bovoi efektyvnosti)" [Tanks (basics of theory, design and combat effectiveness)]: textbook, book 1 / edited by Losik O.A. Moscow: VA BTV. 568 p. [in Russian]
20. (1990), "Teoriia y konstruktivna tanka" [Tank Theory and Construction]: textbook, vol. 10, book 2 / edited by Isakova P. P.. Complex protection. Moscow: Mashinostroenie. 208 p. [in Russian]
21. Kuprinenko O. N. and Golub V.A. (2013), "Syntez variantov proektnykh hipotez tekhnicheskogo oblyka boevykh bronirovanykh mashyn" [Synthesis of variants of design hypotheses of the technical appearance of advanced types of armoured combat vehicles]. *Military-Technical Collection*. NAA; Lviv. No. 2 (9), 2013. pp. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.9.2013.36-42> [in Russian]
22. Kuprinenko O. N. and Golub V.A. (2013), "Vybor ratsionalnogo varianta proektnoi hipotezy tekhnicheskogo oblyka perspektyvnykh typov boevykh bronirovanykh mashyn" [Selection of a rational variant of the design hypothesis of the technical appearance of advanced types of armoured combat vehicles]. *Systems of weapons and military equipment*. № 3 (35). pp. 24–28. [in Russian]
23. Kuznetsov Y. (2013), "Osnovnye napravleniia razvitiia boevykh kolesnykh mashyn zarubezhnykh stran" [Main directions of development of combat wheeled vehicles of foreign countries]. *Foreign Military Review*. no. 4. pp. 46–51. [in Russian]
24. Kuprinenko O. M. (2012), "Obhryntuvannya pryntsyviv formuvannia perapektyvnykh typiv boevykh bronirovanykh mashyn" [Substantiation of the principles of formation of advanced types of armoured combat vehicles]. *Systems of weapons and military equipment*. № 4 (32). pp. 40–46. [in Ukrainian]
25. Bisys S.P. and Bojko G.O. (2014), "Deiaky dani suchasnogo stany ii tendentsii rozvytku kolisnykh boiovykh bronirovanykh mashyn" [Some data on the current state and trends in the development of wheeled armoured combat vehicles]. *Arms and military equipment*. № 3 (3). pp. 20–24. [in Ukrainian]
26. Elwell A. (2013), Global armoured vehicles market report 2013. URL: <http://www.defenceiq.com/armouredvehicles/articles/summary-of-global-armoured-vehicle-market-report-2> (accessed 12.01.2023).
27. Grubel M. G., Kraynik L. V. and Khomenko V. P. (2018), "Doslidzhennia konstruktyvnykh osoblyvosti ta taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk boiovykh bronirovanykh mashyn. typu MRAP" [Research of design features and tactical and technical characteristics of armoured combat vehicles of the MRAP type]. URL: <https://www.ukrmilitary.com/2018/05/mrap.html> (accessed 12.01.2023). [in Ukrainian]
28. Kuznetsov Y. S. (2013), "Prymenenye metodov sravnytel'nogo analiza dlia otsenky bronirovanykh mashyn" [Application of methods of comparative analysis for the assessment of armoured vehicles]. *Foreign Military Review*. № 4. pp. 46–51. [in Russian]
29. Subchev N. I. (2004), "Povysheniye zhyvuchesti bronirovanykh boevykh mashyn legkoi kategoryy" [Increasing the survivability of armoured combat vehicles of light category]. *Armed Forces and Military-Industrial Potential*. NO. 9. pp. 30–48. [in Russian]
30. Korn G. and Korn T. (1973), "Spravochnik po matematyke dlia nauchnykh rabotnikov y inzhenerov" [Handbook of Mathematics for Researchers and Engineers]. Moscow. Nauka. 832 p. [in Russian]
31. Riy V. B. (2020), "Kompleksna metodyka prognozuvannia vtrat zrazkiv ozbroennia ta viiskovoi tekhniki v operatsiiakh" [Integrated methodology for predicting the loss of weapons and military equipment in operations]. Collection of scientific works of Kharkiv National University of the Air Force. № 3. pp. 25–29. [in Ukrainian]
32. Krivzyuk L. P. and Yurchuk O. O. (2014), "Tanky i tankovi viiska: vchera, siogodni, zavtra" [Tanks and Tank Troops: Yesterday, Today, Tomorrow]. Monograph Lviv: Liga Nova. 362 p. [in Ukrainian]
33. "Armia USA terminovo zakhystyla tanky M1 Abrams kompleksom aktyvnogo zakhystu Trophy" [US Army urgently protects M1 Abrams tanks with Trophy active protection system]. *Defence Express*. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/armija_ssha_terminovo_zahistyla_tanki_m1_abrams_kompleksom_aktivnogo_zahistu_trophy-2547.html (accessed 24.11.2023). [in Ukrainian]
34. "Perspektyvnye razrabotky, Stal y ogon: sovremennyye y perspektyvnye tanky" [Promising developments. Steel and fire: modern and promising tanks]. URL: <http://btvt.info/2futureprojects/2futureprojects.htm> (accessed 24.11.2023). [in Russian]

35. (1986), "Nadiezhnost y efektyvnost v tekhnike: Spravochnik v 10 t." [Reliability and efficiency in technology: Handbook in 10 vols]. / edited by Avduevsky V.S. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian]

36. (1992), "Nadiezhnost y efektyvnost v tekhnike: Spravochnik v 10 t." [Reliability in engineering: A reference book in 10 vols]: / edited by Avduevsky V.S. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian]

37. Moskalets S. V., Zhirnyi V. A., Kuzin S. E. and Rudik A. V. (2020), "Otsinyivannia nadiinosti viiskovoi tekhniki pry обмежені кількості зразків" [Evaluation of the reliability of military equipment with a limited number of samples]. Collection of scientific papers of the State Research Institute for Testing and Certification of Arms and Military Equipment. Issue No. 2 (4). pp. 75–82. [in Ukrainian]

GENERALISED SURVIVABILITY MODEL FOR ARMoured WEAPONS AND EQUIPMENT

T. Stakh, R. Sidor, D. Khaystov, Ya. Khaystov, O. Kyrychuk, V. Mudryk, Yu. Nastishin

Today, there is no single, standardized approach to quantifying the survivability of BTOT samples. The survivability models available in the literature differ in the number of components that define the essence of the concept of survivability, depending on the type of military equipment and conditions of its use. The analysis of the literature shows that the following components of the survivability of BTOT include at least the following: 1) secrecy, 2) ability to eliminate the threat by own means, 3) security, 4) recoverability, 5) mobility, 6) resistance to overturning, 7) resistance to spontaneous operational damage or own defects. In order to take into account, the contribution of survivability components to the overall survivability of BTOT, the paper develops the theoretical basis for their classification as random additive/multiplicative statistical events. The proposed step-by-step algorithm for classifying survivability components as random events makes it possible to determine the rule by which their probabilities are combined into the overall survivability indicator. In the available information sources, the above seven components of survivability are considered in various combinations, but the simultaneous consideration of all seven components has not yet been carried out. Moreover, an algorithm for taking into account new components of resilience, if any, remains to be developed. This paper is devoted to the development of a generalized model for assessing durability, taking into account the seven known durability components and with the possibility of introducing new components based on the classification of durability components as random events. The proposed generalized model of sample survivability is developed in two stages. The first stage is to create a basic survivability model that takes into account the seven generally accepted components. At the second stage of developing the generalized model, we propose a new survivability component, which we call threat activity, and use its example to illustrate how new components can be added to the basic model. To quantify the effectiveness of the resilience model and the efficiency of innovative measures to improve specific resilience components, we propose appropriate quantitative indicators.

Keywords: survivability of armoured weapons and equipment; operational and combat survivability of military equipment; components of military equipment survivability; additive and multiplicative random events.

УДК 623.546

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.43-50>

V. Hrabchak, A. Kosovtsov, V. Hrabchak

Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv

Article history: 04 March 2025; Revised 04 March 2025; Accepted 04 March 2025

IDENTIFICATION OF NONLINEAR AERODYNAMIC PROJECTILE COEFFICIENTS BASED ON A MODIFIED POINT MASS TRAJECTORY MODEL

To increase calculation of projectile flight trajectories effectiveness based on mathematical models which describe the spatial movement of the projectile in the air, a pressing question it is relevant to determine individual aerodynamic projectile coefficients with specified accuracy. The construction of modern mathematical models of projectile flight is based on an approximate approach which is called the small-angle approximation. According to this approach, the aerodynamic coefficients are expanded in a Taylor series in terms of the angle of attack and only the linear terms of the expansion are retained, which allows to significantly simplify the mathematical models of the projectile's flight, but considerably worsens the accuracy of calculating its flight trajectories. The most suitable for determining the aerodynamic coefficients of a projectile is a modified point mass trajectory model, as a mathematical model of projectile flight (STANAG 4355 (Edition 3)). The article presents procedures for converting a modified point mass trajectory model into a system of differential-algebraic equations provided in the real form, which, given the appropriate set of linear and nonlinear aerodynamic coefficients, allows calculating the main parameters of the projectile's flight with less computational resources. Analytical expressions were obtained for identifying the aerodynamic coefficients of the drag force, lift force, Magnus force, decreasing of the projectile's