

**О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО, Р. В. ПРОТАСОВ, І. О. КИРИЧЕНКО,
М. В. МАТЮШЕНКО, С. В. АНДРІЄНКО**

РАЦІОНАЛЬНА ТРАНСМІСІЯ ВІЙСЬКОВОЇ КОЛІСНОЇ МАШИНИ: ВІД ІДЕЇ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ

У статті розглянуто інженерні тенденції проєктування озброєння і військової техніки, які засвідчили істотне зростання ролі високотехнологічних систем та інноваційних підходів до їх створення. Зокрема, значний вплив на розвиток військової техніки мають технології штучного інтелекту, робототехніки, нових матеріалів та енергетичних систем, що формують нові вимоги до характеристик технічних засобів. У результаті встановлено, що ефективність функціонування сучасних зразків військової техніки значною мірою визначається рівнем науково проєктування їх основних систем. Аналіз структури та номенклатури бойової броньованої техніки, що використовується Збройними силами України, показав значну частку колісних бойових машин у загальному спектрі озброєння. При цьому колісні платформи охоплюють повністю класи MRAP і броньованих автомобілів та займають істотну частку в інших класах військової техніки. Така тенденція зумовлена їхньою високою мобільністю, відносно нижчою вартістю експлуатації та широкими можливостями застосування у різних типах бойових завдань. Вказано, що досягнення необхідних показників рухомості, маневреності, прохідності та енергоефективності бойових колісних машин значною мірою залежить від ефективності функціонування їх трансмісійних систем. Сучасні механічні ступінчасті трансмісії характеризуються складною структурою, значною кількістю параметрів проєктування та системою технічних обмежень. У результаті обґрунтовано доцільність використання системного підходу до визначення раціональних параметрів трансмісійних систем. Процес раціонального проєктування механічних ступінчастих трансмісій характеризується наявністю великої кількості змінних параметрів, числових та функціональних обмежень, а також декількох критеріїв оцінювання ефективності. У таких умовах задача оптимізації набуває багатоекстремального та нелінійного характеру, що ускладнює застосування класичних детермінованих методів оптимізації. Крім того, взаємозв'язок між окремими параметрами системи може формувати суперечливі вимоги до конструктивних рішень. Показано, що ефективним інструментом розв'язання складних задач оптимального проєктування можуть бути стохастичні та метаевристичні алгоритми, які забезпечують глобальний пошук у складному просторі можливих рішень. Їх використання дає змогу враховувати випадковості, уникати «застрягання» у локальних екстремумах та забезпечувати робастність процесу раціонального проєктування. Завдяки поєднанню стратегій глобального та локального пошуку такі алгоритми здатні формувати раціональні параметричні розв'язки навіть за наявності складної системи обмежень. Це дає підстави розглядати метаевристичні алгоритми як перспективний «механізм» раціонального проєктування комплексу елементів механічних ступінчастих трансмісій колісних бронемашин.

Ключові слова: трансмісія, раціональне проєктування, стохастичні алгоритми, метаевристичні алгоритми

O. BONDARENKO, O. USTYENKO, R. PROTASOV, I. KYRYCHENKO, M. MATYUSHENKO, S. ANDRIENKO

RATIONAL TRANSMISSION OF A MILITARY WHEELED VEHICLE: FROM CONCEPT TO IMPLEMENTATION

The article examines engineering trends in the design of weapons and military equipment that demonstrate a significant increase in the role of high-technology systems and innovative approaches to their development. In particular, the development of military equipment is strongly influenced by artificial intelligence technologies, robotics, new materials, and energy systems, which form new requirements for the characteristics of technical systems. As a result, it has been established that the effectiveness of the functioning of modern models of military equipment is largely determined by the level of scientific design of their main systems. An analysis of the structure and nomenclature of armored combat vehicles used by the Armed Forces of Ukraine has shown a significant share of wheeled combat vehicles in the overall spectrum of armament. At the same time, wheeled platforms fully cover the classes of MRAP vehicles and armored cars and occupy a substantial share in other classes of military equipment. This trend is driven by their high mobility, relatively lower operating costs, and wide possibilities of application in various types of combat tasks. It is indicated that the achievement of the required indicators of mobility, maneuverability, cross-country ability, and energy efficiency of combat wheeled vehicles largely depends on the efficiency of the functioning of their transmission systems. Modern mechanical stepped transmissions are characterized by a complex structure, a large number of design parameters, and a system of technical constraints. As a result, the expediency of using a systems approach to determine the rational parameters of transmission systems has been substantiated. The process of rational design of mechanical stepped transmissions is characterized by the presence of a large number of variable parameters, numerical and functional constraints, as well as several criteria for evaluating efficiency. Under such conditions, the optimization problem acquires a multi-extremal and nonlinear character, which complicates the application of classical deterministic optimization methods. In addition, the interrelation between individual system parameters may generate conflicting requirements for design solutions. It is shown that stochastic and metaheuristic algorithms can be an effective tool for solving complex problems of optimal design, as they provide a global search in a complex space of possible solutions. Their use makes it possible to account for randomness, avoid “stagnation” in local extrema, and ensure the robustness of the rational design process. Due to the combination of global and local search strategies, such algorithms are capable of forming rational parametric solutions even in the presence of a complex system of constraints. This provides grounds for considering metaheuristic algorithms as a promising “mechanism” for the rational design of mechanical stepped transmission systems of wheeled armored vehicles.

Keywords: transmission, rational design, stochastic algorithms, metaheuristic algorithms

Вступ. Актуальність задачі. Сьогоденний етап розвитку технологій і наукових досліджень створює складні інженерні виклики, що обумовлені стрімким зростанням вимог до ефективності, надійності та адаптивності технічних систем. З одного боку, підвищується складність конструкцій через інтеграцію багатофункціональних елементів, збільшення енергетичної насиченості та застосування нових матеріалів. З іншого боку, обмежені виробничі ресурси, висока динаміка зовнішніх умов та постійна мінливість середовища експлуатації накладають додаткові обмеження на проєктування і експлуатацію технічних систем.

Особливо гостро ці проблеми проявляються у військовій сфері. Інженерні рішення повинні враховувати широкий спектр параметрів – від динамічних навантажень та кінематичних властивостей до технологічності виробництва і ремонтпридатності, універсальності та адаптивності як самих систем, так і підходів до їх проєктування.

Серед ключових проблем сучасності також слід виділити когнітивні конфлікти, які виникають при проєктуванні складних технічних об'єктів. Напри-

© О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, Р. В. Протасов,
І. О. Кириченко, М. В. Матюшенко, С. В. Андрієнко, 2026

клад, підвищення потужності двигуна супроводжується збільшенням маси, що негативно впливає на маневреність; посилення броньового захисту може обмежувати мобільність і енергетичну ефективність. Подібні компромісні співвідношення вимагають системного підходу та застосування передових методів аналізу і проєктування, які дають змогу досягти раціонального балансу між технічними характеристиками.

В умовах таких складних взаємозв'язків сучасне інженерне проєктування все частіше спирається на адаптивні, стохастичні та метаевристичні методи. Використання таких підходів дає змогу забезпечити гнучкість, робастність та глобальний пошук оптимальних розв'язків, враховувати випадкові фактори та мінливість зовнішніх умов. Таким чином, інженерні виклики сучасності формують необхідність інтеграції наукових досліджень, інколи кардинально різних сфер, комп'ютерного моделювання та аналітичних методів у процес проєктування високотехнологічних технічних систем.

Основна частина. Сучасність відзначається раптовим зростанням збройних конфліктів, у яких керівництво збройних сил країн стикається з потребою ведення бойових дій проти регулярних та іррегулярних озброєних формувань.

Міжнародне геополітичне середовище та природа конфліктів різко трансформуються під впливом наукових та технологічних інновацій. Сучасні та революційні технології не лише відкривають нові перспективи, але й створюють загрози у сфері безпеки, оборони, та й у різних інших галузях. Рівень захисту та безпеки, який країна забезпечує своїм громадянам, здебільшого пов'язаний зі здатністю передбачити домінуючі технічні та технологічні тенденції, оцінити їх вплив на майбутнє і на цій основі розробити стратегію розвитку. У військовій сфері такі технології спрямовані на розширення можливостей сил та засобів для ефективної дії в оперативних умовах, що стрімко змінюються. Як зазначено у [1], «оборона України – комплекс політичних, економічних, соціальних, воєнних, наукових, науково-технічних, інформаційних, правових, організаційних та інших заходів держави для підготовки до збройного захисту та забезпечення її захисту у разі збройної агресії чи збройного конфлікту». Тобто, розвиток науково-технічного сегменту є невід'ємним складником оборонної спроможності. Така система «заходів держави» узгоджується з єдиною метою та завданнями, що відображається у відповідному документі – плані оборони [2].

Фактори, що впливають на цей процес, з одного боку, обумовлені умовами використання та роллю об'єкту, які формують відповідні вимоги до нього. А з іншого боку, – зміною традиційних підходів до проєктування на сучасні та ростом потужностей обчислювальних систем.

Аналіз науково-технологічних тенденцій у військовій сфері та аналіз прогнозів НАТО й корпорації RAND виявив [3] основні передбачувані напрями науково-технологічних досліджень у сфері озброєння та військової техніки:

1. Штучний інтелект та блокчейн.

2. Інтернет речей та його безпека.

3. Безпілотні транспортні засоби та робототехніка, дрони та рої дронів.

4. Підводний транспорт, зокрема підводні човни.

5. Нові матеріали, такі як матеріали з ефектом невидимості, броньовані матеріали, біоматеріали.

6. Електрифікація військового транспорту та альтернативні джерела енергії.

7. Безпека літальних апаратів.

8. Мережі зв'язку, включаючи бездротові та мобільні адаптивні мережі, та їхню безпеку.

Найбільш перспективним напрямком залишається штучний інтелект (AI) – одна з революційних технологій початку 20-х років. Подальший розвиток цього напрямку дасть змогу провести якісні зміни у військах, зброї та її проєктуванні. Іншим потенційно революційним напрямком є технології зберігання енергії та отримання нових матеріалів. Ці напрями будуть активно розвиватися в найближчому майбутньому.

Бойові дії на зараз вимагають від збройних сил використовувати спеціальні методи та підвищувати вимоги до мобільності, прихованості, автономності та інших факторів. Аналіз військових конфліктів останніх десятиліть вказує на значний вплив засобів збройної боротьби, зокрема, озброєння та військової техніки, на ефективність дій збройних сил. Напрямок їхнього розвитку визначає форми та способи боротьби, а відповідно і бронетехніку, що використовується.

З урахуванням цих обставин, збройні сили повинні бути оснащені сучасними високотехнологічними зразками військової техніки. Ці зразки повинні максимально враховувати специфіку різноманітних завдань та умов їх виконання, забезпечуючи високу рухомість підрозділів.

У роботі [4] вказується, що можливості військових механізованих та танкових військових формувань можна ефективно розширити шляхом реалізації наступних ініціатив:

1. Поступового нарощування чисельності військових частин і підрозділів, а також особового складу.

2. Фокусування підготовки військових частин і підрозділів на готовність до самостійних бойових операцій, використання тактики як для регулярних, так і для іррегулярних формувань, а також ведення бойових дій при обороні населених пунктів та в лісистій місцевості тощо.

3. Збільшення кількості заходів із бойової підготовки.

4. Проведення закупівель нового озброєння та модернізації існуючих основних зразків озброєння і військової техніки для військових частин і підрозділів.

Для досягнення цих цілей рекомендується:

1. Оптимізація та уніфікація структури і чисельності військових частин та підрозділів Сухопутних військ.

2. Впровадження передових методик бойової підготовки.

3. Здійснення закупівель та модернізацію танків

і бойових броньованих машин на державних підприємствах.

Проте танки на сучасний момент не становлять собою найбільш поширеного типу броньованої техніки [5]. Перевагу впевнено утримують бойові машини піхоти та бронетранспортери, броневих автомобілі. Вони виконують завдання забезпечення безпеки обстановки та правопорядку, контролю території, надання допомоги при запобіганні та ліквідації наслідків терактів. У цих завданнях використовуються як гусеничні, так і колісні бойові машини, а також броньовані автомобілі із підвищеним рівнем протимінного захисту.

У роботі [6] обговорюються питання аналізу легких броньованих платформ. Вказується, що відмінність легких броньованих платформ (ЛБП) та бронемашин від бронетранспортерів полягає у їх завданні – виявлення й ураження противника вогнем з бортового озброєння. Зазвичай для конструювання майбутніх бронемашин використовується шасі всюдихідного вантажного автомобіля, яке вже довело свою надійність та ефективність протягом багатьох років експлуатації. Під час модернізації це шасі отримує посилення, оснащується потужнішим двигуном, а також отримує броню та різноманітне озброєння, включаючи кулемети, гармати і, останнім часом, ракети.

Зростаючий інтерес провідних країн НАТО до розробки та впровадження на озброєння бойових колісних машин (БКМ) із підвищеним рівнем балістичного та протимінного захисту пояснюється їхньою ефективністю у вогневій підтримці тактичних мобільних груп, які діють автономно від основних сил. У зв'язку з цим були розроблені броневих автомобілі, які, насамперед, гарантують ефективний захист особового складу, а водночас є більш дешевими та менш витратними на паливо, порівняно з бронетранспортерами чи бойовими машинами піхоти, – MRAP, що розшифровується як "Mine Resistant Ambush Protected" ("стійкі до мін та захищені від засідок"). Ще одним варіантом подібних транспортних засобів є СБА, або "спеціальний броньований автомобіль". Навіть з урахуванням меншого захисту порівняно із MRAP, вони все ще здатні забезпечити безпеку екіпажу від куль та мають протимінний захист днища в певних ситуаціях. MRAP та СБА зазвичай не використовуються на передній лінії фронту, як БТР чи БМП. Вони, скоріше, служать для транспортування особового складу на задні лінії або в найближчий тил. Тим не менше, в умовах обмеженості транспорту броневих автомобілі широко використовуються прямо на передній лінії, що виявляється більш вигідним у порівнянні з іншими альтернативами. Збройні сили України отримали значну кількість MRAP та СБА для покращення своєї мобільності та безпеки на лінії фронту.

Також БКМ використовуються для виконання різноманітних завдань: спеціальних операцій, розвідувальних місій, пошуково-рятувальних операцій та бойового патрулювання в умовах активного використання протитанкових засобів ближнього бою та високого рівня мінної загрози. Також БКМ можуть бути ефективно використані в ході проведення ми-

ротворчих операцій для бойової охорони військ, супроводження колон і патрулювання конфліктних зон.

Заохочуючими факторами для подальшого поширення БКМ є:

- зменшення чисельності збройних сил держав та потреба у підвищенні їхньої оперативної мобільності;
- можливість широкого використання в конструкціях вузлів та агрегатів розроблених для цивільних автомобілів, які є значно менш витратними порівняно із спеціально створеними для військового використання, що в результаті призводить до скорочення термінів виробництва у разі необхідності створення специфічних військових моделей.

У статті [7] наведено напрями для підвищення ефективності бойових броньованих машин:

1. Оптимізація компоновальних схем;
2. Застосування модульних конструкцій на базі уніфікованого шасі в залежності від завдань, що вирішуються;
3. Зменшення габаритних параметрів автомобіля.
4. Зменшення маси бойових броньованих машин.
5. Зменшення вартості розробки, експлуатації, ремонту та утилізації зразків бойових броньованих машин.

Після початку активної фази російсько-української війни, збройні сили України були насичені великою кількістю різноманітної бойової броньованої техніки, як партнерської підтримки та власного виробництва, так і трофейною. Це вивело Україну в лідери рейтингу мілітаризації та широти спектру застосувань бойових машин.

Аналіз, наданий у [8], дає змогу оцінити загальний спектр цільового сегменту військової броньованої техніки України, розподілити її на класи в залежності від типу шасі та зробити висновки стосовно актуальності поставленої у роботі проблеми.

Далі наведемо відсотковий номінальний аналіз цільового сегменту військової броньованої техніки в залежності від типу шасі.

Бойова броньована техніка (власна, партнерська, трофейна) (гусеничні/колісні).

Танки (Т) (100%/0%): гусеничні (Leopard 2, M1 Abrams, Challenger 2, PT-91 Twardy, T-90, T-84U «Оплот», T-80, T-72, БМ «Булат», T-64БВ, T-62, T-55, Leopard 1).

Бойові машини піхоти (БМП) (100%/0%): гусеничні (CV 90, Bradley, Marder, БМП-3, БМП-2, БМП-1, М-80А, БМД-2, БМД-1, БМД-4).

Самохідні протитанкові комплекси (СПТК) (33%/66%): гусеничні (Штурм); колісні (АМХ-10 RC, 9П148 «Конкурс»).

Розвідувальні машини (РМ) (50%/50%): гусеничні (FV107 Scimitar, БРМ-1К); колісні (БРДМ-2, Fennek).

Бронетранспортери (БТР) (41%/59%): гусеничні (M113, AIFV, FV432 Bulldog, FV103 Spartan, БТР-Д, МТ-ЛБ, Bandvagn 206, M548, БТР-МД «Ракушка»); колісні (Stryker, LAV II, КТО Rosomak, Sisu XA-180, БТР-4, БТР-3, БТР-82, БТР-80, БТР-70, БТР-60, Saxon, VAB, M1117,).

MRAP (0%/100%): колісні (MaxxPro, Cougar,

Oshkosh M-ATV, Bushmaster PMV, BMC Kirpi, Cobra II, Dingo ATF, Wolfhound (6×6), Mastiff 3, Husky TSV, Mamba, KrAZ Shrek One, KrAZ Fiona, Gaia Amir).

Бронеавтомобілі (БА) (0%/100%): колісні (Козак-2,4,5,7, 2M1, Новатор, КрАЗ Кугуар, КрАЗ Кобра, КрАЗ Спартан, Дозор-Б, Тритон, UAT-T COBRA, BATT UMG, Roshel Senator, Iveco LMV, MLS Shield, LC79 APC-SH Fighter 2, Panthera T6, Pinzgauer Vector PPV, Dzik, Iveco M 40.12 WM/P, Варта, КрАЗ-6322 «Raptor»).

Самохідні артилерійські установки (САУ) (55%/45%): гусеничні (2С7 «Піон», PzH 2000, AHS Krab, 2С19 «Мста-С», 2С5 «Гіацинт-С», AS-90, M109, 2С3 «Акація», 2С1 «Гвоздика», 2С9 «Нона-С», Panzermärsler); колісні (CAESAR, Zuzana 2, Archer, 2С22 «Богдана», vz.77 «Дана», Дана М2, M120 Rak, 2С23 «Нона-СВК», Барс-8ММК, RCH 155).

Реактивні системи залпового вогню (РСЗВ) (55%/45%): гусеничні (M270 MLRS); колісні (Вільям, TRG-230, HIMARS M142, Буревій, Буревій, RM-70, BM-21MT Striga, APR-40, Верба, BM-21 «Град»).

Таким чином, бойові колісні машини повністю охоплюють номінали класів MRAP, БА, займають близько половини номіналів СПТК, РМ, БТР, САУ, РСЗВ, та повністю відсутні в БМП, танках. Можна констатувати, що бойові колісні машини займають значну частину загального спектру досліджуваного сегменту військової броньованої техніки України.

Отже, можемо акцентувати, що розробка загальних методів та підходів для раціонального проектування нового озброєння і військової техніки для військових частин і підрозділів є актуальним. Значну частину даного перерізу складають саме бойові колісні машини.

Більш того, спостерігається стійка тенденція до підвищення вимог до їх основних тактико-технічних характеристик. Зокрема, особливого значення набувають показники рухомості, маневреності, прохідності, а також експлуатаційної надійності та енергоефективності силового приводу. Досягнення високих значень зазначених характеристик значною мірою визначається ефективністю функціонування трансмісійної системи, яка забезпечує передачу та перетворення потужності двигуна відповідно до змінних умов руху машини.

Конструктивна складність сучасних трансмісій, зростання потужності двигунів та підвищення вимог до масогабаритних показників обумовлюють необхідність використання науково обґрунтованих підходів до їх проектування. Особливо це стосується механічних ступінчастих трансмісій, які залишаються широко застосовуваними у колісних броньованих машинах завдяки своїй конструктивній простоті, високій ефективності передачі потужності та високій надійності.

Водночас підвищення вимог до техніко-експлуатаційних характеристик бронетехніки зумовлює необхідність комплексного врахування при проектуванні трансмісій широкого спектра факторів, зокрема навантажень, кінематичних параметрів, ре-

сурсних характеристик, технологічності та ремонтно-придатності. У зв'язку з цим дедалі більшого значення набуває застосування системного підходу до узгодженого визначення раціональних параметрів трансмісійних систем.

Логічним продовженням вбачається необхідність розгляду сучасних тенденцій і перспективних напрямів розвитку методів раціонального проектування комплексу елементів механічних ступінчастих трансмісій колісних бронемашин.

Сучасний етап розвитку інженерної діяльності характеризується підвищенням вимог до процесу проектування технічних систем. Серед ключових характеристик такого процесу виділяють чітку цілеспрямованість, взаємозв'язок фундаментальних наукових досліджень із практичним результатом їх застосування, скорочення тривалості проектних робіт та їх максимальну автоматизацію. Важливою ознакою сучасного проектування також є комплексність підходу, що передбачає узгодження технічних, технологічних та економічних аспектів проектування.

Процес проектування загалом полягає у виконанні послідовності взаємопов'язаних процедур, спрямованих на створення нових або вдосконалення існуючих технічних об'єктів. Кожна з таких процедур реалізується за допомогою певного методу, який являє собою систему дій, орієнтованих на досягнення поставленої мети та отримання необхідного результату.

Однією з характерних тенденцій сучасного інженерного проектування є прагнення до мінімізації суб'єктивного впливу людини на різних етапах прийняття технічних рішень. У зв'язку з цим значного поширення набули підходи, що базуються на принципах оптимального проектування технічних систем. Це може досягатися шляхом варіювання конструктивних елементів та їхніх характеристик з метою формування найефективнішої конфігурації. У випадках, коли саме технічне рішення вже визначене, оптимізаційна задача полягає у встановленні найбільш раціональних значень параметрів системи. Разом із тим, процес оптимізації технічних об'єктів ускладнюється наявністю значної кількості числових і функціональних обмежень. Крім того, особливості застосованих методів розв'язання оптимізаційних задач не завжди дають змогу досягти глобально найкращих параметрів. З огляду на це доцільним є використання поняття оптимально-раціонального проектування, яке відображає компроміс між теоретичною оптимальністю та практично досяжними результатами.

Проектування механічних ступінчастих трансмісій зі складними компоновальними схемами та високою агрегатною насиченістю становить складну інженерну задачу. Насамперед це пояснюється значною кількістю параметрів, що підлягають визначенню на етапі проектування і можуть налічувати кілька десятків, а також відповідної системи обмежень. Додатковою складністю є наявність декількох критеріїв оцінювання, які іноді можуть бути взаємовиключними або, навпаки, концептуально пов'язаними між собою.

Водночас значна кількість існуючих методів та

підходів до реалізації раціонального проектування може ускладнювати вибір найбільш доцільного інструментарію для розв'язання конкретної інженерної задачі. До того ж не всі методи однаково ефективно адаптуються до специфіки проектування механічних ступінчастих трансмісій.

У якості базового апарату для вирішення існуючої проблеми раціонального проектування комплексу елементів механічних ступінчастих трансмісій колісних бронемашин було обрано стохастичні алгоритми [9]. Це обумовлено трьома головними перевагами стохастичних алгоритмів:

1. Гнучкість. Стохастичні алгоритми можуть працювати з різноманітними типами даних і задачами без необхідності в жорстких обмеженнях. Вони здатні адаптуватися до різних умов і змінюватися залежно від характеру даних та обставин.

2. Глобальний пошук. Стохастичні алгоритми часто використовують випадковий пошук, що дає їм змогу уникнути застрягання в локальних мінімумах чи максимумах. Це дає змогу здійснювати пошук оптимальних або прийнятних рішень у просторі можливостей.

3. Робастність. Стохастичні алгоритми можуть працювати ефективно навіть у випадках, коли вихідні або поточні дані містять шум або невизначеність. Вони є менш чутливими до таких аномалій і забезпечують стабільну продуктивність у різних умовах.

Стохастичні алгоритми оптимізації використовують випадковість у процесі пошуку оптимуму. Зазвичай їх застосовують, коли цільова функція складна, багатоекстремальна, з розривами та перешкодами.

Стохастичні алгоритми у свою чергу умовно можна поділити на евристичні та метаевристичні.

Евристичні алгоритми – спроможні видати прийнятне розв'язання серед багатьох розв'язань, але неспроможні гарантувати, що воно буде найкращим. Зазвичай такі алгоритми знаходять розв'язок, близький до найкращого, та роблять це швидко.

Метаевристичні алгоритми [10] – комбінують методи пошуку локальних та глобальних розв'язків у абстрактні стратегії евристичної оптимізації задач. Саме префікс «мета» вказує на складність, тобто на «високий рівень» або «понад». Більшість таких алгоритмів базується на методах пошуку локальних розв'язків, тобто вони обчислюють деякий початковий розв'язок та покращують його іншими методами. Використовуючи комбінації та поєднання різних стратегій, такі алгоритми намагаються уникнути глухих кутів під час пошуку локальних мінімумів.

Використання ймовірнісного фактору в стохастичних алгоритмах є важливим для ефективного розв'язання задач оптимізації та пошуку. Цей фактор дає змогу алгоритмам враховувати непередбачувані або випадкові події, що можуть виникати в процесі роботи. Врахування ймовірнісного фактору допомагає уникнути «застрягання» в локальних мінімумах чи максимумах. Крім того, цей підхід дає змогу адаптувати алгоритми до різних умов та змінювати їх поведінку на основі випадкових вхідних даних. Застосування ймовірності робить алгоритми більш

гнучкими та адаптивними до змін у середовищі. Загалом, використання ймовірнісного підходу сприяє збільшенню різноманітності та ефективності пошукових процесів у стохастичних алгоритмах.

У якості ймовірнісного фактору була обрана краща псевдовипадкова послідовність – ЛПт [11]. Використання ЛПт-послідовності як псевдовипадкового фактору на багатьох етапах (зокрема, під час генерації початкової популяції, підбору батьківських пар, схрещування та мутації) зумовлене зручністю її застосування та широкими функціональними можливостями. Зокрема, вказана послідовність забезпечує як зовнішню, так і внутрішню варіативність алгоритму, що підвищує «гнучкість» процесу пошуку. Важливою перевагою є можливість використання випадкового процесу при роботі з таблицею чисельників для формування пробних точок з різними координатами у серії експериментів у межах однієї задачі. Це дає змогу більш щільно дослідити простір параметрів проектування та поліпшити етап генерації початкової популяції, досягти її урізноманітнення та збільшення у декілька разів, завдяки цьому кінцевий результат досягається швидше та якісніше. Вказані особливості наближують процес формування нащадків до реального стохастичного процесу, коли він носить випадковий характер.

Основою структури та функціонування стохастичних алгоритмів, у розрізі евристичних та математичних, є фундаментальні процеси дарвіновської еволюції, механізми еволюції Ламарка та Болдуїна.

Спостереження, що лягли в основу еволюційної концепції [12] Ж.-Б. Ламарка, можуть бути інтерпретовані з позиції розроблення метаевристичних алгоритмів оптимізації. У центрі його теорії знаходиться ідея змінюваності організмів під впливом зовнішніх умов та накопичення корисних змін у часі. З точки зору алгоритмізації це може розглядатися як процес поступового вдосконалення розв'язків у просторі пошуку, коли система адаптується до умов задачі, формуючи більш ефективні структури або параметри.

Одним із ключових положень теорії Ламарка є уявлення про поступову градацію організації – перехід від простіших форм до складніших і більш ефективних. У контексті метаевристичних алгоритмів така ідея може бути інтерпретована як послідовне підвищення якості розв'язків у процесі ітераційного пошуку. Кожна нова ітерація алгоритму відповідає певному «рівню організації» популяції можливих рішень, що поступово наближається до оптимального стану.

Особливу цікавість для обчислювальних методів становить ламарківський принцип успадкування набутих ознак. У біологічному трактуванні він означає передачу нащадкам змін, отриманих організмом протягом життя. У метаевристичних алгоритмах цей принцип може бути реалізований як механізм збереження та передачі результатів локального покращення розв'язків. Наприклад, після застосування процедур локального пошуку отримані покращені характеристики розв'язків можуть безпосередньо передаватися наступним поколінням у популяції.

Важливою складовою ламарківського підходу є також роль зовнішнього середовища, яке формує

умови відбору та визначає напрямок адаптаційних змін. У метаевристичних алгоритмах аналогом такого середовища виступає цільова функція задачі, яка визначає якість розв'язків і спрямовує процес пошуку. Зміна параметрів середовища або обмежень задачі може впливати на еволюцію популяції розв'язків подібно до того, як зміни середовища впливають на еволюцію біологічних систем.

Еволюційна концепція Дарвіна [13] сформувала одну з найбільш послідовних наукових моделей розвитку складних систем. Її ключові положення також можуть бути інтерпретовані як концептуальна основа для створення сучасних метаевристичних алгоритмів оптимізації. Центральною ідеєю дарвінівського підходу є взаємодія трьох фундаментальних факторів – мінливості, відбору та спадковості, які відповідають генерації різноманітних розв'язків у просторі пошуку, оцінюванню їх якості за допомогою цільової функції та передачі ефективних характеристик наступним поколінням.

Важливою складовою дарвінівської теорії є положення про надлишкове відтворення та обмеженість ресурсів, що зумовлює конкуренцію між особинами. У метаевристичних алгоритмах аналогом цього процесу є формування популяції потенційних розв'язків, кількість яких перевищує можливості збереження всіх варіантів. У результаті відбувається селекція – вибір найефективніших розв'язків відповідно до значення функції пристосованості, що сприяє поступовому витісненню менш ефективних варіантів та концентрації пошуку в перспективних областях простору параметрів.

Ще одним важливим аспектом є спадкова мінливість, яка в біологічній еволюції проявляється через індивідуальні відмінності організмів. У метаевристичних алгоритмах цей принцип реалізується за допомогою операторів мутації та рекомбінації. Завдяки цьому забезпечується дослідження різних областей простору пошуку та підтримується різноманіття популяції, що зменшує ризик передчасної збіжності алгоритму до локального оптимуму.

Дарвін підкреслював, що природний відбір діє не на окремі ізолювані організми, а на популяції, де еволюційні зміни проявляються статистично. Подібний принцип лежить і в основі популяційних метаевристичних: ефективність алгоритму визначається поведінкою всієї популяції у процесі ітераційного пошуку. Наявність великої кількості варіантів підвищує ймовірність виникнення перспективних комбінацій параметрів, які можуть бути відібрані та розвинуті у наступних поколіннях.

Таким чином, ключові ідеї дарвінівської еволюційної теорії – конкуренція, спадкова мінливість, природний відбір і популяційний характер розвитку – можуть розглядатися як методологічна основа для побудови метаевристичних алгоритмів оптимізації.

З іншого боку, ефект Болдуїна [14] демонструє, що здатність організмів навчатися та адаптувати поведінку під впливом змін середовища впливає на еволюційний процес не менше, ніж традиційний природний відбір. У контексті метаевристичних алгоритмів це можна розглядати як механізм, у якому розв'язки, що здатні швидко адаптуватися до змін-

них умов задачі, мають більшу ймовірність бути збереженими та покращеними в наступних ітераціях. Таким чином, навчання агентів можна інтегрувати у стратегії пошуку, створюючи динамічний відбір рішень, який враховує не лише їхню первинну ефективність, а й здатність до адаптації шляхом аналізу попередніх ітераційних кроків конкретних розв'язків.

Болдуїн підкреслював, що індивідуальний розвиток організму є процесом поступової адаптації, де взаємодія вроджених та набутих реакцій визначає успішність виживання. У метаевристичних алгоритмах аналогічним чином, розв'язок, який адаптується до локальних змін у просторі пошуку, отримує перевагу, подібно до того, як організм з ефективними адаптивними реакціями має більшу ймовірність відтворення та передачі корисних варіацій у популяції рішень.

Вроджені варіації та адаптації, отримані через онтогенетичне навчання, у природі взаємодіють для формування стабільних і корисних ознак. У метаевристичних алгоритмах це можна трактувати як поєднання початкових параметрів алгоритму та динамічної корекції під час ітерацій пошуку.

Положення ефекту Болдуїна можна безпосередньо використовувати для розробки метаевристичних з навчальними компонентами, де адаптація агентів впливає на їхній репродуктивний успіх у пошуку оптимального розв'язку. Використання таких підходів дає змогу імітувати органічний відбір, де розв'язки з високою адаптивністю утримуються та модифікуються у наступних поколіннях. Це дає змогу створювати алгоритми, які не лише відсікають менш придатні рішення, а й стимулюють розвиток найефективніших стратегій через навчання та онтогенетичну адаптацію.

Таким чином, ефект Болдуїна забезпечує концептуальну основу для інтеграції адаптивного навчання у метаевристичні алгоритми. Кожна ітерація пошуку може бути спроектована як онтогенетична адаптація, що визначає напрямок еволюційного прогресу, а органічний відбір дає змогу накопичувати та уточнювати ефективні варіації. Використання цих принципів сприяє створенню алгоритмів з підвищеною гнучкістю, здатністю до самонавчання та стабільним наближенням до глобального оптимуму.

Формування атрибутів задачі також часто викликає труднощі у зв'язку зі складністю систем. Для якісного та зручного формулювання завдання та атрибутів раціонального проектування механічних ступінчастих трансмісій колісних військових пропонується перейти від реального об'єкта до його структурної схеми. Структурна схема трансмісії графічно відображає всі складові системи передачі потужності від двигуна до коліс. Така схема дає змогу здійснювати структурний аналіз, будувати моделі та проводити розрахунки, що є необхідною умовою для формалізації задачі раціонального проектування. Однак для складних трансмісійних систем військових машин пропонується перейти до структурно-логічної схеми, яка враховує всі логічні елементи та послідовні або розгалужені ланцюги передачі моменту.

Логічний елемент визначається як частина системи, яка виконує задану функцію перетворення руху та не підлягає подальшому розділенню на послідовні технічні елементи. Конструктивний елемент, у свою чергу, може включати кілька логічних елементів і відображає агрегатну структуру. Така ієрархія – система → конструктивний елемент → логічний елемент → механізм → деталь – дає змогу декомпозиювати трансмісію до рівня, достатнього для формування моделі раціонального проектування з чіткими параметрами, цільовими функціями та системою обмежень.

Для спрощення аналізу та формалізації задачі пропонується лаконізований перелік базових структурно-логічних елементів трансмісії. Кожен логічний елемент пов'язується з цільовими функціями та обмеженнями, що дає змогу формувати пул параметрів проектування та числових/функціональних обмежень для всієї системи. Такий підхід забезпечує можливість проведення елементного аналізу та створення узагальненої моделі раціонального проектування.

Використання цього підходу спрощує формування задачі оптимізації та полегшує реалізацію алгоритмічних методів, у тому числі метаевристичних, де адаптивне представлення логічних елементів і зв'язків дає змогу ефективно здійснювати пошук раціональних конструкцій трансмісії.

Висновки:

1. Проведений аналіз сучасних науково-технологічних тенденцій розвитку озброєння і військової техніки засвідчив істотне зростання ролі високотехнологічних систем та інноваційних підходів до їх створення. Зокрема, значний вплив на розвиток військової техніки мають технології штучного інтелекту, робототехніки, нових матеріалів та енергетичних систем, що формують нові вимоги до характеристик технічних засобів. У результаті встановлено, що ефективність функціонування сучасних зразків військової техніки значною мірою визначається рівнем науково проектування їх основних систем. Це дає змогу обґрунтувати необхідність застосування сучасних методів оптимізації під час створення та модернізації військової техніки.

2. Аналіз структури та номенклатури бойової броньованої техніки, що використовується Збройними силами України, засвідчив значну частку колісних бойових машин у загальному спектрі озброєння. При цьому колісні платформи охоплюють повністю класи MRAP і броньованих автомобілів та займають істотну частку в інших класах військової техніки. Така тенденція зумовлена їхньою високою мобільністю, відносно нижчою вартістю експлуатації та широкими можливостями застосування у різних типах бойових завдань. Це дає підстави визначити колісні бойові машини як один із пріоритетних об'єктів дослідження при розробленні методів раціонального проектування військової техніки та її систем.

3. Вказано, що досягнення необхідних показників рухомості, маневреності, прохідності та енергоефективності бойових колісних машин значною мірою залежить від ефективності функціонування їх

трансмісійних систем. Сучасні механічні ступінчасті трансмісії характеризуються складною структурою, значною кількістю параметрів проектування та системою технічних обмежень. Це формує складну багатопараметричну задачу синтезу, яка потребує узгодженого врахування кінематичних, силових, ресурсних та експлуатаційних характеристик. У результаті обґрунтовано доцільність використання системного підходу до визначення раціональних параметрів трансмісійних систем.

4. Процес раціонального проектування механічних ступінчастих трансмісій характеризується наявністю великої кількості змінних параметрів, числових та функціональних обмежень, а також декількох критеріїв оцінювання ефективності. У таких умовах задача оптимізації набуває багатоекстремального та нелінійного характеру, що ускладнює застосування класичних детермінованих методів оптимізації. Крім того, взаємозв'язок між окремими параметрами системи може формувати суперечливі вимоги до конструктивних рішень. Це обумовлює необхідність застосування сучасних алгоритмічних підходів до пошуку раціональних розв'язків.

5. Показано, що ефективним інструментом розв'язання складних задач оптимального проектування можуть бути стохастичні та метаевристичні алгоритми, які забезпечують глобальний пошук у багатовимірному просторі можливих рішень. Їх використання дає змогу враховувати випадковість, уникати «застрягання» у локальних екстремумах та забезпечувати робастність процесу раціонального проектування. Завдяки поєднанню стратегій глобального та локального пошуку такі алгоритми здатні формувати раціональні параметричні розв'язки навіть за наявності складної системи обмежень. Це дає підстави розглядати метаевристичні алгоритми як перспективний «механізм» раціонального проектування комплексу елементів механічних ступінчастих трансмісій колісних бронемашин.

Список літератури

1. Про оборону України : Закон України № 1932-ХІІ від 6 грудня 1991 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1932-12#Text>.
2. Сиротенко А.М., Щипанський П.В., Павліковський А.К., Лобко М.М. Актуальні проблеми планування оборони України : комплексний підхід. *Наука і оборона*. 2020. № 1. С. 3–12.
3. Писаренко, Т. Кваша, Т. Гаврис та ін. *Аналіз світових технологічних трендів у військовій сфері : монографія* [Електронний ресурс]. Київ : УкрІНТЕІ, 2021. 110 с.
4. Попко С.М., Музиченко Д.П. Перспективи розвитку спроможностей Сухопутних військ Збройних Сил України. *Наука і оборона*. 2019. № 1. С. 3–8.
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*. 2019. № 3. С. 31–35.
6. Шаповалов О., Колесник Д., Журахов О., Болотов Г. Конструктивні особливості сучасних бронемашин із колісною формулою 4×4. *Технічні науки та технології*, 2016. № 3 (5). С. 85–95.
7. Зеленох О.М., Тимко А.Ю., Пинчук М.В. Обґрунтування напрямків підвищення технічних характеристик бойових броньованих машин. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Випуск 1(59). С. 50–53.
8. *The Military Balance 2023: The International Institute for Strategic Studies Paperback* – 15 Feb, 2023. 576 p.
9. Maude Josée Blondin. *Controller Tuning Optimization Methods*

- for Multi-Constraints and Nonlinear Systems: A Metaheuristic Approach. Springer. 2021. 112 p.
10. Mark French. *Fundamentals of Optimization: Methods, Minimum Principles, and Applications for Making Things Better*. Springer, 2018. 399 p.
 11. I. Sobol', D. Asotsky, A. Kreinin, S. Kucherenko. *Construction and Comparison of High-Dimensional Sobol' Generators*. Wilmott Journal. 2011. Pp. 64–79.
 12. Jablonka E. *Epigenetic inheritance and evolution: The Lamarckian dimension*. Oxford University Press, Oxford, 1999. 360 p.
 13. О.Ю. Галкін, Л.О. Тітова. *Основи еволюційної теорії: Навчальний посібник з дисципліни «Біологія розвитку та основи еволюційної теорії» для студентів спеціальності 162 – Біотехнології та біоінженерія спеціалізації «Промислова біотехнологія»*. Київ, КПІ імені Ігоря Сікорського. 2018. 121 с.
 14. Weber B. H., Depew D. J. (eds.). *Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered*. Cambridge, MA: MIT Press. 2003. 341 p.

References (transliterated)

1. Pro oboronu Ukrainy: Zakon Ukrainy No. 1932-XII vid 6 hrudnia 1991 r. [On the Defense of Ukraine: Law of Ukraine No. 1932-XII of December 6, 1991]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1932-12#Text>.
2. Syrotenko A. M., Shchypanskyi P. V., Pavlikovskiy A. K., Lobko M. M. Aktualni problemy planuvannya oborony Ukrainy: kompleksnyi pidkhid [Current problems of defense planning of Ukraine: a comprehensive approach]. *Nauka i oborona* [Science and Defense]. 2020, No. 1, pp. 3–12.
3. Pysarenko T., Kvasha T., Havrys V. ta in. *Analiz svitovykh tekhnolohichnykh trendiv u viiskovii sferi: monohrafiia* [Analysis of global technological trends in the military sphere: monograph]. Kyiv, UkrINTEI, 2021. 110 p.
4. Popko S. M., Muzychenko D. P. Perspektyvy rozvytku spromozhnosti Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy [Prospects for the development of capabilities of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine]. *Nauka i oborona* [Science and Defense]. 2019, No. 1, pp. 3–8.
5. Holub V. A., Khoma V. V., Kurban V. A., Siedov S. H. Shchodo vyznachennia kontseptsii pobudovy systemy ozbroiennia dlia potreb Zbroinykh Syl Ukrainy [On defining the concept of building a weapons system for the needs of the Armed Forces of Ukraine]. *Nauka i oborona* [Science and Defense]. 2019, No. 3, pp. 31–35.
6. Shapovalov O., Kolesnyk D., Zhurakhov O., Bolotov H. Konstruktyvni osoblyvosti suchasnykh bronemashyn iz kolisnoiou formuloiu 4x4 [Design features of modern armored vehicles with a 4x4 wheel configuration]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* [Technical Sciences and Technologies]. 2016, No. 3(5), pp. 85–95.
7. Zeleniukh O. M., Tymko A. Yu., Pynchuk M. V. Obgruntuvannia napriamkiv pidvyshchennia tekhnichnykh kharakterystyk boiovykh bronovanykh mashyn [Substantiation of directions for improving the technical characteristics of armored combat vehicles]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku* [Control, Navigation and Communication Systems]. 2020, Issue 1(59), pp. 50–53.
8. *The Military Balance 2023*. The International Institute for Strategic Studies. London, 2023. 576 p.
9. Blondin M. J. *Controller Tuning Optimization Methods for Multi-Constraints and Nonlinear Systems: A Metaheuristic Approach*. Springer, 2021. 112 p.
10. French M. *Fundamentals of Optimization: Methods, Minimum Principles, and Applications for Making Things Better*. Springer, 2018. 399 p.
11. Sobol I., Asotsky D., Kreinin A., Kucherenko S. *Construction and Comparison of High-Dimensional Sobol Generators*. Wilmott Journal. 2011, pp. 64–79.
12. Jablonka E. *Epigenetic Inheritance and Evolution: The Lamarckian Dimension*. Oxford University Press, Oxford, 1999. 360 p.
13. Halkin O. Yu., Titova L. O. *Osnovy evoliutsiinoi teorii: navchalnyi posibnyk z dystsypliny "Biolohiia rozvytku ta osnovy evoliutsiinoi teorii" dlia studentiv spetsialnosti 162 – Biotekhnolohii ta bioinzhenieriia spetsializatsii "Promyslova biotekhnolohiia"* [Fundamentals of evolutionary theory: textbook for the course "Developmental Biology and Fundamentals of Evolutionary Theory" for students of specialty 162 – Biotechnology and Bioengineering, specialization "Industrial Biotechnology"]. Kyiv, KPI imeni Ihoria Sikorskoho, 2018. 121 p.
14. Weber B. H., Depew D. J. (eds.). *Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered*. Cambridge, MA, MIT Press, 2003. 341 p.

Надійшла (received) 19.03.2026
Стаття прийнята до друку 18.04.2026
Опублікована 28.04.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Бондаренко Олексій Вікторович / Bondarenko Oleksiy – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (067) 189-97-00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2693-5301>; e-mail: avbondko@gmail.com

Устиненко Олександр Віталійович / Ustynenko Oleksandr – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (093) 398-33-83; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6714-6122>; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org

Протасов Роман Васильович / Protasov Roman – PhD in Eng. S., Словацький технічний університет в Братиславі, старший викладач кафедри автомобільної інженерії та конструювання; м. Братислава, Словаччина; тел.: +421-949-352-655; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1611-0610>; e-mail: roman.protasov@stuba.sk

Кириченко Ірина Олексіївна / Kyrychenko Iryna – доктор технічних наук (Dr. in Eng. S.), професор, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, професор кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті; м. Київ, Україна; тел.: (095) 461-97-67; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3971-4871>; e-mail: i_kir@ukr.net

Матюшенко Микола Васильович / Matyushenko Mykola – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри геометричного моделювання та комп'ютерної графіки; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-31; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4727-8993>; e-mail: matushenkonikolay@ukr.net

Андрієнко Сергій Володимирович / Andrienko Sergij – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, старший викладач кафедри комп'ютерної графіки; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-37-24; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4310-3128>; e-mail: andrisherjjsv@gmail.com