

УДК 355.6:623.4:001.891.57:658.512.2

д-р філософії Бернацький А. П. ORCID: 0000-0003-0379-075X (ВІТІ ім. Героїв Крут)

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ЦЕНТРУ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЯК АДАПТИВНОГО БАГАТОКОНТУРНОГО ЦИКЛУ ФОРМУВАННЯ ОБОРОННО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПРОМОЖНОСТІ НА ОСНОВІ ОПЕРАТИВНОГО ДОСВІДУ

У статті розглянуто концептуальну модель центру перспективних технологій ADM як адаптивну багатоконтурну систему, призначеної для формування оборонно-технологічної спроможності на основі реального оперативного досвіду. Необхідність такого підходу зумовлена тим, що сучасні умови воєнного часу вимагають не лише швидкого реагування на окремі технічні проблеми, а й створення цілісного механізму, здатного перетворювати бойові потреби, дефіцит комплектуючих, пошкодження озброєння і військової техніки, а також нові вимоги практики на перевірені інженерні рішення. У межах дослідження ADM пропонується розглядати не тільки як виробничий, ремонтний або дослідно-конструкторський осередок, а як цілісну соціотехнічну систему, у якій взаємопов'язані кілька функціональних контурів. До них належать контури: виявлення та формалізації оперативної потреби, аналітичного й наукового осмислення проблеми, R&D та інженерного опрацювання, реверс-інжинірингу, технологічної реалізації, випробувань і верифікації, впровадження, підготовки персоналу, документування та оновлення бази знань.

У роботі запропоновано формалізований опис: стану ADM, індексу оборонно-технологічної спроможності, невизначеності технічної проблеми, верифікованої придатності рішення, освітньо-кадрових контурів, умов допуску до впровадження та показників економічної ефективності. Окремо розкрито механізм керування, який забезпечує відбір і пріоритизацію кейсів, визначення траєкторії їх проходження через основні стадії, повернення на доопрацювання у разі невідповідності вимогам, а також адаптивне коригування дій залежно від ризиків, ресурсних обмежень і зміни оперативної ситуації. Прикладний сценарій відновлення дефіцитної деталі озброєння, що була пошкоджена в бойових умовах і не може бути швидко замінена штатним способом, демонструє практичну придатність запропонованої моделі. У висновках показано, що ADM здатний забезпечити контрольований перехід від початкової проблеми до верифікованого технічного рішення, навчального кейсу, цифрового сліду та елементу інституційної пам'яті. Окреслено подальші напрями розвитку моделі, зокрема її математичну деталізацію, кількісне оцінювання ефективності та прикладну апробацію в різних сценаріях оборонно-технологічного реагування.

Ключові слова: ADM, перспективні технології, оборонно-технологічна спроможність, оперативний досвід, багатоконтурний цикл, адаптивне виробництво, верифікація технічних рішень, управління знаннями, підготовка персоналу, оборонні технології, невизначеність, економічна ефективність, ремонт і відновлення озброєння, логістична стійкість.

A. Bernatskyi. Conceptual model of a centre for advanced technologies as an adaptive, multi-loop cycle for building defence and technological capabilities based on operational experience

This paper considers a conceptual model of the ADM Centre for Advanced Technologies as an adaptive multi-loop system designed to build defence and technological capabilities based on real-world operational experience. The need for such an approach stems from the fact that modern wartime conditions require not only a rapid response to individual technical problems, but also the creation of a comprehensive mechanism capable of transforming combat requirements, shortages of components, damage to weapons and military equipment, as well as new practical demands, into proven engineering solutions. Within the scope of this study, the ADM is proposed to be viewed not merely as a production, repair or research and development centre, but as a holistic socio-technical system in which several functional loops are interconnected. These include the loop for identifying and formalising operational requirements, analytical and scientific understanding of the problem, R&D and engineering development, reverse engineering, technological implementation, testing and verification, deployment, personnel training, documentation, and updating the knowledge base.

The paper proposes a formalised description of the ADM state, the defence-technology capability index, the uncertainty of the technical problem, the verified suitability of the solution, knowledge and personnel frameworks, conditions for approval for implementation, and economic efficiency indicators. Separately, the paper details a management mechanism that ensures the selection and prioritisation of cases, the determination of their progression through the main stages, their return for further refinement in the event of non-compliance with requirements, as well as the adaptive adjustment of actions depending on risks, resource constraints and changes in the operational situation. An applied scenario involving the restoration of a scarce weapon component, which was damaged in combat conditions and cannot be quickly replaced through standard procedures, demonstrates the practical suitability of the proposed model. The conclusions show that ADM is capable of ensuring a controlled transition from the initial problem to a verified

technical solution, a training case, a digital trail and an element of institutional memory. Further directions for the model's development are outlined, in particular its mathematical refinement, quantitative assessment of effectiveness, and applied testing in various defence-technology response scenarios.

Keywords: ADM, promising technologies, defence technology capability, operational experience, multi-loop cycle, additive manufacturing, verification of technical solutions, knowledge management, personnel training, defence technologies, uncertainty, cost-effectiveness, repair and refurbishment of weaponry, logistical resilience.

Постановка проблеми. Повномасштабна війна докорінно змінила вимоги до системи забезпечення військ, ремонту, адаптації озброєння та військової техніки, а також до швидкості розроблення й впровадження нових технічних рішень. Ключовими ознаками сучасного середовища стали висока динаміка бойових умов, нестабільність ланцюгів постачання, дефіцит окремих комплектуючих, потреба в оперативному відновленні техніки, швидкому масштабуванні виробництва та переході від тривалого мирного циклу інженерного погодження до воєнного циклу швидкого технічного реагування. У документах НАТО та Європейського Союзу 2025 року посилено акцентується значення швидкості, адаптивності, інноваційного оборонного виробництва, стійких ланцюгів постачання, підготовки персоналу та прискореного впровадження нових технологій у формування сучасної оборонної готовності [1]. Україна вже володіє не лише унікальним бойовим, а й вагомим логістичним, технічним та організаційним досвідом функціонування в умовах тривалої війни проти російської агресії. НАТО окремо наголошує на значущості системного вивчення й поширення уроків війни України, а українські державні інституції підкреслюють, що безперервний зворотний зв'язок між виробниками та фронтом дає змогу швидко адаптувати технології до реальних потреб поля бою [2]. Показовим є й зростання частки українських виробників у закупівлях товарів військового призначення до 82 % у 2025 році [3], що свідчить про посилення ролі внутрішнього оборонно-промислового потенціалу та поступове формування більш зрілого інноваційного середовища.

Отже, наукова проблема полягає у відсутності цілісної концептуальної моделі, яка б описувала центр перспективних технологій як адаптивну багатоконтурну систему перетворення оперативного досвіду на оборонно-технологічну спроможність. Наявна практика воєнного часу вже демонструє високу швидкість технічного реагування, однак здебільшого залишається фрагментарною з погляду формалізації зв'язків між оперативною потребою, інженерним опрацюванням, верифікацією, підготовкою персоналу та накопиченням знань. Саме тому виникає потреба в моделі, що пояснює логіку замкненого циклу розвитку такої спроможності та створює підґрунтя для переходу від частково імпровізаційної практики до системно організованої архітектури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика формування оборонно-технологічних спроможностей Сил оборони України та партнерів перебуває на перетині кількох взаємопов'язаних дослідницьких напрямів, серед яких найбільш близькими до теми цієї роботи є застосування адитивного виробництва в умовах критичних операцій, управління запасними частинами та стійкістю ланцюгів постачання, а також реверс-інжиніринг і перепроєктування деталей для швидкого технологічного відтворення. Саме в межах цих напрямів упродовж останніх років сформовано важливе теоретичне і прикладне підґрунтя для осмислення ролі центрів перспективних технологій у секторі безпеки й оборони. Так, у роботі [4] Dey A. та співавтори адитивне виробництво розглядають як перспективний інструмент для місійно-критичних застосувань завдяки скороченню строків виготовлення, можливості виробництва на вимогу, створенню складних індивідуалізованих конструкцій і дистанційному обміну цифровими моделями; водночас автори наголошують, що ширше використання таких рішень стримується вимогами до якості, надійності та стандартизації. Систематичний огляд [5] Alzahmi W., Shamayleh A., Stefancich M., виконаний за PRISMA-підходом на основі 77 публікацій, показує, що адитивне виробництво здатне забезпечити виготовлення запасних частин на вимогу, зменшення складських запасів, скорочення строків постачання, підвищення

гнучкості та зниження простоїв у процесах технічного обслуговування. У свою чергу, Peron M. зі співавторами у Delphi-дослідженні [6] доводять, що адитивне виробництво загалом позитивно впливає на стійкість ланцюгів постачання, передусім через зростання адаптивності та ефективності, однак його ефект не є універсально позитивним, оскільки одночасно виникають нові ресурсні та організаційні обмеження.

Окрему групу становлять сучасні дослідження, у яких увагу зосереджено не лише на друці деталей, а на повному переході від дефіцитного або пошкодженого компонента до нового інженерно обґрунтованого рішення, вони ґрунтуються на застосуванні реверс-інжинірингу та перепроєктування деталей, що є особливо важливим для концепції ADM. Rešetar M. та співавтори у дослідженні [7] пропонують підхід, який поєднує 3D-сканування, реверс-інжиніринг, функціональний аналіз і Design for Additive Manufacturing для виготовлення запасних частин; при цьому автори переконливо показують, що простого копіювання геометрії недостатньо, а відновлення деталі має враховувати її функціональне призначення, сумісність із системою та доцільність перепроєктування під нову технологію виготовлення. У вітчизняному науковому полі важливими є праці, що розкривають інституційний та логістичний вимір оборонно-технологічного розвитку. Так Давимука С. А. в роботі [8] обґрунтовує необхідність формування багаторівневої інноваційної екосистеми оборонної промисловості України, у якій поєднуються наукові знання, технології, інституційні механізми та учасники сектору Defense Tech. Натомість Бурдейна Н., Федченко О. та Венцюк А. акцентують [9] увагу на сучасних викликах військової логістики України, пов'язаних із координацією, ефективністю управління ресурсами, постачанням, транспортуванням, зберіганням і розподілом матеріально-технічних засобів, а серед практичних напрямів удосконалення виділяють централізоване управління та єдиний координаційний контур логістичних процесів. У цьому ж контексті інтерес становлять роботи норвезького FFI [10], де адитивне виробництво розглядається як засіб швидкого виготовлення, ремонту та використання нових матеріалів у військових умовах, а польові експерименти демонструють можливість розподіленого виробництва прототипів і запасних частин безпосередньо близько до місця потреби, зокрема у контейнеризованому форматі.

Поряд із науковими працями дедалі більшого значення набувають офіційні документи НАТО, Європейського Союзу та Європейського оборонного агентства, які задають інституційну рамку для осмислення оборонно-технологічної спроможності. Оновлений Defence Production Action Plan НАТО, Секретарський річний звіт за 2025 рік, а також документи НАТО STO засвідчують зростання уваги до оборонного виробництва, стійкості логістики, багатонаціонального обслуговування та впровадження адитивного виробництва для підвищення взаємосумісності й логістичної ефективності. На рівні ЄС аналогічна логіка простежується в European Defence Industrial Strategy та White Paper for European Defence, де акцент зроблено на переході до defence industrial readiness, прискоренні виробництва, посиленні досліджень і формуванні більш цілісної європейської оборонно-технологічної бази. Водночас European Defence Agency у звіті за 2025 рік прямо фіксує розвиток проекту Additive Manufacturing for Logistic Support, спрямованого на вироблення спільних стандартів і підвищення взаємозамінності запасних частин між державами, причому до цього проекту вже долучено десять країн ЄС і Норвегію.

Отже, наявні дослідження достатньо ґрунтовно розкривають окремі технологічні, логістичні та організаційні аспекти оборонно-технологічного реагування, зокрема адитивне виробництво, виготовлення запасних частин на вимогу, реверс-інжиніринг, перепроєктування та інституційні механізми зміцнення оборонно-промислової стійкості. Водночас у доступному науковому полі практично відсутня цілісна концептуальна модель, яка б інтегрувала ці елементи в єдиний адаптивний багатоконтурний цикл формування оборонно-технологічної спроможності на основі оперативного досвіду.

Мета дослідження. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та концептуальне моделювання центру перспективних технологій ADM, як адаптивного багатоконтурного циклу формування оборонно-технологічної спроможності на основі оперативного досвіду.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах воєнного часу центр перспективних технологій доцільно розглядати не як сукупність ізольованих функцій, а як цілісну адаптивну соціотехнічну систему, у межах якої інтегруються оперативний досвід, технічний аналіз, наукове осмислення, інженерне опрацювання, технологічна реалізація, верифікація, підготовка персоналу, документування та накопичення знань. У такому підході ключовим результатом діяльності центру стає не окремий виріб чи разове розв'язання локальної технічної проблеми, а формування стійкої оборонно-технологічної спроможності, здатної до відтворення, масштабування, адаптації та подальшого розвитку. Отже, ADM слід інтерпретувати як інституційний механізм перетворення практичного досвіду на керовану систему рішень, знань, технологій і підготовлених фахівців. Теоретичною передумовою такого підходу є те, що у воєнному середовищі формування спроможності не відбувається лінійно. На відміну від класичних мирних моделей, де між виявленням потреби та реалізацією рішення існує відносно стабільний і послідовний ланцюг погоджень, у середовищі високої невизначеності, часових обмежень, дефіциту комплектуючих, ризиків логістичного зриву та швидкої зміни вимог ефективна система повинна функціонувати як замкнений цикл із багатьма внутрішніми поверненнями. Саме тому ADM доцільно описувати як адаптивний багатоконтурний цикл, у якому кожен завершений результат не лише вирішує поточну проблему, а й зменшує невизначеність майбутніх рішень, збагачує систему знаннями і підсилює її кадрову та технологічну готовність.

У межах запропонованого підходу загальна логіка функціонування ADM може бути представлена як великий зовнішній цикл (рис. 1), який включає такі стадії, як виникнення оперативної потреби, формалізація проблеми, наукове осмислення, R&D та інженерне опрацювання, технологічна реалізація, верифікація, впровадження, підготовка особового складу, документування, оновлення знань і перехід до нового циклу розвитку. Ця послідовність є принципово важливою, оскільки вона демонструє, що центр перспективних технологій не зводиться до виробничого майданчика чи ремонтного вузла, а функціонує як механізм постійного перетворення бойового досвіду на інституційно закріплену оборонно-технологічну спроможність.

Перша стадія циклу пов'язана з виникненням оперативної потреби. Під нею слід розуміти не будь-який абстрактний запит, а реальну проблему, що виникає внаслідок пошкодження виробу, дефіциту запасних частин, необхідності адаптації техніки до нових умов, появи нових засобів ураження або потреби у швидкому технологічному реагуванні. На цьому етапі система отримує первинний імпульс від практики. Проте емпіричний характер такого запиту є недостатнім для побудови відтворюваного рішення, а тому наступною стадією є формалізація проблеми, у межах якої визначаються її технічна сутність, функціональні вимоги, критичність, обмеження, граничні часові параметри, ризики та критерії допустимого результату. Після формалізації, проблема переходить у стадію наукового осмислення, де початковий практичний запит переводиться в аналітичну площину, а саме з'ясовуються причини відмови або дефіциту, аналізуються закономірності виникнення проблеми, формуються гіпотези щодо шляхів її розв'язання, визначаються можливі технічні, матеріалознавчі, конструктивні чи організаційні альтернативи. Саме на цьому етапі ADM перестає бути лише інструментом швидкої реакції, а набуває якостей дослідницько-аналітичного осередку, який здатний не тільки виконати завдання, а й пояснити проблему, узагальнити її та підготувати основу для повторного використання знання в майбутньому.

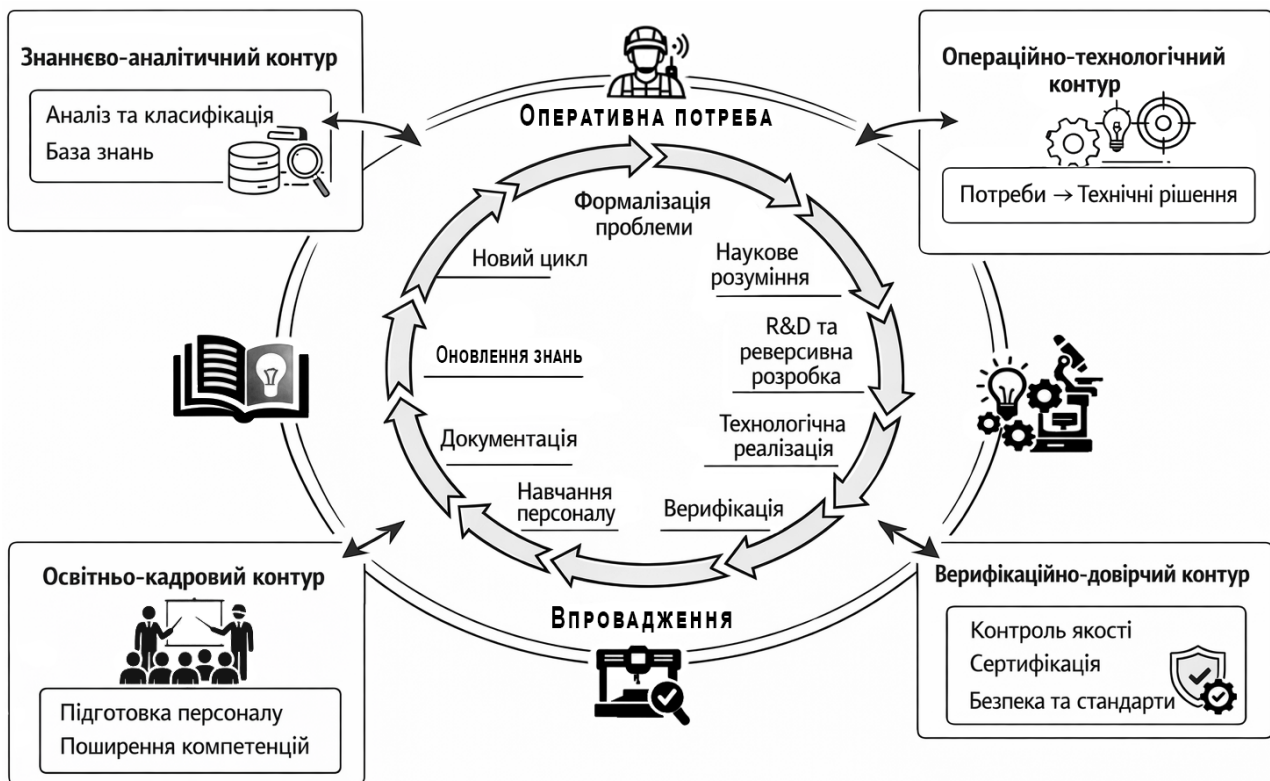


Рис. 1. Концептуальна модель адаптивного багатоконтурного циклу ADM формування оборонно-технологічної спроможності

Центральною ланкою моделі виступає стадія R&D та інженерного опрацювання. У її межах здійснюються реверс-інжиніринг, перепроектування, адаптація конструкції до доступних технологічних можливостей, підбір матеріалів, цифрове моделювання, виготовлення прототипів, випробувальне уточнення параметрів та інші інженерні дії, спрямовані на перехід від аналітичного розуміння проблеми до конкретного технічного рішення. Саме тут відбувається найінтенсивніша трансформація знання в артефакт, вузол, деталь, модуль, технологічну карту, методику або новий виробничий процес. При цьому R&D-стадія не є одноразовою, оскільки для досягнення прийнятної рівня функціональності, сумісності та технологічної здійсненості зазвичай потрібні багаторазові мікроітерації між моделюванням, прототипуванням, перевіркою та коригуванням.

Наступною стадією виступає технологічна реалізація, яка охоплює виготовлення або відновлення виробу, цифрове відтворення геометрії, адитивне чи субтрактивне виробництво, постобробку, складання, доведення та підготовку об'єкта до практичного застосування. Однак технологічна реалізація сама по собі ще не означає завершення циклу, оскільки будь-який отриманий результат повинен бути перевірений на відповідність функціональним, безпековим і експлуатаційним вимогам. Саме тому верифікація в моделі ADM має системоутворювальний характер. Вона включає контроль якості, випробування, технічний допуск, перевірку повторюваності результату, оцінку ризику відмови, формування технічної довіри до рішення та ухвалення рішення щодо допуску до впровадження.

У межах концептуальної моделі верифікацію доцільно розглядати не як допоміжну процедуру, а як формальний фільтр між експериментальним рішенням і рішенням, що допускає до практичного використання. Це означає, що до впровадження буде допущений результат, який задовольняє мінімальні порогові значення функціональної придатності, безпекової відповідності та економічної доцільності. Тим самим ADM вбудовує в свою логіку не лише прискорення технічного циклу, а й механізм запобігання помилковому або

передчасному впровадженню. І після верифікації система переходить до стадії впровадження. У контексті ADM це означає не просто передання готового виробу, а включення результату в реальний контекст експлуатації, де він взаємодіє з технікою, операторами, інженерами, логістичними ланцюгами та організаційними процедурами. Лише на цьому рівні стає остаточно зрозуміло, наскільки рішення є не тільки технічно працездатним, а й експлуатаційно доцільним, зручним, масштабованим і виправданим з погляду часу та ресурсів. Отже, впровадження виконує роль переходу від внутрішнього циклу центру до зовнішнього середовища оборонної практики.

Жодне технологічне рішення не здатне забезпечити довготривалий ефект, якщо не сформовано людський ресурс, який може його відтворювати, застосовувати, супроводжувати, удосконалювати та передавати далі. Тож у концептуальній моделі ADM особливе місце посідає підготовка особового складу. На відміну від класичних виробничих схем, у яких навчання часто розглядається як зовнішній або другорядний процес, у запропонованому підході кадровий контур є невід'ємною частиною формування спроможності. Саме тому підготовка операторів, інженерів, техніків, інструкторів і майбутніх фахівців має ґрунтуватися не на абстрактних програмах, а на реальних кейсах, сформованих у попередніх стадіях великого циклу. У цьому сенсі ADM виступає також середовищем безперервного кадрового відтворення технологічної культури.

Завершальними стадіями великого циклу є документування та оновлення знань. Документування включає фіксацію конструктивних рішень, параметрів виготовлення, результатів випробувань, типових дефектів, обміну досвідом, технологічних карт, цифрових моделей, навчальних кейсів і методичних матеріалів. Оновлення знань означає включення цього досвіду до бази знань центру, перегляд методик, уточнення стандартів, розроблення нових навчальних модулів і формування наступних технічних задач. Саме через ці стадії ADM набуває замкнутого характеру, коли результат не зникає після виконання окремого завдання, а повертається в систему як ресурс нового циклу розвитку.

Проведемо формалізований опис запропонованої моделі ADM. Нехай стан ADM у дискретний момент часу k визначається вектором (1):

$$X_k = (H_k, Z_k, V_k, P_k, K_k, L_k), \quad (1)$$

де H_k – рівень невизначеності щодо технічної проблеми; Z_k – рівень технічної зрілості рішення; V_k – рівень верифікованої придатності; P_k – кадрова готовність; K_k – обсяг формалізованого знання; L_k – рівень логістично-виробничої забезпеченості. Тоді загальна динаміка системи може бути подана як формула (2):

$$X_{k+1} = F(X_k, U_k, E_k), \quad (2)$$

де U_k – керуючі дії системи; E_k – зовнішні впливи середовища, серед яких часовий тиск, дефіцит ресурсів, зміна бойових вимог, ризики порушення постачання та інтенсивність зворотного зв'язку з практики.

Інтегральний результат функціонування ADM опишемо через індекс оборонно-технологічної спроможності (3):

$$C_k = \alpha_1 \left(1 - \frac{H_k}{H_{max}}\right) + \alpha_2 Z_k + \alpha_3 V_k + \alpha_4 P_k + \alpha_5 K_k + \alpha_6 L_k, \quad (3)$$

де $\alpha_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^6 \alpha_i = 1$. Розуміємо, що (2) демонструє зростання спроможності не лише через факт виготовлення рішення, а як результат одночасного зменшення невизначеності, зростання

технічної зрілості, проходження верифікації, підготовки кадрів, накопичення знань і підсилення виробничо-логістичної готовності.

Формалізуємо невизначеність технічної проблеми з урахуванням ентропії (4):

$$H_k = - \sum_{i=1}^m p_i^{(k)} \ln p_i^{(k)}, \quad (4)$$

де $p_i^{(k)}$ – імовірність того, що i -та гіпотеза розв'язання є правильною на етапі k . Це свідчить про те, що на ранніх стадіях циклу система має кілька конкуруючих пояснень і варіантів рішення, а отже невизначеність є високою. У міру формалізації, аналізу, R&D та верифікації правильний варіант поступово уточнюється, а ентропія зменшується. Таким чином, ключовий ефект ADM полягає не лише у виготовленні виробу, а в системному зменшенні невизначеності майбутніх технічних рішень.

Проведемо опис верифікованої придатності, як інтегральної функції якості, відповідності вимогам, повторюваності результату та ризику (5):

$$V_k = \sigma(\beta_1 q_k + \beta_2 s_k + \beta_3 r_k - \beta_4 \rho_k), \quad (5)$$

де q_k – функціональна якість рішення; s_k – рівень відповідності технічним вимогам і стандартам; r_k – повторюваність результату; ρ_k – ризик відмови або небезпечного застосування; $\sigma(\cdot)$ – нормувальна функція. За такого підходу довіра до виробу або технології вже не є інтуїтивною оцінкою виконавця, а виступає наслідком формалізованих та виконаних процедур контролю, випробувань і підтвердження відповідності.

Контури знань і кадрів також доцільно подати у вигляді динамічних залежностей (6), (7):

$$K_{k+1} = (1 - \mu)K_k + \gamma_1 D_k + \gamma_2 LL_k, \quad (6)$$

$$P_{k+1} = (1 - \nu)P_k + \delta_1 T_k + \delta_2 Pr_k, \quad (7)$$

де D_k – інтенсивність документування LL_k – обсяг обміну досвідом; T_k – інтенсивність навчання; Pr_k – обсяг практичної участі персоналу в реальних кейсах; μ і ν – коефіцієнти старіння знання та деградації компетенцій без практичного застосування. В такому вигляді, знання і кадри в ADM не є периферійними продуктами діяльності, а належать до базових змінних системного розвитку.

Багатоконтурність ADM передбачає наявність мінімум чотирьох локальних мікроциклів поряд із великим зовнішнім циклом. Де перший, це *дослідницько-інженерний мікроцикл*, який функціонує в зоні R&D та забезпечує повторюваний перехід між аналізом, моделюванням, перепроєктуванням, прототипуванням і технічним уточненням до досягнення прийнятного рівня здійсненності. Другий, це *верифікаційно-довірчий мікроцикл*, він локалізується в зоні випробувань і контролю якості та забезпечує коригування рішення на основі результатів тестування, уточнення критеріїв допуску та зниження ризику помилкового впровадження. Третій, *освітньо-кадровий мікроцикл*, що забезпечує взаємний перехід між реальним практичним кейсом, навчальним модулем, формуванням компетенцій і поверненням підготовлених фахівців у контур практичної діяльності. І четвертий, *мікроцикл освітньо-аналітичний*, якій охоплює документування, класифікацію, накопичення та повторне використання технічного досвіду, перетворюючи одиничний результат на колективний ресурс системи.

Розширимо модель за рахунок введення умови допуску рішення до впровадження. Нехай рішення може бути передане до практичної реалізації лише тоді, коли виконується система умов (8):

$$V_k \geq V_{min}, \rho_k \leq \rho_{max}, \eta_k > 0, \quad (8)$$

де V_{min} – мінімально допустимий рівень верифікованої придатності, ρ_{max} – гранично допустимий ризик, η_k – показник економічної доцільності. Це дозволить відмежувати просто технічно можливе рішення від рішення, яке є обґрунтовано допустимим до реального оборонного застосування.

Важливо зазначити, що економічний зміст ADM полягає в тому, що він функціонує не лише як центр виготовлення чи відновлення окремих технічних об'єктів, а як механізм зниження сукупних витрат оборонної системи в умовах високої невизначеності. При цьому в традиційній лінійній моделі втрати зазвичай формуються за рахунок тривалих строків постачання, простоїв техніки, імпортої залежності, повторюваних інженерних помилок, браку стандартизованого знання, дефіциту підготовленого персоналу тощо. Тоді як у моделі ADM частина цих витрат трансформується в інвестиції у знання, інженерну спроможність, підготовку кадрів і повторне використання цифрових рішень.

Сукупні витрати функціонування ADM можна подати як (9):

$$J = \sum_{k=0}^T (c_k^{R\&D} + c_k^{prod} + c_k^{ver} + c_k^{train} + c_k^{log} + c_k^{delay} + c_k^{fail}), \quad (9)$$

де $c_k^{R\&D}$ – витрати на інженерне опрацювання; c_k^{prod} – витрати на виготовлення або відновлення; c_k^{ver} – витрати на випробування; c_k^{train} – витрати на навчання; c_k^{log} – логістичні витрати; c_k^{delay} – втрати від затримки забезпечення; c_k^{fail} – втрати від браку або помилкового впровадження. Водночас інтегральний ефект функціонування системи може бути представлений як (10):

$$E = \sum_{k=0}^T (b_k^{time} + b_k^{import} + b_k^{uptime} + b_k^{reuse} + b_k^{knowledge}) - J, \quad (10)$$

де b_k^{time} – вираш від скорочення часу до отримання рішення; b_k^{import} – вираш від зменшення імпортої залежності; b_k^{uptime} – вираш від скорочення простоїв техніки; b_k^{reuse} – вираш від повторного використання моделей і рішень; $b_k^{knowledge}$ – довгостроковий вираш від накопичення знань і кадрового відтворення. Якщо $E > 0$, система демонструє не лише технологічну, а й економічну доцільність.

Для порівняння окремих кейсів доцільно також використовувати питомий показник ефективності (11):

$$\eta_k = \frac{\lambda_1 \Delta t_k + \lambda_2 \Delta d_k + \lambda_3 \Delta i_k + \lambda_4 \Delta u_k}{J_k}, \quad (11)$$

де Δt_k – скорочення часу виготовлення або відновлення; Δd_k – зменшення простою техніки; Δi_k – зменшення імпортої залежності; Δu_k – приріст повторного використання напрацьованих рішень; J_k – витрати поточного циклу; λ_i – вагові коефіцієнти. Саме цей показник дає змогу переходити від загальних тверджень про корисність ADM до вимірюваного аналізу його результативності.

Для завершеного опису концептуальної моделі ADM недостатньо його подати лише як послідовність стадій великого адаптивного циклу та сукупність локальних мікроциклів. Не менш важливо визначити внутрішню структурно-функціональну архітектуру центру, тобто ті підсистеми, організаційні вузли та функціональні модулі, через які забезпечується проходження оперативного запиту від стадії виявлення потреби до стадії верифікованого впровадження, навчального відтворення та закріплення знань. Саме така архітектура

дозволяє перейти від опису процесу до моделі інституційно організованого середовища, здатного стабільно відтворювати оборонно-технологічну спроможність у воєнних умовах.

З позицій системного аналізу запропоновану архітектуру доцільно інтерпретувати як поєднання трьох взаємопов'язаних рівнів. Перший рівень становить рівень оперативного входу, до якого належать виявлення потреби, її постановка та пріоритезація. Другий рівень є рівнем інженерно-технологічного перетворення, де здійснюються дослідження, R&D, виготовлення, випробування та допуск. Третій рівень утворює рівень інституційного відтворення, який охоплює навчання, документування, накопичення знань, кадрове забезпечення та підготовку основи для нового циклу розвитку. Така трирівнева інтерпретація дозволяє показати, що ADM є не лише технічним, а й організаційно-знансьвим механізмом, де результати кожного циклу працюють одночасно на поточне розв'язання проблеми та на довгострокове нарощування спроможності.

Проведемо формалізацію механізму керування запропонованої моделі. У загальному вигляді керування ADM доцільно інтерпретувати як процес цілеспрямованого впливу координаційно-управлінського ядра на стан функціональних підсистем центру з метою досягнення прийняттого поєднання чотирьох базових результатів, таких як, скорочення часу реакції на оперативну потребу, забезпечення технічної та безпекової придатності рішення, мінімізації ризику помилкового впровадження та формування довготривалого освітньо-кадрового ефекту. У такій постановці ADM прагне не лише до швидкого проходження циклу, а прагне до оптимального балансу між швидкістю, якістю, ризиком і накопиченням спроможності.

Для формалізації механізму керування введемо вектор керуючих дій системи (12):

$$U_k = (u_k^p, u_k^a, u_k^r, u_k^t, u_k^v, u_k^i, u_k^e, u_k^d), \quad (12)$$

де u_k^p – інтенсивність постановки та формалізації задачі; u_k^a – аналітичне опрацювання; u_k^r – R&D та конструкторсько-інженерні дії; u_k^t – технологічна реалізація; u_k^v – верифікаційно-випробувальні процедури; u_k^i – дії з впровадження та супроводу; u_k^e – освітньо-кадрові дії; u_k^d – документування та інтеграція результату до бази знань. У цьому вигляді керування набуває змісту розподілу інституційної уваги, ресурсів і часу між ключовими контурами системи залежно від характеру запиту та поточного стану ADM.

Зазначимо, що вхідним об'єктом керування є оперативний кейс або технічний запит R_j , що надходить із зовнішнього середовища практичного застосування. Для кожного такого запиту доцільно формувати картку первинної постановки, яку можна подати у вигляді вектора (13):

$$R_j = (q_j, \tau_j, \kappa_j, \chi_j, \psi_j), \quad (13)$$

де q_j – критичність потреби; τ_j – допустимий часовий горизонт реагування; κ_j – технічна складність; χ_j – ресурсомісткість; ψ_j – очікуваний ефект від розв'язання. Саме на основі цих параметрів координаційно-керуючий блок приймає рішення щодо пріоритетності кейсу, вибору траєкторії його проходження через контури ADM та допустимого режиму використання ресурсів.

Для впорядкування потоку запитів введемо інтегральний показник пріоритету (14):

$$P_j = \omega_1 q_j + \omega_2 \frac{1}{\tau_j} + \omega_3 \kappa_j + \omega_4 \psi_j - \omega_5 \chi_j, \quad (14)$$

де ω_i – вагові коефіцієнти, що відображають управлінські пріоритети центру. Така функція означає, що перевага надається задачам із високою критичністю, коротким допустимим часом

реагування, значним очікуваним ефектом і прийнятною ресурсною вартістю. У разі дефіциту потужностей саме значення P_j дозволяє не інтуїтивно, а формалізовано визначати черговість опрацювання кейсів. Це особливо важливо для воєнного середовища, де одночасно можуть надходити кілька конкурентних запитів із різною глибиною наслідків.

Після прийняття кейсу до опрацювання система переходить у режим керованого просування між контурами. Для цього доцільно ввести дискретну змінну стадії (15):

$$s_k \in \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}\}, \quad (15)$$

де S_1 – оперативна потреба; S_2 – формалізація; S_3 – наукове осмислення; S_4 – R&D; S_5 – технологічна реалізація; S_6 – верифікація; S_7 – впровадження; S_8 – підготовка персоналу; S_9 – документування; S_{10} – оновлення знань. Тоді рух кейсу через систему можна подати як (16):

$$s_{k+1} = \mathcal{T}(s_k, \mathcal{E}_k), \quad (16)$$

де \mathcal{T} – функція переходу, а \mathcal{E}_k – сукупність умов переходу, що включає поточні значення технічної зрілості, рівня верифікованої придатності, ризику, економічної доцільності, кадрової готовності й повноти документування.

Перехід від стадії оперативної потреби до формалізації доцільно дозволяти лише за умови наявності мінімально достатньої вхідної інформації, тобто коли показник повноти постановки I_k задовольняє умову $I_k \geq I_{min}$. Це означає, що кейс не може бути переданий у поглиблене технічне опрацювання, доки не визначено його функціональний контекст, обмеження, критичність і хоча б базові критерії успішності. Якщо ж $I_k \geq I_{min}$, система не рухає кейс уперед, а повертає його в контур додаткового уточнення. Такий підхід запобігає ситуації, коли інженерний або виробничий контур починає працювати з частково поставленою задачею.

Також перехід від аналітичного осмислення до R&D та конструкторського опрацювання доцільно здійснювати тільки тоді, коли сформовано хоча б одну технічно несуперечливу гіпотезу розв'язання та визначено множину допустимих обмежень. Формально це може бути задано умовами $n_h \geq 1$, $\Omega_k = \emptyset$, де n_h – кількість сформованих робочих гіпотез, а Ω_k – множина допустимих конструктивно-технологічних рішень. Якщо ж аналітичний блок не спромігся виділити реалістичну траєкторію розв'язання, кейс не переходить у R&D, а або повертається на доуточнення постановки, або переводиться в режим відкладеного опрацювання до появи додаткових даних чи ресурсів.

Критично важливим є перехід від R&D до технологічної реалізації. У межах ADM його доцільно дозволяти лише за умови досягнення мінімального рівня технічної зрілості рішення Z_k та технологічної здійсненності M_k , тобто $Z_k \geq Z_{min}$, $M_k \geq M_{min}$. При цьому тут Z_k відображає ступінь інженерної пропрацьованості рішення, а M_k – його сумісність із наявними технологічними засобами, матеріалами, обладнанням і часовими обмеженнями центру. Якщо хоча б одна з цих умов не виконується, кейс повертається в R&D-контур на доопрацювання. Саме цей механізм запобігає надходженню у виробничо-технологічний блок тільки рішення, що доведені до стану реальної матеріалізації, а не будь-які конструкторські гіпотези. Завершення технологічної реалізації, направляє кейс у верифікаційно-випробувальний контур. Такий перехід доцільно здійснювати лише за умови досягнення базової функціональної завершеності прототипу або виробу, $G_k \geq G_{min}$, де G_k – показник готовності об'єкта до випробувань. Його зміст полягає в тому, що результат має бути достатньо цілісним, аби його випробування мало сенс з інженерної точки зору. У протилежному випадку верифікація буде фіксувати не властивості рішення, а лише факт його незавершеності, що

створює зайве навантаження на контрольний контур і спотворює управлінський зворотний зв'язок.

Найважливішим у структурі керування ADM є механізм прийняття рішення про допуск до впровадження. В межах запропонованої моделі він має бути не ситуативним, а формалізованим і узгодженим. Тому рішення може бути передане в практичне середовище лише тоді, коли одночасно виконуються умови $V_k \geq V_{min}$, $\rho_k \leq \rho_{max}$, $\eta_k > 0$. Тут V_k – інтегральний рівень верифікованої придатності, ρ_k – ризик відмови або небажаного ефекту при застосуванні, η_k – показник економічної доцільності. Ця система умов означає, що ADM не розглядає технічно можливе рішення як автоматично придатне до впровадження. Для практичного допуску воно має бути перевіреним, достатньо безпечним і виправданим не лише функціонально, а й з позицій часу, ресурсів і повторюваності. У випадках, коли хоча б одна з умов допуску не виконується, система повинна визначати не просто факт відмови, а й контур повернення (табл. 1).

Таблиця 1

Контур повернення

Логіка	Пункт повернення
Недостатня якість	повернення в R&D або технологічний блок
Невідповідність вимогам	повернення в R&D або технологічний блок
Надмірний ризик	направлення в поглиблену верифікацію
Відсутня економічна доцільність	координаційно-керуючий блок зупиняє проєкт, або зміна режиму у відкладений розвиток

Таким чином, зворотний хід у моделі ADM є частиною адаптивного циклу, що зменшує ймовірність помилкового впровадження та підвищує якість майбутніх рішень.

Окремо слід підкреслити роль освітньо-кадрового та знаннево-аналітичного контурів у механізмі керування. У межах ADM вони не мають активуватися лише наприкінці циклу як завершальний додаток до технічного результату. Навпаки, рішення про підключення освітнього або знанневого контуру має прийматися ще на етапі проходження кейсу через основні стадії. Якщо кейс має високу повторюваність, навчальний потенціал або значення для формування стандарту, координаційно-керуючий блок повинен ініціювати паралельне формування документації, шаблонів, інструкцій, навчальних модулів і матеріалів супроводу. Це дозволяє відразу перетворювати одиничний результат на інституційний ресурс, не відкладаючи його формалізацію до завершення проєкту.

З позицій системної оптимізації мету керування ADM доцільно розглянути через цільову функцію (17):

$$\max \Phi_k = \theta_1 C_k - \theta_2 T_k - \theta_3 J_k - \theta_4 \rho_k + \theta_5 K_k + \theta_6 P_k, \quad (17)$$

де C_k – інтегральна оборонно-технологічна спроможність; T_k – тривалість проходження циклу; J_k – сукупні витрати; ρ_k – ризик; K_k – знанневий приріст; P_k – кадровий приріст; θ_i – вагові коефіцієнти. Така форма показує, що ADM керується не однією метою, наприклад, мінімізацією часу, а багатокритеріальною логікою, у якій швидкість, безпека, ефективність, знання та кадрове відтворення повинні перебувати у збалансованому співвідношенні.

У практичному розумінні це означає, що координаційно-керуючий блок ADM виконує три базові функції:

а) функцію відбору та пріоритетності кейсів;

б) функцію маршрутизації, тобто визначення послідовності проходження кейсу через контури та рішення про повернення;

в) функцію адаптивної корекції, коли на основі результатів верифікації, експлуатаційного зворотного зв'язку або ресурсних змін система змінює інтенсивність керуючих дій U_k та фактично перебудовує траєкторію проходження кейсу.

А отже, бачимо, що механізм керування ADM доцільно визначати як формалізовану систему пріоритетності, маршрутизації, допуску, повернення та адаптивної корекції кейсів у межах структурно-функціональної архітектури центру. У такому підході кожний перехід між контурами спирається на визначені критерії стану, а кожне повернення має не випадковий, а функціонально обґрунтований характер. Саме це забезпечує цілісність ADM як керованої системи, здатної працювати в умовах невизначеності, часового тиску, ресурсних обмежень і високої ціни помилки. У подальшому така формалізація створює підґрунтя для сценарного опису проходження кейсу через центр і для побудови системи показників оцінювання результативності ADM.

Сценарій функціонування ADM та система показників ефективності. Для прикладної інтерпретації запропонованої концептуальної моделі розглянемо типовий для воєнного часу сценарій, у якому об'єктом втручання виступає дефіцитна деталь озброєння, що вже не випускається серійно, але є критично важливою для відновлення працездатності пошкодженого вузла після бойового застосування. Вибір саме такого кейсу є методично виправданим, оскільки він поєднує одразу кілька характерних ознак середовища, описаного в моделі ADM, таких як дефіцит постачання, пошкодження виробу, часовий тиск, невизначеність технічного стану, потребу в інженерній адаптації та необхідність швидкого переходу від емпіричної проблеми до верифікованого рішення. Саме такі умови визначимо як базові для виникнення оперативної потреби та запуску великого адаптивного циклу ADM.

Нехай унаслідок бойового впливу пошкоджено вузол певного зразка озброєння, а його ключова деталь D^* більше не виробляється серійно, в зв'язку з чим відсутня в доступному ланцюгу постачання та не може бути оперативно замінена штатним способом. У такому випадку оперативний запит до ADM формується не як абстрактне технічне завдання, а як критичний кейс відновлення бойової спроможності конкретного виробу в обмеженому часовому інтервалі. Формалізуємо такий кейс у виразі (18):

$$R^* = (q^*, \tau^*, \kappa^*, \chi^*, \psi^*), \quad (18)$$

де q^* – критичність деталі для функціонування вузла; τ^* – максимально допустимий час реагування; κ^* – технічна складність відтворення; χ^* – ресурсомісткість рішення; ψ^* – очікуваний ефект від відновлення. Для обраного сценарію природно припустити, що q^* є високим, τ^* – малим, κ^* – середнім або високим, а ψ^* – істотним, оскільки відновлення деталі повертає в дію не окремий компонент, а цілий функціональний вузол.

На першій стадії запропонованого циклу ADM відбувається фіксація оперативної потреби. Джерелом запиту виступає факт бойового пошкодження та неможливість штатної заміни деталі. Оскільки запит поєднує високу функціональну значущість, дефіцитність і прямий вплив на відновлення спроможності, координаційно-керуючий блок маркує кейс як пріоритетний. В форматі ADM це є первинний контакт системи з практичною складовою, коли емпіричний факт відмови стає джерелом постановки задачі.

Наступна фаза, це стадія формалізації проблеми, де здійснюється ідентифікація пошкодженого вузла, збір залишків або уламків деталі, аналіз місця її розташування в системі, уточнення функціонального призначення, навантажень, допусків, умов взаємодії з суміжними елементами та можливих обмежень щодо матеріалу. Якщо повна технічна документація відсутня, формується неповна, але достатня для старту інженерного аналізу постановка завдання. На цій стадії ключовим результатом є технічно придатний опис задачі, який дозволяє перейти від запиту “потрібно відновити деталь” до задачі типу “потрібно відтворити або перепроектувати функціональний елемент із заданими механічними, геометричними та

посадковими характеристиками”, а не саме рішення проблеми. Саме такий перехід від емпіричного випадку до формалізованої проблеми є обов'язковою умовою запуску подальших контурів ADM.

Після цього кейс входить у дослідницько-аналітичний контур. На цій стадії встановлюється, що пряме копіювання залишків пошкодженої деталі може бути недостатнім, оскільки її геометрія вже спотворена бойовим ушкодженням, а первинний матеріал або технологія виробництва можуть бути недоступними. Тому аналітичне осмислення включає не лише відновлення форми, а й реконструкцію функції деталі в межах цілого вузла. У результаті формується одна або кілька інженерних гіпотез, таких як точне відтворення, функціонально еквівалентне перепроєктування або посилене перепроєктування з адаптацією до доступної технології виготовлення та тимчасове польове рішення з подальшим доопрацюванням.

Саме на цьому етапі невизначеність H_k є найбільшою, оскільки існує кілька конкуруючих траєкторій розв'язання. У міру відбору гіпотез і накопичення технічних даних ентропія проблеми зменшується, що і становить один із головних системних ефектів ADM.

Центральною фазою сценарію виступає R&D та інженерне опрацювання. У цьому контурі здійснюються 3D-сканування уламків, побудова цифрової моделі, реверс-інжиніринг, обчислювальна реконструкція відсутніх фрагментів, визначення функціонально критичних поверхонь, підбір доступного матеріалу та коригування геометрії під наявну технологію виготовлення. Якщо оригінальна технологія була недосяжною або економічно не виправданою, модель переходить до перепроєктування деталі під адитивне або гібридне виробництво. Це повністю узгоджується з роллю R&D-контурів, описаних у запропонованій моделі як ядра інженерної трансформації оперативного досвіду в придатний до реалізації продукт.

Після досягнення мінімального рівня технічної зрілості $Z_k \geq Z_{min}$ кейс переходить у виробничо-технологічний контур. Тут відбувається фізичне виготовлення деталі D_{new}^* , яке може включати адитивний друк, механічну дообробку, термічну або поверхневу постобробку, контроль посадкових розмірів і складання з суміжним вузлом. Якщо в процесі виготовлення виявляються технологічні обмеження, кейс повертається в R&D-контур для корекції цифрової моделі або підбору іншого матеріалу. Таким чином, технологічна реалізація виступає не просто етапом виготовлення, а активним елементом адаптації рішення до ресурсних і часових умов.

Стадія верифікації для даного сценарію є критичною, оскільки деталь стосується озброєння, а отже помилка впровадження може мати неприйнятні наслідки. Верифікація включає геометричний контроль, функціональні випробування у складі вузла, оцінку стійкості до робочих навантажень, перевірку сумісності, аналіз поведінки після циклу роботи та, за потреби, прискорені ресурсні тести. У межах моделі ADM рішення може бути допущене до впровадження лише тоді, коли виконується система умов $V_k \geq V_{min}$, $\rho_k \leq \rho_{max}$, $\eta_k > 0$, де V_k – інтегральна верифікована придатність, ρ_k – ризик відмови, η_k – економічна доцільність. Якщо хоча б одна з умов не виконується, кейс не вважається завершеним, а повертається в контур доопрацювання. Саме в такій процедурі реалізується верифікаційно-довірчий мікроцикл, у якому довіра до рішення є не інтуїцією, а результатом багатокрокового підтвердження.

Після успішної верифікації деталь передається на стадію впровадження. У межах сценарію це означає не лише встановлення нової деталі у вузол, а фактичне відновлення функціональної готовності конкретного зразка озброєння. Однак на цьому практична цінність кейсу не завершується. На відміну від лінійної ремонтної моделі, ADM розглядає впровадження як точку виходу рішення в експлуатаційне середовище, з якого надходить новий зворотний зв'язок: чи була деталь зручною в монтажі, чи не виявилися додаткові вібраційні або теплові ефекти, чи не виникли нові обмеження під час бойового застосування,

чи можна стандартизувати таке рішення для інших аналогічних випадків. Таким чином, кейс не “закривається” впровадженням, а переходить у фазу експлуатаційного навчання системи.

Особливе значення в цьому сценарії має освітньо-кадровий контур. Якщо відновлення дефіцитної деталі виявилось успішним, результат повинен бути використаний для формування навчального кейсу: як ідентифікувати критичні пошкодження такого типу, як правильно збирати залишки геометрії, як будувати цифрову модель, які параметри є функціонально визначальними, які технологічні ризики супроводжують виготовлення, які критерії допуску є обов'язковими. У такий спосіб одиничне технічне рішення трансформується в навчальний модуль для інженерів, техніків, операторів ремонтних підрозділів або курсантів. Саме тут ADM проявляє себе не просто як центр виготовлення, а як середовище кадрового відтворення технологічної компетентності.

Останнім, але не менш важливим етапом виступає документування та оновлення знань. Для розглянутого кейсу це означає створення цифрового паспорту рішення, який включає 3D-модель відновленої деталі, опис вихідної проблеми, параметри сканування та реконструкції, вибір матеріалу, технологічну карту виготовлення, результати випробувань, зафіксовані ризики, часові витрати, обмін досвідом, що були отримані під час процесу, і рекомендації для аналогічних випадків. Після цього кейс повинен бути включений у бібліотеку реверсованих деталей, базу обміну досвідом і, за потреби, у каталог допустимих тимчасових або серійно відтворюваних рішень. Завдяки цьому ADM зменшує витрати майбутніх циклів: наступний випадок аналогічного пошкодження вже не стартує з нульової невизначеності, а використовує накопичений знаннєвий капітал. Саме така логіка повернення результату в систему як ресурсу нового циклу і становить одну з головних відмінностей ADM від звичайного ремонтного ланцюга.

З позицій формалізації підсумковий ефект розглянутого сценарію доцільно описувати не одним результатом, а вектором виходу (19):

$$Y^* = (D_{new}^*, V^*, \Delta T^*, \Delta U^*, K_{add}^*, P_{add}^*), \quad (19)$$

де D_{new}^* – відновлена або перепроєктована деталь; V^* – досягнутий рівень верифікованої придатності; ΔT^* – скорочення часу відновлення порівняно з альтернативним способом; ΔU^* – приріст відновленої бойової спроможності вузла або системи; K_{add}^* – приріст ресурсу знання; P_{add}^* – приріст кадрової готовності. Такий підхід дозволяє показати, що результатом роботи ADM є не лише фізична деталь, а складний багатокомпонентний ефект відновлення.

Для оцінювання результативності ADM у розглянутому сценарії введемо систему показників ефективності.

Першою групою визначимо часові показники, такі як, час від надходження запиту до формалізації проблеми t_1 , час аналітичного опрацювання t_2 , час R&D t_3 , час виготовлення t_4 , час верифікації t_5 та час до фактичного впровадження t_6 . Тож сукупний час проходження кейсу дорівнює виразу (20):

$$T_{ADM} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6. \quad (20)$$

Розуміємо, щодо доцільності порівняння T_{ADM} з умовним альтернативним часом відновлення T_{alt} , який був би потрібен у разі зовнішнього пошуку аналога, імпортного замовлення, канібалізації іншого зразка або відкладеного ремонту, отримаємо часовий вииграш (20):

$$\Delta T = T_{alt} - T_{ADM}. \quad (21)$$

Другою групою розглянемо техніко-функціональні показники. До них належать рівень верифікованої придатності V^* і коефіцієнт функціонального відновлення вузла (21):

$$\Gamma = \frac{F_{after}}{F_{nom}}, \quad (22)$$

де F_{after} – фактична функціональність вузла після впровадження рішення, а F_{nom} – його номінальна функціональність, а також показник повторюваності виготовлення R_{rep} , який показує, чи може це рішення бути стабільно відтворене повторно без втрати якості.

Третьою групою є ризикові показники. Базовим серед них є ρ^* – оцінений ризик відмови після впровадження. Для прикладного аналізу його можна доповнювати частотою виявлених критичних дефектів на етапі випробувань, коефіцієнтом повернення кейсу на доопрацювання та середньою кількістю ітерацій у верифікаційно-довірчому мікроциклі. Чим нижчим є ρ^* від прийняттого T_{ADM} , тим вищою є якість роботи ADM саме як керованої системи, а не лише як швидкого виробничого майданчика.

Четверту групу становлять економічні показники. Витрати на проходження кейсу доцільно розглядати як (23):

$$J^* = c^{anal} + c^{R\&D} + c^{prod} + c^{ver} + c^{train} + c^{doc}, \quad (23)$$

де окремі доданки відображають витрати на аналіз, інженерне опрацювання, виготовлення, випробування, навчання та документування. Водночас економічний ефект кейсу може бути поданий у вигляді (24):

$$E^* = b^{uptime} + b^{import} + b^{reuse} + b^{knowledge} - J^*, \quad (24)$$

де b^{uptime} – вигреш від скорочення простою озброєння; b^{import} – вигреш від уникнення зовнішньої закупівлі або пошуку аналога; b^{reuse} – вигреш від можливості повторно використовувати модель і технологічну карту; $b^{knowledge}$ – довгостроковий вигреш від включення кейсу до бази знань і навчальної системи. Якщо $E^* > 0$, кейс є не лише технічно успішним, а й економічно виправданим.

П'ята група показників призначена відображати освітньо-кадровий результат, без якого ADM втрачає свою концептуальну відмінність. До неї доцільно віднести приріст формалізованого знання ΔK (25):

$$\Delta K = K_{after} - K_{before}, \quad (25)$$

про кількість створених або оновлених документів, число підготовлених фахівців, що пройшли кейс як навчальний модуль, а також коефіцієнт повторного використання знання Λ_K (26):

$$\Lambda_K = \frac{N_{reuse}}{N_{cases}}, \quad (26)$$

де N_{reuse} – кількість наступних кейсів, у яких використано напрацювання даного сценарію, а N_{cases} – загальна кількість кейсів відповідного типу. Саме цей показник особливо важливий, оскільки він демонструє, чи справді ADM переводить одиничне технічне рішення в режим інституційної пам'яті.

Отже, розглянутий сценарій з дефіцитною деталлю озброєння, що вже не випускається і була пошкоджена в бойових умовах, наочно демонструє прикладну працездатність

концептуальної моделі ADM. Узагальнюючи викладене, слід підкреслити, що прикладна цінність концептуальної моделі ADM полягає не в описі окремого технічного процесу, а у формуванні цілісного механізму перетворення оперативного досвіду на відтворювану оборонно-технологічну спроможність. Саме в цьому полягає принципова відмінність запропонованого підходу від лінійних схем ремонту, локального реверс-інжинірингу або разового технологічного реагування. У моделі ADM кожен окремий кейс, зокрема такий, як відновлення дефіцитної деталі озброєння, що вже не випускається, розглядається не як ізольований епізод технічної допомоги, а як елемент ширшого інституційного циклу, в якому матеріальний результат поєднується зі знанневим, кадровим, організаційним та економічним ефектом. Запропонована модель демонструє, що ефективність ADM визначається не тільки здатністю виготовити або відновити потрібний компонент у стислий строк. Її справжня результативність проявляється в тому, що центр одночасно виконує кілька функцій, скорочує час реагування на критичну потребу, знижує невизначеність технічного рішення, фільтрує ризик через верифікаційно-довірчий контур, формує документаційно зафіксоване знання, створює основу для навчання персоналу та зменшує витрати майбутніх циклів за рахунок повторного використання напрацьованих рішень. Таким чином, ADM виступає не лише засобом технічного відновлення, а механізмом накопичення оборонно-технологічного капіталу, що зростає з кожним завершеним кейсом.

У процесі дослідження отримані значення переваг моделі ADM порівняно з лінійним підходом воєнно-технічного реагування, наведені у нормованому концептуально-аналітичному вигляді для зручної ілюстрації системної відмінності запропонованої концепції ADM (табл. 2). На основі чого побудований нормований порівняльний профіль ефективності моделі ADM та класичного лінійного підходу, що показаний на рисунку 2.

Таблиця 2

Порівняльний профіль ефективності моделі ADM за ключовими функціональними вимірами

КРІ	Класична модель	ADM модель
Швидкість реагування	0,45	0,8
Технічна придатність	0,55	0,82
Верифікаційна надійність	0,4	0,85
Економічна доцільність	0,5	0,78
Накопичення знань	0,2	0,92
Кадрове відтворення	0,25	0,88
Масштабованість	0,35	0,76

Особливе значення має те, що в межах запропонованої моделі архітектура центру, механізм керування, сценарій проходження кейсу та система показників ефективності не існують відокремлено. Вони утворюють єдину логіку. Архітектура визначає, які саме підсистеми забезпечують цикл. Механізм керування встановлює правила переходу, повернення й допуску. Сценарій показує, як ця логіка працює на реальному прикладі.

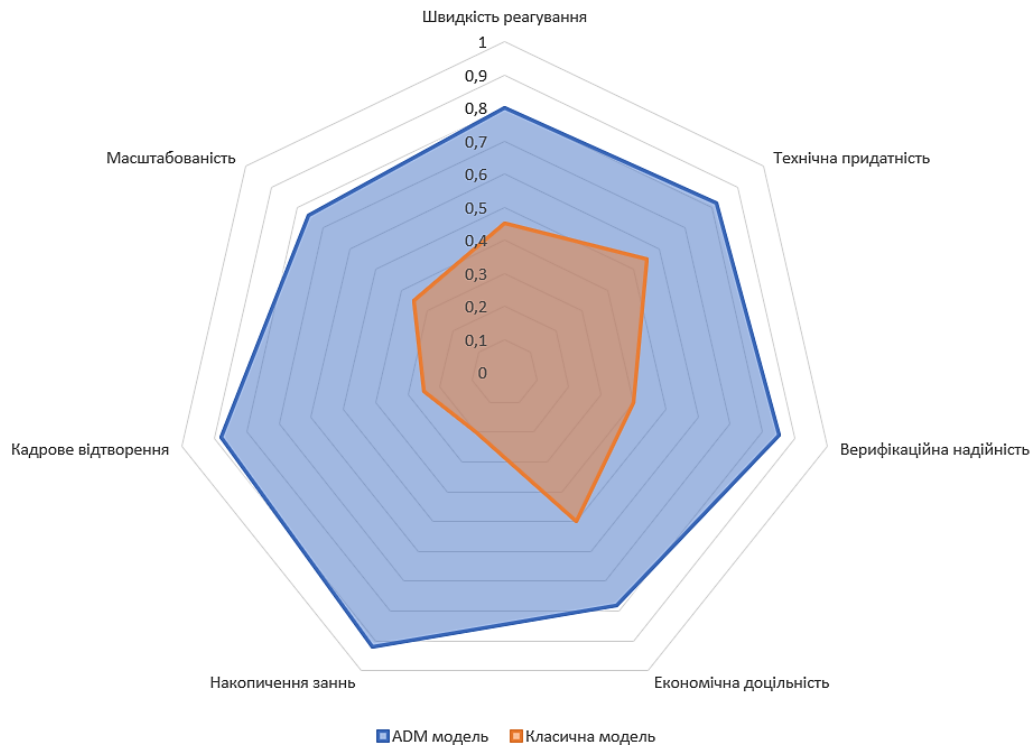


Рис. 2. Нормований порівняльний профіль ефективності моделі ADM та класичного лінійного підходу

Система показників переводить результат з рівня якісного опису у площину оцінювання й порівняння. Саме тому модель ADM може бути використана не лише як теоретичне пояснення, а як рамка для побудови практичних організаційних рішень, для внутрішнього аудиту роботи центру, для порівняння альтернативних конфігурацій і для подальшого математичного або цифрового моделювання. З прикладного погляду це означає, що ADM має цінність одразу на трьох рівнях. На оперативному рівні він дозволяє швидше повертати в дію техніку, вузли та системи, критичні для бойового застосування. На організаційному рівні він переводить імпровізаційні або ситуативні практики в керований та повторюваний цикл. На стратегічному рівні він створює передумови для поступового накопичення внутрішнього оборонно-технологічного потенціалу через знання, кадри, стандартизовані рішення та зменшення залежності від зовнішніх джерел постачання. Саме в сукупності цих рівнів і проявляється реальна прикладна цінність моделі центру перспективних технологій ADM.

Отже, запропонована концептуальна модель ADM має прикладну значущість не лише як спосіб опису воєнно-технічного реагування, а як інструмент системної організації оборонно-технологічного розвитку в умовах невизначеності, дефіциту та високої ціни помилки. Її сильна сторона полягає в тому, що вона поєднує практику, наукове осмислення, інженерію, верифікацію, навчання, документування та економічну доцільність у межах єдиного багатоконтурного циклу, де кожен завершений результат стає основою для наступного етапу розвитку. Саме така побудова створює логічно завершене підґрунтя для формулювання висновків і визначення напрямів подальших досліджень.

Висновки та напрями подальших досліджень

У роботі здійснено теоретичне обґрунтування та концептуальне моделювання центру перспективних технологій ADM як адаптивного багатоконтурного циклу формування оборонно-технологічної спроможності на основі оперативного досвіду. На відміну від підходів, у яких технічне реагування зводиться до окремих виробничих, ремонтних або дослідницьких дій, запропонована модель дозволяє інтерпретувати ADM як цілісне

соціотехнічне та інституційне середовище воєнного часу, у межах якого оперативна потреба послідовно проходить стадії формалізації, наукового осмислення, R&D та інженерного опрацювання, технологічної реалізації, верифікації, впровадження, підготовки персоналу, документування та оновлення знань. Саме така логіка дала змогу показати, що ключовим результатом функціонування ADM є не лише окреме технічне рішення, а відтворювана оборонно-технологічна спроможність, здатна до накопичення, масштабування та подальшого розвитку.

У ході дослідження доведено, що концептуальна модель ADM має багатоконтурний характер і поєднує макрологіку великого циклу з мікрологікою локальних контурів адаптації, верифікації, кадрового відтворення та накопичення знань. Це дало підстави обґрунтувати ADM не як суто функціональну схему центру, а як замкнений механізм нарощування спроможності, у якому практичний досвід, інженерне рішення, верифікація, навчання і документування не існують окремо, а взаємно підсилюють одне одного. Розроблені в межах роботи структурно-функціональна архітектура центру, механізм керування переходами між контурами, а також сценарій проходження типового кейсу показали, що запропонований підхід має не лише теоретичну цілісність, а й прикладну придатність до організації реального процесу воєнно-технічного реагування.

Розгляд прикладного сценарію з відновлення дефіцитної деталі озброєння, що вже не випускається і була пошкоджена в бойових умовах, підтвердив, що ADM може бути інтерпретований як механізм, який перетворює одиничну критичну проблему не лише на верифіковане технічне рішення, а й на навчальний кейс, елемент бази знань, підставу для майбутнього повторного використання та джерело зменшення витрат наступних циклів. Саме в цьому виявляється одна з головних сильних сторін моделі, що описує не тільки відновлення окремого вузла, а процес накопичення оборонно-технологічного капіталу через знання, кадри, стандартизовані рішення та інституційно організований досвід.

До напрямів подальших досліджень доцільно віднести, насамперед, поглиблення математичної формалізації моделі ADM через побудову системи динамічних змінних, функції цілі та критеріїв оптимального керування багатоконтурним циклом; розроблення методики кількісного оцінювання ефективності центру на основі часових, техніко-функціональних, ризикових, економічних і освітньо-кадрових показників; побудову цифрового двійника функціонування ADM для імітаційного дослідження різних типів кейсів і режимів навантаження; апробацію моделі на ширшому спектрі практичних сценаріїв, зокрема для задач бойового ремонту, адаптації вузлів, прискореного виготовлення компонентів, підготовки персоналу та відновлення логістичних критичних елементів; а також дослідження можливостей інтеграції ADM із системами управління знаннями, цифровими бібліотеками моделей, платформами верифікації та освітніми траєкторіями підготовки фахівців. Перспективним є і окремий напрям економічного аналізу, пов'язаний із оцінюванням довгострокового ефекту від функціонування ADM через скорочення простоїв техніки, зниження імпортої залежності, повторне використання інженерних рішень і накопичення внутрішнього технологічного потенціалу. Саме ці напрями можуть стати підґрунтям для переходу від концептуальної моделі до її подальшої методичної, організаційної та прикладної реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Updated Defence Production Action Plan // NATO. 13 February 2025. URL: <https://www.nato.int/en/about-us/official-texts-and-resources/official-texts/2025/02/13/updated-defence-production-action-plan>.

2. Ukraine directed over 70% of weapon procurement spending to its own defense industry // National Security and Defense Council of Ukraine. 21.01.2026. URL: <https://www.rnbo.gov.ua/en/Dialnist/7364.html> (дата звернення: 17.04.2026).

3. Share of Ukrainian manufacturers in military procurement rises to 82% // Ministry of Defence of Ukraine. 23.01.2026. URL: <https://mod.gov.ua/en/news/share-of-ukrainian-manufacturers-in-military-procurement-rises-to-82> (дата звернення: 17.04.2026).
4. Dey A., Olusanmi A., Monsuru R., Nita Y., Weilong C. Additive Manufacturing Applications in Mission-Critical Operations: A Review // Journal of Manufacturing and Materials. 2025. Proc. 9, no.3. P. 70. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp9030070>.
5. Alzahmi W., Shamayleh A., Stefancich M. The role of additive manufacturing in spare parts management: A systematic review // Cleaner Engineering and Technology. 2025. Vol. 27. P. 101029. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101029>.
6. Peron M., Saporiti N., Coruzzolo A.M., Lolli F., Holmström J. The impact of Additive Manufacturing on supply chain resilience: a Delphi study // Technological Forecasting and Social Change. 2025. Vol. 219. P. 124231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124231>.
7. Rešetar M., Valjak F., Branilović M., Šercer M., Bojčetić N. An approach for reverse engineering and redesign of additive manufactured spare parts // Proceedings of the Design Society. 2024. No. 4. P. 703–712. URL: <https://doi.org/10.1017/pds.2024.73>.
8. Давимука С. А. Інноваційна екосистема оборонної промисловості України: концептуальні засади та практика формування // О.В. Регіональна економіка – Регіональна економіка. 2024. № 111 (1). С. 65–80. DOI: <https://doi.org/10.36818/1562-0905-2024-1-7>.
9. Бурдейна Н., Федченко О., Венцюк А. Сучасні виклики військової логістики: аналіз забезпечення Збройних сил України в умовах війни з рф. // Journal of Scientific Papers Social development & Security. 2025. № 15. С. 83–91. URL: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.9>.
10. Research and development plan. 2021–2024. Part 1. Outlook // Norwegian Defence Research Establishment (FFI). 2021. 36 p. URL: <https://www.ffi.no/en/documents/> (date of access: 17.04.2026).
11. The Secretary General's Annual Report 2025 // NATO. 2026. URL: <https://www.nato.int/> (date of access: 17.04.2026).
12. 2024 NATO STO Highlights // NATO Science & Technology Organization (STO). 31.03.2025. URL: <https://www.sto.nato.int/> (date of access: 17.04.2026).
13. NATO Science and Technology Organization 2025 Collaborative Programme of Work // NATO Science & Technology Organization (STO). 10.02.2025. URL: <https://www.sto.nato.int/> (date of access: 17.04.2026).
14. First ever defence industrial strategy and a new defence industry programme to enhance Europe's readiness and security // European Commission, Directorate-General for Defence Industry and Space. 05.03.2024. URL: <https://defence-industry-space.ec.europa.eu/> (date of access: 17.04.2026).
15. Joint White Paper for European Defence Readiness 2030 // European Commission, High Representative of the Union for Foreign Affairs and Security Policy. 19.03.2025. URL: <https://defence-industry-space.ec.europa.eu/document/> (date of access: 17.04.2026).
16. Annual report 2025 // European Defence Agency. 2026. 36 p. URL: <https://eda.europa.eu/docs/> (date of access: 17.04.2026).

Надійшла до редколегії 27.04.2026.

Схвалена до друку 22.05.2026.

Дата публікації 29.05.2026.