

Методика обґрунтування тактико-технічних вимог наземних роботизованих комплексів

Methodology for Substantiating Tactical and Technical Requirements of Terrestrial Robotic Complexes

Олег Каламурза

ад'юнкту кафедри технічного забезпечення, e-mail: zarin-zaman@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3899-3821>

Oleh Kalamurza

PhD Student of the Department of Technical Support, e-mail: zarin-zaman@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3899-3821>

Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: June 18, 2026 | Revised: June 27, 2026 | Accepted: June 30, 2026

УДК 623.454:623.438

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.3.29>

Мета роботи. Розроблення науково-методичного підходу до обґрунтування тактико-технічних вимог до наземних роботизованих комплексів на основі прогнозування визначальних вимог, закономірностей науково-технічного розвитку та математичних моделей прогнозування.

Метод дослідження. Використано системний аналіз, аналіз і синтез, методи науково-технічного прогнозування, математичне моделювання, регресійний аналіз, метод найменших квадратів, статистичні методи обробки інформації та методи оптимізації.

Результати дослідження. Запропоновано методику прогнозування визначальних тактико-технічних вимог до НРК, обґрунтовано їх поділ на визначальні та похідні, визначено особливості застосування лінійних, експоненціальних, логістичних і ступінчастих моделей для прогнозування та подальшої оптимізації характеристик НРК.

Теоретична цінність дослідження. Розвинено науково-методичні засади прогнозування технічного розвитку НРК і формування їх тактико-технічних вимог.

Практична цінність дослідження. Методика може використовуватися під час обґрунтування ТТВ, проектування перспективних НРК та підтримки прийняття рішень щодо їх створення й оснащення Збройних Сил України.

Тип статті. Теоретична.

Purpose. To develop a scientific and methodological approach to substantiating the tactical and technical requirements for ground robotic systems based on forecasting the determining requirements, identifying patterns of scientific and technological development, and applying mathematical forecasting models.

Method. The study employs a combination of systems analysis, analysis and synthesis, scientific and technological forecasting methods, mathematical modelling, regression analysis, the least squares method, statistical data processing methods, and optimisation techniques.

Findings. A methodology for forecasting the determining tactical and technical requirements for ground robotic systems is proposed. The study substantiates the classification of requirements into determining and derived categories, identifies the applicability of linear, exponential, logistic, and stepwise models for forecasting technological development, and demonstrates their use in the subsequent optimisation of the tactical and technical characteristics of ground robotic systems.

Theoretical implications. The research advances the scientific and methodological foundations for forecasting the technological development of ground robotic systems and for substantiating their tactical and technical requirements.

Practical implications. The proposed methodology can be applied to the development of tactical and technical requirements, the design of advanced ground robotic systems, and decision support for their development and procurement for the Armed Forces of Ukraine.

Paper type. Theoretical.

Ключові слова. наземний роботизований комплекс; тактико-технічні вимоги; методи прогнозування; визначальні вимоги; похідні вимоги

Key words. Ground Robotic Complex, Tactical and Technical Requirements, Forecasting Methods, Defining Requirements, Derived Requirements.

Вступ

Прогнозування науково-технічного розвитку – це науково обґрунтована інформація про майбутній розвиток наземних роботизованих комплексів (НРК). Особливої актуальності наукове прогнозування набуває нині у зв'язку з прискореними темпами розвитку НРК, які закономірно зростають в умовах війни РФ проти України [1]. Прогноз має ґрунтуватися на врахуванні відповідних тенденцій і реальних закономірностей науково-технічного розвитку. У статті розкрито окремі загальні закономірності цього процесу. Для використання результатів прогнозування в моделях дослідження операцій ці результати необхідно подати у формі відповідних числових величин з оцінками точності прогнозу.

При обґрунтуванні тактико-технічних вимог (ТТВ) до НРК необхідно розрізняти два можливі їх типи: визначальні та похідні.

Визначальними ТТВ будь-якої ерготехнічної системи називатимемо вимоги, що характеризують її призначення, точність, умови експлуатації та технічні спроможності. Для НРК такими вимогами є мобільність і прохідність, вантажопідйомність і модульність, система управління, зв'язок і автономність, спеціалізоване оснащення тощо.

Похідними називатимемо вимоги, що залежать від визначальних і визначаються в кожному конкретному випадку для досліджуваної моделі з урахуванням економічної доцільності.

Зокрема, ТТВ до НРК визначаються не лише граничними технічними можливостями щодо створення НРК з необхідними параметрами прохідності, автономності, запасу ходу або вантажопідйомності, а й реальними потребами підрозділів у комплексах відповідного призначення [2], а також доцільністю їх застосування в конкретних умовах бойових дій та економічною ефективністю їх розроблення й експлуатації.

Якщо тенденцією розвитку визначальних вимог є їх безперервне зростання (або зменшення) з різною швидкістю на різних етапах розвитку озброєння та військової техніки, то похідні вимоги зростають (або зменшуються) відповідно до зміни визначальних вимог доти, доки не будуть задоволені наявні потреби. Надалі ці вимоги можуть зростати, залишатися незмінними або зменшуватися відповідно до зміни потреб у них та економічної доцільності їх реалізації. Визначальні вимоги можуть визначатися лише методами прогнозування, тоді як похідні – шляхом оптимізації за одним із критеріїв економічної доцільності з використанням результатів прогнозування визначальних вимог, а також моделей проектування і функціонування НРК. Схему визначення похідних показників наведено на рис. 1.

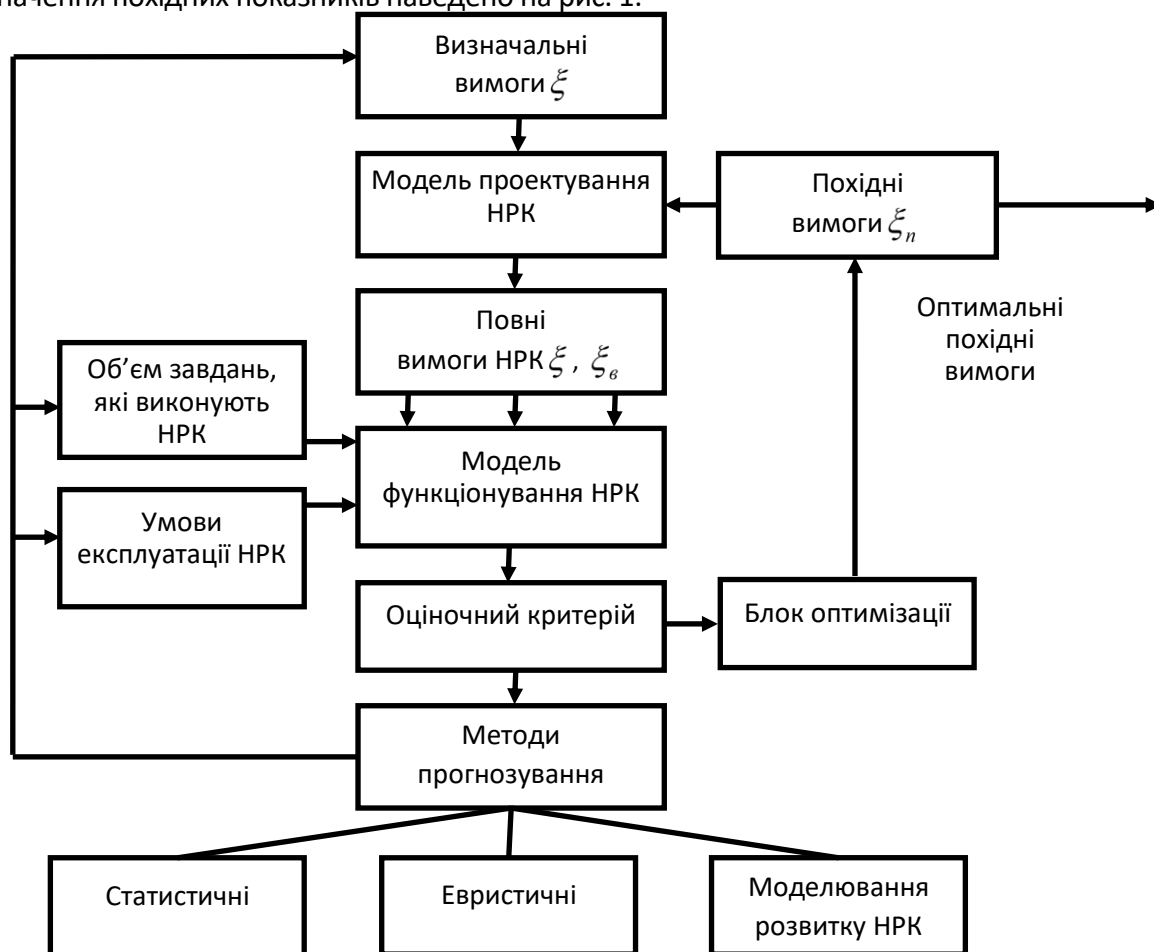


Рисунок 1: Схема визначення похідних вимог до НРК

Джерело: розроблено авторами.

Сутність завдання полягає у пошуку такого набору похідних вимог, який забезпечував би максимум (або мінімум) оцінювального критерію. Для розв'язання цього завдання необхідно спрогнозувати визначальні вимоги, обсяг завдань, що вирішуються НРК [3], та умови їх застосування.

Зазначимо, що як у моделі проектування НРК (транспортер, ударна платформа, робот-камікадзе, розвідувальний, інженерний тощо), так і в моделі його функціонування (дистанційно керований, автономний, роботизований) може здійснюватися внутрішня оптимізація, зокрема шляхом вибору таких конструктивних і функціональних рішень, які забезпечують перевагу комплексу над іншими зразками за сукупністю тактико-технічних показників [4] та ефективністю застосування під час виконання бойових завдань [5].

Розглянемо на окремих прикладах характер зміни визначальних вимог до НРК, зокрема: вагової міцності матеріалів, що використовуються людиною; видів палива, які використовуються людиною; швидкості переміщення на значні відстані; а також швидкодії обчислювальних пристроїв.

Огляд літератури

Стрімкий розвиток НРК є одним із найхарактерніших проявів сучасної науково-технічної революції у військовій сфері. Досвід російсько-української війни засвідчує швидке розширення сфер застосування НРК – від розвідки й вогневої підтримки до логістичного забезпечення, евакуації поранених, інженерного забезпечення та виконання спеціальних завдань [1, 2]. Одночасно зі зростанням ролі роботизованих платформ виникає потреба у науково обґрунтованому прогнозуванні їх розвитку, що має забезпечувати формування перспективних тактико-технічних вимог ще на початкових етапах створення нових зразків озброєння та військової техніки.

Проблеми прогнозування розвитку складних технічних систем досліджувалися багатьма науковцями. Загальновизнаним є положення про те, що розвиток техніки відбувається не лінійно, а відповідно до закономірностей технологічної еволюції, яка характеризується чергуванням еволюційних і революційних етапів розвитку [6]. Під час еволюційних етапів удосконалення технічних систем досягається завдяки вдосконаленню конструкцій, технологій виробництва та методів проектування. Революційні етапи пов'язані із впровадженням принципово нових фізичних принципів, матеріалів, джерел енергії або алгоритмів керування, що спричиняють стрибкоподібне підвищення технічних характеристик.

Відомі дослідження з теорії прогнозування свідчать, що технологічний розвиток має експоненціальний характер, а інтервали між принциповими технічними нововведеннями поступово скорочуються [6]. Це значно ускладнює прогнозування перспективних технічних характеристик НРК, оскільки процес їх зміни поєднує безперервні тенденції розвитку зі стрибкоподібними переходами до нових технологічних принципів. У таких умовах для короткострокового прогнозування доцільним є використання безперервних апроксимацій, тоді як довгострокові прогнози повинні враховувати можливість технологічних стрибків та зміну самих принципів побудови роботизованих систем.

Особливістю сучасного етапу розвитку НРК є швидке впровадження технологій штучного інтелекту, автономної навігації, машинного зору, нових джерел живлення, композитних матеріалів та цифрових систем управління [2]. Це призводить до появи якісно нових функціональних можливостей роботизованих платформ, які не можуть бути адекватно описані лише екстраполяцією існуючих тенденцій розвитку.

Сучасні підходи до оцінювання НРК переважно базуються на міжнародних стандартах ASTM, ISO, JAUS та NGVA, які регламентують питання термінології, безпеки, навігації, взаємної сумісності та проведення випробувань роботизованих платформ [8–13]. Водночас ці нормативні документи орієнтовані переважно на оцінювання вже створених технічних систем

і практично не розглядають питання прогнозування перспективних тактико-технічних характеристик майбутніх поколінь НРК.

Вітчизняні методичні підходи до обґрунтування тактико-технічних вимог озброєння та військової техніки ґрунтуються на комплексному оцінюванні ефективності, експертних процедурах та багатокритеріальній оптимізації [5, 14, 15]. Проте більшість існуючих методик використовує вже відомі технічні характеристики перспективних зразків, тоді як питання прогнозування визначальних вимог, що формують майбутній технічний рівень НРК, досліджено недостатньо.

Аналіз сучасних досліджень дозволяє зробити висновок, що під час формування перспективних тактико-технічних вимог до НРК доцільно розмежовувати визначальні та похідні вимоги. Визначальні вимоги характеризують фундаментальні технічні можливості системи (мобільність, автономність, вантажопідйомність, прохідність, рівень автоматизації тощо) і формуються відповідно до закономірностей науково-технічного розвитку. Похідні вимоги визначаються на основі оптимізації з урахуванням економічної ефективності, особливостей бойового застосування та потреб військ.

Таким чином, проведений аналіз літератури свідчить про відсутність комплексного науково-методичного підходу, який би поєднував закономірності розвитку технічних систем, методи науково-технічного прогнозування та процедури обґрунтування перспективних тактико-технічних вимог до наземних роботизованих комплексів. Саме усунення цієї наукової прогалини становить зміст даного дослідження.

Методологія дослідження

Аналіз технологічного розвитку людства [6] дозволяє помітити наявність загальних закономірностей, властивих розвитку всіх вимог, що розглядаються. По-перше, розвиток носить експоненціальний характер з постійним прискоренням. Від тисячоліть, що були необхідні для зміни базових засобів праці, людство перейшло до епохи, де нові технології швидко змінюються, формуючи обличчя постіндустріального суспільства.

По-друге, процес зміни визначальних вимог є процес чергування ділянок еволюційного та революційного розвитку. Перші відрізняються повільною зміною вимог, що досягається шляхом удосконалення технології виготовлення, методів проєктування, тощо. Другі відрізняються швидкою зміною вимог, які досягаються шляхом використання нових фізичних принципів, технічних ідей, тощо.

Зазначені закономірності значною мірою ускладнюють прогнозування визначальних вимог до НРК, оскільки процес зміни цих вимог може бути описаний безперервною функцією. Тому доводиться користуватися одним із можливих наближень.

Якщо йдеться про великий проміжок часу, на якому можливо багато стрибків, то з певним ступенем наближення зміну визначальних вимог можна апроксимувати безперервною залежністю.

Саме так робиться при короткостроковому прогнозуванні, коли можна очікувати, що на проміжку часу, що розглядається, стрибка не відбудеться. Зрештою, труднощі в прогнозуванні не виникають, якщо відомо, до чого стрибок може призвести. Слід зазначити, що з моменту появи ідеї (винаходу), навіть якщо вона в даний час реалізована, до появи достатньої кількості технічних пристроїв, в яких використовується ця ідея, проходить великий відрізок часу, що обчислюється іноді десятиліттями.

Прогнозування на великий проміжок часу найважче, тут одним з можливих наближень буде ступінчаста функція. З іншого боку, процес зміни визначальних вимог має тенденцію до почастишання стрибків (тобто зменшення відрізків часу між ними) і зростання їх величини (якщо йдеться про зростаючі вимоги). Тут передусім слід розрізняти стрибки різних категорій.

Найбільш значними є стрибки пов'язані, як правило, з використанням нових принципів (наприклад, використання штучного інтелекту і біотехнологій, тощо). Наступна категорія стрибків пов'язана з використанням нових рішень у рамках одного принципу (наприклад, використання різних горючих речовин для спалювання в повітрі, перехід від двигунів внутрішнього згорання до двигунів на електротязі, тощо). Нарешті, вдосконалення технології виготовлення (наприклад, перехід на конвеєрне виробництво) або конструкції також відбувається стрибками, величина яких незмірно менша, ніж попередніх.

Тому розглянемо лише перші дві групи стрибків. Частота цих стрибків (часова відстань між ними) закономірно зменшується, причому цілком очевидно, що чітка закономірність тут певною мірою завуальована неминучими елементами випадковості. У середньому час між великими еволюційними стрибками Δt (років) зменшує експоненціальну залежність, яка описується відомим законом еволюційних стрибків у техніці:

$$\Delta t = 10^{5,5-i},$$

де i – порядковий номер стрибка.

Що стосується величини стрибків, тоді тут справа значно складніша. Буває більшість випадків, коли впровадження нового принципу або нового рішення в рамках старого принципу одразу призводить до стрибкоподібного зростання тієї чи іншої визначальної вимоги. Однак бувають і такі випадки, коли ця вимога спочатку нижча, ніж досягається при використанні існуючого принципу, але згодом у процесі еволюції обганяє ті, які дають можливість отримати існуючий принцип (найочевидніше це видно в процесі зміни вагової міцності матеріалів).

Таким чином, стрибки можуть бути як позитивними, так і негативними (але в останньому випадку з більшою похідною величиною за часом). Сама величина позитивних стрибків з часом може як зростати, так і убувати, причому спад стрибків спостерігається в міру вичерпання можливостей нових рішень в рамках існуючого принципу. У середньому в рамках існуючого принципу величина стрибків, що визначаються новими рішеннями, відповідає функції логістичного зростання (сигмоїді) виду $A[1 + th(a + bt)]$, тобто на початку освоєння принципу відбувається збільшення стрибків, а потім – зменшення з наближенням до нуля. Що ж до стрибків, обумовлених впровадженням нових принципів, то вони мають яскраво виражену тенденцію розвитку невичерпності), причому величини стрибків зростають приблизно так само, дотримуючись експоненціальної залежності.

Методи прогнозування можна розділити на великі групи: прямого і непрямого прогнозування. У першому випадку безпосередньо прогнозуються ті показники, які необхідні для подальшого аналізу. У другому випадку прогнозуються вимоги, які необхідно розрахувати.

Власне прогнозування може здійснюватися рядом методів: моделюванням процесів НРК, статистичним методом (тобто обробкою статистичних даних та отриманням на їх базі математичних залежностей, які потім використовуються для екстраполяції), евристичним методом (тобто в кінцевому підсумку використанням думок кваліфікованих спеціалістів).

Слід зазначити, що прогнозування є одним із найскладніших питань, у якому за сучасного стану науки ми ніколи не гарантовані від суттєвих помилок прогнозу [7].

Результати дослідження

Моделювання процесів розвитку НРК є складним завданням. Однак деякі результати можуть бути отримані шляхом аналізу найзагальніших закономірностей розвитку [8]. Розглянемо процес розвитку та нарощування спроможностей НРК в умовах обмежених ресурсів. У цьому випадку необхідно враховувати пріоритетність напрямів їх створення, модернізації та застосування відповідно до потреб підрозділів і характеру виконуваних бойових завдань для

виконання яких будуть залучатися НРК. У цьому випадку іноді сприймають, що швидкість приросту зростає пропорційно кількості створеного і зменшується в міру вичерпання ресурсів.

$$\frac{d\xi}{dt} = \alpha \left(1 - \frac{\xi}{k}\right) \xi, \quad (1)$$

де ξ – міра створеного;
 α і k – відповідно, коефіцієнт, що визначає темп розвитку, та гранична межа спроможності.

Інтегруючи (1), отримуємо

$$\frac{1}{\xi} - \frac{1}{k} = \left(\frac{1}{\xi_0} - \frac{1}{k}\right) \exp[-\alpha(t - t_0)].$$

Прийmemo за початок розрахунку $t_0 = 0$, тоді

$$\frac{1}{\xi} - \frac{1}{k} = \left(\frac{1}{\xi_0} - \frac{1}{k}\right) \exp(-\alpha t),$$

Звідки:

$$\xi = \frac{k}{1 + \left(\frac{k}{\xi_0} - 1\right) \exp(-\alpha t)}.$$

Позначивши $\left(\frac{k}{\xi_0} - 1\right) = b$, отримаємо рівняння логістичної кривої у канонічній формі

$$\xi = \frac{k}{1 + b \exp(-\alpha t)}.$$

Зазначимо, що це рівняння можна записати і в такому вигляді:

$$\xi = A [1 + \exp(a_1 + b_1 t)]. \quad (2)$$

Тоді, підставляючи вираз для $\exp$, отримуємо

$$\xi = A \left[1 + \frac{\exp(a_1 + b_1 t) - \exp(-a_1 - b_1 t)}{\exp(a_1 + b_1 t) + \exp(-a_1 - b_1 t)} \right] = \frac{2A}{1 + \exp(-2a_1 - 2b_1 t)}$$

а позначаючи $2A = k$, $-2a_1 = b$, $2b_1 = a$, отримуємо класичне рівняння сигмоїди [9].

У тому випадку, якщо $b \gg 1$, тобто $\frac{k}{\xi_0} \gg 2$ або $\frac{\xi_0}{k} \ll \frac{1}{2}$, що фізично означає малий рівень використання загальних ресурсів, отримуємо експоненційну залежність

$$\xi \approx \frac{k}{b} \exp(ab) \approx \xi_0 \exp(ab). \quad (3)$$

Нарешті, за малих ab , що фізично означає мале відхилення від вихідного стану, отримуємо лінійну залежність

$$\xi \approx \xi_0 (1 + at) \approx \xi_0 + \xi_0 ab.$$

Отже, процес, аналогічний до процесу розширеного відтворення в умовах обмежених ресурсів, описується логістичною кривою (функцією гіперболічного тангенсу), при необмежених ресурсах – експонентою, а при малих змінах – прямою.

Розглянемо загальну модель. Нехай є багато принципів, кожен із яких розвивається відповідно до залежностей, викладених в (1–3). Швидкість пошуку нового принципу

пропорційна накопиченому потенціалу, а ефект кожного нового принципу зростає пропорційно накопиченому потенціалу.

Тоді, за необмежених ресурсів для загального розвитку та обмеженнях для кожного принципу, можна записати, що

$$\xi(t) = \max_i \{ \xi_0 \exp(k_1 i) \text{th}[(t - \sum_{j=0}^i \exp(-k_a j))] \}, \quad (4)$$

де i – номер принципу;
 ξ_0, k_1, k_a – позитивні коефіцієнти.

Якщо ж величина a велика, то матиме місце ступінчаста функція виду

$$\xi = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j u(t - t_j), \quad (5)$$

де $u(t - t_j) = 1$ при $t - t_j > 0$;

$u(t - t_j) = 0$ при $t - t_j \leq 0$.

Залежності (2), (3), (4) та (5) можуть використовуватись як основа для статистичних методів обробки інформації [10].

Як вже зазначилось, прогнозування визначальних вимог до НРК може здійснюватися з використанням як безперервних, так і ступінчастих функцій. Спочатку розглянемо перший випадок - безперервні функції (рис. 2.):

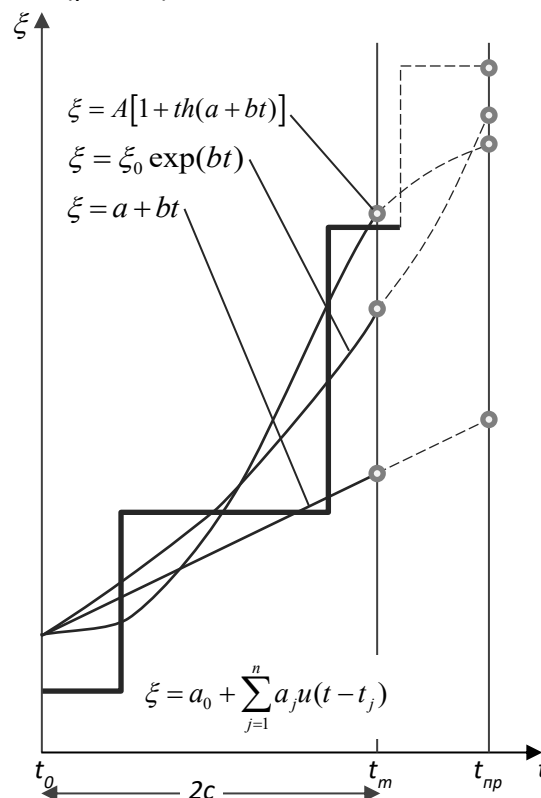


Рисунок 2: Види функцій, що застосовуються для прогнозування

Джерело: розроблено авторами.

лінійну

$$\xi = a + bt,$$

експоненційну

$$\xi = \xi_0 \exp(bt), \quad (6)$$

гіперболічну

$$\xi = A[1 + \text{th}(a + bt)].$$

Отже, нехай є інформація про зміну деяких визначальних вимог ξ у часі, подана у формі сукупності N точок $\xi_1, t_1, \xi_2, t_2, \dots, \xi_N, t_N$.

У разі лінійної функції (рис. 2) виду

$$\xi = a + bx, \quad (7)$$

де

$$x = t - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i x_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}.$$

Помилка значення ξ_i , визначеного формулою (7), описується рівнянням

$$\sigma_\xi = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^N x_i^2} [Nx^2 + \sum_{i=1}^N x_i^2]}, \quad (8)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення величин ξ_i від загальної тенденції розвитку, яке приблизно можна визначити за формулою [11]

$$\sigma \leq \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\xi_i - a - bx_i)^2}. \quad (9)$$

Оскільки відхилення від загальної тенденції пов'язані з великою кількістю чинників, є підстава вважати, що вони розподілені за нормальним законом. І тут рішення методом найменших квадратів збігається з рішенням за принципом максимальної правдоподібності.

У разі експоненційної функції (рис. 2) можна застосувати наступний метод. З формули (6) після логарифмування маємо:

$$\ln \xi = \ln \xi_0 + bt.$$

Позначимо

$$\ln \xi = y,$$

$$\ln \xi_0 = a.$$

Перейдемо тепер від t до нової змінної x за умови, що $\sum_{i=1}^N x_i = 0$, де x_i – ординати точок, наявних у нашому розпорядженні. Вочевидь, що

$$x = t - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i. \quad (10)$$

Тоді

$$y = a + bx. \quad (11)$$

За наявною інформацією можна обчислити y_i і x_i , визначивши a і b методом найменших квадратів для лінійної функції за формулами

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}. \quad (12)$$

Помилки вихідної інформації σ наближено можна визначити, виходячи з відхилень дослідних точок від розрахункових, за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - a - bx_i)^2}{N-1}}. \quad (13)$$

Тоді, за аналогією до (8), можна записати

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{1}{N \sum_{i=1}^N x_i^2} [Nx^2 + \sum_{i=1}^N x_i^2]}.$$

Звідси

$$\sigma_y = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{1 + \frac{Nx^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2}}.$$

Якщо точки x_1 розподілені по заданому інтервалу $2c$ (рис. 2) рівномірно, то неважко довести, що при досить їх кількості

$$\sum_{i=1}^N x_i = \frac{Nc^2}{3}.$$

Звідки

$$\sigma_y = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{1 + 3 \left(\frac{x}{c}\right)^2}. \quad (14)$$

З формули (14) видно, що помилка досягає мінімуму на середині інтервалу, що розглядається, потім зростає спочатку порівняно повільно, а в межі – пропорційна до x .

Розглянемо питання розподілу величин, обчислених за допомогою формули (11).

При великих N розподіл $\sum_{i=1}^N y_i$ і $\sum_{i=1}^N x_i y_i$ можна вважати нормальним, отже, розподіл величин y , обчислених за допомогою формули (11), буде нормальним. Звідси розподіл величин ξ , обчислених виходячи з (6), буде логарифмічно нормальним.

Якщо обробку вести не в натуральних логарифмах, а в десяткових, що зручніше, тоді математичне очікування можна записати в такому вигляді:

$$M(\xi) = 10^{M_y} \exp\left(\frac{\sigma_y^2}{2 \cdot 0,4342^2}\right).$$

Тобто відбувається деяке коригування, величини якої залежить від величин σ_y .

Середньоквадратичне відхилення ξ дорівнюватиме [11]

$$\sigma(\xi) = M(\xi) \sqrt{\exp\left(\frac{\sigma_y^2}{2 \cdot 0,4342^2}\right) - 1}.$$

Точним методом обчислення ξ_0 і b буде наступний. Потрібно мінімізувати функціонал шляхом відповідного вибору ξ_0 і b :

$$D = \sum_{i=1}^N [\xi_i - \xi_0 \exp(bt_i)]^2.$$

Зауважимо, що можливі межі зміни параметру ξ_0 від ξ_{min} до ξ_{max} . Тоді може бути використана наступна процедура пошуку.

При фіксованому ξ_0 знаходиться величина b , що мінімізує дисперсію D одним з методів регулярного пошуку. Потім аналогічна процедура повторюється щодо b при знайденому ξ_0 , потім знову щодо ξ_0 і до тих пір, поки не буде знайдений мінімум функції цих двох змінних.

Як наближена формула для оцінки точності, отриманої таким чином залежності, може бути використана формула для лінійної функції.

У разі гіперболічної залежності (рис. 2) точним методом розв'язання задачі буде наступний. Потрібно шляхом вибору A , a та b мінімізувати дисперсію

$$D = \sum_{i=1}^N \{\xi_i - A[1 + th(a + bt_i)]\}^2. \quad (15)$$

Для цього можна використовувати один із існуючих методів пошуку. Як наближений метод може бути рекомендований наступний.

Від аргументу t переходимо до x за формулою (10). Від змінної ξ , переходимо до змінної y за формулою:

$$y = \text{Arth}\left(\frac{\xi}{A} - 1\right).$$

Далі за наявною інформацією (точки ξ_i і t_i) та за результатами аналізу процесу розвитку визначаємо величину A (це межа, якої прагне досягнути технічна вимога) і потім обчислюємо показники a і b за формулами (12), а також дисперсію D за допомогою формули

(15). Оцінка точності отриманої залежності у першому наближенні проводиться за допомогою формули (9) для лінійної залежності.

Розглянемо прогнозування з використанням ступінчастої функції (рис. 2). По суті, для визначення цієї функції необхідно знати дві функції:

$$a_j = f_a(j),$$

$$\delta t_j = f_t(j),$$

маючи на увазі, що

$$t_j = \sum_{j=1}^n \delta t_j.$$

Зазвичай a_j – зростаюча функція в залежності від j (тобто в міру технічного прогресу величина стрибків зростає), δt_j – функція, що зменшується в залежності від j (тобто в міру технічного прогресу стрибки частішають). Одним із можливих варіантів визначення цих функцій за наявності вихідної інформації в N точках (ξ_i, t_i) буде наступний. Величина n (кількість стрибків) визначається шляхом аналізу історії розвитку НРК за період $2c$.

Вважатимемо, що

$$\xi \tau_j = \tau \exp(-k, j).$$

Тоді період $2c$ становитиме

$$2c = \tau \sum_{j=1}^n \exp(-k_\tau, j). \quad (16)$$

Враховуючи, що праворуч в рівнянні (15) записано суму геометричної прогресії із знаменником $(-k_\tau)$, отримуємо

$$\tau = 2c \frac{1 - \exp(-k)}{1 - \exp(-k_\tau, n)}$$

Тепер, задаючи k_τ можемо обчислити $\tau, \delta t_j, t_j$, а потім на кожному інтервалі від t_{j-1} до t_j – визначити математичне очікування

$$M(a_j) = \frac{1}{n_j} \sum_{z_{j_1}}^{z_{j_2}} \xi_i - \sum_{k=1}^{j-1} M(a_k)$$

де z_{j_1}, z_{j_2} – відповідно номери першої та останньої точок, що потрапляють в цей інтервал, а також середньоквадратичне відхилення [11]:

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^n \sum_{z_{j_1}}^{z_{j_2}} [\xi_i - M(a_j)]^2.$$

Оптимальним буде те k , при якому відхилення σ мінімальне. Для вирішення цього завдання можна використати метод випадкового пошуку [12]. Перевагою такого підходу є внесення деякої апіорної інформації, що особливо важливо за обмеженості статистичного матеріалу.

Також для цілей прогнозування можуть бути використані інші методи [7]. Метод побудови рівнянь регресії, який за наявності великого статистичного матеріалу може дати дуже хороші результати і, головне, дозволяє провести оцінку точності одержуваних результатів. Класичний регресійний аналіз будується на розкладанні функції пошуку в ряди Тейлора чи Фур'є або за ступенями поліномів Лежандра, Лаггера, Ерміта. У ряді випадків виявляється ефективним використання поліномів. Можливі і складніші підходи до проблеми прогнозування, засновані на застосуванні методів, розроблених у теорії автоматичного регулювання [13].

Обговорення

Отримані результати підтверджують, що обґрунтування перспективних тактико-технічних вимог до наземних роботизованих комплексів доцільно здійснювати не лише на основі аналізу існуючих зразків озброєння та військової техніки, а й із використанням закономірностей науково-технічного розвитку та методів прогнозування. На відміну від більшості існуючих підходів, орієнтованих переважно на оцінювання вже створених систем, запропонований підхід передбачає попереднє прогнозування визначальних вимог, які формують перспективний технічний рівень НРК, а вже потім – визначення похідних вимог шляхом оптимізації з урахуванням економічної доцільності та умов бойового застосування.

Проведене дослідження показало, що розвиток визначальних вимог до НРК має експоненціальний характер із чергуванням еволюційних і революційних етапів розвитку. Саме ця особливість обумовлює необхідність використання різних математичних моделей прогнозування залежно від горизонту прогнозу та характеру досліджуваних процесів. Для короткострокового прогнозування доцільним є застосування безперервних моделей, тоді як під час довгострокового прогнозування необхідно враховувати можливість технологічних стрибків шляхом використання ступінчастих функцій.

Запропоновані математичні залежності дозволяють описувати процеси розвитку технічних характеристик НРК за допомогою лінійних, експоненціальних, логістичних і ступінчастих моделей, а також оцінювати точність отриманих прогнозів із використанням статистичних методів обробки інформації. При цьому вибір конкретної моделі повинен визначатися характером вихідних статистичних даних, горизонтом прогнозування та особливостями розвитку відповідної технічної характеристики.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його використання під час обґрунтування тактико-технічних вимог до перспективних наземних роботизованих комплексів різного призначення, проведення досліджень операцій, моделювання процесів розвитку НРК, а також прийняття рішень щодо вибору раціональних технічних характеристик майбутніх зразків з урахуванням прогнозованого розвитку технологій і потреб військ.

Висновки

Обґрунтовано доцільність розмежування тактико-технічних вимог до наземних роботизованих комплексів на визначальні та похідні. Визначальні вимоги формуються відповідно до закономірностей науково-технічного розвитку, тоді як похідні визначаються шляхом оптимізації з урахуванням економічної доцільності, умов бойового застосування та потреб військ.

Встановлено, що процес розвитку визначальних вимог характеризується експоненціальним зростанням із чергуванням еволюційних і революційних етапів розвитку, що необхідно враховувати під час прогнозування перспективних характеристик НРК.

Запропоновано використовувати для прогнозування визначальних вимог комплекс математичних моделей, що включає лінійні, експоненціальні, логістичні та ступінчасті функції, а також статистичні й оптимізаційні методи оцінювання їх параметрів і точності прогнозу.

Показано, що результати прогнозування визначальних вимог можуть бути використані як вихідні дані для подальшого обґрунтування похідних тактико-технічних вимог у моделях проектування та функціонування наземних роботизованих комплексів.

Практичне застосування запропонованого підходу сприятиме підвищенню наукової обґрунтованості формування перспективних тактико-технічних вимог до НРК, удосконаленню процедур їх прогнозування та підтримці прийняття рішень під час створення перспективних роботизованих комплексів для потреб Збройних Сил України.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел:

1. Дачковський В., Каламурза О. Аналіз розвитку наземних роботизованих комплексів // *Social Development and Security*. 2025. Т. 15, № 3. С. 223–236. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.20>.
2. Каламурза О. Г. Визначення потреби у наземних роботизованих комплексах для оснащення Збройних Сил України // *Нові горизонти в наукових дослідженнях: забезпечення військ (сил) та застосування геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони* : зб. матеріалів IX Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 28 квіт. 2026 р.). Київ : Національний університет оборони України, 2026. С. 798–801.
3. Коваль В., Семененко О., Баранов С. та ін. Роль і місце роботизованих систем у сучасних війнах і збройних конфліктах: теоретичний аспект // *Social Development and Security*. 2023. Т. 13, № 5. С. 256–276. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.5.24>.
4. Каламурза О. Г., Сенаторов В. М. Проблеми матеріально-технічного забезпечення Збройних Сил наземними роботизованими комплексами // *Нові горизонти в наукових дослідженнях: забезпечення військ (сил) та застосування геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони* : зб. матеріалів IX Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 28 квіт. 2026 р.). Київ : Національний університет оборони України, 2026. С. 795–798.
5. Дачковський В. О., Овчаренко І. В., Ярошенко О. В. Методика визначення потреби в оснащенні Збройних Сил безпілотними комплексами // *Social Development and Security*. 2023. Т. 13, № 3. С. 66–84. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.5>.
6. Філіпенко О. М. Розвиток технічного прогресу та етапи історії цивілізації // *Управління проектами та розвиток виробництва*. 2004. № 1(9). С. 110–116.
7. Ганчук А. А., Соловійов В. М., Чабаненко Д. М. Методи прогнозування : навч. посіб. Черкаси : Брама-Україна, 2012. 140 с.
8. Чепков І. Б., Довгополий А. С., Гусляков О. М. Концептуальні засади створення вітчизняних ударно-розвідувальних наземних роботизованих комплексів важкого класу // *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 3(23). С. 16–25. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3\(23\).16-25](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3(23).16-25).
9. Цмоць І., Рабик В., Ігнатів І. Реалізація сигмоїдальних функцій активації на ПЛІС для нейронних мереж // *Електроніка та інформаційні технології*. 2019. Вип. 11. С. 39–51. DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.11.4>.
10. Шабатура Т. С. Статистичні методи обробки інформації в наукових дослідженнях : метод. вказ. Одеса : Одеський державний аграрний університет, 2020. 22 с.
11. Дачковський В. О., Коцюрба В. І. Методика обґрунтування тактико-технічних вимог до засобів технічної розвідки // *Збірник наукових праць Військової академії* (м. Одеса). 2022. № 1(17). С. 37–47.
12. Ладогубець Т. С., Фіногенов О. Д. Методи оптимізації без використання похідних : практикум з дисципліни «Дослідження операцій». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 45 с.
13. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного регулювання : підручник. Київ : Либідь,

References

1. Dachkovskiy, V., & Kalamurza, O. (2025). Analiz rozvytku nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv [Analysis of the development of ground robotic complexes]. *Social Development and Security*, 15(3), 223–236. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.20>

2. Kalamurza, O. H. (2026, April 28). Vyznachennia potreby u nazemnykh robotyzovanykh kompleksakh dlia osnashchennia Zbroinykh Syl Ukrainy [Determining the need for ground robotic complexes to equip the Armed Forces of Ukraine]. In *Novi horyzonty v naukovykh doslidzhenniakh: zabezpechennia viisk (syl) ta zastosuvannia heoinformatsiinykh system v interesakh natsionalnoi bezpeky ta oborony* [New horizons in scientific research: Military support and application of geographic information systems in the interests of national security and defence] (Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference, pp. 798–801). National Defense University of Ukraine.
3. Koval, V., Semenenko, O., Baranov, S., et al. (2023). Rol i mistse robotyzovanykh system u suchasnykh viinakh i zbroinykh konfliktakh: Teoretychnyi aspekt [The role and place of robotic systems in modern wars and armed conflicts: A theoretical aspect]. *Social Development and Security*, 13(5), 256–276. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.5.24>
4. Kalamurza, O. H., & Senatorov, V. M. (2026, April 28). Problemy materialno-tekhnichnoho zabezpechennia Zbroinykh Syl nazemnymi robotyzovanyimi kompleksami [Problems of logistical support of the Armed Forces with ground robotic complexes]. In *Novi horyzonty v naukovykh doslidzhenniakh: zabezpechennia viisk (syl) ta zastosuvannia heoinformatsiinykh system v interesakh natsionalnoi bezpeky ta oborony* [New horizons in scientific research: Military support and application of geographic information systems in the interests of national security and defence] (Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference, pp. 795–798). National Defense University of Ukraine.
5. Dachkovskiy, V. O., Ovcharenko, I. V., & Yaroshenko, O. V. (2023). Metodyka vyznachennia potreby v osnashchenni Zbroinykh Syl bezpilotnymi kompleksami [Methodology for determining the need to equip the Armed Forces with unmanned systems]. *Social Development and Security*, 13(3), 66–84. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.5>
6. Filipenko, O. M. (2004). Rozvytok tekhnichnoho prohresu ta etapy istorii tsyvilizatsii [Development of technological progress and stages of the history of civilization]. *Upravlinnia proiektamy ta rozvytok vyrobnytstva*, 1(9), 110–116.
7. Hanchuk, A. A., Soloviov, V. M., & Chabanenko, D. M. (2012). *Metody prohnozuvannia* [Forecasting methods]. Brama-Ukraina.
8. Chepkov, I. B., Dovhopolyi, A. S., & Husliakov, O. M. (2019). Kontseptualni zasady stvorennia vitchyznianskykh udarno-rozviduvalnykh nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv vazhkoho klasu [Conceptual foundations for developing domestic heavy-class strike and reconnaissance ground robotic systems]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, 3(23), 16–25. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3\(23\).16-25](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3(23).16-25)
9. Tsmots, I., Rabyk, V., & Ihnatiev, I. (2019). Realizatsiia syhmoidalnykh funktsii aktyvatsii na PLIS dlia neironnykh merezh [Implementation of sigmoid activation functions on FPGA for neural networks]. *Elektronika ta informatsiini tekhnolohii*, 11, 39–51. <https://doi.org/10.30970/eli.11.4>
10. Shabatura, T. S. (2020). *Statystychni metody obrobky informatsii v naukovykh doslidzhenniakh* [Statistical methods of information processing in scientific research]. Odesa State Agrarian University.
11. Dachkovskiy, V. O., & Kotsiuruba, V. I. (2022). Metodyka obgruntuvannia taktyko-tekhnichnykh vymoh do zasobiv tekhnichnoi rozvidky [Methodology for substantiating tactical and technical requirements for technical reconnaissance equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoi akademii (m. Odesa)*, 1(17), 37–47.
12. Ladohubets, T. S., & Finohenov, O. D. (2020). *Metody optymizatsii bez vykorystannia pokhidnykh: Praktykum z dystsypliny «Doslidzhennia operatsii»* [Derivative-free optimization methods: Practical guide for the course "Operations Research"]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
13. Popovych, M. H., & Kovalchuk, O. V. (2007). *Teoriia avtomatychnoho rehuliuвання* [Theory of automatic control]. Lybid.

