

© О. М. Красноштан, канд. техн. наук,  
ORCID: 0000-0001-9866-9930,  
e-mail: olexander.krasnoshtan@gmail.com  
Національний транспортний університет

© Olexander Krasnoshtan, PhD,  
ORCID: 0000-0001-9866-9930,  
e-mail: olexander.krasnoshtan@gmail.com  
National Transport University

## ЖИВУЧІСТЬ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ТА СПОСОБИ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

### SURVIABILITY OF THE TRANSPORTATION SYSTEM AND METHODS OF ITS INCREASE

**Анотація.** Запропоноване поняття живучості транспортної системи як одне із важливих показників функціонування транспортної системи в умовах надзвичайних ситуацій військового, природного та техногенного характеру. Проаналізовано перелік факторів, які чинять вплив на зазначений показник транспортної системи та запропоновано перелік заходів, спрямованих на підвищення цього показника.

**Ключові слова:** транспортна система, живучість системи, заходи підвищення живучості системи.

**Abstract.** The proposed concept of the survivability of the transport system as one of the important indicators of the functioning of the transport system in the conditions of emergency situations of a military, natural and man-made nature. The list of factors influencing the specified indicator of the transport system was analyzed and a list of measures aimed at increasing this indicator was proposed.

The increase in the intensity of the combat use of air and space attack means and changes in the enemy's views on the conduct of war, in particular the use of terrorist methods of attack on civilian transport infrastructure objects with the aim of intentionally causing damage and hindering the functioning of the transport system, require a significant review of issues related to the implementation of basic transport functions and ensuring a continuous transport process. The list of measures to increase the security and survivability of the transport system related to complex systems, ensuring its stability and, in particular, survivability, also require additional study.

**Keywords:** transport system, system survivability, measures to increase system survivability.

#### Вступ

На сьогодні транспортна система України функціонує в умовах широко-масштабної збройної агресії з боку РФ. У цих реаліях транспортна система виконує низку життєво важливих функцій як з погляду оборони, так і критично важливих для забезпечення стійкості економіки та реалізації соціальних функцій.

Зростання інтенсивності бойового застосування засобів повітряно-космічного нападу та зміни в поглядах противника на ведення війни, зокрема використання терористичних методів нападу на об'єкти цивільної транспортної інфраструктури з метою навмисного завдання втрат і перешкоджання функціонуванню транспортної системи, потребують суттєвого перегляду питань щодо реалізації основних транспортних функцій та забезпечення безперервного транспортного процесу. Необхідно також додатково вивчити питання пере-

ліку заходів щодо підвищення захищеності та живучості транспортної системи, які належать до складних систем, забезпечення її стійкості і, зокрема, живучості.

Питання, зумовлені визначенням характеристик, показників, параметрів, критеріїв і моделей живучості, розробкою підходу до кількісної оцінки показників живучості складних людино-технічних систем і формулюванням підходів та способів забезпечення даної властивості систем, розглядалися в багатьох роботах, зокрема у [1-3]. Відновленню параметрів, структури та функціоналу складних систем та створення адаптивної системи технічного забезпечення присвячено низку робіт [4-9].

У зазначених вище роботах поняття «живучість» стосується складних технічних систем: обчислювальних систем, систем військового призначення тощо. Однак, сьогодні фактично не тра-

пляються роботи, які розглядають живучість саме транспортних систем, що належать до критичної інфраструктури [10]. Водночас необхідність визначення можливості, доцільності, параметрів і показників живучості транспортної системи як складної технічної системи, що належать до критичної інфраструктури і визначають *мету цієї статті*.

### Основна частина

Загалом поняття «живучість» належить до комплексних властивостей складних систем. Комплексність цього поняття спричинена тим фактом, що вона проявляється у можливості зберігати та/або відновлювати (повністю або в наперед заданих/визначених межах) Комплексний характер цієї властивості визначається тим, що вона проявляється через можливість зберігати чи відновлювати стан спроможності під час впливу вражаючих факторів. Низка джерел надають свої визначення поняття живучості систем, які дещо відрізняються між собою. Однак, практично у всіх визначеннях їх суть зводиться до двох основних характеристик живучості:

- Зберігати функціональну здатність;
- Відновлювати її.

Іншими словами, головними характеристиками складної системи з погляду її живучості є:

- Невразливість – здатність системи зберігати функціональність під час впливу факторів ураження, до яких зокрема, але не виключно, належать ураження фізичною дією (повітряна ударна хвиля; хвиля тиску; сейсмічна вибухова хвиля; хвиля прориву гідротехнічних споруд; уламки; екстремальний нагрів середовища; теплове випромінювання; іонізуюче випромінювання). Також фактором ураження можна вважати спрямований вплив радіоелектронних засобів тощо;
- Адаптивність – здатність системи в разі ураження зупинити деструктивні процеси на максимально ранній стадії та забезпечити функціональність завдяки залишеним неушко-

дженими елементами системи. До деструктивних процесів у розрізі транспортної системи можуть належати зокрема, але не виключно: руйнування елементів інфраструктури, автомобільних доріг, верхньої будови колій (ВБК), штучних споруд, центрів управління рухом, кабелів зв'язку тощо;

- Відновлюваність – здатність системи відновити функціонування на повному (або необхідному на певному етапі) рівні завдяки внутрішнім ресурсам та у терміни, визначеним для вирішення головних завдань. Наприклад, відновлення перевізного процесу завдяки використанню рухомого складу з баз запасу замість знищених або відновлення елементів ВБК завдяки незнижувальним резервам елементів інфраструктури, що перебувають на зберіганні тощо.

Зазначені характеристики можуть бути використані під час дослідження, аналізу, синтезу транспортних систем та їхніх елементів як незалежні. Водночас, для повної оцінки параметрів живучості транспортної системи необхідно використовувати інтегральний комплексний показник, який враховує всі три характеристики, що дасть змогу отримати повну та всебічну оцінку живучості системи.

Узагальненим показником живучості транспортної системи може стати коефіцієнт, що відображає частку елементів транспортної системи, які залишаються у стані, що дає змогу їм виконувати основну функцію системи. На відміну від складних систем іншого призначення (військового, ІТ, промислового тощо), при дослідженні живучості транспортної системи варто брати до уваги неперервність перевізного процесу та в більшості випадків – послідовність включення елементів у систему. Особливо це стосується інфраструктури: у разі втрати спроможності певного критичного елемента інфраструктури, нездатність виконувати функцію набуває весь транспортний коридор, незважаючи на те, чи дістали ушкодження інші

елементи системи, чи залишились не-ушкодженими [1]:

$$K_{ж} = 1 - \frac{N_{ур} - N_B - N_a}{N_0} \quad (1)$$

де  $K_{ж}$  – коефіцієнт живучості системи;

$N_{ур}$  – кількість елементів транспортної системи, які були уражені засобами ураження ворога;

$N_B$  – кількість елементів транспортної системи, що були відновлені у проміжок часу, прийнятний для виконання її завдань;

$N_a$  – кількість елементів транспортної системи, що відновили свої функціональні властивості достатньою мірою завдяки адаптаційним властивостям;

$N_0$  – загальна кількість елементів системи.

Із врахуванням того, що неможливо уразити більше елементів системи, ніж до неї входять, тобто  $N_{ур} \leq N_0$ , а також з врахуванням того, що кількість елементів, які відновлюються та адаптуються, завжди рівна або менша за кількість уражених об'єктів, тобто  $N_{ур} \geq N_B + N_a$ , значення коефіцієнта живучості перебувають в межах  $0 \leq K_{ж} \leq 1$ . При цьому чим вищий є коефіцієнт живучості, тим краще: коли значення  $K_{ж} = 0$  система повністю вразлива та нездатна до відновлення й адаптації;  $K_{ж} = 1$  система є абсолютно живучою, тобто вона має здатність повністю відновити своє повноцінне (потрібне) функціонування впродовж заданого проміжку часу після впливу фактору (-ів) ураження. Однак, варто врахувати, що в реальному житті не існує абсолютно живучих систем, а заходи щодо підвищення живучості повинні бути спрямовані на забезпечення  $K_{ж} \rightarrow \max$ .

Виходячи із викладених вище залежностей, а також із врахуванням залежності (1) доходимо висновку, що існує певна множина комплексних заходів, що здатні досягти необхідного показника живучості транспортної системи завдяки 1 – підвищенню показників невразливості (захищеності), 2 – відповідній здатності до відновлюваності та 3 – оптимальний рівень адаптивності. Беручи до уваги, що часто зазначені

властивості перебувають у залежності, і підвищення одних характеристик може знижувати інші. Тому для прийняття виважених рішень доцільно запровадити критерій оптимальності. Наприклад, процес відновлення доцільно розглядати з погляду придатності, а процес адаптації повинен базуватись на неперервному процесі аналізу та прийнятті рішень.

Транспортна система характеризується тим, що всі елементи перебувають у достатньо жорстких, контрольованих і чітко регламентованих залежностях. Тобто елементи системи впорядковані. Цей факт значно полегшує процес моделювання та напрацювання рішень щодо підвищення рівня живучості.

Завдання аналізу та оцінки живучості має комплексний характер, що робить неможливим прийняття рішень, базуючись лише на одному параметрі. Це створює необхідність розгляду багатокритеріальних показників. При цьому розгляд і визначення критеріїв необхідно здійснювати на етапі до початку планування створення, модернізації та розвитку системи. Критерії мають брати до уваги конструктивно-технологічні аспекти транспортної системи, потенційні фактори ураження її елементів, фактори та підходи до підвищення живучості. Наприклад, для транспортних систем можливо застосувати такі критерії:

- відповідності системи необхідним показникам продуктивності та реалізації параметрів якості функціонування в сукупності з оцінкою ступеня деградації елементів системи;
- ефективності реконфігурації та перерозподілу ресурсів;
- оцінки рівня відновлення системи після уражень та збоїв;
- ті, що характеризують динаміку функціональності та продуктивності системи в умовах деградації окремих елементів (підсистем);
- адаптивності системи до факторів ураження, зовнішніх і внутрішніх змін;

— економічності ефективності використання різних підходів та методів підвищення живучості системи.

На сьогодні сформувалась певна система поглядів та принципів досягнення позитивного ефекту в напрямі підвищення живучості систем. Ці принципи можуть бути формалізовані на основі аналізу матриці здатності системи та алгоритму переходу від логічних функцій станів здатності до імовірнісних функцій під час процесу моделювання адаптивності транспортної системи як чітко структурованої системи

На основі визначених вище підходів можна запропонувати такі принципи:

- 1) елементи транспортної системи повинні прагнути до мінімізації структурної значимості за умови збільшення стійкості;
- 2) структура системи повинна забезпечувати максимальну або достатню кількість станів спроможності;
- 3) система повинна прагнути до забезпечення спроможності за умови найменшої можливої кількості елементів;
- 4) стани спроможності системи повинні відповідати різним елементам системи.

Реалізація зазначених вище принципів матиме наслідком підвищення коефіцієнта  $K_{ж}$ , а отже, така реалізація призведе до підвищення живучості системи.

Окремо необхідно наголосити на важливості фактору часу, розглядаючи адаптацію та відновлення систем, оскільки в критичних умовах час відіграє вирішальне значення для досягнення цілей функціонування системи.

Зазначені принципи повинні стати основоположними під час вирішення завдань аналізу та синтезу заходів для підвищення живучості системи. Способами забезпечення живучості системи доцільно вважати реалізацію одного або одночасно декількох принципів. Відомі в теорії живучості систем способи забезпечення даної властивості реалізуються на різних ієрархічних рівнях – на

рівні елементів, на рівні підсистем або на системному рівні [1]:

Спосіб вибіркового захисту елементів системи реалізується без будь-яких структурних перетворень. Дії, що застосовуються для забезпечення живучості спрямовані до найбільш значущих (критично важливих) елементів. За правильної реалізації способу його ефективність вища, ніж за умови дублювання, іншими словами, цей спосіб ефективніший, ніж дублювання.

Спосіб дублювання полягає у реалізації принципів 1 і 2. Він базується на розвитку підвищення надлишковостей ключових елементів.

Спосіб автономізації елементів системи фактично є реалізацією третього принципу, за якого забезпечення потрібного рівня живучості досягається шляхом включення в структуру універсальних (або трансформерних) за функціональним призначенням елементів модульної побудови.

Спосіб розукрупнення або розподілу елементів системи фактично реалізує принцип 1. Практика останніх років довела його ефективність. Особливим є його значення для тих випадків, коли в структурі системи є елементи, що мають такі характеристики:

- критичну значущість та відносно низьку стійкість (для прикладу елементи підсистеми диспетчеризації та управління);
- існує технічна та технологічна можливість розділення елементів на складові частини з метою їх розосередження за умови збереження функціональної здатності системи.

Спосіб ешелонування полягає в забезпеченні надлишковості на рівні всієї системи, або її критичних ланок (підсистем). Фактично, він забезпечує реалізацію принципів 1 та 2.

Спосіб чергування залучення елементів системи, що передбачає черговість їхнього залучення до процесу і чергування із проведенням профілактичних, підтримуючих та відновлювальних робіт. Завдяки застосуванню такого підходу, зменшуються технологічні про-

стої, що сприяють підвищенню продуктивності системи.

Всі ці способи підпорядковані одній меті – підвищенню коефіцієнта  $K_{ж}$ , тобто живучості транспортної системи.

Питання забезпечення живучості транспортної системи повинно бути в полі постійної уваги на всіх етапах життєвого циклу системи (її елементів, підсистем) починаючи від задуму і закінчуючи утилізацією. В цьому контексті можна сформулювати низку рекомендацій щодо підвищення живучості транспортної системи:

Як уже зазначалось вище, фактор часу відіграє вирішальну роль у питаннях живучості транспортної системи. Тому для підвищення цього показника необхідно забезпечити на етапі експлуатації мінімізацію часу на прийняття рішень, що своєю чергою висуває необхідність забезпечення чіткого орієнтування відповідальних осіб на всіх рівнях в особливостях роботи системи, її підсистем та елементів. Для цього важливо прагнути до найменшого складу системи, яка забезпечує її спроможний стан. Забезпечення можливості функціонального переорієнтування дає змогу підвищити живучість системи.

Розосередження та розукрупнення критичних елементів транспортної системи доцільно провести шляхом розосередження основних і дублюючих елементів так, щоб гарантувати їхню безпеку та недопустимість ураження в ході одного акту ураження. Особливу увагу необхідно звернути на забезпечення живучості та захищеності критичних елементів системи, ураження яких зробить неможливим подальше забезпечення функції перевезення транспортною системою.

Моделювання та розробка заходів підвищення живучості транспортної системи повинна бути проведена заздалегідь. Ці заходи варто реалізовувати із врахуванням потенційних дій противника (або прогнозними сценаріями розвитку подій надзвичайного стану).

Час відновлення працездатності системи залежить від засобів і ступеню ураження. Водночас, для мінімізації цьо-

го часу елементи системи (передусім критичні елементи) необхідно обладнати засобами діагностики (оптимально – дистанційної), що дасть змогу зменшити час прийняття рішення про спосіб та послідовність дій щодо відновлення працездатності системи. Одночасно підвищення швидкості та ефективності системи варто досягати оптимальним плануванням та розміщенням ремонтних комплектів та команд для їхнього негайного задіяння.

### Висновки

Із викладеного вище можна зробити висновок, що до транспортної системи як складної людино-технічної системи, доцільно застосувати поняття живучість, особливо під час її функціонування в умовах повномасштабної збройної агресії, що супроводжується цілеспрямованим впливом на неї засобів ураження. До того ж застосування поняття живучості до транспортної системи необхідно здійснити з врахуванням особливостей її будови та функціонування. Важливим є аналіз показників живучості та їхніх складових, а також визначення інтегрованого показника за критеріями оцінки його складових.

Проаналізовано принципи та підходи до підвищення живучості транспортної системи з метою забезпечення виконання її функцій.

У наступних дослідженнях доцільно конкретизувати визначені вище поняття та принципи в прив'язці до різних видів транспорту та підсистем (підсистема управління, інфраструктура, рухомий склад тощо), а також розробити відповідні заходи.

### References

1. Hloba O. V., Levchenko M. A., Patalakha V. H. (2021). Bezpeka zastosuvannia ta zabezpechennia zhyvuchosti syl ta zasobiv rodiv viisk ta spetsialnykh viisk povitrianykh syl zbroinykh syl ukrainy. [Security of use and ensuring the survivability of forces and means of troops and special forces of the air forces of the armed forces of Ukraine]. *Povitriana mits Ukrainy*, 1, 83-87.

2. Stekolnykov Yu.Y. (2002). Zhyvuchest system. [Survivability of systems]. St. Petersburg, Polytekhnyka, 155.

3. Cherkesov H. N. (1987). Metody y modely otsenky zhyvuchesty slozhnykh system. [Methods and models for assessing the survivability of complex systems]. Moscow, Znanye, 31.

4. M. B. Brovko, H. M. Zubrytskyi, A. O. Kovalchuk, V. V. Startsev. (2010). Pohliady na pobudovu adaptivnoi systemy tekhnichnoho zabezpechennia zenitnykh raketnykh viisk Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. [Views on the construction of an adaptive technical support system for anti-aircraft missile troops of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine].

//Systemy ozbroiennia ta viiskova tekhnika, 1, 31–45.

5. Hrebennykov N. D. (1972). Vostanovlenie vooruzheniya y boevoi tekhniky ZRV PVO strany. [Restoration of weapons and military equipment of the air defense air defense forces of the country]. Minsk, MVYZRU, 274.

6. A. P. Kovtunenکو, M. A. Shyshanov, V. V. Zubarev. (2007). Osnovy teorii vostanovleniya ekspluatatsyonnykh svoistv tekhnicheskoykh system: monohrafiya. [Fundamentals of the theory of restoration of operational properties of technical systems: monograph]. Kyiv, Knyzhkove vydavnytstvo NAU, 301.

7. A. P. Kovtunenکو, V. V. Zubarev. (2009). Osnovy analiza slozhnykh tekhnicheskoykh system. Teoriya y prylozheniya: monohrafiya. [Fundamentals of analysis of complex technical systems. Theory and applications: monograph]. Kyiv, Knyzhkove vydavnytstvo NAU, 504.

8. A. P. Kovtunenکو, V. V. Zubarev, B. N. Lanetskyi, A. A. Zverev. (2006). Matematycheskoe modelyrovanye v zadachakh yssledovaniya nadezhnosti tekhnicheskoykh system: Monohrafiya. [Mathematical modeling in the problems of researching the reliability of technical systems: Monograph]. Kyiv, Knyzhkove vydavnytstvo NAU, 236.

9. V. V. Startsev, M. B. Brovko, H. M. Zubrytskyi, V. V. Voinov. (2009). Propozytsii shchodo rozvytku systemy tekhnichnoho zabezpechennia zenitnykh raketnykh viisk Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. [Proposals for the development of the system of technical support of the anti-aircraft missile forces of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine]. Systemy ozbroiennia ta viiskova tekhnika. 10, 37–41.

10. Verkhovna Rada of Ukraine. (2022). Zakon Ukrainy «Pro krytychnu infrastrukturu». [The Law of Ukraine "On Critical Infrastructure"]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>

## НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЖУРНАЛ "АВТОШЛЯХОВИК УКРАЇНИ"

ISSN 0365-8392 (print) / 2958-0757 (online) / AvtoShlyakhovik Ukrainy / A Scientific and Industrial Journal the Avtoshliakhovik Ukrayiny DOI:10.33868/0365-8392

Фахове видання має глибоку історію (заснований в 1960 році) та високу репутацію.

НВЖ «Автошляховик України» має **категорію «Б»**

Атестований МОН України за такими науковими спеціальностями:

- 133 Галузеве машинобудування;
- 183 Технології захисту навколишнього середовища;
- 191 Архітектура та містобудування;
- 192 Будівництво та цивільна інженерія;
- 274 Автомобільний транспорт;
- 275 Транспортні технології (за видами);
- 263 Цивільна безпека

Індексований: **Ulrichsweb, CrossRef, Google Scholar, Index Copernicus International, Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD)**

На сторінках журналу друкуються матеріали про сучасні технології, наукові дослідження, правові й нормативні документи у сфері автотранспорту та дорожнього будівництва, матеріали про проектування, будівництво автомобільних доріг, спецтехніку тощо.

**Запрошуємо авторів до публікації! E-mail: [journal@insat.org.ua](mailto:journal@insat.org.ua), тел./факс: (+38044) 201-08-09(10)**