

DOI: 10.35681/1560-9189.2024.26.1.308655

УДК 004.056.5

**В. В. Мохор, Ф. О. Коробейніков**

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України  
вул. Генерала Наумова, 15, 03164 Київ, Україна  
e-mail: v.mokhor@ipme.kiev.ua; admin@cybersecurity.com.ua

## Стійкість і резильєнтність у безпековому домені

*Розглянуто концептуальну відмінність між термінами «резильєнтність» і «стійкість», підкреслено важливість використання першого в його первісній, запозиченій формі для збереження точності наукового дискурсу. В рамках парадигми резильєнтності проаналізовано особливості нелінійних динамічних систем, їхню взаємодію та процеси самоорганізації, акцентуючи увагу на значущості адаптації та еволюції систем в умовах стохастичних загроз. Особливу увагу приділено аналізу еволюційних процесів у відкритих нелінійних дисипативних системах, що ґрунтується на принципах теорії хаосу та синергетики. Запропоновано поглиблений погляд на комплексні аспекти понять резильєнтності та стійкості, наголошуючи на важливості точного термінологічного розмежування в наукових дослідженнях.*

**Ключові слова:** *резильєнтність, стійкість, інформаційна безпека, ризики, теорія хаосу, синергетика.*

### Вступ

Резильєнтність і стійкість являють собою дві унікальні концепції у безпековому домені, що визначають динаміку функціонування як природних, так і антропогенних систем в умовах зовнішніх впливів і внутрішніх змін. Незважаючи на те, що обидві ці концепції охоплюють схожі царини, їхня спрямованість і сфера практичного застосування в цьому домені істотно різняться.

У рамках національного академічного наукового діалогу спостерігається значна термінологічна невизначеність, зумовлена відсутністю в українському лексичному масиві історично усталеного еквівалента англійського терміну «*resilience*», який посідає ключове місце в сучасній безпековій парадигмі серед англійської наукової спільноти. Внаслідок цього дефіциту в україномовному науковому дискурсі відбувається використання різноманітних синонімічних термінів, серед яких можна виокремити як цілком доречні та семантично близькі як-то «живучість» [1], так і ті, що не повною мірою передають, а подекуди й викривляють смислове наванта-

ження оригінального поняття «resilience», наприклад: «стійкість», «стабільність», «робастність» тощо. Ситуація ускладнюється тим, що кожна наукова дисципліна формує власний унікальний концептуальний апарат для інтерпретації та опису поведінки систем, що призводить до додаткових різночитань. Крім того, наявні відмінності в мовній і культурній інтерпретації термінів «стійкість» і «резильєнтність» здатні спричинити непорозуміння в рамках міжнародного наукового обміну. Така смислова неузгодженість віддзеркалює ще більш значну проблему міждисциплінарної комунікації, де однакові терміни в різних контекстах можуть набувати різних семантичних відтінків.

Для усунення термінологічної плутанини, необхідно визначити наукові дефініції і семантичні особливості цих термінів, а також їхні ключові відмінності в конкретно визначеному контексті забезпечення функціонування динамічних систем у рамках безпекового домену.

### **Резильєнтність не еквівалентна стійкості**

Задача дещо спрощується через те, що термін «стійкість» уже має чітке визначення в українському науковому лексиконі, що відображено в галузевих стандартах і регуляторних документах.

Наприклад, відповідно до нормативних положень у галузі енергетики [2] стійкість — це «здатність повертатися до усталеного режиму після малих збурень...», де «усталений режим — режим, який характеризується незмінними параметрами».

Загальне сучасне визначення стійкості може включати як опір системи змінам, так і здатність системи повертатися до свого початкового стану у відповідь на збурення [3] (у цьому контексті доречним буде також зіставлення поняття стійкості з фізичною та математичною ідеєю О.О. Андронова і Л.С. Понтрягіна про грубі системи [4]). Тобто, можна зробити припущення, що стійкість визначається передбачуваністю поведінки системи в умовах стресу, здатністю продовжувати стабільно функціонувати без змін або збоїв і повертатися до усталеного режиму після впливу зовнішніх загроз.

У рамках теорії динамічних систем концепція стійкості здебільшого вивчається через призму рівноважних станів. Визначається, що динамічна система має стійкість, якщо, зазнавши малих зовнішніх збурень, вона демонструє здатність повертатися до вихідного рівноважного стану або залишатися в його безпосередній близькості. Для кількісного опису та точного визначення цієї властивості застосовуються різні математичні формалізми, ключовим серед яких є поняття стійкості за Ляпуновим [5]. Згідно з цим підходом, стійкість системи характеризується її здатністю зберігати достатньо малими відхилення значень координат збуреного процесу після дії збурення від значень тих самих координат незбуреного процесу, якщо ці відхилення були достатньо малими в момент закінчення збурення [6]. Тобто стійка система має підтримувати траєкторії руху в обмеженій області рівноважного стану, що дає змогу проводити точний аналіз динамічної поведінки системи в умовах невеликих збурень.

У контексті аналізу стійкості системи, механізм зворотного зв'язку виступає як ключовий чинник, що визначає її поведінку та стабільність. Він може проявлятися як у формі негативного, так і позитивного зворотного зв'язку, кожен з яких має свій вплив на динаміку системи.

Негативний зворотний зв'язок сприяє стабілізації системи шляхом зменшення відхилень від рівноважного стану. Цей процес характеризується автоматичним регулюванням, яке протидіє змінам, що відводять систему від заданого стану рівноваги.

Позитивний зворотний зв'язок, навпаки, посилює відхилення системи, потенційно призводячи до її нестабільності.

Таким чином, зворотний зв'язок є центральним елементом у механізмах керування стійкістю системи, впливаючи на її здатність підтримувати рівновагу та реагувати на зовнішні збурення.

Лінійний чи нелінійний характер динамічних систем також відіграє значну роль у визначенні їхньої стійкості та поведінкових характеристик. Ця дихотомія між лінійними та нелінійними системами є фундаментальною в контексті системного аналізу, оскільки вона безпосередньо впливає на реакцію систем на зовнішні впливи та внутрішні динамічні процеси.

У лінійних системах поведінку та стійкість можна проаналізувати і змоделювати з високим ступенем точності на основі стандартних математичних методів, у той час як нелінійні системи являють собою значно більшу складність через їхню здатність генерувати складніші та часто непередбачувані режими поведінки.

Реакція нелінійних дисипативних систем на зовнішні впливи часто не підпорядковується умовно простій пропорційності щодо сили цих впливів. Ця особливість веде до виникнення складних динамічних режимів, включно з хаотичною поведінкою, де традиційні поняття стабільності виявляються неадекватними для повного опису системної динаміки. Теоретично, стабільність таких систем може бути описаною за допомогою концепцій атракторів, де атрактор формально визначається як множина станів системи, яка притягує кожну траєкторію її розвитку, коли час наближається до нескінченності. У дисипативних системах втрата енергії призводить до того, що система еволюціонує до підмножини фазового простору меншої розмірності, яка є атрактором [7]. Але практично ці феномени значно ускладнюють задачу управління поведінкою нелінійних систем у контексті безпеки, оскільки реакції на збурення в них часто залежать не тільки від початкових умов, а й від цілої низки параметрів, що визначають їхню внутрішню динаміку.

Власне, саме ця особливість нелінійних систем (а, також те, що в домені безпеки об'єктом дослідження є переважно саме нелінійні системи і їхня взаємодія) стала каталізатором генезису та подальшого розвитку парадигми резильєнтності.

Зростаюче усвідомлення складності та непередбачуваності поведінки нелінійних систем сприяло переосмисленню підходів до аналізу резильєнтності, що виходять за рамки класичних лінійних моделей.

У безпековому домені, парадигма резильєнтності була покликана відповісти на виклики, які пов'язані з управлінням нелінійними системами, що потерпають від стохастичних загроз, спричинених як внутрішніми, так і зовнішніми факторами.

Резильєнтність, на відміну від традиційного розуміння стійкості, акцентує увагу на «здатності системи передбачати, витримувати, відновлюватися та адаптуватися» [8, 9] у відповідь на значні збурення та непередбачувані зміни, що є особливо актуальним у контексті нелінійних динамічних систем (рис. 1).

Можна сформулювати гіпотезу, що парадигма резильєнтності є відповіддю на складні виклики, що пов'язані з управлінням і підтриманням функціонування

нелінійних динамічних систем, наголошуючи на необхідності розроблення стратегій, які враховують складність, хаотичність і потенційну нестабільність середовища.

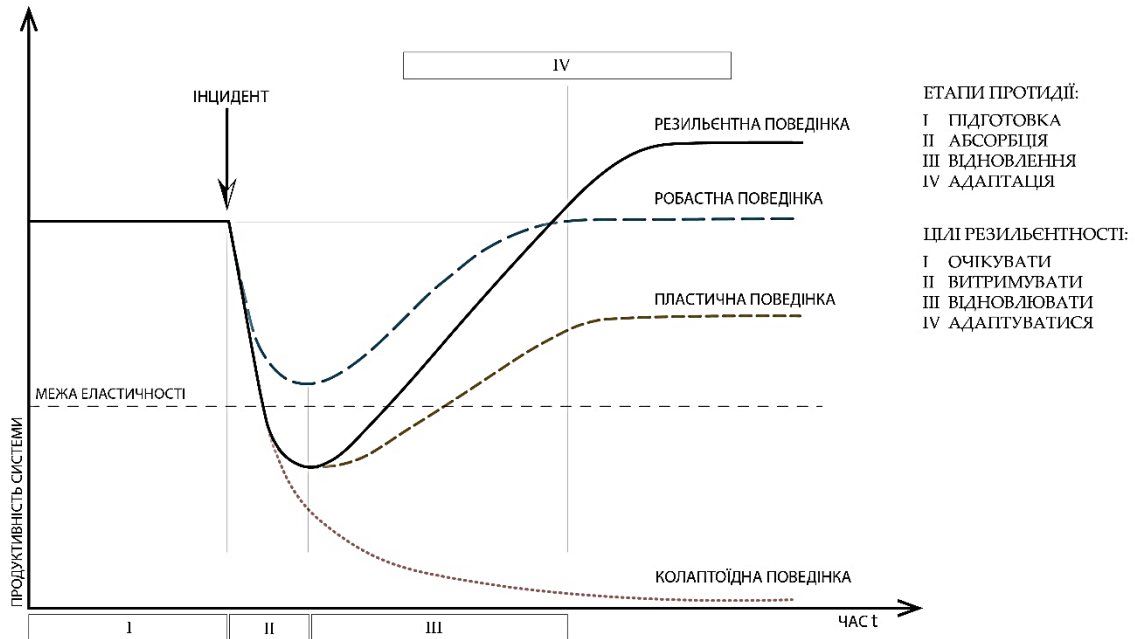


Рис. 1. Представлення різних типів реакцій систем на збурення

Слід зазначити, що більшість стратегій і сценаріїв, які спрямовані на забезпечення резильєнтності на різних рівнях — від місій і організацій до національного та міжнародного масштабу, фокусуються на взаємодії саме з відкритими нелінійними динамічними системами. Ця тенденція робить особливо актуальним вивчення і аналіз фізичних і математичних теорій, які описують динаміку та поведінку таких систем. Відкриті нелінійні системи характеризуються складними взаємодіями і обміном матерії, енергії та інформації з навколишнім середовищем, що призводить до появи нових, часто непередбачуваних форм поведінки і організації.

Теоретичні засади, що лежать в основі розуміння динаміки цих систем, містять у собі не тільки класичні аспекти нелінійної динаміки та теорії хаосу, але й більш комплексні підходи в дослідженні феноменів адаптації і самоорганізації, що розглядаються в синергетиці та теорії складних систем. Вони дозволяють враховувати і аналізувати безліч факторів і змінних, що впливають на системи, але не бралися до уваги раніше в домені безпеки, та пропонують принципи, які можна використати для підвищення резильєнтності в умовах постійно мінливих зовнішніх і внутрішніх викликів.

У світлі цього, розроблення ефективних стратегій резильєнтності потребує міждисциплінарного підходу, який поєднує знання та методи з різних галузей науки, що дає змогу формувати комплексне та гнучке розуміння поведінки систем у різноманітних контекстах та умовах.

Так, наприклад, можна зробити припущення, що теорія хаосу спроможна пояснити, чому резильєнтна система здатна впоратися зі стохастичними загрозами

високого рівня впливу та низької імовірності (НІЛР), тоді як системи, що орієнтовані виключно на стійкість, часто виявляються неефективними. З погляду теорії хаосу, ризики та загрози можуть бути інтерпретовані як точки біфуркації, де система досягає критичного стану, стаючи нестійкою до флуктуацій і породжуючи невизначеність у своїй майбутній поведінці. У цей момент система може або перейти до хаотичного стану, або, навпаки, еволюціонувати до більш диференційованого та вищого рівня впорядкованості (рис. 2).

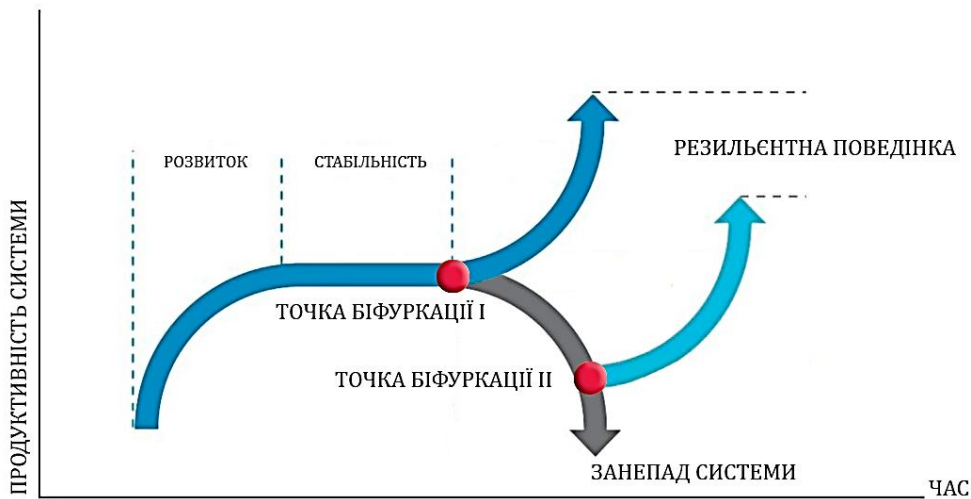


Рис. 2. Представлення резильєнтних ризиків як точок біфуркації

Принципи теорії біфуркацій дають привід замислитись над тим, що зустріч із ризиками та загрозами не завжди несе в собі тільки руйнівний потенціал, але також може стимулювати систему до адаптації та самоорганізації [10]. Це аналогічно тому, як імунна система людини «тренується» у відповідь на вплив різних патогенів, що підвищує її резильєнтність. Кожне зіткнення із загрозою посилює здатність системи до адаптації і виживання в мінливому середовищі, підвищуючи її загальну стійкість до майбутніх збурень.

Отже, реакція на загрози в контексті резильєнтності є не просто засобом виживання або відновлення системи, а й важливим механізмом її еволюції та вдосконалення.

Цей процес яскраво демонструє фундаментальну відмінність між концепціями резильєнтності та стійкості. Резильєнтність, на відміну від стійкості, не просто має на увазі здатність системи зберегти свій початковий стан в умовах зовнішніх збурень, а й охоплює її адаптивну здатність до еволюції і переходу на нові рівні функціонування у відповідь на ці збурення. Таким чином, резильєнтні системи мають гнучкість, що дає їм змогу не тільки відновлюватися після непередбачуваних подій, а й отримувати з цих подій користь, стимулюючи розвиток і поліпшення своїх функціональних механізмів.

На відміну від резильєнтності, стійкість традиційно пов'язана з поняттям стабільності та здатністю системи протистояти змінам, прагнучи зберегти status quo. Стійкі системи, хоча і здатні витримувати зовнішні збурення, часто не володіють тим самим ступенем адаптивності та гнучкості, що й резильєнтні системи, і можуть

виявитися вразливими перед несподіваними або складними змінами в їхньому оточенні.

Можна також припустити, що синергетика має потенціал стати фундаментальним підходом до розуміння резильєнтних процесів, бо дає змогу здійснювати ідентифікацію і аналіз ключових принципів самоорганізації, які сприяють адаптації і посиленню резильєнтності відкритих нелінійних систем:

1) природні системи демонструють ієрархічну структуру, що включає декілька видів відкритих нелінійних систем різних рівнів організації, які охоплюють: динамічно стабільні, адаптивні та еволюційні системи. Взаємодія між цими рівнями відбувається через хаотичні, нерівноважні стани, що сприяє виникненню нової організації і порядку. Така нерівноважність є критичним чинником для еволюції і розвитку систем на різних стадіях ієрархії;

2) об'єднання нелінійних динамічних систем призводить до формування нової системи, яка не є простою сумою своїх складових, а являє собою структуру іншого типу організації або рівня. В процесі еволюції, при переході від невпорядкованого стану до впорядкованого, системи, що розвиваються, демонструють однакову поведінку, аналіз якої можливий за допомогою математичних методів і моделей;

3) системи, які розвиваються, будучи перманентно відкритими, активно взаємодіють з навколишнім середовищем через обмін енергією та ресурсами, що сприяє процесам локальної впорядкованості та самоорганізації [11];

4) порівнюючи принципи синергетики та постулати парадигми резильєнтності, можна також виявити аналогії, що сприяють визначенню конкретних умов і критеріїв, які необхідні для адаптації та еволюції нелінійних дисипативних систем;

5) визначальним чинником здатності систем до адаптації, самоорганізації та еволюціонування є їхня відкритість. Згідно із законами термодинаміки, закриті системи зрештою досягають стану максимальної ентропії, припиняючи будь-яку еволюцію. Навпаки, відкриті системи, що перебувають на значній відстані від термодинамічної рівноваги, мають потенціал до самоорганізації. У стані рівноваги навіть складні системи досягають максимальної ентропії, втрачаючи здатність до самоорганізації. При наближенні до рівноваги, без достатнього зовнішнього припливу енергії (ресурсів), системи з часом дедалі більше прагнуть до рівноваги, внаслідок чого втрачають здатність до подальшої зміни свого стану;

6) етап самоорганізації у відкритій системі ініціюється за умови переважання позитивних зворотних зв'язків над негативними. Подібне домінування сприяє розвитку і адаптації системи, тоді як негативні зворотні зв'язки зазвичай підтримують стійкість систем і перешкоджають змінам;

7) еволюційні процеси у відкритих нелінійних дисипативних системах незмінно пов'язані з порушенням симетрії. В описі таких процесів необхідно відходити від концепції часової симетрії, притаманної повністю детермінованим і оборотним процесам класичної механіки. Ці еволюційні процеси характеризуються необоротним руйнуванням наявних структур і формуванням нових, що поряд із явищем незменшення ентропії у закритих системах зумовлює існування спрямованості в часі, або «осі часу» [12, 13].

Наведені вище принципи акцентують увагу на значущості адаптації та еволюції систем як ключових чинників для їхнього виживання в умовах стохастичних

загроз. Це підкреслює адекватність і доречність спрямування на резильєнтність як цільового вектора в стратегіях управління безпекою. Визнання динамічного та нелінійного характеру безпекового ландшафту вимагає від системи не тільки стійкості, а й здатності до гнучкого реагування, адаптації і розвитку у відповідь на мінливі умови. Резильєнтність, у цьому контексті, стає не лише реактивною здатністю до відновлення, а й проактивним процесом безперервного самовдосконалення та еволюції, що забезпечує системі довгострокове виживання та ефективність в умовах непередбачуваних і мінливих загроз.

Агрегуючи вищевикладені дефініції і міждисциплінарне підґрунтя досліджуваних концепцій, можна відмітити суттєву розбіжність у семантичному наповненні терміна «стійкість», усталеного в українському мовному контексті, та поняття «резильєнтність», що наразі не набуло широкого розповсюдження серед україномовної наукової спільноти і не затвердилося в офіційному термінологічному словнику. Така розбіжність підкреслює нееквівалентність цих понять, роблячи використання терміна «стійкість» як заміну «резильєнтності» концептуально некоректним.

Отже, пропонується використовувати термін «резильєнтність» у його первісній запозиченій формі, щоб уникнути некоректних аналогій і зберегти точність наукового дискурсу. Такий підхід дасть змогу забезпечити однакове та точне розуміння цього поняття в україномовних наукових і фахових колах, усуваючи можливі непорозуміння, що можуть виникати в разі використання неточних або невідповідних синонімів. Упровадження та утвердження терміну «резильєнтність» в українській мові, таким чином, сприяє міжнародній співпраці, особливо, у сфері безпеки, зокрема, в інформаційній безпеці і в забезпеченні функціонування критичної інфраструктури [14]. Це значно полегшить обмін знаннями та дослідницьким досвідом між різними науковими дисциплінами, і, своєю чергою, зміцнить міждисциплінарний діалог і сприятиме розвитку спільного розуміння ключових концепцій, що є особливо важливим у контексті глобалізованої наукової спільноти.

## **Висновки**

Представлено аналіз концептуальних відмінностей між резильєнтністю і стійкістю. Наголошено на критичній значущості формування системами механізмів адаптації та еволюції задля підвищення їхньої резильєнтності, а також досліджено внесок синергетики та теорії хаосу в розуміння цих процесів. Особливу увагу приділено необхідності лінгвістичної точності в застосуванні спеціалізованої термінології.

Подальшими напрямками дослідження є аналіз наявних принципів і математичних моделей, що описують процеси функціонування, взаємодії і самоорганізації відкритих нелінійних дисипативних систем з метою їхнього застосування в контексті резильєнтності.

1. Додонов О.Г., Горбачик О.С., Кузнецова М.Г. Живучість інформаційних систем та забезпечення резильєнтності критичних інфраструктур // Живучість та резильєнтність критичної інфраструктури – 2023: збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 35–37. [https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/11/Матеріали\\_конференції\\_Survivability\\_and\\_Resilience-2023-4.pdf](https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/11/Матеріали_конференції_Survivability_and_Resilience-2023-4.pdf)

2. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки: від 2002 р. № ГКД 34.20.575-2002. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19499/3/GKD\\_34.20.575-2002.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19499/3/GKD_34.20.575-2002.pdf)
3. Mayar K., Carmichael D.G., Shen X. Stability and Resilience — A Systematic Approach. *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 8. P. 1242. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12081242>
4. Nikolaev I. Morse-Smale Foliations. *Foliations on Surfaces*. Berlin, Heidelberg, 2001. P. 37–65. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04524-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04524-4_3).
5. Lyapunov A. Stability of motion. Amsterdam: Elsevier Science, 1967. 203 p.
6. Співак В.М., Власюк Г.Г. Основи Електроніки (вступ до фаху), 2-е видання доповнене та перероблене. Електронний навчальний посібник для студентів ВНЗ. Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2017. С. 208 URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38038/1/Osnovy\\_elektroniky\\_Vstup\\_do\\_fakhu.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38038/1/Osnovy_elektroniky_Vstup_do_fakhu.pdf)
7. Anishchenko, V., & Strelkova, G. Attractors of dynamical systems. 1st International Conference, Control of Oscillations and Chaos Proceedings (Cat. No. 97TH8329). 1997. Vol. 3. P. 498–503. <https://doi.org/10.1109/COC.1997.626654>.
8. NIST Special Publication 800-160, Volume 2. Developing cyber-resilient systems: A systems security engineering approach. Official edition. National Institute of Standards and Technology, 2021. 254 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-160v2r1>.
9. Korobeynikov F. Resilience Paradigm Development In The Security Domain. *Electronic Modeling*. 2023. Vol. 45, No. 4. P. 88–111. <https://doi.org/10.15407/emodel.45.04.088>.
10. Prigogine I. Order out of chaos: The evolutionary paradigm and the physical sciences. New York, N.Y: Bantam Books, 1984. 349 p.
11. Haken H. Synergetics and a New Approach to Bifurcation Theory. *Structural Stability in Physics*. Berlin, Heidelberg, 1979. P. 31–39. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-67363-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-67363-4_5)
12. Haken H. Synergetics. *Physics Bulletin*. 1977. Vol. 28, No. 9. P. 412–414. URL: <https://doi.org/10.1088/0031-9112/28/9/027>
13. Haken H. Synergetics: an overview. *Reports on Progress in Physics*. 1989. Vol. 52, No. 5. P. 515–553. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/52/5/001>.
14. Мохор В.В., Коробейніков Ф.О., Дибач О.М., Бакалинський О.О. Втілення парадигми резильєнтності в забезпечення функціонування критичної інфраструктури ЄС. Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023: збірник матеріалів науково-практичної конференції: ПІМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України, 2023. С. 48–51. URL: <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/06/Матеріали-конференції-Critical-Infrastructure-Resilience-2023.pdf>

Надійшла до редакції 29.01.2024