

Моделювання функціонування енергетичної системи держави: практичний аспект

Modeling the functioning of the state energy system: a practical aspect

Юрій Клят

Yurii Kliat

к. т. н., доцент, начальник інституту, e-mail: klyatt@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8267-3748

Ph.D., Associate Professor, Head of the Institute, e-mail: klyatt@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8267-3748

Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ, Україна

Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: June 3, 2025 | Revised: June 24, 2025 | Accepted: June 30, 2025

DOI: 10.33445/sds.2025.15.3.2

Мета роботи: визначення практичного аспекту моделювання функціонування енергетичної системи держави на основі модифікованого когнітивного підходу.

Метод дослідження: використано модифікований когнітивний підхід до моделювання.

Практична цінність дослідження: запропонований підхід до моделювання енергетичної системи дозволяє: здійснювати оцінку впливу різних факторів на енергетичну безпеку; підтримувати ухвалення управлінських рішень у сфері енергетики; адаптувати модель до реальних умов, включаючи зовнішні загрози; створити гнучку систему аналізу та планування, придатну для стратегічного управління енергетичною безпекою держави.

Тип статті: практична.

Purpose: determination of the practical aspect of modeling the functioning of the state energy system on the basis of a modified cognitive approach.

Method: a modified cognitive approach to modeling is used.

Practical implications: The proposed approach to modeling the energy system allows: to assess the impact of various factors on energy security; to support management decision-making in the energy sector; to adapt the model to real conditions, including external threats; to create a flexible system of analysis and planning suitable for strategic management of the state's energy security.

Paper type: practical.

Ключові слова: енергетична безпека, когнітивне моделювання, система диференціальних рівнянь, експертне оцінювання, метод групового урахування аргументів.

Key words: energy security, cognitive modeling, system of differential equations, expert evaluation, group method of data handling.

Вступ

Енергетична безпека є однією з основ національної безпеки кожної держави, адже безперервне забезпечення енергоресурсами критично важливе для стабільного функціонування економіки, соціальної інфраструктури та обороноздатності. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах зовнішньої агресії, дестабілізації ринків енергоресурсів і глобальних геополітичних змін. З 2014 року Україна перебуває у стані війни, внаслідок чого частина енергетичних потужностей була втрачена або пошкоджена, а енергетична інфраструктура зазнала численних атак.

У сучасних умовах, коли надійність енергосистеми визначає не лише економічну ефективність, а й стійкість оборонного потенціалу держави, зростає потреба у застосуванні сучасних наукових підходів до моделювання енергетичних процесів. Одним із таких інструментів є когнітивне моделювання, яке дозволяє враховувати як кількісні, так і якісні характеристики енергетичних процесів, взаємозв'язки між елементами системи та їх поведінкову динаміку.

Теоретичні основи дослідження

Проблематика енергетичної безпеки посідає важливе місце в сучасній науковій думці, особливо в контексті гібридних загроз, що постали перед Україною. Значна увага приділяється дослідженню моделей функціонування енергетичних систем, способів аналізу їх стійкості, використанню когнітивного підходу в моделюванні складних систем.

У "Стратегії енергетичної безпеки України на період до 2025 року" акцентовано на

необхідності інтеграції до європейських енергетичних ринків і підвищення стійкості енергосистеми до зовнішніх впливів [1]. Мормуль Н.Є. розглядає енергетичну безпеку як складову національної безпеки, акцентуючи на її багатофакторності [2].

Шевченко А.Ю. [3] та Сидоренко О.В. [4] акцентують на важливості інформаційно-аналітичного забезпечення управління енергетичною сферою, пропонуючи підходи до оцінки ризиків та рівнів загроз. Зелінська С.В. [5] аналізує європейські підходи до енергобезпеки в умовах глобальних криз.

Засадничі положення когнітивного моделювання в дослідженні складних соціотехнічних систем висвітлено у працях Коваленка Л.В. [6] та Потапенка В.Г. [7]. Ці автори демонструють, як когнітивні карти дозволяють структурувати інформацію про об'єкти, зв'язки та впливи, що особливо важливо в умовах обмеженості даних.

Методи побудови систем диференціальних рівнянь у прикладному моделюванні висвітлено в роботі Назаренка І. В. [8], де йдеться про економічну динаміку з урахуванням зовнішніх впливів. Васильєв О. Л. [9] підкреслює воєнно-енергетичні виклики в умовах гібридної війни, наголошуючи на необхідності адаптивного управління.

На міжнародному рівні значний внесок у розробку концепцій енергетичної безпеки зробили Cherp A. та Jewell J. [10], які розширили традиційні “чотири А” (availability, accessibility, affordability, acceptability) до динамічної моделі. Sovacool B.K. [11] пропонує індекси оцінки енергобезпеки на основі 22 країн, що дає змогу адаптувати методології для локальних умов. Dudin M.N. з колегами [12] акцентують на практичному інструментарії для виявлення системних загроз і підвищення стійкості енергетики.

Таким чином, актуальність когнітивного моделювання та системного аналізу енергетичної безпеки знаходить підтвердження в численних наукових публікаціях, які обґрунтовують необхідність поєднання аналітичного моделювання, експертного оцінювання та прогнозування в умовах нестабільного середовища.

Постановка проблеми

Мета статті полягає у викладенні практичного аспекту моделювання функціонування енергетичної системи держави на основі модифікованого когнітивного підходу.

Результати

Основні положення методу моделювання функціонування енергетичної системи держави на основі модифікованого когнітивного підходу викладено у [13], а система показників, яку пропонується використовувати під час моделювання у [14].

Запропонований метод моделювання передбачає низку етапів:

1. Формалізований опис досліджуваної системи у вигляді метамоделі:

$$M = \{M_O(Y, U, P), M_E(X), M_{OE}, M_d(Q), M_{MO}, M_{ME}, M_U, A, M_H\},$$

де	$M_O(Y, U, P)$	– ідентифікуюча модель системи (модель об'єкта);
	Y	– ендогенні фактори;
	U	– вектор керованих змінних;
	P	– вектор ресурсів;
	M_E	– модель навколишнього середовища;
	X	– екзогенні фактори;
	$M_{OE} = \{M_{SX}, M_{SY}\}$	– модель взаємодії об'єкта й середовища;
	M_{SX}, M_{SY}	– моделі зв'язку системи із середовищем на вході й виході;
	$M_d(Q)$	– модель поведінки системи;
	Q	– впливи на систему;

M_{MO}, M_{ME}	– моделі оцінювання стану системи й навколишнього середовища;
M_U	– модель керуючої системи;
A	– правило вибору процесів змінення об'єкта.

2. Когнітивна структуризація, яка полягає у визначення об'єктів (які характеризуються як кількісно, так і якісно) системи, що досліджується, та встановлення зв'язків між ними. Це здійснюється за допомогою експертів, шляхом збирання й оброблення статистичної та іншої інформації, ці дії базуються на теоретичних знаннях у відповідній предметній галузі.

3. Побудова ієрархічних функціональних когнітивних карт з урахуванням трьох видів впливів (вплив фактору на фактор, автовплив та опосередкований вплив), а також визначенням часу реалізації стратегій.

4. Визначення характеру впливів з використанням статистичних залежностей (експертного опитування) та математичного опису на основі методу групового урахування аргументів (МГУА) на основі визначених сукупностей базових наборів для всіх елементів та всієї системи в цілому. Для цього кожен з W експертів формує сукупність матриць, які містять:

числові значення визначених показників;

числові значення станів елементів, які досягаються за таких значень показників:

$$\left(|X, Y, Z| \rightarrow V \right)^w, \\ \left(\begin{array}{l} |g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1N}| \rightarrow X \\ |g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1N}| \rightarrow X \\ |g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1N}| \rightarrow X \end{array} \right)^w,$$

де w – позначення експерта (його порядковий номер), $w = \overline{1, W}$;

W – загальна кількість експертів.

5. Побудова систем диференціальних рівнянь за умови, що як імовірності станів буде розглядатися безпосередньо стан вершини (елемента) системи, а під інтенсивністю переходу – матиметься на увазі ступінь впливу вершин однієї на іншу (саму на себе).

6. Перевірка отриманої системи на стійкість.

Так для практичних розрахунків після первинної формалізації та когнітивної структуризації було побудовано когнітивну карту для енергетичного сектору, в якій враховувалися три взаємодіючі сторони – Україна, ЄС та США, рф (рис. 1).

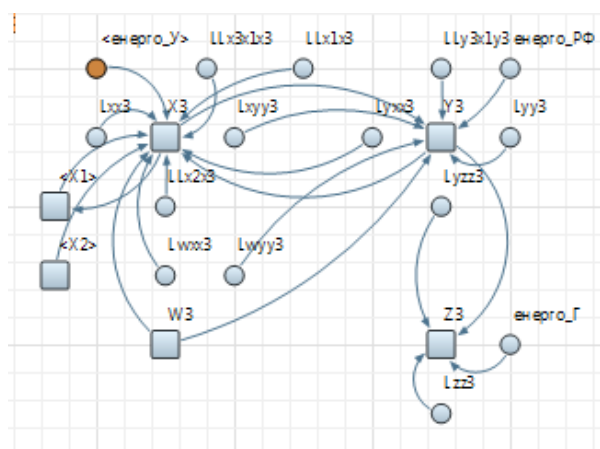


Рисунок 1 – Когнітивна карти взаємодії в енергетичному секторі

Після побудови первинної когнітивної карти був проведений її статистичний аналіз, визначено взаємовплив різних факторів (зрізів), оцінено вплив факторів на систему та систему на фактори (рис. 2).

Дані							Метод		Довідка		
Введена матриця							Результат				
0	-0,06	0,05	-0,06	0,07	0,09	0	вплив системи на фактор	вплив фактора на систему			
-0,07	0	0	0	-0,06	0	0,07	0,033	0,013			
0,04	0	0	0,05	-0,05	0	0,05	-0,002	-0,009			
0,07	0,05	0	0	0	0	0	0,009	0,014			
0,08	0	0	0	0	0,05	0	-0,003	0,019			
0,02	0	0	0	0	0	-0,06	-0,003	0,018			
0,08	0	0	0	0	0,05	0	0,027	-0,006			
							0,007	0,018			
Розмір матриці							7x7				

Рисунок 2 – Результати розрахунків для оцінювання впливу факторів на систему та впливу системи на фактори

Це дозволило уточнити структуру когнітивної моделі, ввести корективи у множину зв'язків, визначити значення та характер затримок у системі (час реалізації стратегії для кожного з впливів).

Після цього була побудована система диференціальних рівнянь для кожної сторони та кожного зрізу:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \omega_{xy}X - \omega_{yxx}Y + \omega_{wxx}W + \omega_{x_1x(t-1)}X_1 + \omega_{xx}X + \omega_{x_2x}X_2 + \omega_{x_4x}X_4 - \\ \quad - \omega_{y_4xx}Y_4 + \Delta VZ_X; \\ \frac{dY}{dt} = -\omega_{wyy}W - \omega_{xyy}X + \omega_{yx}Y + \Delta VZ_Y; \\ \frac{dZ}{dt} = \omega_{yzz}Y - \omega_{wzz}W + \omega_{zy}Z + \Delta VZ_Z, \end{cases}$$

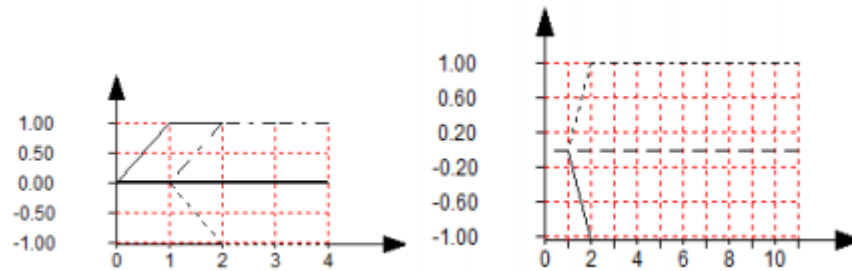
- де ΔVZ – значення приросту значення енергетичної безпеки на кожному циклі;
 ω_{xy} – сила впливу воєнного зрізу України (x) на воєнний зріз росії (y) тощо;
 $\omega_{x_1x(t-1)}$ – сила впливу енергетичного зрізу України (x_1) на воєнний зріз України (x) з урахуванням часу реалізації стратегії (t-1).

Після чого проведено перевірки на стійкість моделі системи по збудженню та на структурну стійкість (рис. 3). З огляду на те, що побудована система є суттєво нелінійною, перевірка її на стійкість, за запропонованим підходом, показала, що має місце асимптотична стійкість нульового рішення рівнянь (рис. 3).

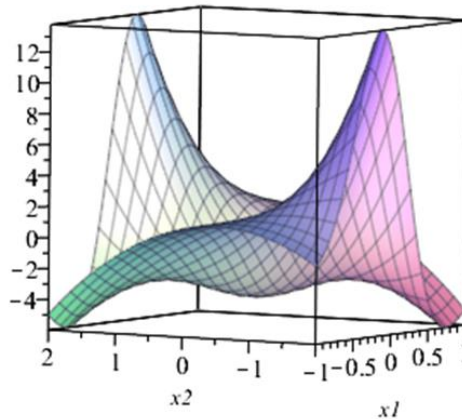
Визначеними експертами з певним рівнем компетентності були визначені вагові коефіцієнти показників на різних рівнях. Експерти виявили достатню узгодженість думок (коефіцієнт конкордації знаходиться в межах 0,7–0,9).

Отримані плани експериментів були оброблені за допомогою МГУА, внаслідок чого були отримані відповідні функціонали (у статті не наводяться через їх великий обсяг).

Точність отриманих функціоналів виявилась достатньо високою, що свідчить про коректність моделювання та якість роботи експертів. Приклади оцінок точності деяких функціоналів, наведені на рис. 4.



А)



Б)

Рисунок 3 – Результати оцінювання А) стійкості системи по збудженню та Б) стійкості системи диференціальних рівнянь

Мера погрешности	Абсолютная	Выходная переменная: ВПО		Мера погрешности	Абсолютная	Выходная переменная: ст	
Результаты подготовки данных		Обучение	Экзамен	Результаты подготовки данных		Обучение	Экзамен
Число наблюдений		12	3	Число наблюдений		17	4
Макс. отрицательное отклонение		-1,05693E-13	-8,57092E-14	Макс. отрицательное отклонение		-2,03393E-13	-2,0961E-13
Макс. положительное отклонение		1,18572E-13	4,13003E-14	Макс. положительное отклонение		2,04281E-13	3,9968E-14
Средний модуль ошибки (MAE)		7,27936E-14	4,44089E-14	Средний модуль ошибки (MAE)		6,97481E-14	1,1724E-13
Среднеквадратическое отклонение (RMSE)		7,89098E-14	5,50468E-14	Среднеквадратическое отклонение (RMSE)		9,38469E-14	1,31916E-13
Сумма отклонений		9,32587E-15	-3,81917E-14	Сумма отклонений		-1,86517E-14	-3,89022E-13
Стандартное отклонение остатков		7,8906E-14	5,35545E-14	Стандартное отклонение остатков		9,38405E-14	8,91248E-14
Коэффициент детерминации (R ²)		1	1	Коэффициент детерминации (R ²)		1	1
Корреляция		1	1	Корреляция		1	1

Рисунок 4 – Результати оцінки точності

На основі отриманих функціоналів в середовище “AnyLogic” була створена програмна реалізація побудованої когнітивної моделі функціонування енергетичної системи держави. Графічна інтерпретація одного з функціоналів наведена на рис. 5.

Для проведення розрахунків були зібрані вихідні дані для значень відповідних показників за 2010–2019 роки, які базуються на статистичних даних та експертних оцінках у випадку, коли статистика відсутня.

Результати розрахунків за розробленим програмним забезпеченням наведено на рис. 6.

Перевірка стаціонарності отриманих часових рядів за допомогою розширеного тесту Дики Фуллера (Augmented Dickey-Fuller test, ADF) [15] показала загальну стаціонарність з наявністю тренду та відсутністю сезонної складової, що підтвердило гіпотезу про принципову можливість прогнозування досліджуваних процесів.

Аналіз результатів розрахунків свідчить, що за збереження існуючих умов загальний

рівень ефективності функціонування енергетичної безпеки держави (енергетичної безпеки) не досягне прийнятного значення, що й підтвердилося на практиці. Крім цього незадовільне функціонування енергетичної системи було погіршено агресією РФ.

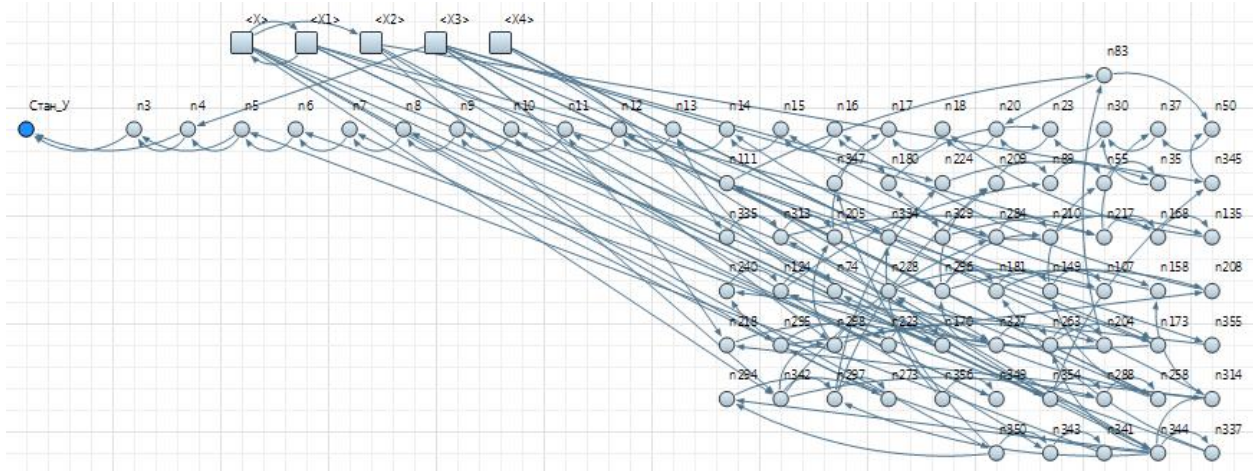


Рисунок 5 – Графічне відображення зв'язків між складовими отриманого функціонала

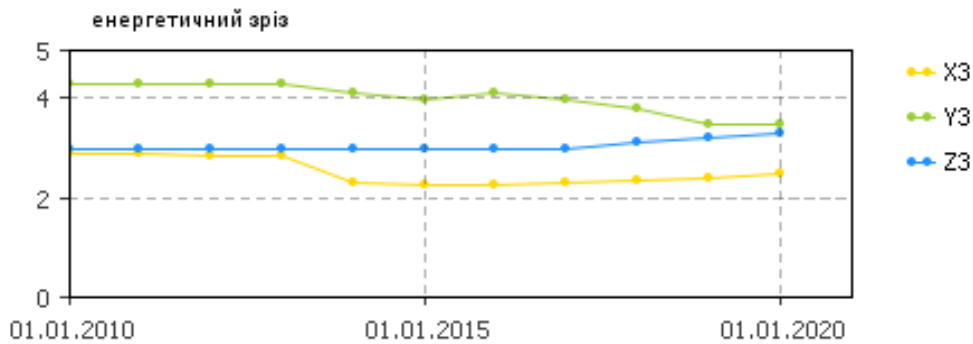


Рисунок 6 – Результати розрахунків

Висновки

Проведене дослідження дозволило сформулювати новий підхід до моделювання функціонування енергетичної системи держави, який базується на використанні когнітивної моделі з подальшою математичною формалізацією. Запропонований метод:

забезпечує комплексне уявлення про взаємозв'язки в енергетичній системі;

дозволяє враховувати не лише технічні, а й політичні, соціальні та економічні фактори;

створює передумови для формування адаптивної стратегії управління енергетичною безпекою;

підтверджує ефективність застосування методів експертного оцінювання та когнітивного аналізу;

придатний для практичного використання у процесах прийняття рішень на рівні державного управління.

Результати роботи демонструють високий потенціал когнітивного підходу для прогнозування змін та визначення ефективних сценаріїв функціонування енергетичної системи в умовах кризових впливів і нестабільного середовища.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Стратегія енергетичної безпеки України на період до 2025 року. Київ : Міненерго України, 2017. 48 с.
2. Мормуль Н. Є. Енергетична безпека як компонент національної безпеки України. Економіка і держава. 2020. № 1. С. 12–16.
3. Шевченко А. Ю. Інформаційно-аналітичне забезпечення управління енергетичною безпекою держави. Економіка та держава. 2022. № 3. С. 9–14.
4. Сидоренко О. В. Методологія оцінки рівня енергетичної безпеки в умовах воєнної агресії. Військово-науковий вісник. 2023. № 38. С. 67–74.
5. Зелінська С. В. Сучасні виклики енергетичній безпеці: європейський контекст. Вісник НУ «Львівська політехніка». 2021. № 884. С. 45–51.
6. Коваленко Л. В. Когнітивне моделювання складних систем: теорія та практика. Системи обробки інформації. 2019. № 6. С. 56–61.
7. Потапенко В. Г. Когнітивні карти як засіб дослідження складних соціотехнічних систем. Проблеми управління та інформатики. 2020. № 2. С. 39–45.
8. Назаренко І. В. Диференціальні рівняння у моделюванні складних економічних систем. Математичне моделювання в економіці. 2021. № 1. С. 22–27.
9. Васильєв О. Л. Енергетичні виклики в умовах гібридної війни: досвід України. Стратегічні пріоритети. 2021. № 1(58). С. 34–40.
10. Cherp A., Jewell J. The concept of energy security: Beyond the four as. Energy Policy. 2014. Vol. 75. P. 415–421.
11. Sovacool B. K. Energy security performance in 22 countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. P. 234–246.
12. Dudin M. N., Frolova E. E., Lyasnikov N. V. Energy security of the state: systemic threats and instruments for their neutralization. International Journal of Energy Economics and Policy. 2020. Vol. 10(5). P. 276–282.
13. Клят Ю. О. Метод моделювання функціонування енергетичної системи держави на основі модифікованого когнітивного підходу. Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України 2024. № 3 (110). С. 22-33.
14. Юрій Клят, Олексій Соломицький, Ольга Таран Обґрунтування системи показників оцінювання енергетичної безпеки держави. Міжнародний наук. журнал Military Science. 2024. Том. 2, № 2 С. 5–12.
15. Elliott G., Rothenberg T. J., Stock J. H. Efficient Tests for an Autoregressive Unit Root. Econometrica. – 1996. Vol. 64, no. 4. P. 813–836.

References

1. Stratehiia enerhetychnoi bezpeky Ukrainy na period do 2025 roku. Kyiv : Minenerho Ukrainy, 2017. 48 s.
2. Mormul, N. Ye. (2020). Enerhetychna bezpeka yak komponent natsional'noyi bezpeky Ukrayiny [Energy security as a component of national security of Ukraine]. *Ekonomika i derzhava [Economy and State]*, 1, 12–16.
3. Shevchenko, A. Yu. (2022). Informatsiyno-analytychne zabezpechennya upravlinnya enerhetychnoyu bezpekoju derzhavy [Information and analytical support for managing the state's energy security]. *Ekonomika ta derzhava [Economy and State]*, 3, 9–14.
4. Sidorenko, O. V. (2023). Metodolohiya otsinky rivnya enerhetychnoyi bezpeky v umovakh voyennoyi

- ahresiyi [Methodology for assessing the level of energy security in the context of military aggression]. *Viys'kovo-naukovyy visnyk [Military Science Bulletin]*, 38, 67–74.
5. Zelinska, S. V. (2021). Suchasni vyklyky enerhetychniy bezpetsi: yevropeys'kyy kontekst [Modern challenges to energy security: the European context]. *Visnyk NU «L'viv's'ka politekhnika» [Visnyk NU "Lviv Polytechnic"]*, 884, 45–51.
 6. Kovalenko, L. V. (2019). Kohnityvne modelyuvannya skladnykh system: teoriya ta praktyka [Cognitive modeling of complex systems: theory and practice]. *Systemy obrobky informatsiyi [Information Processing Systems]*, 6, 56–61.
 7. Potapenko, V. H. (2020). Kohnityvni karty yak zasib doslidzhennya skladnykh sotsiotekhnichnykh system [Cognitive maps as a tool for studying complex socio-technical systems]. *Problemy upravlinnya ta informatyky [Problems of Management and Informatics]*, 2, 39–45.
 8. Nazarenko, I. V. (2021). Dyferentsial'ni rivnyannya u modelyuvanni skladnykh ekonomichnykh system [Differential equations in modeling complex economic systems]. *Matematychnye modelyuvannya v ekonomitsi [Mathematical Modeling in Economics]*, 1, 22–27.
 9. Vasylyev, O. L. (2021). Enerhetychni vyklyky v umovakh hibrydnoyi viyny: dosvid Ukrainy [Energy challenges in the context of hybrid warfare: the experience of Ukraine]. *Stratehichni priorityty [Strategic Priorities]*, 1(58), 34–40.
 10. Cherp, A., & Jewell, J. (2014). The concept of energy security: Beyond the four as. *Energy Policy*, 75, 415–421.
 11. Sovacool, B. K. (2016). Energy security performance in 22 countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 234–246.
 12. Dudin, M. N., Frolova, E. E., & Lyasnikov, N. V. (2020). Energy security of the state: systemic threats and instruments for their neutralization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(5), 276–282.
 13. Klyat, Yu. O. (2024). Metod modelyuvannya funktsionuvannya enerhetychnoyi systemy derzhavy na osnovi modyfikovanoho kohnityvnoho pidkhodu [Method of modeling the functioning of the state's energy system based on a modified cognitive approach]. *Zbirnyk naukovykh prats' TsNDI ZS Ukrainy [Collection of Scientific Works of the Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine]*, 3 (110), 22-33.
 14. Klyat, Yu., Solomyts'kyy, O., & Taran, O. (2024). Obgruntuvannya systemy pokaznykiv otsinyuvannya enerhetychnoyi bezpeky derzhavy [Justification of the system of indicators for assessing the energy security of the state]. *Mizhnarodnyy nauk. zhurnal Military Science [International Scientific Journal Military Science]*, 2(2), 5–12.
 15. Elliott, G., Rothenberg, T. J., & Stock, J. H. (1996). Efficient Tests for an Autoregressive Unit Root. *Econometrica*, 64(4), 813–836.