

<https://doi.org/10.26565/2524-2547-2024-67-07>
УДК: 339.7

Валерія Олександрівна Яценко

аспірантка

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

вул. Васильківська, 90А, Київ, 03022, Україна

valeriyatsenko5@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2925-7470>

ПОКАЗНИКИ ЕНТРОПІЇ ЯК ОЦІНКИ ВАЛЮТНИХ РИЗИКІВ

Валютний ринок, як найбільший за оборотом фінансовий ринок у світі, безсумнівно, є відкритою динамічною системою, що перебуває під впливом широкого спектру детермінант, що включають політичні та економічні фактори, шоки глобальної кон'юнктури тощо. Водночас збурення самого ринку також впливають як на фінансовий, так і на реальний сектори економіки, що окреслює виключно важливість підтримки стабільного передбачуваного обмінного курсу, а у зворотному випадку, ефективного управління валютними ризиками, що, в свою чергу, вимагає їхньої правильної кількісної оцінки. Оскільки класичні – статистичні, методи оцінки валютних ризиків не завжди гарантують достовірне відображення потенційних загроз у зв'язку із наявністю шуму у фінансових часових рядах, поведінковою компонентою курсоутворення, необхідним є пошук альтернативних методів вимірювання ризиків, одним із яких постає застосування інструментів теорії динамічних нелінійних систем, а саме показників ентропії, наприклад, Шеннона та Рен'ї. У зв'язку із високим рівнем економічної, а точніше торговельної, відкритості, окрім динаміки самої гривні, також були досліджені коливання валют основних ринків збуту вітчизняної продукції, шоки яких можуть бути запозичені до України різноманітними трансмісійними механізмами. Виявлено, що на противагу інтуїції, вищий рівень ентропії, що означає більшу невизначеність, складність та непрогнозованість, одночасно вказує на розвиненіші, ефективніші самоорганізовані системи, в той час як нижчі значення ентропії свідчатимуть про неефективні ринки, схильних до збурень, та навіть можливе наближення біфуркаційних точок, зокрема у вигляді криз. Крім того, ентропію можна вважати цілком достовірним індикатором ризиків з огляду статистично та економічно значущих коефіцієнтів кореляції із іншими якісними характеристиками розподілів доходності валютних курсів – асиметрією та ексцесом. Отримані результати можуть бути корисними для інвесторів та портфельних менеджерів в розрізі кращого розуміння динаміки валютних курсів, прийняття обґрунтованих управлінських рішень та мінімізації збитків від їхньої несприятливої волатильності.

Ключові слова: **валютний курс, валютний ризик, ентропія, часові ряди, доходність.**

JEL Classification: C4; F31; F41.

Як цитувати: Яценко, В. О. (2024). Показники ентропії як оцінки валютних ризиків. *Соціальна економіка*, 67, 72-80. doi: <https://doi.org/10.26565/2524-2547-2024-67-07>

In cites: Yatsenko, V. (2024). Entropy indicators for an estimation of currency risks. *Social Economics*, 67, 72-80. doi: <https://doi.org/10.26565/2524-2547-2024-67-07> (In Ukrainian)

Вступ. Непередбачувана волатильність валютних курсів і її логічного наслідку – валютних ризиків, справедливо вважається однією з найпріоритетніших проблем міжнародної макроекономіки з моменту запровадження Ямайської валютної системи у 1976, набуваючи все більшої актуальності в контексті перманентно зростаючої глобальної нестабільності. Очевидно, що ефективний ризик-менеджмент можливий виключно за умови коректної кількісної оцінки ризиків, що втім, часто постає проблематичним завданням з огляду зашумленості фінансових

часових рядів і, в багатьох випадках, їхньої нелінійної динаміки.

Оцінювання ризиків за допомогою традиційних статистичних показників – стандартного відхилення, розмаху або коефіцієнтів варіації, ексцесу та асиметрії, не завжди забезпечує необхідні рівні статистичної або економічної значущості, провокуючи отримання зміщених, зокрема занижених оцінок і, як наслідок, прийняття нераціональних управлінських рішень. Так, статистичні показники можуть ігнорувати ймовірнісний розподіл інформації або невизначеності, не

підходити розподілам з довгими «хвостами» та пам'яттю, високим рівнем варіативності та флуктуаціями, які послаблюють дію статистичних законів, або суттєвими відхиленнями від нормального розподілу (Jakimowicz, 2020). Крім того, навіть за умови коректного розрахунку, статистичні показники, відображаючи кількісний рівень валютних ризиків, часто залишають за дужками висновки про їхню природу та причини можливого походження. Наприклад, ризики, втілені високим рівнем волатильності, можуть бути результатом чутливої реакції обмінного курсу до шоків, або меншого рівня стабільності динамічної валютної системи, або ж навпаки її більшої стійкості (Bask & de Luna, 2005), внаслідок збурень як самого валютного ринку, так і фундаментальних факторів, що впливають на нього. Крім того, вчені, на основі аналізу монетарної інтеграції країн Європи, виявили, що стабілізація валютного курсу, в більшості випадків, призводить до зниження їхньої волатильності, а відтак, і ризиків, і навпаки (Bask & de Luna, 2005).

Звичайно, ігнорування здатності валютного ринку до збереження стійкості або рівня його складності не обов'язково призведе до управлінських помилок і прямих фінансових збитків, однак, цілком здатне обумовити субоптимальність прийнятих рішень і втрат у довгостроковій перспективі. Відповідно, оцінювання валютних ризиків та побудова ризик-менеджменту лише на основі традиційних статистичних показників, зокрема оцінок волатильності, може бути лімітованим і, навіть на думку деяких вчених недоречним (Bask & de Luna, 2005), обумовлюючи необхідність пошуку альтернативних методів оцінювання, одним із яких виступає застосування міждисциплінарного підходу, а саме інструментів еконофізики або теорії динамічних нелінійних систем.

Відповідно, метою статті виступає вимірювання ентропії часових рядів доходності валютних курсів та вивчення можливості їхнього використання для оцінки валютних ризиків.

Виконання поставленої мети, окреслило наступні завдання:

1 оцінити рівень ефективності та складності валютних ринків України та основних торговельних партнерів за допомогою ентропії Шеннона;

2 порівняти вплив виняткових шоків або часто повторюваних подій на волатильність валютних курсів за допомогою ентропії Реньї;

3 ідентифікувати можливість використання показників ентропії як оцінок валютних ризиків на основі кореляційного аналізу із традиційними статистичними оцінками ризиків– стандартним відхиленням, асиметрією та ексцесом.

Як наслідок, об'єктом статті виступає оцінка валютних ризиків альтернативними методами, в той час як, предметом– застосування показників ентропії до вимірювання ризиків.

Огляд літератури. Оцінювання валютних ризиків крізь призму теорії динамічних нелінійних систем мають значний теоретичний та практичний потенціал з огляду декількох причин. По-перше, фінансові ринки та, валютні зокрема, протягом останніх кількох десятиліть демонструють явні ознаки нелінійності та високого рівня складності, в результаті поглиблення фінансової інтернаціоналізації, удосконалення та розповсюдження технологій, зокрема фінтеху, розширення кола контрагентів і прийняття множинних рішень (Özkaya, 2022) і, як наслідок, ймовірності встановлення множинної рівноваги, розширення ланцюгових ефектів між ринками та країнами (Wang et al, 2014), тяжіння до децентралізації, зокрема у формі дерегульованих ринків криптовалют (Garnier & Solna, 2019). По-друге, застосування такого підходу може виявитись особливо корисним у випадку раптових або суттєвих шоків, аналіз яких традиційними лінійними методами та моделями може виявитись недостовірним (Adrangi et al, 2010).

Використання теорії динамічних нелінійних систем, зокрема показників ентропії, привертає все більше уваги, знайшовши відображення у працях багатьох закордонних вчених. Так, (Olbryś & Komar, 2023), (Liu et al., 2022), (Sheraz & Nasir, 2021), (Anh, 2020), (Metin, 2019), (Gu, 2017) застосовували показники ентропії для аналізу фондових ринків; Lahmiri & Bekiros (2020), (Gonçalves et al., 2019), (Lahmiri et al., 2017) вивчали та прогнозували за їх допомогою системні ризики; (Rodriguez-Rodriguez & Miramontes, 2022) розглядали можливості зниження портфельних ризиків, а (Mishra & Ayyub, 2019) досліджували соціально-економічні відносини.

Даний напрям також здобуває популярність і серед українських вчених, проте, із наданням переваги фрактальному аналізу, відображеного у роботах Данильчук (2019), яка застосувала фрактальний та мультифрактальний аналіз до вивчення фондових ринків Німеччини, Франції, Великої Британії та Китаю; Liashenko & Kravets (2016), які виконали фрактальний аналіз 17 валютних пар, та Пластун з Макаренко (2014), які виявили неефективність фондового ринку України за допомогою фрактальної гіпотези ринку.

Методологія. Оцінка рівня складності нелінійних динамічних систем здійснюється за допомогою показників ентропії, найвідомішими з яких є ентропія Шеннона та Реньї (Shannon entropy, SE та Renyi entropy, RE), основна відмінність між якими полягає у спо-

собі розрахунку – в той час як SE покладається на експоненційний розподіл, RE використовує степеневий (Rodriguez-Rodriguez & Miramontes, 2020).

SE – вимірює рангову ентропію, представляє глобальні оцінки і експоненційні рівноважні розподіли, шляхом вимірювання загубленої інформації на основі функції розподілу ймовірностей, припущеннях ергодичності та незалежності (Rodriguez-Rodriguez & Miramontes, 2020) (1-2). SE виступає оцінкою інформації в системі – наявної або навпаки загубленої, обсягу транзитивної інформації або передачі інформації випадковою подією і може набувати невід’ємних значень $[0, \infty)$ (Sheraz & Nasir, 2021; Mishra & Ayyub, 2019; Gu, 2017).

$$S = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i) \quad (1)$$

$$\text{або } S = -\frac{1}{\ln(2)} \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (2)$$

де p_i – ймовірність настання окремої події, за умови $\sum_{i=1}^n p_i = 1$;

$-\ln p_i$ – обсяг інформації, який передається даною подією;

$-\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$ – обсяг інформації, що передається системою в результаті усіх подій (Miśkiewicz, 2021; Anh, 2020; Mishra & Ayyub, 2019; Gu, 2017).

Більше значення SE вказує на вищий рівень невизначеності, складності та концентрованості системи, більший обсяг транзитивної інформації та інформації необхідної для розуміння функціонування системи, більшу кількість ймовірних подій, при чому більш ймовірна подія переноситиме менше інформації і навпаки – малоймовірна подія обумовлюватиме більше транзитивної інформації і відповідно невизначеності (Liu et al., 2022; Gu, 2017).

Мінімальна ентропія на рівні 0 вказуватиме на абсолютну ймовірність реалізації однієї події, іншими словами існує елемент, який матиме місце в усіх випадках, в той час як наближення до максимального значення

передбачатиме однакову ймовірність реалізації усіх подій або іншими словами засвідчуватиме випадкове блукання (Sheraz & Nasir, 2021; Anh, 2020; Mishra & Ayyub, 2019).

RE, або узагальнена дискретна функція ентропії, в свою чергу, розкриває геометричні властивості хаотичної системи, зокрема вимірює рівень випадковості, невизначеності та різноманітності системи, складності сигналу, аналізує багаторівневий інформаційний порядок, відрізняє вплив менш та більш ймовірних подій шляхом експоненційного зважування значень елементарної міри інформації і залежить від розподілу степеневого закону або закону розподілу ймовірності (Rodriguez-Rodriguez & Miramontes, 2022; Sheraz & Nasir, 2021; Lahmiri & Bekiros, 2020; Lahmiri et al, 2017). Відповідно, RE притаманна симетричність та невід’ємність значень ($R_q(x) \geq 0$) (Jizba et al, 2022). Як зазначають Lahmiri et al. (2017), для часового ряду $\{x_t\}_{t=1}^n$ RE розраховуватиметься шляхом (3).

$$R_q(x) = \frac{1}{1-q} \log_2 \sum_{i=1}^n p_i^q \quad (3)$$

де q – порядок ентропії або індекс різних ймовірностей; при $q \in (0, 1) \cup (1, \infty)$,

p – дискретна ймовірність, для якої $\sum_i p_i = 1$ (Jizba et al, 2022; Rodriguez-Rodriguez & Miramontes, 2022; Lahmiri & Bekiros, 2020).

При розрахунку RE важливим постає вибір порядку ентропії (рис. 1), оскільки низьке значення q ($0 < q < 1$) апелює до виняткових подій з низьким рівнем ймовірності («чорних лебедів»), в той час високий q ($q > 1$) описуватиме вплив періодичних вірогідних (звичайних, повсякденних) подій; $q=0$ (ентропія Хартлі) та $q=\infty$ (ентропія Коллізіона) визначають максимальне та мінімальне значення ентропії відповідно; при $q \rightarrow 1$, згідно з правилом Лопіталя, RE виступає випадком SE (Jizba, 2022; Rodriguez-Rodriguez & Miramontes, 2022; Metin, 2019).

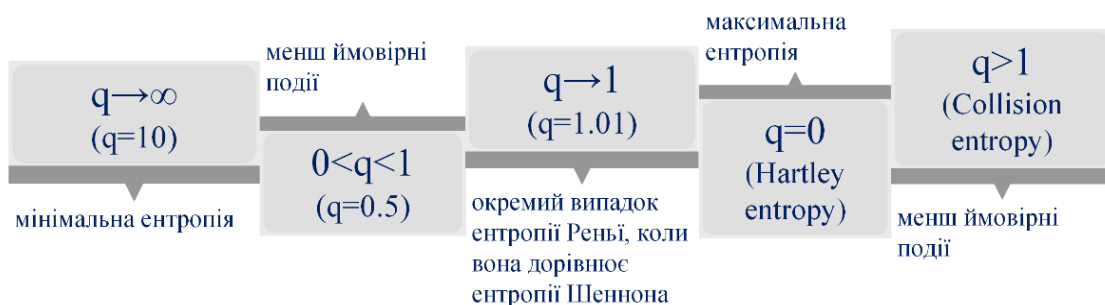


Рис. 1. Кількісні значення RE

Fig. 1. Quantitative values of RE

Джерело: складено автором на основі (Jizba, 2022; Rodriguez-Rodriguez & Miramontes, 2022; Metin, 2019)

З метою комплексного аналізу впливу різного роду змін (виняткових шоків або часто повторюваних подій) на розподіли доходності валютних курсів, важливим є розрахунок RE для різних рівнів порядку, виражених q , що дозволить зробити точніші висновки про втрату інформації при менш та більш ймовірних подіях (Lahmiri & Bekiros, 2020), на що також звертають увагу Jizba et al. (2022). В даному випадку RE були розраховано для $q \in [0; 0.5; 1.01; 2; 10]$.

Обчислення SE та RE здійснювались у пакеті Google Colab.

З метою ідентифікації можливостей використання показників ентропії як оцінок ризиків, подібно до Bask & de Luna (2005), було сформульовано першу нульову гіпотезу H_0^1 .

H_0^1 : $r_{\text{статистичні оцінки ентропія}} = 0$ – показники ентропії не можуть використовуватись як достовірні оцінки валютних ризиків

H_1^1 : $r_{\text{статистичні оцінки ентропія}} \neq 0$ – показники ентропії можуть використовуватись в якості оцінок валютних ризиків

Прийняття H_0^1 вимагає отримання нульового коефіцієнту кореляції за 95% або 99% достовірності, що свідчатиме про неможливість використання показників ентропії для оцінки валютних ризиків, і навпаки, заперечення H_0^1 означатиме можливість їхнього застосування до вимірювання, пояснення природи та ефективного управління ризиками.

Дані. Враховуючи високий рівень торговельної відкритості України, а значить потенційну можливість запозичення зовнішніх шоків, окрім динаміки самої гривні, до аналізу були включені валюти основних імпортерів вітчизняної продукції, на які припадає 64,52%¹ експорту за останні 10 років. Аналогічно до методології інших досліджень, замість абсолютних значень, була використана перша різниця логарифмів щоденних значень двосторонніх спот курсів проти долара США і торговельно зваженого індексу долара або іншими словами доходність (4).

$$returns_t = \log(ER_t) - \log(ER_{t-1}) \quad (4)$$

Часовий горизонт охоплює період з 2014 до червня 2023, джерелом даних виступає база Bloomberg.

Основні результати. Результати розрахунку ентропії за оригінальною формулою SE та RE, при $q \rightarrow 1$, в даному дослідженні $q=1.01$ представлені рис. 2. Незважаючи на відмінність в абсолютних значеннях – SE $\in [0.697; 3.187]$ проти $RE_{q=1.01} \in [0.477; 2.208]$, порядковість отриманих оцінок повністю співпадає для усіх валют, що дозволяє зробити наступні висновки.

По-перше, SE оцінює ефективність валютного ринку.

1.1 Вище значення SE є свідченням більш ефективного ринку згідно однойменної гіпотези² (Anh, 2020), що Gulko називає ентропійною гіпотезою (наведено у Olbry's & Komar, 2023). Відповідно, отримані результати констатують переважаюче тяжіння аналізованих часових рядів до ефективного ринку в сильній або функціонування в напівсильній формі (Olbry's & Komar, 2023; Anh, 2020), що означає краще відображення більшого обсягу ринкової інформації та сигналів в поточних валютних курсах; складності і неточності, а за максимальної ентропії – неможливість прогнозування; нижчу доходність таких валют з огляду менш сприятливих умов для арбітражу.

Натомість, менші значення ентропії UAN та KZT демонструють ознаки слабо-ефективних ринків, і повністю неефективного ринку EGP, для якого SE, розрахована двома способами, не перевищує 1 (Anh, 2020).

Одним із можливих наслідків неефективних валютних ринків є процвітання «чорних» або паралельних ринків в Казахстані³, Туреччині⁴, Україні, зокрема в періоди проведення жорсткої монетарної політики НБУ під час системної кризи 2014-2015 або повномасштабного вторгнення 2022-2023⁵, і чи не найбільше в Єгипті^{6,7}.

Для інвесторів, відхилення від гіпотези ефективного ринку означатиме можливість отримання надлишкових збитків або вигід,

¹ рф та білорусь із 10,76 та 4,32% виключені з аналізу; інші країни не аналізувались з огляду незначної частки в торгівлі <1%.

² Мова йде про гіпотезу ефективного ринку.

³ The black market is still alive and well though. Kazakhstan restricts export of foreign currency and gold. URL: <https://eurasianet.org/kazakhstan-restricts-export-of-foreign-currency-and-gold> (дата звернення: 10.04.2024).

⁴ Private companies, banks and public institutions are buying foreign currencies on the informal over-the-counter market. At Istanbul's Grand Bazaar: 'The lira is plummeting and we are selling the dollar for more than the official rate. URL: https://www.lemonde.fr/en/international/article/2023/06/22/at-istanbul-s-grand-bazaar-the-lira-is-plummeting-and-we-are-selling-the-dollar-for-more-than-the-official-rate_6035389_4.html (дата звернення: 10.04.2024).

⁵ Доларизація та чорний ринок валюти в Україні: причини, обсяги, наслідки для економіки та політики. URL: https://ces.org.ua/wp-content/uploads/2016/07/Currency-black-market_Research-paper.pdf (дата звернення: 10.04.2024).

⁶ And the black market shows the hard currency shortage that has plagued Egypt for more than a year persists. Analysis: Pressure builds on Egypt to devalue currency further. URL: <https://www.reuters.com/markets/currencies/pressure-builds-egypt-devalue-currency-further-2023-03-28/> (дата звернення: 10.04.2024).

⁷ Whether for investment purposes or to save up some money, Egyptians approach the black market to buy US dollars since their value keeps increasing, in contrast with the ailing Egyptian pound. Explainer: What is the Black Market and How Does it Affect Egypt's Economy? URL: <https://egyptianstreets.com/2023/02/05/explainer-what-is-the-black-market-and-how-does-it-affect-egypts-economy/> (дата звернення: 10.04.2024).

однак, виключно за умови коректної ідентифікації закономірностей та логіки змін обмінного курсу, в тому числі за допомогою інструментів фундаментального або технічного аналізу (Anh, 2020). Наприклад, виявлення втраченої інформації курсоутворення гривні, яка зумовлює перманентну недооцінку валюти, в середньому на 65.1% за індексом BigMac¹, могло б пояснити причини неочікуваного зміцнення валюти у 2018-2019, або ж поодинокі випадки стабілізації курсу у 2023² всупереч загальній невизначеності та викликам спричинених повномасштабною війною, для пояснення яких, за словами міністра фінансів С. Марченка: «немає жодних фундаментальних чинників»³.

1.2 Вище значення SE означає наближення системи до оптимального або паритету, рівність розподілу доходності, а значить – менший рівень ризиків, в першу чергу системних, і навпаки (Mishra & Auub, 2019).

Максимальна ентропія засвідчує встановлення рівноважного курсу, що збалансовує попит і пропозицію на іноземну валюту, виконує інформаційну функцію, амортизує шоки, здатний забезпечити чисті позитивні

вигоди для суспільства і покращити конкурентоспроможність національних виробників за умови девальвації, оскільки відповідатиме структурі економіці.

Навпаки, мінімальна ентропія вказує на суттєве відхилення фактичного валютного курсу від рівноважного, що призводить до формування дисбалансів, викривлення інформаційної та сигнальної функцій, трансформує його з амортизатора в причину шоків.

1.3 Нижче значення SE свідчить про наближення біфуркацій, в першу чергу валютних криз, протягом яких часто повторювальні тренди знижують ентропію (Olbry's & Komar, 2023), або існування аномалій (Mishra & Auub, 2019). Найнижча ентропія характерна для потерпаючого від 50% девальвації та 35.7% галопуючої інфляції Єгипту, вказує на ймовірну масштабну валютну кризу, що може стати найближчими роками, наслідки якої можуть перевершити історичне падіння єгипетського фунту у 2017, якщо Центральний банк країни не вирішить накопичені дисбаланси та не зменшить тиск «чорного» ринку на курс фунту⁴.

ISO	SE	SE based on RE q=1.01
1	2	3
EGP	0.697	0.477
KZT	1.678	1.156
UAH	2.255	1.559
TRY	2.525	1.747
CNY	2.632	1.822
JPY	2.710	1.876
EUR	2.787	1.929
BGN	2.809	1.945
RON	2.822	1.954
GBP	2.842	1.968
CHF	2.858	1.979
USD	2.926	2.026
INR	2.934	2.032
PLN	2.956	2.047
CZK	3.044	2.108
HUF	3.187	2.208

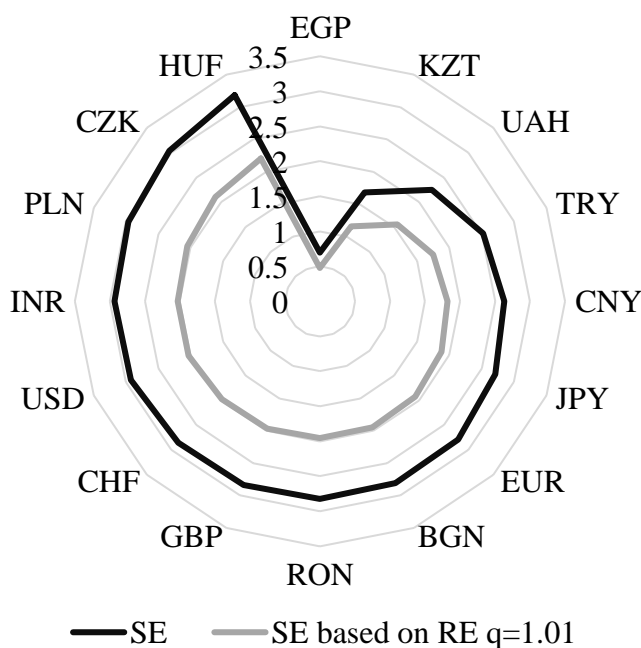


Рис. 2. Оцінки SE валютних ринків
Fig. 2. SE of foreign exchange markets

¹ Big Mac Index – Ukraine. URL: https://data.nasdaq.com/data/ECONOMIST/BIGMAC_UKR-big-mac-index-ukraine (дата звернення: 10.04.2024).

² НБУ впроваджує керовану гнучкість обмінного курсу, що посилить стійкість валютного ринку та економіки. URL: <https://bank.gov.ua/ua/news/all/nbu-vprovadjuje-kerovanu-gnuchkist-obminnogo-kursu-scho-posilit-stiykist-valyutnogo-rinku-ta-ekonomiki> (дата звернення: 10.04.2024).

³ Мінфін хвилює укріплення гривні: названо ймовірний курс на 2024 рік. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2023/09/11/704153/> (дата звернення: 10.04.2024).

⁴ Egypt growth forecast cut, currency expected to slip further. URL: <https://www.reuters.com/world/africa/egypt-growth-forecast-cut-currency-seen-slipping-further-2023-07-20/> (дата звернення: 10.04.2024).

Високі темпи інфляції, ресурсна орієнтація економіки та спричинена нею невизначеність (низхідний тренд цін на нафту та логістичні проблеми пов'язані із транспортування територією РФ) можуть потенційно зумовити послаблення тенге, про що свідчить низька ентропія¹.

Невизначеність спричинена повномасштабним вторгненням РФ та увесь спектр закономірних економічних наслідків втілюються у відносно низькій ентропії UAH², окреслюючи загрози потрясінь валютного ринку, якими в свій час стали заяви НБУ про девальвацію валюти у липні 2022 та запровадження режиму керованої гнучкості ER у жовтні 2023³, а також ймовірну поствоєнну кризу.

По-друге, ентропія оцінює рівень складності системи.

2.1 Вищий рівень ентропії вказує на складнішу систему, що може спостерігатись внаслідок вищого рівня самоорганізації, яка збільшує рівень порядку системи, а відтак, і рівень ентропії (Mishra & Ayyub, 2019); більшої кількості учасників валютного ринку, що може включати асиметрії між менш та більш поінформованими учасниками, відмінний вплив інституційних або великих гравців ринку від приватних учасників та їхньої «по

ведінки натовпу», зміщення внаслідок поведінки ірраціональних інвесторів та шумової торгівлі (Liu et al, 2022); глибшого рівня залученості до системи міжнародних економічних відносин, що характерно для країн ЄС, розвинених країн та найбільших країн, ринки яких розвиваються – Індії та Китаю; вищого рівня відкритості фінансових ринків та схильності до ефекту зараження; зрілості фінансових і валютних ринків, передбачаючи прерогативу ринкових інструментів регулювання та розвинений ринок валютних деривативів; більшої кількості детермінант, що обумовлюють неочікувані зміни валютних курсів.

2.2 Вище значення ентропії сигналізує про вищий рівень невизначеності і непрогнозованості, оскільки складніша система вимагає більшого обсягу інформації для аналізу з огляду більшої кількості подій із нижчою вірогідністю (Liu et al, 2022; Mishra & Ayyub, 2019), а максимальна SE, засвідчує випадкове блукання обмінних курсів, в той час як нижча ентропія, вимагаючи меншого обсягу інформації, забезпечує кращу передбачуваність і менший рівень невизначеності.

По-третє, RE розкриває статистичні та математичні властивості розподілу (рис. 3).

ISO	q=0 max ентропія	q=0.5 менш ймовірні	q=2 більш ймовірні	q=10 min ентропія
1	2	3	4	5
BGN	1.965	2.060	1.789	1.497
CHF	1.898	2.124	1.794	1.456
CNY	2.000	2.023	1.630	1.445
CZK	2.270	2.198	1.983	1.720
EGP	0.159	0.983	0.217	0.122
GBP	2.110	2.104	1.827	1.606
HUF	2.358	2.255	2.124	1.807
INR	2.092	2.156	1.864	1.560
JPY	1.834	2.055	1.673	1.375
KZT	0.585	1.635	0.737	0.451
PLN	2.188	2.164	1.894	1.642
RON	2.036	2.108	1.778	1.530
TRY	1.657	1.944	1.527	1.248
UAH	1.211	1.841	1.265	0.931
EUR	1.965	2.090	1.749	1.478
USD	1.898	2.150	1.855	1.461

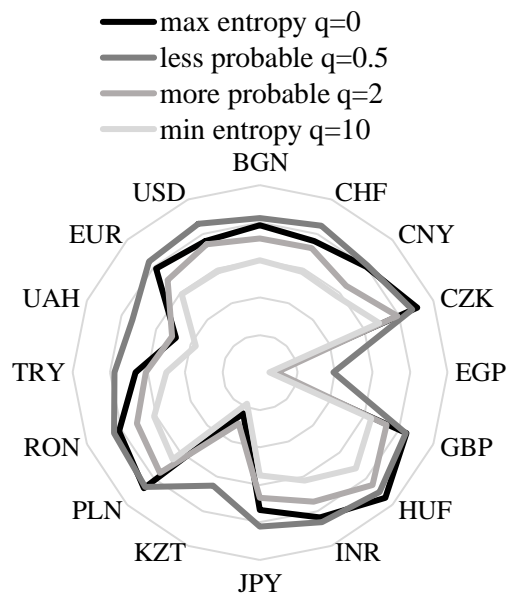


Рис. 3. Оцінки RE валютних ринків
Fig. 3. RE of foreign exchange markets

¹ Amid Challenging Times, Kazakhstan's Economy to Recover Modestly in 2023, Says World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/04/25/amid-challenging-times-kazakhstan-s-economy-to-recover-modestly-in-2023-says-world-bank> (дата звернення: 10.04.2024).

² За умови відсутності підтримки фіксованого курсу гривні, в умовах повномасштабної війни, можна було б передбачити нижче за отримане значення ентропії.

³ НБУ впроваджує керовану гнучкість обмінного курсу, що посилить стійкість валютного ринку та економіки. URL: <https://bank.gov.ua/ua/news/all/nbu-vprovadjuje-kerovanu-gnuchkist-obminnogo-kursu-scho-posilit-stiystkist-valyutnogo-rinku-ta-ekonomiki> (дата звернення: 10.04.2024).

На відміну від SE, яка представляє інтегральне значення ентропії, RE розрізняє вплив рідкісних та розповсюджених подій на рівень невизначеності– більше значення RE при $0 < q < 1$, вказує на концентрацію випадковості внаслідок виняткових подій або «чорних лебедів», що характерно для більшості аналізованих розподілів, дозволяючи зробити припущення про неергодичність валютних систем цих країн (Jakimowicz, 2020); натомість, вище значення RE при $q=0$, що характерно для CZK, GBP, HUF і PLN відображають максимальну ентропію, а відтак, випадкове блукання зазначених обмінних курсів.

Здавалось би парадоксальні, на перший погляд, результати видаються цілком логічними з урахуванням оригінальної сутності ентропії– з точки зору фізики, а точніше, другого закону термодинаміки, сформульованого Clausius, ентропія Всесвіту прагне до максимуму (Jakimowicz, 2020), надаючи їй іманентного характеру незалежно від галузі знань або сфери застосування. Відповідно, ентропія в економіці також прагне до зростання, що, наприклад, підтверджується досвідом країн з високим рівнем доходу (Mishra & Ayuub, 2019), законом термодинамічного управління DeMarco and Lister, згідно якого ентропія компанії також зростає з часом, логіки екологічної економіки де ентропія виступає основою виробничого циклу– зростання якої забезпечує трансформацію ресурсів у готові товари (Jakimowicz, 2020).

З метою ідентифікації можливостей використання показників ентропії як методів оцінки валютних ризиків, подібно до Bask & de Luna (2005), було виконано кореляційний аналіз (рис. 4), в якому пріоритетність була надана виключно статистично та економічно значущим коефіцієнтам– 0.62¹ і вище при 99% достовірності. Крім того, досліджува-

лись, в першу чергу, рівні тісноти лінійного зв'язку між групами– статистичними і альтернативними, в той час як залежність оцінок в межах одного способу розрахунку, наприклад, між стандартним відхиленням та асиметрією або між SE та RE при різних q ігнорувались, оскільки не виступають метою даного дослідження.

Очевидно, що достовірними і високими, однак, від'ємними коефіцієнтами кореляції характеризується зв'язок ентропії з асиметрією та ексцесом, вказуючи на ускладнення валютних систем (зростання ентропії) при збалансуванні коливань обмінних курсів– наближення варіативних значень до середньої. На противагу, зв'язок ентропійних показників зі стандартним відхиленням, що є базовим кількісним показником ризиків, виявився тільки статистично значущим,– сам коефіцієнт кореляції не перевищує 0.59.

Висновки. Незважаючи на той факт, що зростання ентропії означає вищий рівень невизначеності та складності, вона є свідченням вищого рівня розвитку та ефективності валютної системи, наближеності до гіпотези ефективного ринку, а значить і менших ризиків, що цілком пояснює отримані результати– наближена до хаосу валютна система Єгипту та низькоефективний ринок Казахстану відрізняються найнижчими значеннями ентропії, в той час вищі SE України можуть пояснити відносну стабільність гривні, яка спостерігається в умовах повномасштабної війни та навіть випадки поодинокого зміцнення у 2023². Крім того, ентропійні показники можна впевнено вважати якісними характеристиками здатності валютних систем до потенційного збалансування шоків валютних курсів, а, отже, і зниження ризиків, подібно до асиметрії та ексцесу, з огляду тісного лінійного зв'язку між ними.

	Стандартне відхилення	Асиметрія	Ексцес	SE	RE при $q=1.01$	max ентропія	Менш ймовірні події	Більш ймовірні події	min ентропія
Стандартне відхилення	1								
Асиметрія	0.430	1							
Ексцес	0.425	0.763	1						
SE	-0.509*	-0.899	-0.885	1					
RE при $q=1.01$	-0.510	-0.898	-0.885	1.000	1				
max ентропія	-0.588	-0.840	-0.830	0.972	0.972	1			
Менш ймовірні події	-0.498	-0.909	-0.911	0.994	0.994	0.949	1		
Більш ймовірні події	-0.534	-0.873	-0.848	0.994	0.994	0.987	0.976	1	
min ентропія	-0.571	-0.844	-0.826	0.977	0.977	0.999	0.953	0.992	

Рис. 4. Результати кореляційного аналізу статистичних оцінок валютних ризиків та показників ентропії

Fig. 4. Results of correlation analysis between the statistical estimates of currency risks and entropy indicators

¹ Це критичне значення для кореляції Пірсона при 14 ступенях свободи та 99% достовірності.

² В умовах повномасштабного вторгнення волатильність середньоринкового курсу гривні могла бути набагато більшою, навіть попри фіксацію офіційного курсу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Adrangi B., Allender M. A., Chatrath A., Raffiee K. Nonlinear Dependencies And Chaos In The Bilateral Exchange Rate Of The Dollar. *International Business & Economics Research Journal (IBER)*. 2010. Vol. 9(3). DOI: <https://doi.org/10.19030/iber.v9i3.538>
2. Anh T. T. T. Investigating the Relationships between Asean Stock Markets: an Approach Using the Granger Causality Test of Time-Varying Information Efficiency. *Dalat University Journal of Science*. 2020. Vol. 10(4). Pp. 43-56. DOI: [https://doi.org/10.37569/DalatUniversity.10.4.614\(2020\)](https://doi.org/10.37569/DalatUniversity.10.4.614(2020))
3. Bask M., de Luna X. EMU and the stability and volatility of foreign exchange: Some empirical evidence. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2005. Vol. 25(3). Pp. 737-750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2004.12.009>
4. Garnier J., Solna K. Chaos and order in the bitcoin market. *Physica A*. 2019. Vol. 524. Pp. 708-721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.164>
5. Gonçalves B. A., Carpi L., Rosso O. A., Ravetti M. G., Atman A. Quantifying instabilities in Financial Markets. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2019. Vol. 525. Pp. 606-615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.029>
6. Gu R. Multiscale Shannon entropy and its application in the stock market. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2017. Vol. 484. 215-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.04.164>
7. Jakimowicz A. The Role of Entropy in the Development of Economics. *Entropy*. 2020. Vol. 22(4). Pp. 452. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22040452>
8. Jizba P., Lavička H., Tabachová Z. Causal Inference in Time Series in Terms of Rényi Transfer Entropy. *Entropy*. 2022. Vol. 24. Pp. 855. DOI: <https://doi.org/10.3390/e24070855>
9. Lahmiri S., Bekiros S. Rényi entropy and mutual information measurement of market expectations and investor fear during the COVID-19 pandemic. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020. Vol. 139. 110084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110084>
10. Lahmiri S., Uddin G. S., Bekiros S. Nonlinear dynamics of equity, currency and commodity markets in the aftermath of the global financial crisis. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2017. Pp. 342-346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.06.019>
11. Liashenko O., Kravets T. Fractal Analysis of Currency Market: Hurst Index as an Indicator of Abnormal Events. In *ICTERI*. 2016. Pp. 550-557. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-1614/paper_105.pdf (дата звернення: 10.04.2024).
12. Liu J., Li W., Li Q. Do Institutional Group Holding Anomalies Drive Broad Market Trends? *Journal of Organizational and End User Computing*. 2022. Vol. 34(8). Pp. 1-31. DOI: <https://doi.org/10.4018/joec.314787>
13. Metin K. Volatility measurement of the world indices using different entropy methods. *Thermal Science*. 2019. Vol. 23 (Suppl. 6). Pp. 1849-1861. DOI: <https://doi.org/10.2298/tsci190130345m>
14. Mishra S., Ayyub B. M. Shannon Entropy for Quantifying Uncertainty and Risk in Economic Disparity. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*. 2019. Vol. 39(10). Pp. 2160-2181. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.13313>
15. Miśkiewicz J. Network Analysis of Cross-Correlations on Forex Market during Crises. *Globalisation on Forex Market. Entropy*. 2021. Vol. 23(3). Pp. 352. DOI: <https://doi.org/10.3390/e23030352>
16. Olbrys J., Komar N. Symbolic Encoding Methods with Entropy-Based Applications to Financial Time Series Analyses. *Entropy*. 2023. Vol. 25. Pp. 1009. DOI: <https://doi.org/10.3390/e25071009>
17. Özkaya A. Chaotic dynamics in Turkish foreign exchange markets. *Business & Management Studies: An International Journal*. 2022. Vol. 10(2). Pp. 787-795. DOI: <https://doi.org/10.15295/bmij.v10i2.2068>
18. Rodriguez-Rodriguez N., Miramontes O. Shannon Entropy: An Econophysical Approach to Cryptocurrency Portfolios. *Entropy*. 2022. Vol. 24(11). Pp. 1583. DOI: <https://doi.org/10.3390/e24111583>
19. Sheraz M., Nasir I. Information-Theoretic Measures and Modeling Stock Market Volatility: A Comparative Approach. *Risks*. 2021. Vol. 9(5). P. 89. DOI: <https://doi.org/10.3390/risks9050089>
20. Wang R., Hui X., Zhang X. Analysis of Multiple Structural Changes in Financial Contagion Based on the Largest Lyapunov Exponents. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/209470>
21. Данильчук Г. Б. Фрактальний та мультифрактальний аналіз сучасного стану світових фондових ринків (fractal and multifractal analysis of current state of world stock markets). *Моделювання та інформаційні системи в економіці*. 2019. Вип. 98. Pp. 80-90. DOI: <https://doi.org/10.33111/mise.98.9>
22. Пластун О., Макаренко І. Моделювання поведінки фінансових ринків під час фінансової кризи із застосуванням фрактальної гіпотези ринку. *Вісник Національного банку України*. 2014. Вип. (4)., Pp. 38-45.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2024 р.

Стаття рекомендована до друку 15.06.2024 р.

Valeria Yatsenko, PhD Student, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 90A, Vasylykivska str., Kyiv, 03022, Ukraine
 valeriyatsenko5@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2925-7470>

ENTROPY INDICATORS FOR AN ESTIMATION OF CURRENCY RISKS

Abstract. As the world's largest by-turnover financial market, foreign exchange market is undoubtedly an open, dynamic system. A wide range of variables influence it, i.e., political and economic factors, global shocks. Simultaneously, currency distress also affects the countries' financial and real sectors. It determines the crucial importance of maintaining a stable, predictable exchange rate and, in the opposite case, effective currency risk management, requiring proper

measurement. Since statistical methods of currency risk assessment do not always guarantee a reliable reflection of potential threats due to the noise in financial time series or irrational agents' behaviour, it is necessary to search for alternative risk measurement methods. One way is by using tools of the theory of dynamic nonlinear systems, namely entropy indicators, such as Shannon and Renyi. Because of the high economic, or rather trade, openness, besides the hryvnia itself, we investigated currency fluctuations of the leading imported markets for domestic products. The reason is the potential transmission of shocks from these countries to Ukraine via various mechanisms. Counter-intuitively, a high entropy, implying more significant uncertainty, complexity, and unpredictability, simultaneously indicates more mature, efficient, self-organized systems. In contrast, lower entropy values would indicate inefficient markets exposed to shocks and even bifurcations, particularly crises. Moreover, we propose considering entropy as a reliable indicator of risks based on the statistical and economic significance of correlation coefficients with other qualitative characteristics of distributions of exchange rate returns - skewness and kurtosis. The results may help investors and portfolio managers better understand exchange rate dynamics, make effective managerial decisions, and minimize losses from unfavourable volatility.

Keywords: **Foreign Exchange Rate, Currency Risk, Entropy, Return Time Series.**

JEL Classification: C4; F31; F41.

REFERENCES

1. Adrangi, B., Allender, M. A., Chatrath, A., & Raffiee, K. (2010, December 19). Nonlinear Dependencies and Chaos In The Bilateral Exchange Rate Of The Dollar. *International Business & Economics Research Journal (IBER)*, 9(3). doi: <https://doi.org/10.19030/iber.v9i3.538>
2. Anh, T. T. T. (2020). Investigating the Relationships between Asean Stock Markets: an Approach Using the Granger Causality Test of Time-Varying Information Efficiency. *Dalat University Journal of Science*, 10(4), 43-56 doi: [https://doi.org/10.37569/DalatUniversity.10.4.614\(2020\)](https://doi.org/10.37569/DalatUniversity.10.4.614(2020))
3. Bask, M., & de Luna, X. (2005, August). EMU and the stability and volatility of foreign exchange: Some empirical evidence. *Chaos, Solitons & Fractals*, 25(3), 737-750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2004.12.009>
4. Garnier, J., & Solna, K. (2019). Chaos and order in the bitcoin market. *Physica A*, 524, 708-721. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.164>
5. Gonçalves, B. A., Carpi, L., Rosso, O. A., Ravetti, M. G., & Atman, A. (2019, July). Quantifying instabilities in Financial Markets. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 525, 606-615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.029>
6. Gu, R. (2017, October). Multiscale Shannon entropy and its application in the stock market. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 484, 215-224. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.04.164>
7. Jakimowicz, A. (2020, April 16). The Role of Entropy in the Development of Economics. *Entropy*, 22(4), 452. doi: <https://doi.org/10.3390/e22040452>
8. Jizba, P., Lavička, H., & Tabachová, Z. (2022). Causal Inference in Time Series in Terms of Rényi Transfer Entropy. *Entropy*, 24, 855. doi: <https://doi.org/10.3390/e24070855>
9. Lahmiri, S., & Bekiros, S. (2020, October). Renyi entropy and mutual information measurement of market expectations and investor fear during the COVID-19 pandemic. *Chaos, Solitons & Fractals*, 139, 110084. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110084>
10. Lahmiri, S., Uddin, G. S., & Bekiros, S. (2017). Nonlinear dynamics of equity, currency and commodity markets in the aftermath of the global financial crisis. *Chaos, Solitons and Fractals*, 342-346. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.06.019>
11. Liaschenko, O., & Kravets, T. (2016). Fractal Analysis of Currency Market: Hurst Index as an Indicator of Abnormal Events. In *ICTERI*, 550-557. Retrieved from http://ceur-ws.org/Vol-1614/paper_105.pdf
12. Liu, J., Li, W., & Li, Q. (2022, December 9). Do Institutional Group Holding Anomalies Drive Broad Market Trends? *Journal of Organizational and End User Computing*, 34(8), 1-31. doi: <https://doi.org/10.4018/joeuc.314787>
13. Metin, K. (2019). Volatility measurement of the world indices using different entropy methods. *Thermal Science*, 23(Suppl. 6), 1849-1861. doi: <https://doi.org/10.2298/tsci190130345m>
14. Mishra, S., & Ayyub, B. M. (2019). Shannon Entropy for Quantifying Uncertainty and Risk in Economic Disparity. *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, 39(10), 2160-2181. doi: <https://doi.org/10.1111/risa.13313>
15. Miśkiewicz, J. (2021, March 15). Network Analysis of Cross-Correlations on Forex Market during Crises. Globalisation on Forex Market. *Entropy*, 23(3), 352. doi: <https://doi.org/10.3390/e23030352>
16. Olbryś, J., & Komar, N. (2023). Symbolic Encoding Methods with Entropy-Based Applications to Financial Time Series Analyses. *Entropy*, 25, 1009. doi: <https://doi.org/10.3390/e25071009>
17. Özkaya, A. (2022, June 25). Chaotic dynamics in Turkish foreign exchange markets. *Business & Management Studies: An International Journal*, 10(2), 787-795. doi: <https://doi.org/10.15295/bmij.v10i2.2068>
18. Plastun, O., & Makarenko, I. (2014). Modelling the behaviour of financial markets during the financial crisis using the fractal market hypothesis. *Bulletin of the National Bank of Ukraine*, 4, 38-45
19. Rodriguez-Rodriguez, N., & Miramontes, O. (2022, November 1). Shannon Entropy: An Econophysical Approach to Cryptocurrency Portfolios. *Entropy*, 24(11), 1583. doi: <https://doi.org/10.3390/e24111583>
20. Sheraz, M., & Nasir, I. (2021, May 8). Information-Theoretic Measures and Modeling Stock Market Volatility: A Comparative Approach. *Risks*, 9(5), 89. doi: <https://doi.org/10.3390/risks9050089>
21. Danylichuk, H. (2019, November 28). Fractal and multifractal analysis of current state of world stock markets. *Modeling and Information Systems in Economics*, 98, 80-90. doi: <https://doi.org/10.33111/mise.98.9>
22. Wang, R., Hui, X., & Zhang, X. (2014). Analysis of Multiple Structural Changes in Financial Contagion Based on the Largest Lyapunov Exponents. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1155/2014/209470>

The article was received by the editors 10.05.2024.

The article is recommended for printing 15.06.2024.