

**Юрій Олексійович Петренко**

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького  
[petrenko62@gmail.com](mailto:petrenko62@gmail.com)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6348-2110>

**Владислав Михайлович Северинчук**

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького  
[vladyslav.severynchuk@gmail.com](mailto:vladyslav.severynchuk@gmail.com)

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-1276-0977>

## ЕНТРОПІЯ ПОВЕДІНКОВИХ РЕАКЦІЙ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ ЦЕНТРАЛЬНОЇ НЕРВОВОЇ СИСТЕМИ

***Анотація.** Сенсомоторні реакції людини на повторювані стимули не є незалежними: час реакції має внутрішню структуру, що формується під впливом уваги, нейродинамічної стабільності та когнітивного навантаження. У зв'язку з цим часові ряди можна розглядати як динамічну систему.*

*Метою дослідження було застосування ентропійного аналізу часу простої сенсомоторної реакції. Дослідження проводилися на базі Черкаського національного університету ім. Б. Хмельницького. В них прийняли участь 80 осіб віком від 17 до 75 років. Визначення часу простої зорово-моторної реакції проводилося за методикою Макаренка М.В. (1999). Ентропія обчислювалася на основі дискретної Shannon entropy, застосованої до гістограм розподілу часу реакції.*

*Встановлено, що ентропія не зводиться до середнього значення чи варіативності, а відображає додаткові характеристики розподілу, пов'язані з його структурною невизначеністю. Це підтверджується відсутністю залежності між ентропією та середнім часом реакції або коефіцієнтом варіації.*

***Ключові слова:** сенсомоторні реакції, центральна нервова система, ентропія, дисипативні структури, реакційні процеси, асиметрія, онтогенез.*

**Постановка проблеми.** Швидкість сенсомоторної реакції та стабільність її виконання є важливими показниками функціонального стану центральної нервової системи (ЦНС). Середній час реакції (RT) дає лише загальне уявлення про роботу системи, тоді як варіабельність реакцій – коливання від відповіді до відповіді - значно точніше відображає рівень уваги, контролю та нейродинамічної стабільності. Підвищена нерівномірність у часі реакції може свідчити про втому, зниження концентрації чи нестійкість нервових процесів.

Для розуміння цих коливань важливо враховувати поняття організованості функціональної системи ЦНС. Організована система працює впорядковано та узгоджено: реакції стають передбачуваними, а виконання завдань – стабільним. Якщо ж організованість зменшується, у поведінкових відповідях зростає хаотичність, з'являються випадкові збої та нерівномірність.

Одним із сучасних способів кількісно описати ці зміни є використання ентропії – показника, який відображає ступінь складності або невизначеності в роботі системи. У психофізіології ентропійний аналіз застосовують для оцінки того, наскільки впорядкованими або хаотичними є нейрофізіологічні процеси. Підвищення або зниження ентропії в часових рядах реакцій може вказувати на зміну стану ЦНС та її здатності підтримувати стійкість і контроль [1, 2].

**Аналіз останніх публікацій.** Сучасні дослідження фізіології свідчать, що динаміка живих систем не є ні повністю регулярною, ні повністю випадковою. Відомі роботи Goldberger A.L. [5] та Lipsitz L.A. [9] сформулювали концепцію, згідно з якою здорові фізіологічні системи демонструють "організовану складність". Йдеться про багатомасштабні флуктуації, структуровані взаємодії між підсистемами та оптимальне співвідношення між порядком і варіабельністю.

Зниження складності, тобто рух у бік надмірної регулярності або надмірного хаосу, розглядається як ознака зниження функціональної адаптивності. Так, за даними Goldberger A. L. [5], патологічні стани пов'язуються з деградацією нормальної фрактально-ієрархічної структури фізіологічних процесів. Лійніні, надмірно регулярні сигнали – так само, як і нестабільні хаотичні – свідчать про втрату здатності системи ефективно реагувати на зміну умов.

Поняття організованості у фізіології розглядається як характеристика, що відображає здатність системи підтримувати узгоджену, структуровану та стійку роботу при одночасному збереженні необхідного рівня гнучкості. На відміну від механічних систем, ЦНС не функціонує в режимі ідеальної регулярності: її нормальна робота передбачає наявність помірних стохастичних коливань, які забезпечують адаптацію.

У межах теорії складності організованість проявляється у стабільності патернів фізіологічної активності, послідовності реакцій на стимул і здатності системи пригнічувати випадкові флуктуації, зберігаючи структуровану варіабельність. Оптимальна робота ЦНС передбачає наявність помірної різноманітності сигналів, що поєднує стабільність і гнучкість. З позицій нейронауки це означає, що оптимальна робота ЦНС характеризується помірною, структурною різноманітністю сигналів, що дозволяє системі бути водночас стабільною та адаптивною [1]. Коли система надто впорядкована або надто хаотична, організованість знижується.

Організм людини є відкритою нерівноважною біологічною системою, яка функціонує за рахунок постійного енергетичного обміну. Коливання показників реакційного часу, варіативності серцевого ритму чи інших психофізіологічних параметрів можуть розглядатися як прояви флуктуацій у складній регуляторній системі.

Зміни ентропійних характеристик часових рядів у цьому випадку можна інтерпретувати як маркери переходів між режимами функціонування регуляторних систем і зміни ступеня їхньої узгодженості [7, 8]. Зокрема, ентропійні показники можуть відображати: перехід між відносно стабільними режимами функціонування; зростання або зниження нестійкості регуляції у процесі виконання завдання; зміну рівня функціональної організації системи; зсув між надмірною впорядкованістю та дезорганізацією.

Отже, у світлі теорії дисипативних структур [7] ентропія може розглядатися не лише як показник хаотизації процесів, а як індикатор динамічного балансу між стабільністю та адаптивною перебудовою функціональних систем організму. Це створює теоретичне підґрунтя для застосування ентропійних метрик у дослідженнях функціонального стану центральної нервової системи.

У дослідженні Fitousi D. [4] показано, що кумулятивна залишкова ентропія дозволяє оцінити невизначеність розподілів часу реакції та відображає форму розподілу, його асиметрію та внутрішню структуру. Це підкреслює, що ентропія поведінкових даних є інформативною не лише щодо швидкості реагування, але й щодо складності процесів переробки стимулу.

Робота Iglesias-Martínez M. E. та ін. [6] продемонструвала, що часові ряди сенсомоторних реакцій мають виражену серійну організацію, а спектральна ентропія здатна кількісно описувати ступінь узгодженості чи хаотичності цієї динаміки. Зміни ентропії протягом виконання завдання відображають зміни когнітивного навантаження та процесів регуляції уваги.

Дослідження Brown J. W. та ін. [3] показало, що ентропія може виступати характеристикою не лише поведінкового виходу, а й інформаційної структури самого завдання, визначаючи нейронні витрати системи когнітивного контролю. Активація відповідних мозкових мереж модулюється рівнем інформаційної невизначеності, що свідчить про взаємозв'язок ентропії, часу реакції та нейрофункціональних механізмів вибору.

Коректність ентропійних оцінок залежить від чіткого визначення метрики, належної якості даних та відповідної аналітичної процедури. Кожен тип ентропії, кумулятивна залишкова, спектральна чи інформаційна, відображає різні аспекти структури реакційного процесу та може використовуватися для дослідження специфічних властивостей варіабельності.

Застосування ентропійних показників потребує достатнього обсягу даних, стандартизованої обробки реакційних рядів та контролю зовнішніх умов, які впливають на динаміку реагування. Етапи підготовки даних, очищення від артефактів, вибору перетворень та самого розрахунку ентропії формують основу для надійного та відтворюваного аналізу [10].

Інтерпретація ентропійних результатів має базуватися на загальній концепції організованої складності: надмірна регулярність так само, як і надмірна хаотичність, може сигналізувати про обмеження адаптивних можливостей функціональних систем. Помірна, структурована ентропія відображає збалансований стан, у якому поєднуються гнучкість і стабільність реакційної діяльності.

Узагальнюючи, ентропійний аналіз часу сенсомоторної реакції є перспективним інструментом дослідження функціонального стану центральної нервової системи. Він дозволяє оцінювати не лише швидкість реагування, але й внутрішню організацію, варіабельність та динамічну рівновагу процесів переробки інформації. Такі підходи формують методологічну основу для подальших емпіричних досліджень і поглибленого розуміння структурних характеристик поведінкових реакцій [11].

Ентропійні показники є перспективними для аналізу поведінкових і нейрофізіологічних процесів завдяки своїй здатності відображати багатокомпонентну, структуровану й динамічну природу сенсомоторних реакцій. Ентропія, як міра невизначеності та складності, може слугувати індикатором організованості реакційних процесів, чутливо реагуючи на зміни стану системи та параметрів завдання.

**Мета дослідження** – встановити можливість застосування ентропійного аналізу часу простої сенсомоторної реакції для дослідження функціонального стану центральної нервової системи.

**Організація та методи дослідження.** Дослідження проводилися на базі Черкаського національного університету ім. Б. Хмельницького. В них прийняли участь 80 осіб віком від 17 до 75 років. Визначення часу простої зорово-моторної реакції проводилося за методикою Макаренка М.В. (1999).

Перед проведенням статистичного та ентропійного аналізу часових рядів сенсомоторної реакції було здійснено попередню обробку даних, спрямовану на усунення артефактів та забезпечення коректності подальших розрахунків.

На першому етапі до аналізу включалися лише значення часу реакції, що належать до фізіологічно обґрунтованого діапазону. Реакції з тривалістю менше 100 мс розглядалися як передчасні або випадкові відповіді, які не відображають повноцінного сенсомоторного процесу. Значення понад 700 мс інтерпретувалися як потенційні прояви втрати уваги, затримки відповіді або технічних похибок. У зв'язку з цим зазначені значення виключалися з подальшого аналізу.

На другому етапі застосовувався робастний метод виявлення статистичних викидів на основі медіанного абсолютного відхилення (Median Absolute Deviation, MAD). Для кожного набору реакцій обчислювалася медіана та MAD, після чого для кожного значення визначався модифікований z-показник. Значення, для яких абсолютне значення цього показника перевищувало порогове значення 3.5, вважалися статистичними викидами та вилучалися. На відміну від класичних методів, що базуються на середньому та стандартному відхиленні, MAD-підхід є стійким до асиметричних розподілів, характерних для часу реакції.

У результаті двоетапної процедури очищення формувалася фінальний набір даних, який використовувався для подальшого аналізу. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив випадкових або нефізіологічних значень і забезпечує більш коректну оцінку варіабельності та структури часових рядів реакцій.

Ентропія обчислювалася на основі дискретної Shannon entropy, застосованої до гістограм розподілу часу реакції [12]. Для кожного тесту значення RT групувалися в інтервали за правилом Стерджеса, після чого розраховувалися ймовірності потрапляння у відповідні інтервали та обчислювалася ентропія як міра невизначеності розподілу. Таким чином, ентропія відображає не лише розкид значень, але й їхню структурну організацію.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Після застосування процедури очищення було сформовано узагальнений масив даних та визначено чотири вікові групи по роках: 17–18, 19–44, 45–60 та 61–75.

Аналіз розподілів очищених значень часу реакції представлено на рис. 1.

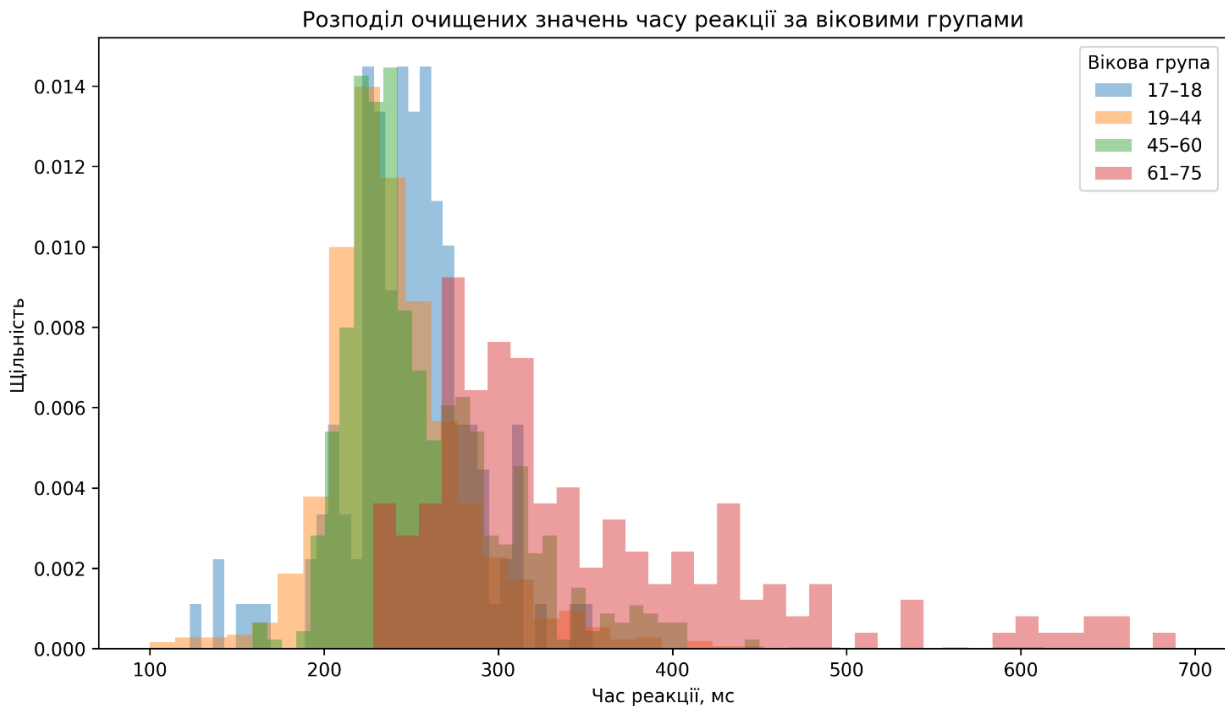


Рис. 1. Розподіл очищених значень часу простої зорово-моторної реакції за віковими групами

Гістограми показують, що розподіл часу реакції в усіх вікових групах має подібну загальну форму: основна маса значень зосереджена в діапазоні приблизно 200–300 мс. Водночас спостерігається виражена правостороння асиметрія, що проявляється у наявності довгого «хвоста» повільних реакцій. Така структура є типовою для сенсомоторних даних і відображає поодинокі затримки, пов'язані зі змінами уваги або короткочасними збоями у процесі реагування.

При порівнянні вікових груп простежується тенденція до поступового зміщення розподілу вправо зі збільшенням віку. У групі 17–18 років розподіл є більш концентрованим, із відносно вузьким діапазоном значень. У групах 19–44 та 45–60 років форма розподілу залишається подібною, однак спостерігається незначне розширення та збільшення частки повільніших реакцій. Найбільш виражені зміни характерні для групи 61–75 років, де розподіл є ширшим і має значно довший правий хвіст, що свідчить про зростання частоти повільних реакцій.

Додатково варіативність часу реакції за віковими групами представлено у вигляді boxplot-діаграми (рис. 2).

Boxplot-аналіз підтверджує отримані спостереження на рівні описових характеристик. Медіанний час реакції зростає з віком, причому найбільш помітний приріст спостерігається у старшій віковій групі. Одночасно збільшується міжквартильний розмах, що вказує на підвищення варіативності реакцій. Кількість та амплітуда викидів також зростають із віком, особливо у групі 61–75 років, де спостерігається значна кількість повільних реакцій, що виходять за межі основного діапазону.

Таким чином, уже на рівні розподільного аналізу можна зробити висновок, що вікові зміни часу сенсомоторної реакції проявляються не лише у збільшенні середнього значення,

але й у зміні структури варіабельності. Зі зростанням віку реакційний процес стає менш стабільним, що відображається у розширенні розподілу та появі більш виражених правосторонніх хвостів. Ці особливості створюють підґрунтя для подальшого аналізу із використанням кількісних показників варіативності та ентропійних характеристик.

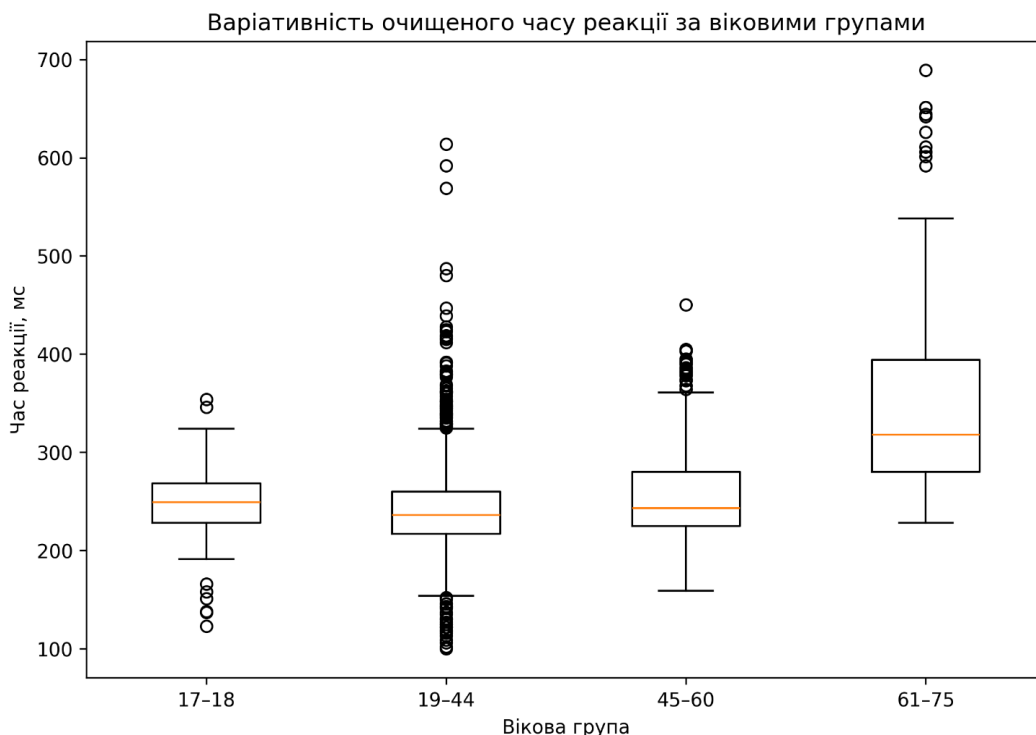


Рис. 2. Варіативність очищеного часу реакції за віковими групами.

Після аналізу форми розподілу наступним етапом було визначення кількісних характеристик часу сенсомоторної реакції за допомогою описових статистичних показників. Це дозволяє формалізувати спостережувані відмінності між віковими групами та оцінити як центральні тенденції, так і варіативність реакційного процесу (рис. 3).

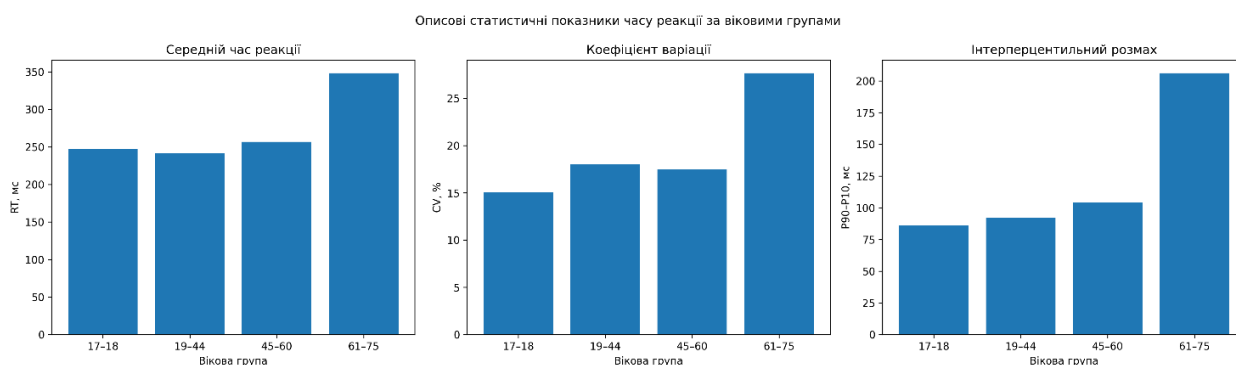


Рис. 3. Описові статистичні показники часу реакції за віковими групами.

Середній час реакції демонструє загальну тенденцію до зростання з віком. У групах 17–18 та 19–44 років значення (247,74 мс та 241,95 мс) статистично достовірних відмінностей не мають ( $p > 0,05$ ), що вказує на відносну стабільність сенсомоторної швидкості в молодому віці. У групі 45–60 років спостерігається помірне зростання середнього значення (256,72 мс), тоді як у групі 61–75 років відбувається різкий стрибок до 348,40 мс, що свідчить про суттєве уповільнення реакційних процесів (достовірні відмінності з попередніми групами ( $p < 0,05$ )).

Водночас коефіцієнт варіації (CV), який відображає відносну варіативність, демонструє ще більш виражені вікові відмінності. У молодших групах значення CV становлять близько 15–18%, що відповідає відносно стабільному характеру реакцій. У старшій групі (61–75 років) CV зростає до 27,65%, що вказує на значне збільшення розкиду значень відносно середнього та, відповідно, на зниження стабільності сенсомоторного контролю.

Інтерперцентильний розмах (P90–P10) підтверджує цю тенденцію. У групах 17–18 та 19–44 років він становить 86,0 мс та 92,0 мс відповідно, що відповідає відносно вузькому діапазону основної маси реакцій. У групі 45–60 років цей показник зростає до 104,4 мс, тоді як у групі 61–75 років він подвоюється (206,2 мс), що свідчить про суттєве розширення розподілу та наявність більш виражених відхилень.

При додатковому порівнянні середнього та медіанного часу реакції було встановлено, що в усіх вікових групах середнє значення перевищує медіану, що підтверджує наявність правосторонньої асиметрії, виявленої на попередньому етапі аналізу. Найбільша різниця між середнім і медіаною спостерігається у групі 61–75 років (348,40 мс проти 318,0 мс), що свідчить про суттєвий вплив повільних реакцій на структуру розподілу.

Показники асиметрії також підтверджують ці висновки: у групах 19–44, 45–60 та 61–75 років спостерігається позитивна асиметрія (1,57; 1,14 та 1,46 відповідно), що вказує на наявність довгого правого хвоста. Винятком є група 17–18 років, де значення асиметрії є незначно від'ємним (–0,42), що може бути пов'язано з особливостями вибірки або меншою кількістю спостережень.

Таким чином, результати описового статистичного аналізу узгоджуються з попередніми спостереженнями на рівні розподілів і дозволяють зробити більш формалізований висновок: вікові зміни часу сенсомоторної реакції проявляються не лише у збільшенні середнього значення, але й у суттєвому зростанні варіативності та асиметрії розподілу. Це свідчить про те, що з віком реакційний процес стає менш стабільним і більш чутливим до випадкових відхилень.

На попередньому етапі було показано, що класичні статистичні показники дозволяють описати центральну тенденцію та варіативність часу сенсомоторної реакції. Однак такі метрики, як середнє значення та коефіцієнт варіації, не враховують повну структуру розподілу і не відображають ступінь невизначеності або «розпорошеності» значень. У зв'язку з цим доцільним є застосування ентропійного підходу, який дозволяє оцінити складність та організованість реакційного процесу. Результати аналізу ентропії за віковими групами наведено на рис. 4.



Рис. 4. Ентропія часу простої зорово-моторної реакції за віковими групами.

Спостерігалось поступове зростання ентропії зі збільшенням віку: від 2,285 біт у групі 17–18 років до 2,543 біт у групі 61–75 років. Це свідчить про те, що розподіл часу реакції у старших групах є більш «розмитим» і менш передбачуваним. Водночас різниця між молодшими та середніми групами є відносно невеликою, що вказує на поступовий характер змін, із найбільш вираженим ефектом у старшому віці.

Для оцінки зв'язку ентропії з класичними показниками було проаналізовано залежність ентропії від середнього часу реакції (рис. 5).

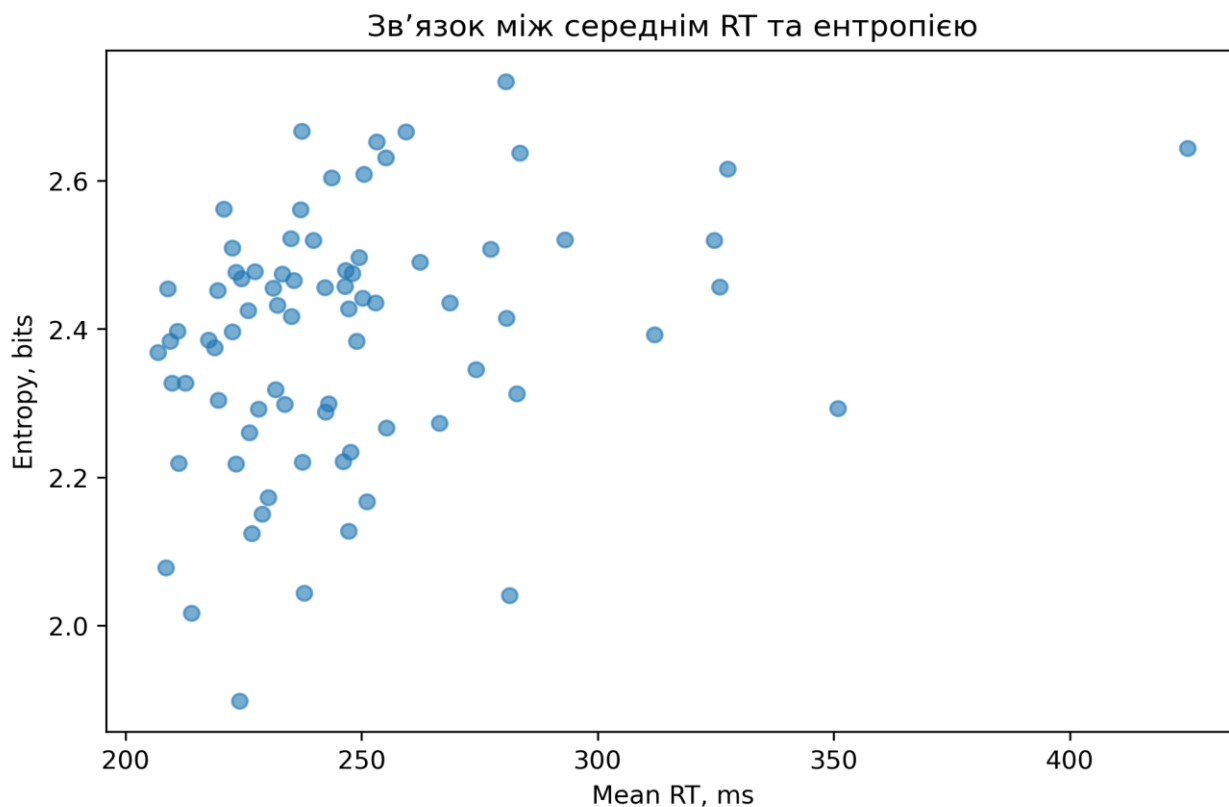


Рис. 5. Зв'язок між середнім часом реакції та ентропією.

З графіка видно, що між середнім значенням RT та ентропією відсутня функціональна залежність. Точки утворюють розсіяне поле без чітко вираженої лінійної структури. Це означає, що ентропія не зводиться до середнього часу реакції і відображає інші аспекти розподілу. Зокрема, при близьких значеннях середнього RT можуть спостерігатися різні рівні ентропії, що свідчить про відмінності у внутрішній структурі варіацій.

Аналогічний аналіз для коефіцієнта варіації представлено на рис. 6. Хоча між CV та ентропією спостерігається певна тенденція до зростання, залежність також незначна. Це вказує на те, що ентропія частково пов'язана з варіативністю, але не є її прямим еквівалентом. Таким чином, ентропія надає додаткову інформацію про розподіл часу реакції, яка не повністю відображається класичними статистичними показниками.

Отримані результати дозволяють інтерпретувати ентропію як показник ступеня організованості сенсомоторної системи. Нижчі значення ентропії характерні для більш стабільних і передбачуваних реакційних процесів, тоді як зростання ентропії свідчить про підвищення невизначеності та зниження організованості [4, 11]. Виявлена тенденція до збільшення ентропії з віком узгоджується з попередніми результатами та підтверджує гіпотезу про вікове зростання варіативності та складності реакційних процесів.

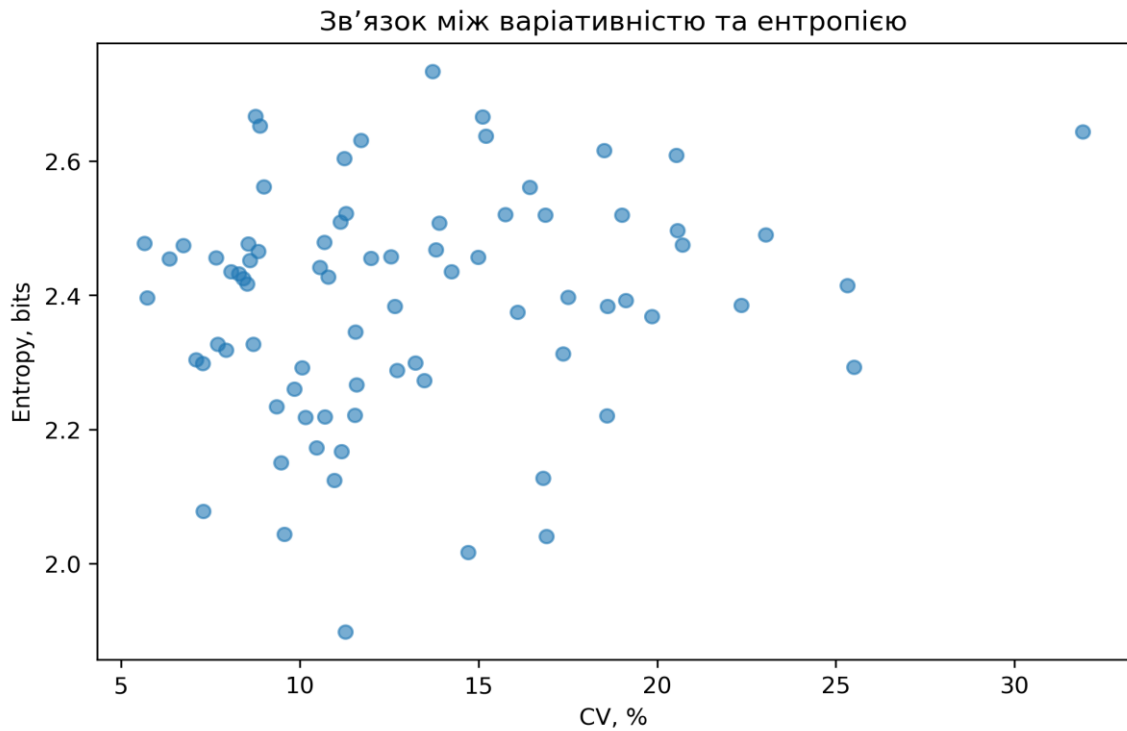


Рис. 6. Зв'язок між варіативністю та ентропією.

На завершальному етапі емпіричного аналізу було здійснено узагальнення отриманих результатів з метою їх інтерпретації у контексті теорії організованості та складності функціональних систем. Для цього ключові показники часу сенсомоторної реакції були приведені до нормалізованого вигляду, що дозволило порівняти їхню динаміку незалежно від одиниць вимірювання (рис.7).

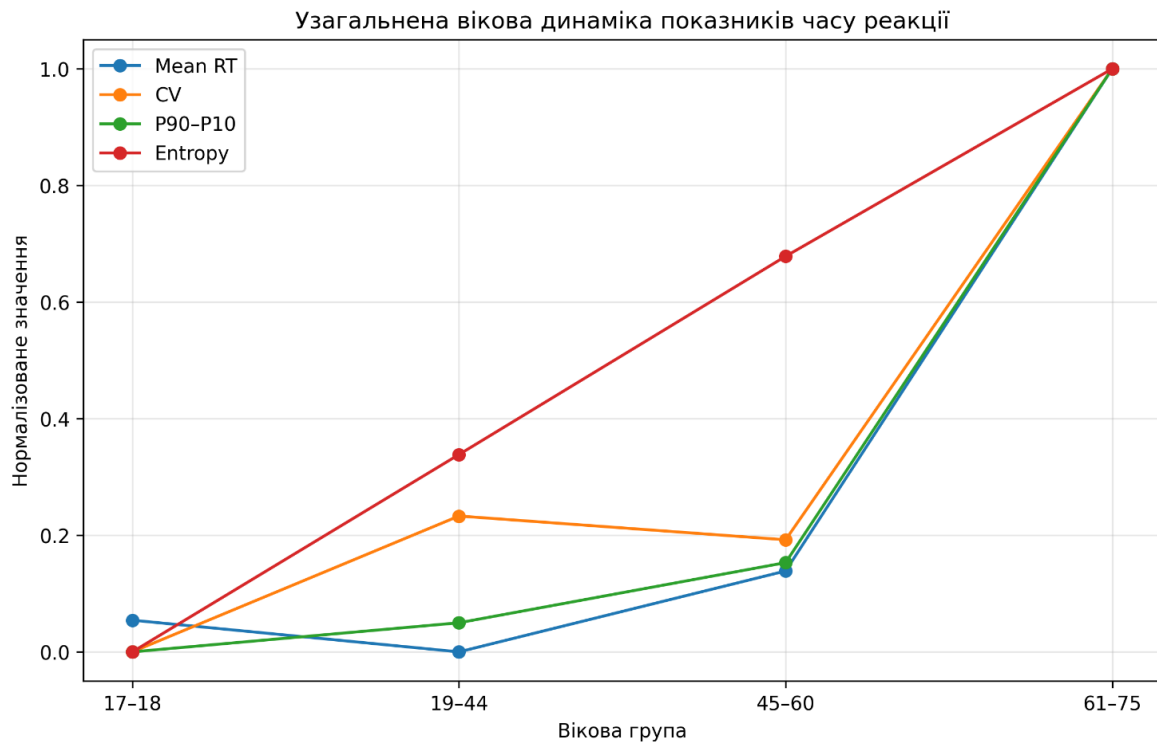


Рис. 7. Узагальнена вікова динаміка показників часу простої зорово-моторної реакції у вікових групах.

Як видно з рис. 7, усі розглянуті показники, середній час реакції, коефіцієнт варіації, інтерперцентильний розмах та ентропія, демонструють узгоджену тенденцію до зростання з віком. При цьому зміни мають нелінійний характер: у молодших та середніх вікових групах показники змінюються відносно повільно, тоді як у групі 61–75 років спостерігається різкий стрибок за всіма метриками.

Цей результат свідчить про те, що вікові зміни сенсомоторної реакції не зводяться лише до поступового уповільнення. Навпаки, ключовим фактором є зростання варіативності та нестабільності реакційного процесу. Це підтверджується одночасним збільшенням коефіцієнта варіації та інтерперцентильного розмаху, що вказує на розширення діапазону значень та зростання ролі випадкових відхилень.

Особливу увагу привертає динаміка ентропії, яка демонструє найбільш послідовне та монотонне зростання серед усіх показників. На відміну від середнього часу реакції та CV, які можуть змінюватися нерівномірно, ентропія відображає загальну структурну невизначеність розподілу. Це означає, що з віком реакційний процес стає не лише повільнішим і більш варіативним, але й менш організованим у цілому.

Таким чином, отримані результати дозволяють інтерпретувати вікові зміни часу сенсомоторної реакції як прояв зниження функціональної організованості системи. У молодших вікових групах реакції є більш стабільними та передбачуваними, що відповідає нижчим значенням ентропії. У старших групах спостерігається підвищення невизначеності та зростання ролі випадкових факторів, що відображається у збільшенні ентропії та варіативності. Узгодженість змін різних показників та їх відповідність теоретичним уявленням про організовану складність свідчать про доцільність використання ентропійного підходу для аналізу сенсомоторних процесів [3, 4, 8]. Ентропія в даному контексті виступає як інтегральний показник, що доповнює класичні статистичні метрики та дозволяє більш повно охарактеризувати функціональний стан системи.

### Висновки

1. Було здійснено аналіз часу сенсомоторної реакції із використанням як класичних статистичних показників, так і ентропійного аналізу.
2. Спостерігалось зростання середнього часу реакції з віком, однак більш суттєвими були зміни варіативності. Показники коефіцієнта варіації та інтерперцентильного розмаху демонстрували розширення діапазону значень і збільшення нестабільності реакцій.
3. Розподіли часу реакції мали правосторонню асиметрію, яка посилювалася у старших вікових групах, що свідчить про зростання частоти повільних реакцій.
4. Значення ентропії часу реакції зростали із віком та мали більш послідовну динаміку порівняно з класичними статистичними показниками.
5. Встановлено, що ентропія не зводиться до середнього значення чи варіативності, а відображає додаткові характеристики розподілу, пов'язані з його структурною невизначеністю.
6. Визначено, що вікові зміни сенсомоторної реакції проявляються не лише у її уповільненні, але й у зниженні стабільності та організованості реакційного процесу.
7. Вікове зростання ентропії може бути інтерпретоване як показник підвищення невизначеності та зменшення впорядкованості функціонування сенсомоторної системи.

**Перспектива подальших досліджень** може бути спрямована на розширення вибірки обстежуваних, включення різних типів сенсомоторних тестів, а також застосування більш складних методів ентропійного аналізу. Це дозволить уточнити отримані закономірності та поглибити розуміння взаємозв'язку між варіативністю, ентропією та функціональним станом центральної нервової системи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Іванець О. Б., Буриченко М. Ю., Архирей М. В., Братко В. Ю. Особливості використання методів нелінійної динаміки для обробки біомедичних даних // Наукоємні технології. – 2022. – № 4(56). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.56.17131>

2. Попадинець О.О., Гоженко А.І., Бадюк Н.С., Попович І.Л. Індивідуальні особливості ентропії параметрів нервових регуляторних структур (ЕЕГ/ВРС). VIII Національний конгрес патофізіологів України “Патологічна фізіологія - охороні здоров’я України” (Одеса, 13-15 травня 2020 р). Одеса; 2020: 312-314.
3. Brown J. W., Mendes N., Heathcote A., McKinnon R., Seli P. (2017). Hick–Hyman law is mediated by the cognitive control network in the brain. *Scientific Reports*. Vol. 7. Article 16104. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16104-3>
4. Fitousi D. (2023). Quantifying entropy in response times (RT) distributions using the cumulative residual entropy (CRE) function. *Entropy*. Vol. 25, No 8. Article 1239. DOI: <https://doi.org/10.3390/e25081239>
5. Goldberger A. L. (1996). Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *The Lancet*. Vol. 347, No 9011. Pp. 1312–1314. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(96\)90948-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(96)90948-4)
6. Iglesias-Martínez M. E., Candela-Riera G., Hernández-Wilches C. (2020). Machinery failure approach and spectral analysis to study the reaction time dynamics over consecutive visual stimuli: an entropy-based model. *Mathematics*. Vol. 8, No 11. Article 1979. DOI: <https://doi.org/10.3390/math8111979>
7. Ilya Prigogine – Facts. Nobel Prize in Chemistry 1977: “for his contributions to non-equilibrium thermodynamics, particularly the theory of dissipative structures”. [Електронний ресурс]. – NobelPrize.org. – Режим доступу: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1977/prigogine/facts/> (Accessed: 23.02.2026).
8. Keshmiri S. (2020). Entropy and the Brain: An Overview. *Entropy*. Vol. 22, No 9. Art. 917. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22090917>
9. Lipsitz L. A., Goldberger A. L. (1992). Loss of complexity and aging. *JAMA*. Vol. 267, No 13. Pp. 1806–1809. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.1992.03480130122036>
10. Pincus S. M. (1991). Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. Vol. 88. Pp. 2297–2301
11. Richman J. S., Moorman J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology*. Vol. 278. Pp. H2039–H2049
12. Shannon C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*. Vol. 27. Pp. 379–423, 623–656. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>

#### REFERENCES

1. Ivanets O. B., Burychenko M. Yu., Arkhyrey M. V., Bratko V. Yu. (2022). Peculiarities of using nonlinear dynamics methods for processing biomedical data. *Naukoiemni tekhnolohii (High Technologies)*. No 4(56). DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.56.17131>
2. Popadynets O.O., Gozhenko A.I., Badyuk N.S., Popovych I.L. (2020). Individual features of entropy of parameters of nervous regulatory structures (EEG/HRV). VIII National Congress of Pathophysiologicals of Ukraine "Pathological physiology - to the health care of Ukraine" (Odesa, May 13-15, 2020). Odesa; pp. 312-314.
3. Brown J. W., Mendes N., Heathcote A., McKinnon R., Seli P. (2017). Hick–Hyman law is mediated by the cognitive control network in the brain. *Scientific Reports*. Vol. 7. Article 16104. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16104-3>
4. Fitousi D. (2023). Quantifying entropy in response times (RT) distributions using the cumulative residual entropy (CRE) function. *Entropy*. Vol. 25, No 8. Article 1239. DOI: <https://doi.org/10.3390/e25081239>
5. Goldberger A. L. (1996). Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *The Lancet*. Vol. 347, No 9011. Pp. 1312–1314. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(96\)90948-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(96)90948-4)
6. Iglesias-Martínez M. E., Candela-Riera G., Hernández-Wilches C. (2020). Machinery failure approach and spectral analysis to study the reaction time dynamics over consecutive visual stimuli: an entropy-based model. *Mathematics*. Vol. 8, No 11. Article 1979. DOI: <https://doi.org/10.3390/math8111979>
7. Ilya Prigogine – Facts. Nobel Prize in Chemistry 1977: “for his contributions to non-equilibrium thermodynamics, particularly the theory of dissipative structures”. NobelPrize.org. Available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1977/prigogine/facts/> (Accessed: 23.02.2026).
8. Keshmiri S. (2020). Entropy and the Brain: An Overview. *Entropy*. Vol. 22, No 9. Art. 917. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22090917>
9. Lipsitz L. A., Goldberger A. L. (1992). Loss of complexity and aging. *JAMA*. Vol. 267, No 13. Pp. 1806–1809. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.1992.03480130122036>
10. Pincus S. M. (1991). Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. Vol. 88. Pp. 2297–2301
11. Richman J. S., Moorman J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology*. Vol. 278. Pp. H2039–H2049
12. Shannon C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*. Vol. 27. Pp. 379–423, 623–656. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>

*Petrenko Yu. O., Severynchuk V. M.*

#### **ENTROPY OF BEHAVIORAL REACTIONS AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM**

*Introduction. Sensorimotor reactions to repeated stimuli are not independent; reaction time possesses an internal structure formed under the influence of attention, neurodynamic stability, and*

*cognitive load. Therefore, time series can be viewed as dynamic systems where healthy physiological systems demonstrate "organized complexity". A decrease in complexity—moving toward excessive regularity or excessive chaos—is seen as a sign of reduced functional adaptability. In light of the theory of dissipative structures, entropy can be considered an indicator of the dynamic balance between stability and the adaptive restructuring of functional systems.*

**The purpose of the study** was to investigate the possibility of using entropy analysis of simple sensorimotor reaction time to study the functional state of the central nervous system

**Methods.** The study was conducted at Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy with 80 participants aged 17 to 75. Simple visual-motor reaction time was determined using the Makarenko method. Data preprocessing included removing reactions outside the 100–700 ms range and applying the Median Absolute Deviation (MAD) method to eliminate statistical outliers. Entropy was calculated based on discrete Shannon entropy applied to reaction time distribution histograms, with RT values grouped into intervals using Sturges' rule.

**Results.** It was found that as age increases, the average reaction time grows, but changes in variability are more significant. The coefficient of variation and interpercentile range (P90–P10) demonstrate an expansion of the value range and increased instability, especially in the 61–75 age group. Entropy values also increased with age, from 2.285 bits in the 17–18 group to 2.543 bits in the 61–75 group. Analysis revealed no functional dependence between entropy and mean reaction time or coefficient of variation, confirming that entropy reflects unique characteristics of distribution related to structural uncertainty. Generalized age dynamics show that while all metrics (Mean RT, CV, P90–P10, Entropy) increase with age, entropy demonstrates the most consistent and monotonic growth.

**Originality.** For the first time, an integral approach combining classical statistical metrics with Shannon entropy was applied to sensorimotor reaction time series across a wide age range to quantify the degree of organization of the central nervous system. The study demonstrates that entropy serves as an independent indicator of the "organized complexity" of behavioral responses that classical statistics cannot fully capture.

**Conclusion.** The introduction of entropy analysis allows for a deeper assessment of the functional state of the CNS beyond simple speed metrics. Age-related changes in sensorimotor reactions manifest not only as slowing but as a decrease in the stability and organization of the reaction process. Increased entropy in older age groups indicates higher uncertainty and reduced order in the functioning of the sensorimotor system, reflecting a decline in functional organization.

**Keywords:** sensorimotor reactions, central nervous system, entropy, dissipative structures, reaction processes, asymmetry, ontogenesis.

Надійшла до редакції / Received: 25.03.2026

Схвалено до друку / Accepted: 11.05.2026