

УДК 616-71 : 612.843.4 : 616.89-008.45
DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-25

Тимків П. О., Гевко О. В., Петров В. В.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ІНТЕГРОВАНА ПУПІЛОМЕТРІЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

В умовах соціально-економічної нестабільності та тривалого стресового навантаження, зокрема спричиненого воєнним конфліктом, зростає необхідність у сучасній та об'єктивній діагностиці психофізіологічного стану людини, включаючи рівень тривожності та стресу. Ці стани безпосередньо корелюють із дисрегуляцією вегетативної нервової системи (ВНС). Метою роботи є розроблення автоматизованої системи зворотного зв'язку з інтегрованою пупілометрією для моніторингу та діагностики психофізіологічного стану людини. Проведено аналіз наукових праць, що підтверджують зв'язок динаміки зінічних реакцій з активацією симпатичної ланки ВНС, когнітивним навантаженням та емоційними станами. На основі цих даних розроблено програмно-апаратний комплекс, що використовує пупілометрію для об'єктивного відстеження змін вегетативного балансу. Система передбачає механізм зворотного зв'язку для інтеграції психокорекційних методик, таких як арттерапія. В основу системи покладено об'єктивний маркер — Індекс симпатичної активації (ІСА), розрахований як відсоткове відношення площі зініці до площі рогівки.

Розроблена автоматизована система дозволяє неінвазивно та безперервно фіксувати параметри зініці (зокрема, розмір та швидкість реакції), які слугують маркерами рівня тривожності. Використання пупілометрії як інтегрованого показника дозволяє оцінити психологічний стан та ефективність психорелаксуючого впливу в режимі реального часу.

Ключові слова: пупілометрія, автоматизована система, стрес, вегетативний баланс.

Постановка проблеми. Негативний вплив воєнного стану, соціально-економічної нестабільності, прискорення темпів життя та стресових умов праці позначається на психологічному стані людини. Тривалий військовий конфлікт в Україні сприяє зростанню частки таких психічних розладів, як депресія, тривога та посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) [1, 2]. Важливим аспектом цієї проблеми є потреба у сучасній оцінці рівня стресу, що допоможе запобігти негативним наслідкам та відповідній психокорекції.

Аналіз стану досліджень. Незаперечним є факт впливу стресу на психологічне та фізіологічне здоров'я. Відомо, що вегетативна нервова система (ВНС) та гіпоталамо-гіпофізарно-надниркова вісь (ГГНВ) регулюють реакцію організму людини на стресові ситуації [3]. Під час стресу в людини активується симпатична ланка ВНС і пригнічується парасимпатична. У свою чергу, ГГНВ продукує свій ефекторний гормон — кортизол. Гострий стрес вважається адаптивним механізмом, тоді як хронічний стрес стає дезадаптивним, що сприяє виникненню низки патофізіологічних механізмів, погіршує когнітивні функції та викликає дисрегуляцію ВНС.

Для оцінки стресу застосовують як суб'єктивні методи (анкетування), так і об'єктивні методики дослідження стану ВНС та ГГНВ. Шкала сприйнятого стресу (PSS) залишається найпопулярнішим інструментом для суб'єктивного вимірювання стресу. Проте її застосування обмежене: PSS не надає кількісної оцінки стресорів і не відображає хронічні стресові фактори з тривалістю понад місяць [4, 5]. Для оцінки тривожності також нерідко використовують Опитувальник тривожності Спілбергера [5, 6]. Через суб'єктивність анкетування та потенційну упередженість реакцій, доцільно застосовувати комплексний підхід. Значна частина методик оцінки стану ВНС і ГГНВ є громіздкими, а також складними для виконання та інтерпретації.

Біомаркерами стресу можна вважати кортизол, тестостерон, катехоламіни (адреналін, норадреналін), глікований СРБ, а також низку інших біологічно активних речовин [7]. Однак класичні біохімічні методики потребують вартісних реактивів, їх вимірювання часто є інвазивним (наприклад, забір крові) і відображає реальний стан із запізненням (особливо у випадку кортизолу). Хоча перспективним напрямком у цьому контексті є визначення кортизолу в слині, оскільки слина є неінвазивною та легкодоступною біологічною рідиною, здатною відображати і навіть прогнозувати рівень стресу [8].

Увага науковців сьогодні зосереджена на методах нейровізуалізації, таких як позитронно-емісійна томографія, ближня інфрачервона спектроскопія, магнітоенцефалографія та електроенцефалографія [9, 10, 11]. Проте ці методики також є складними, вартісними та вимагають тривалого часу для виконання й інтерпретації.

Ряд інших фізіологічних сигналів також може слугувати маркерами стресу, зокрема: варіабельність серцевого ритму, артеріальна осцилограма [12-17], електродермальна активність і температура шкіри. Однак особливий інтерес викликає такий феномен зміни розміру зіниці у відповідь на стрес. Дана методика вважається неінвазивною, недорогою та об'єктивною, а також дозволяє проводити моніторинг у режимі реального часу. Крім того, важливим є той факт, що розмір зіниці є прямим індикатором активності блакитної плями (locus coeruleus) - підкіркового ядра, що є ключовим центром норадреналіну, який регулює стан пильності та емоційного збудження.

Регуляція розміру зіниці є результатом антагоністичної дії двох гладких м'язів райдужки. Сфінктер зіниці забезпечує міоз (звуження) і перебуває під контролем парасимпатичної нервової системи. Натомість, дилататор зіниці спричиняє мідріаз (розширення), іннервуючись симпатичною нервовою системою. Ця подвійна вегетативна іннервація обумовлює можливість використання пупілометрії (вимірювання діаметра зіниці) як неінвазивного методу оцінки балансу та домінуючої активності симпатичної та парасимпатичної гілок вегетативної нервової системи [18,19]. Коливання діаметра зіниці людини (від 2 до 8 мм) забезпечує регулювання потоку світла, що надходить до ока, із кратністю приблизно в 16 разів. Упродовж останніх років світлова реакція зіниці - зміна її розміру у відповідь на світло та темряву - була добре вивчена. Проте, новітні дослідження, що стосуються уяви світла, привертають значну увагу та змінюють усталені погляди. Зокрема, низка вчених довела, що зіниці досліджуваних звужувались навіть тоді, коли вони подумки уявляли себе в яскравому світлі [20]. Цей факт переконливо свідчить про те, що світлова реакція зіниці не є суто рефлекторною, а значною мірою модулюється когнітивними факторами [21].

Сучасні дослідження розширюють уявлення про регуляцію розміру зіниці, демонструючи, що навіть нюхова стимуляція впливає на параметри світлового рефлексу [22]. Проте найбільш значущі відкриття стосуються зв'язку зіниці з когнітивними процесами. Розмір зіниць може змінюватись під час таких процесів, як когнітивне навантаження та конфлікт рішень [21, 23]. Тривале розумове перевантаження, наприклад, здатне зменшити розмір зіниць [24]. Водночас, розширення зіниці корелює з ускладненням завдання, здивуванням та емоційним збудженням [25, 26]. Примітно, що розширення зіниць, емоційне збудження та шкірна провідність тісно корелюють між собою, відображаючи переважання симпатикотонії (активності симпатичної нервової системи) [26]. З огляду на це, останніми роками все частіше наголошується, що пупілометрія стає інтегрованим показником різних станів уваги, оскільки вона відображає активність нейронних мереж, які відповідають за три основні компоненти уваги: тривожність, орієнтація та виконавчий контроль [27]. Таким чином, пупілометрія виходить за межі простого вимірювання фізіологічних реакцій і має потенціал стати цінним, неінвазивним інструментом для дослідження складних когнітивних процесів. Пупілометрія набуває особливого значення у пацієнтів із невідкладними нейрохірургічними станами, зокрема при гострій черепно-мозковій травмі (ЧМТ) [19], хворих із хворобою Альцгеймера, деменцією [24].

Найбільший інтерес у наукових колах становлять дослідження, які відображають стан активації певних гілок ВНС, зокрема симпатичної в умовах стресу. Наприклад, дані (Bogdanova et al., 2022) переконливо продемонстрували активацію симпатичної ланки, що виражалось розширенням зіниць, у відповідь на демонстрацію «роздратованих облич» [28]. Ця чутливість зіничної реакції до емоційних і стресових стимулів підтверджує потенціал методу. Як наслідок, методики автоматизованої пупілометрії активно впроваджуються та стають реальністю [29]. Це дозволяє не лише фіксувати дані об'єктивно, але й забезпечує необхідну точність і безперервність моніторингу, що є критично важливим для клінічної практики та наукових досліджень.

Отже, розмір зіниці зручно використовувати як маркер фізіологічного стану людини з огляду на його чутливість до співвідношення між симпатичною та парасимпатичною гілками ВНС. Імовірно, за допомогою цього маркера можна ефективно відстежувати також рівень тривожності. Тому метою нашого дослідження стало створення автоматизованої системи для моніторингу рівня тривожності з використанням пупілометрії.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення автоматизованої системи на основі інтегрованої пупілометрії для об'єктивного моніторингу та діагностики психофізіологічного стану людини.

Результати та їх обговорення. На основі інтегрованої пупілометрії для об'єктивного моніторингу та діагностики психофізіологічного стану людини побудовано структурну схему автоматизованої системи з інтегрованою пупілометрією (рис. 1).

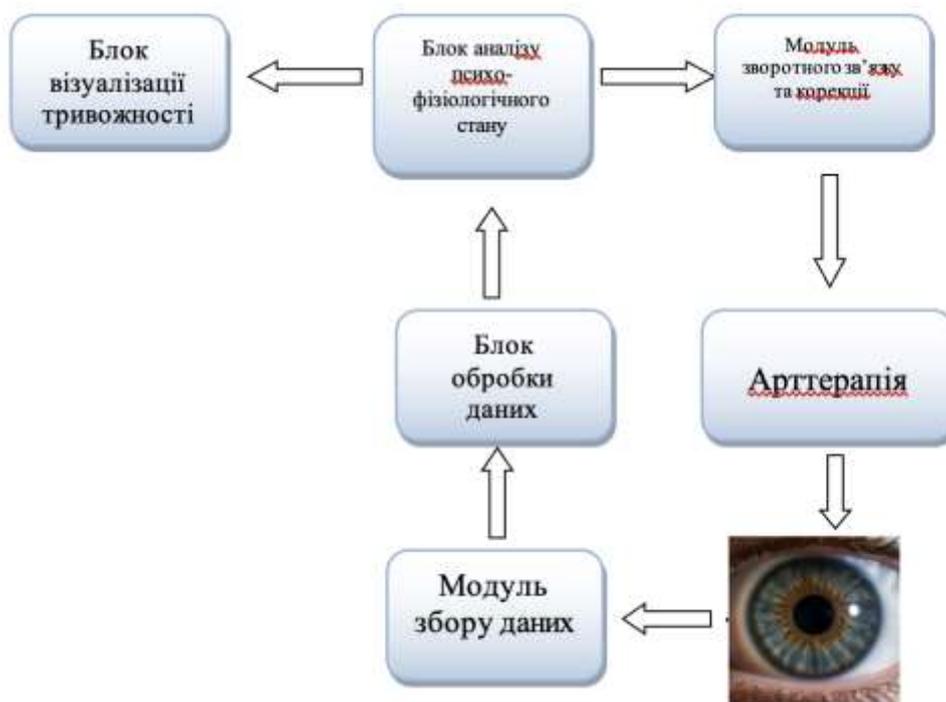


Рисунок 1 – Структурна схема Автоматизованої системи зворотного зв'язку з інтегрованою пупілометрією для моніторингу та корекції психологічного стану людини

Автоматизована система інтегрованої пупілометрії (АСП) побудована за модульним принципом і складається з п'яти основних блоків (рис. 2):

- 1) модуль відбору (отримання) зображень (МВЗ) - використано цифрова камера високої роздільності з ІЧ-фільтром, яка зменшує вплив нерівномірного освітлення;
- 2) модуль попередньої обробки (МПО) - проводить попереднє опрацювання та фільтрацію шумів, нормалізує контраст зображення та компенсує неоднорідність освітлення на оці;
- 3) модуль морфометричного аналізу (ММА) - виділяє і окреслює межі рогівки і зіниці та визначає їх площу і співвідношення;
- 4) модуль статистичного оцінювання (МСО) - проводить розрахунок індексу симпатичної активації (ІСА) та рівня тривожності;
- 5) модуль зворотного зв'язку (МЗЗ) - інтегрує отримані дані з індикативними показниками систем біологічного зворотного зв'язку для психокорекційних цілей.

Отже, блок обробки даних на структурній схемі складається з двох модулів: модуля попередньої Обробки та модуля морфометричного аналізу. Вони відповідають за очищення і підготовку зображення до аналізу та безпосереднє вимірювання ключового показника - індексу симпатичної активації. Відповідно блок аналізу психофізіологічного стану на структурній схемі складається з модуля статистичного оцінювання. Його функція полягає у трансформації отриманих морфометричних даних (зокрема, індексу симпатичної активації на діагностичний висновок. Це досягається шляхом статистичного порівняння поточних значень ІСА з нормативними та пороговими даними. Результатом роботи МСО є об'єктивна оцінка рівня тривожності та поточного вегетативного дисбалансу людини, що є основою для прийняття рішення про корекцію.

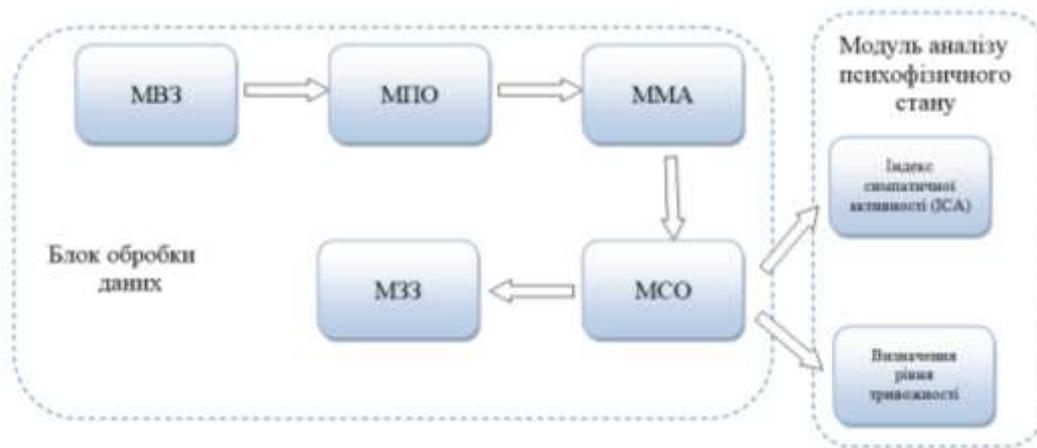


Рисунок 2 – Блок-схема автоматизована система інтегрованої пупілометрії (АСІП) для психокорекційних цілей

Загальний принцип роботи полягає у реєстрації зображення ока, подальшій автоматичній сегментації зон зіниці та рогівки, розрахунку їхніх площ і визначенні індексу симпатичної активації (ІСА) - у відсотках відношення площі зіниці до площі рогівки. Згідно з [18], цей показник може бути індикатором вегетативного дисбалансу. В основі методу лежить використання алгоритмів комп'ютерного зору бібліотеки OpenCV (Python) (рис. 3).

```

1 import cv2
2 import numpy as np
3 import glob
4 import os
5 import csv
6 # --- 1. Підготовка для збереження результатів ---
7 output_csv = "pupil_analysis_results.csv"
8 results = [{"ІСІА": "Радіус зіниці(px)", "Радіус рогівки(px)", "Відношення(%)"}]
9 # --- 2. Завантаження всіх фото з папки "eyes" ---
10 image_paths = glob.glob("eyes/*.jpg") + glob.glob("eyes/*.png")
11 for path in image_paths:
12     print(f"Обробка: {os.path.basename(path)}")
13     image = cv2.imread(path)
14     image = cv2.resize(image, (600, 400))
15     gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
16     # --- 3. Попередня обробка ---
17     gray = cv2.medianBlur(gray, 5)
18     gray = cv2.equalizeHist(gray)
19     # --- 4. Пошук кіл (HoughCircles) ---
20     circles = cv2.HoughCircles(
21         gray,
22         cv2.HOUGH_GRADIENT,
23         dp=1.2,
24         minDist=100,
25         param1=50,
26         param2=30,
27         minRadius=20,
28         maxRadius=120
29     )
30 # --- 5. Обробка знайдених кіл ---
31 if circles is not None:
32     circles = np.uint16(np.around(circles))
33     circles = sorted(circles[0, :, 1], key=lambda x: x[2])
34     if len(circles) == 2:
35         pupil = circles[0]
36         cornea = circles[1]
37
38         r_pupil = pupil[2]
39         r_cornea = cornea[2]
40
41         area_pupil = np.pi * (r_pupil ** 2)
42         area_cornea = np.pi * (r_cornea ** 2)
43
44         ratio = (area_pupil / area_cornea) * 100
45         # --- 6. Виведення результатів ---
46         output = image.copy()
47         cv2.circle(output, (pupil[0], pupil[1]), r_pupil, (0, 0, 255), 2)
48         cv2.circle(output, (cornea[0], cornea[1]), r_cornea, (0, 255, 0), 2)
49         cv2.putText(output, f"Радіус: {r_pupil} px", (50, 50),
50             cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1, (255, 255, 255), 2)
51         cv2.putText(output, f"Радіус: {r_cornea} px", (150, 250, 255), 2)
52         cv2.putText(output, f"Відношення: {ratio}%", (150, 350, 255), 2)
53         print(f"Результат: Радіус зіниці: {r_pupil} px, Радіус рогівки: {r_cornea} px, ІСІА: {ratio}%")
54         results.append((os.path.basename(path), r_pupil, r_cornea, f"{ratio}%"))
55     else:
56         print(f"Не знайдено кіл на зображенні.")
57         results.append((os.path.basename(path), "-", "-", "-"))
58 else:
59     print(f"Немає кіл на зображенні.")
60     results.append((os.path.basename(path), "-", "-", "-"))
61 cv2.destroyAllWindows()
62 # --- 7. Збереження результатів у CSV ---
63 with open(output_csv, "w", newline="", encoding="utf-8") as f:
64     writer = csv.writer(f)
65     writer.writerow(results)
66 print(f"Результати збережено у файл: {output_csv}")
  
```

Рисунок 3 – Лістинг програми визначення індексу симпатичної активації (ІСА) в середовищі Python

На першому етапі роботи алгоритму АСІП проводиться конвертація зображення в градації сірого (GrayScale) для спрощення аналізу та препроцесинг фільтрації шумів (застосовано фільтр Гауса (Gaussian Blur) для усунення локальні сплесків яскравості). Далі проведено адаптивну бінаризацію (Adaptive Thresholding), що дозволяє досить точно виділити темнішу область зіниці навіть при нерівномірності освітлення. Для пошуку контурів (Canny Edge Detection) визначаємо межі зіниці та апроксимуємо визначені контури за допомогою еліпсу. Оскільки форма зіниці не є ідеально круглою, то в даному алгоритмі запропоновано використання еліптична моделі, при цьому площа еліпсу визначається за відомою формулою площі еліпса:

$$S_{\text{зіниці}} = \pi \cdot a \cdot b, \quad (1)$$

де a і b - півосі еліпса.

На наступному етапі, для уникнення артефактів від відблисків, застосовується алгоритм Contour Approximation with Convex Hull, для забезпечення стійкості до яскравих рефлексів рогівки. Для визначення меж рогівки використано метод Хафа для детектування кіл (Hough Circle Transform). Попередня фільтрація (High-pass filter) для виділення контурів та пошук кільцевих структур проводиться у діапазоні 50–150 пікселів.

Площу рогівки визначаємо за відомою формулою площі кола:

$$S_{\text{рогівки}} = \pi \cdot r^2, \quad (2)$$

де r - радіус рогівки, визначений автоматично.

Порівнюючи площу зіниці до площі рогівки, визначаємо індекс симпатичної активації (ISA) [30]:

$$ISA = \frac{S_{\text{зіниці}}}{S_{\text{рогівки}}} \times 100\% \quad (3)$$

Для подальшого автоматизованого моніторингу та діагностики психофізіологічного стану людини прийємо типові порогові діапазони значення показника ISA:

- а) стан спокою: 18 - 22 %
- б) помірно когнітивне навантаження: 25 - 32 %
- в) високий рівень стресу або емоційне збудження: до 40 % [27, 30].

Використання цього показника дозволить кількісно (за допомогою показника ISA) оцінювати стан вегетативної нервової система та рівень психоемоційного навантаження. Результати опрацювання показали стабільність визначення результуючого показника ISA навіть при зміні яскравості освітлення на ± 20 %, що уможливило застосування АСП в режимі реального часу для моніторингу в клінічних і лабораторних умовах.

Висновок. Проведений аналіз наукових праць підтвердив доцільність використання пупілометрії як маркера вегетативного балансу. На цій основі було розроблено автоматизовану систему зворотного зв'язку, що забезпечує безперервний моніторинг рівня тривожності за розміром та реакцією зіниць. Розроблена автоматизована система інтегрованої пупілометрії забезпечує високу точність визначення площі зіниці та рогівки; реєстрацію динамічних змін у режимі реального часу; кількісну оцінку індексу симпатичної активації (ISA) - маркера рівня стресу, тривожності та когнітивного навантаження. Це дозволяє інтегрувати психокорекційні втручання, такі як арттерапія, для оперативного впливу на психофізіологічний стан. Отримані результати підтвержують, що інтегрована пупілометрія може бути ефективним, неінвазивним і доступним інструментом для об'єктивного контролю психофізіологічного стану людини.

Інформаційні джерела

1. Чепурко Г., & Соболев А. (2023). Ментальне здоров'я українців: виклики воєнного часу. Collection of Scientific Papers «ЛОГОС», (May 26, 2023; Boston, USA), 179–182. <https://doi.org/10.36074/logos-26.05.2023.048>
2. Yasenok V., Baumer A., Petrashenko V., Kaufmann M., Frei A., Rügger S, et al. (2025). Mental health burden of persons living in Ukraine and Ukrainians displaced to Switzerland: the mental health assessment of the Ukrainian population (MAP) studies. *BMJ Global Health*,10(e019557). <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2025-019557>
3. Ringgold V., & Rohleder N. (2025). Stress and Resilience: Associations of Stress Biomarkers With Different Conceptualizations of Resilience. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 61, 101463.
4. Malykhin N., Serrano J., Pietrasik W., & Hegadoren K. (2025). Effects of duration and intensity of psychological stressors on mental health outcomes. *Journal of Psychiatric Research*, 187, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2025.05.012>

5. Benítez-Agudelo, J.C., Restrepo, D., Navarro-Jimenez, E. et al. (2025). Longitudinal effects of stress in an academic context on psychological well-being, physiological markers, health behaviors, and academic performance in university students. *BMC Psychol* 13(753). <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03041-z>
6. Van Knippenberg, F. C. E., Duivenvoorden, H. J., Bonke, B., & Passchier, J. (1990). Shortening the state-trait anxiety inventory. *Journal of Clinical Epidemiology*, 43(9), 995–1000.
7. Ostapiuk-Karolczuk, J., Dziewiecka, H., Bojsa, P., et al. (2025). Biochemical and psychological markers of fatigue and recovery in mixed martial arts athletes during strength and conditioning training. *Scientific Reports*, 15(24234). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09719-z>
8. Budala, D. G., Luchian, I., Virvescu, D. I., Tudorici, T., Constantin, V., Surlari, Z., Butnaru, O., Bosinceanu, D. N., Bida, C., & Hancianu, M. (2025). Salivary Biomarkers as a Predictive Factor in Anxiety, Depression, and Stress. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(7), 488. <https://doi.org/10.3390/cimb47070488>
9. Nagasawa, Y., Ishida, M., Komuro, Y., et al. (2020). Relationship between cerebral blood oxygenation and electrical activity during mental stress tasks: Simultaneous measurements of NIRS and EEG. *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 1232, pp. 99–104). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34461-0_14.
10. Ahammed, K., & Ahmed, M. U. (2020). Quantification of mental stress using complexity analysis of EEG signals. *Biomedical Engineering Applications Basis Communications*, 32(2), 2050011. <https://doi.org/10.4015/S1016237220500118>.
11. Modi, N., Kumar, Y., Mehta, K., et al. (2025). Physiological signal-based mental stress detection using hybrid deep learning models. *Discovery Artificial Intelligence*, 5(166). <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00412-8>
12. Вакуленко Д.В., Гевко О.В. Перспективні напрямки у створенні системи віртуальної реальності для корекції психофізіологічного стану пацієнта / Вакуленко Д.В., Гевко О.В., Вакуленко Л.О., Кіфер В.М. // “Перспективні технології та прилади”. Збірник наукових праць. Випуск 19. м. Луцьк, грудень 2021р. Луцьк: Луцький НТУ, 2021. С.27-33. <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2021-19-4>
13. Vakulenko, D., Vakulenko, L., Sas, L., Hevko, O. (2024). Effectiveness Application of the Analysis of Arterial Pulsations Registered during Blood Pressure Measurement Using the Oranta-AO Information System in Psychophysiology In: D. V. Vakulenko, L. O. Vakulenko (eds.), *Arterial oscillography: New capabilities of the blood pressure monitor with the Oranta-AO information system*, (Chapter 26, pp. 419–430). Nova Science Publishers, Inc. USA. <https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2024/10/Arterial-Oscillography-Ch26.pdf>
14. Vakulenko, D., Vakulenko, L., Hevko, O. (2024). Prospect of Creating a Virtual Reality System with Feedback for the Correction of the Patient’s Psychological State Based on the Results of the Analysis of Arterial Pulsations Registered during Blood Pressure Measurement Using the Oranta-AO Information System In: D. V. Vakulenko, L. O. Vakulenko (eds.), *Arterial oscillography: New capabilities of the blood pressure monitor with the Oranta-AO information system* (Chapter 37, pp. 587–599). Nova Science Publishers, Inc. USA. <https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2024/10/Arterial-Oscillography-Ch37.pdf>
15. Vakulenko, D., Vakulenko, L., Hevko, O. (2024). Systematic and Analytical Substantiation of the Use of Multimedia Environment for the Prevention And Rehabilitation of Various Diseases in Information System Oranta-AO In: D. V. Vakulenko, L. O. Vakulenko (eds.), *Arterial oscillography: New capabilities of the blood pressure monitor with the Oranta-AO information system*, (Chapter 38, pp. 601–615). Nova Science Publishers, Inc. USA. <https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2024/10/Arterial-Oscillography-Ch38.pdf>
16. Vakulenko, D., Vakulenko, L., Kaverinsky, V., Malakhov, K., Grushko, V., & Hevko, O. (2025). Demonstrating the Validity of Methods for Studying and Evaluating the Results of Spectral Analysis of Arterial Oscillograms Recorded During Blood Pressure Measurement and AI Algorithms for Detecting Risks of Mental Diseases. In L. T. Duncan (Ed.), *Advances in health and disease* (Vol. 85, Chapter 1, pp. 1–43). Nova Science Publishers, Inc. USA. <https://www.scopus.com/pages/publications/105000585231?inward=>
17. Vakulenko, D., Hevko, O., Vakulenko, L., Smachylo, I., & Kocherga, Z. (2025). Telemedicine and psychocorrection: a new paradigm through healthcare data processing innovations. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2025)* (Vol. 4057, pp. 374–386). CEUR-WS.org. <https://ceur-ws.org/Vol-4057/paper23.pdf>

18. Mathôt, S. (2018). Pupillometry: Psychology, Physiology, and Function. *Journal of Cognition*, 1(1), 16. doi: 10.5334/joc.18. PMID: 31517190; PMCID: PMC6634360. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6634360/>
19. Hsu, C.-H., & Kuo, L.-T. (2023). Application of Pupillometry in Neurocritical Patients. *Journal of Personalized Medicine*, 13(7), 1100. <https://doi.org/10.3390/jpm13071100>
20. Mathôt, S., Grainger, J., & Strijkers, K. (2017). Pupillary responses to words that convey a sense of brightness or darkness. *Psychological Science*, 28(8), 1116–1124. DOI: [10.1177/0956797617702699](https://doi.org/10.1177/0956797617702699)
21. Ebitz, R. B., & Moore, T. (2019). Both a Gauge and a Filter: Cognitive Modulations of Pupil Size. *Frontiers in Neurology*, 9, 1190. doi: 10.3389/fneur.2018.01190. PMID: 30723454; PMCID: PMC6350273.
22. Hatsukawa, H., & Ishikawa, M. (2023). Psychological states affecting initial pupil size changes after olfactory stimulation in healthy participants. *Scientific Reports*, 13(16050). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43004-1>
23. Benitez, V. L., & Robison, M. K. (2022). Pupillometry as a Window into Young Children's Sustained Attention. *Journal of Intelligence*, 10(4), 107. doi: 10.3390/jintelligence10040107. PMID: 36412787; PMCID: PMC9680391.
24. Castellotti, S., Castaldi, E., Blini, E., & Arrighi, R. (2025). Pupil size as a biomarker of cognitive (dys)functions: Toward a physiologically informed screening of mental states. *Acta Psychologica*, 253, 104720. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2025.104720>
25. Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4), 602–607. doi: [10.1111/j.1469-8986.2008.00654.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00654.x).
26. De Zorzi, L., Ranfaing, S., Honoré, J., & Sequeira, H. (2021). Autonomic reactivity to emotion: A marker of sub-clinical anxiety and depression symptoms? *Psychophysiology*, 58(4), e13774. doi: [10.1111/psyp.13774](https://doi.org/10.1111/psyp.13774).
27. Strauch, C., Wang, C. A., Einhäuser, W., Van der Stigchel, S., Naber, M., et al. (2022). Pupillometry as an integrated readout of distinct attentional networks. *Trends Neurosci.* Aug;45(8):635-647. doi: 10.1016/j.tins.2022.05.003.
28. Bogdanova, O. V., Bogdanov, V. B., Miller, L. E., & Hadj-Bouziane, F. (2022). Simulated proximity enhances perceptual and physiological responses to emotional facial expressions. *Scientific Reports*, 12(1), doi: [10.1038/s41598-021-03587-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-03587-z)
29. Lussier, B. L., Olson, D. W. M., & Aiyagari, V. (2019). Automated Pupillometry in Neurocritical Care: Research and Practice. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 19, 71, doi: [10.1007/s11910-019-0994-z](https://doi.org/10.1007/s11910-019-0994-z).
30. Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2015). Memory, emotion and pupil diameter: Repetition of natural scenes. *Psychophysiology*, 52(9), 1186–1193. doi: [10.1111/psyp.12442](https://doi.org/10.1111/psyp.12442)

Tymkiv P., Hevko O., Petrov V.V.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

INTEGRATED PUPILLOMETRY AS A TOOL FOR AUTOMATED MONITORING OF HUMAN PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE

In the context of socio-economic instability and prolonged stress load, particularly that caused by military conflict, there is a growing need for timely and objective diagnosis of the human psychophysiological state, including levels of anxiety and stress. These states directly correlate with the dysregulation of the autonomic nervous system (ANS). The aim of this work is the development of an automated feedback system with integrated pupillometry for monitoring and diagnosing the human psychophysiological state.

An analysis of scientific literature was conducted, confirming the link between the dynamics of pupillary reactions and the activation of the sympathetic branch of the ANS, cognitive load, and emotional states. Based on this data, a software and hardware complex was developed, which uses pupillometry for the objective tracking of changes in autonomic balance. The system incorporates a feedback mechanism for the integration of psychocorrective methods, such as art therapy. The system is based on an objective marker—the Sympathetic Activation Index (SAI), calculated as the percentage ratio of the pupil area to the cornea area. The developed automated system allows for the non-invasive

and continuous fixation of pupillary parameters (specifically, size and reaction speed), which serve as markers of the anxiety level. The use of pupillometry as an integrated readout allows for the assessment of the psychological state and the effectiveness of psychorelaxing influence in real-time.

Conclusions: The developed automated system with integrated pupillometry has high potential to become a valuable and accessible tool for the objective monitoring of stress and anxiety levels, as well as for controlling the effectiveness of psychocorrective measures across a wide range of applications.

Key words: *Pupillometry, Automated system, Stress, Autonomic balance*

Дата першого надходження
статті до видання
17.10.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
12.11.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.