

В. Д. ПАВЛЕНКО, д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Одеса,
Т. В. ШАМАНІНА, магістр, ОНПУ, Одеса

ПОБУДОВА МОДЕЛІ ВОЛЬТЕРРИ ОКО-РУХОВОЇ СИСТЕМИ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ ДАНИХ АЙТРЕКІНГУ

Розроблено інструментальні, обчислювальні та програмні засоби побудови нелінійної динамічної моделі око-рухової системи (ОРС) людини на основі даних експериментів "вхід-вихід" з використанням тестових візуальних стимулів та інноваційної технології айтрекінгу. Для ідентифікації використовується модель Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій 1-го, 2-го та 3-го порядків, які враховують інерційні та нелінійні властивості ОРС. Розроблені в середовищі Matlab програмні засоби обробки даних айтрекінгу апробовано на реальних даних експериментального обстеження ОРС. Іл.: 12. Табл.: 5. Бібліогр.: 17 назв.

Ключові слова: око-рухова система; ідентифікація; модель Вольтерри; багатовимірні перехідні функції; тестові візуальні стимули; технологія айтрекінгу.

Постановка проблеми. Дослідження рухів очей людини і траєкторії їх переміщення (Айтрекінг, Eye-tracking) дозволяють розкрити структуру взаємин індивіда з середовищем, людини зі світом. Аналіз взаємозв'язку окуло-моторики з центральною нервовою системою, з одного боку, з вмістом психічних процесів – з іншого, з різноманітними формами активності (поведінкою, діяльністю, спілкуванням) – з третього, сприяє вивченню механізмів роботи мозку і їх порушення, виявлення динаміки психофізіологічних станів людини, закономірностей сприйняття, мислення, уявлень, диференціації інтенцій, намірів і установок особистості [1]. Знання про рух очей розширюють можливості вивчення специфіки багатьох професій з метою підвищення ефективності функціонування суб'єкта трудової діяльності [2, 3].

Все більш широке застосування апаратних засобів айтрекінгу (айтрекерів) [3] в експериментальній психології підвищує затребуваність використання ефективних методів математичного моделювання ОРС людини та створення тріади "модель-алгоритм-програма" для інформаційного забезпечення системи інтерпретації даних, отриманих за допомогою відеоокулографії.

Аналіз літератури. Технологія айтрекінгу в останні роки отримала подальший розвиток та ефективно застосування при побудові математичної моделі процесу неперервного відстеження руху ока на основі поліномів Вольтерри [4], які враховують інерційні і нелінійні

властивості окорухової системи людини [5 – 9]. Процес ідентифікації ґрунтується на використанні тестових візуальних стимулів, що відображаються на екрані монітора комп'ютера на різних відстанях від стартової позиції (рис. 1) [10].

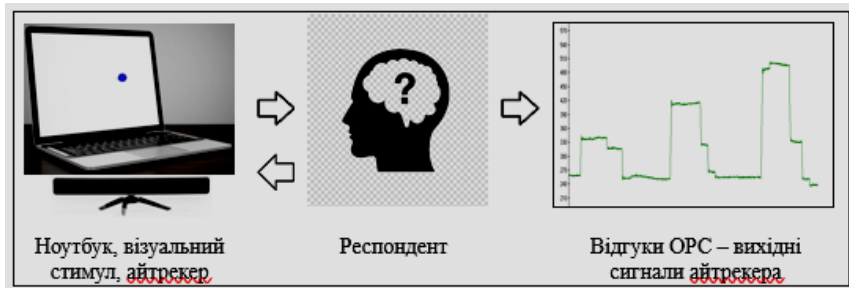


Рис. 1. Схема процесу айтрекінга

Метою роботи є розробка інструментальних програмних засобів побудови непараметричної динамічної моделі Вольтерри окорухової системи людини на основі даних експериментальних досліджень "вхід-вихід" з застосуванням тестових візуальних стимулів та технології айтрекінгу.

Для побудови моделі Вольтерри ОРС людини використовуються детерміновані тестові впливи – ступінчасті сигнали, найбільш адекватні для дослідження динаміки ОРС, що дозволяє спростити обчислювальний алгоритм ідентифікації та істотно зменшити час обробки експериментальних даних [10 – 13].

Об'єкт дослідження – процес ідентифікації ОРС на основі даних експериментальних досліджень "вхід-вихід" із застосуванням технології айтрекінгу.

Предмет дослідження – інструментальні, обчислювальні і програмні засоби побудови моделі Вольтерри – визначення перехідних функцій 1-го, 2-го та 3-го порядків ОРС за даними айтрекінгу.

1. Модель Вольтерри. Для опису об'єктів невідомої структури доцільно використовувати найбільш універсальні нелінійні непараметричні динамічні моделі – моделі Вольтерри [14, 15]. При цьому нелінійні і динамічні властивості досліджуваного об'єкту однозначно описуються послідовністю інваріантних відносно виду вхідного сигналу багатовимірних вагових функцій – ядер Вольтерри (ЯВ).

Співвідношення "вхід-вихід" для нелінійної динамічної системи (НДС) з невідомою структурою (типу "чорний ящик") з одним входом і

одним виходом може бути представлено дискретним кубічним поліномом Вольтерри у вигляді:

$$\begin{aligned}
 y[m] = & \sum_{n=1}^3 y_n[m] = \sum_{k_1=0}^m w_1[k_1]x[m-k_1] + \\
 & + \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m w_2[k_1, k_2]x[m-k_1]x[m-k_2] + \\
 & + \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m \sum_{k_3=0}^m w_3[k_1, k_2, k_3]x[m-k_1]x[m-k_2]x[m-k_3],
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $w_1[k_1]$, $w_2[k_1, k_2]$, $w_3[k_1, k_2, k_3]$ – дискретні вагові функції (ядра Вольтерри) 1-го, 2-го та 3-го порядків; $x[m]$, $y[m]$ – вхідна (стимул) і вихідна (відгук) функції (сигнали) системи, яка моделюється, відповідно; $y_n[m]$ – парціальні складові відгуку (згортка послідовностей n -го порядку); m – дискретна перемінна часу.

Структурна схема моделі Вольтерри ОРС має вигляд (рис. 2).

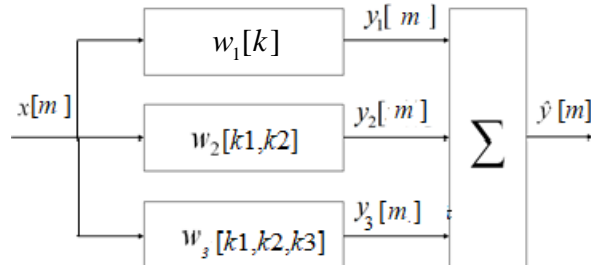


Рис.2. Структурна схема моделі Вольтерри ОРС

2. Побудова моделі Вольтерри ОРС на основі даних експериментів "вхід-вихід". Задача ідентифікації полягає у виборі тестових сигналів $x[m]$ і розробці алгоритму, який дозволяє по вимірюваним відгукам $y[m]$ виділяти парціальні складові $y_n[m]$, ($n = 1, 2, 3$) і визначати на їх основі ЯВ $w_1[k_1]$, $w_2[k_1, k_2]$, $w_3[k_1, k_2, k_3]$ [16].

З урахуванням специфіки досліджуваної ОРС для ідентифікації використовуються тестові ступінчасті сигнали. Якщо тестовий сигнал $x[m] = \theta[m]$, де $\theta[m]$ – одинична функція (функція Хевісайда), тоді парціальні складові відгуку $y_1[m]$, $y_2[m]$, $y_3[m]$ дорівнюватимуть перехідній функції першого порядку $h_1[m]$ і діагональним перетинам перехідних функцій 2-го і 3-го порядків $h_2[m, m]$, $h_3[m, m, m]$, відповідно:

$$\begin{aligned}
 y_1[m] &= h_1[m] = \sum_{k_1=0}^m w_1[m-k_1], \\
 y_2[m] &= h_2[m,m] = \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m w_2[m-k_1, m-k_2], \\
 y_3[m] &= h_3[m,m,m] = \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m \sum_{k_3=0}^m w_3[m-k_1, m-k_2, m-k_3].
 \end{aligned} \tag{2}$$

Визначення піддіагональних перетинів перехідних функцій ґрунтується на випробуванні НДС за допомогою L тестових ступінчастих сигналів із заданими амплітудами a_i , $i = 1, 2, \dots, L$ ($L \geq N$, N – ступінь полінома Вольтерри). Відгуки НДС, що при цьому вимірюються, позначимо $y_1[m]$, $y_2[m]$, ..., $y_L[m]$. Відгуки моделі Вольтерри дорівнюватимуть

$$\tilde{y}_i[m] = a_i \hat{y}_1[m] + a_i^2 \hat{y}_2[m] + a_i^3 \hat{y}_3[m], \quad i=1, 2, \dots, L, \tag{3}$$

де $\hat{y}_1[m] = \hat{h}_1[m]$, $\hat{y}_2[m] = \hat{h}_2[m,m]$, $\hat{y}_3[m] = \hat{h}_3[m,m,m]$ – отримані оцінки парціальних складових моделі (багатовимірних перехідних функцій).

Для визначення перехідних функцій $h_1[m]$, $h_2[m,m]$, $h_3[m,m,m]$ використовується метод найменших квадратів, який забезпечує мінімум середньоквадратичної похибки відхилення відгуків моделі від відгуків ОРС на один і той же стимул:

$$J_N = \sum_{j=1}^L \left(y_j[m] - \sum_{n=1}^N a_j^n \hat{y}_n[m] \right)^2 \rightarrow \min. \tag{4}$$

Мінімізація критерію (4) зводиться до вирішення системи нормальних рівнянь Гаусса [16], яку в векторно-матричній формі можна записати у вигляді

$$A' A \hat{y} = A' y, \tag{5}$$

де

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_1^2 & \mathbf{L} & a_1^N \\ a_2 & a_2^2 & \mathbf{L} & a_2^N \\ \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} \\ a_L & a_L^2 & \mathbf{L} & a_L^N \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1[m] \\ y_2[m] \\ \mathbf{L} \\ y_L[m] \end{bmatrix}, \quad \hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1[m] \\ \hat{y}_2[m] \\ \mathbf{L} \\ \hat{y}_N[m] \end{bmatrix}.$$

Розв'язавши систему рівнянь (5) відносно $\hat{y}_1[m]$, $\hat{y}_2[m]$, $\hat{y}_3[m]$, отримуємо оцінки багатовимірних перехідних функцій ОРС

$\hat{h}_1[m]$, $\hat{h}_2[m, m]$, $\hat{h}_3[m, m, m]$ в кожний момент часу m на інтервалі спостереження.

З рівняння (5), отримуємо

$$\hat{y} = (A'A)^{-1} A'y. \quad (6)$$

Здійснивши в (6) матричні операції, отримуємо

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_1[m] \\ \hat{y}_2[m] \\ \mathbf{L} \\ \hat{y}_N[m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^L a_j^2 & \sum_{j=1}^L a_j^3 & \mathbf{L} & \sum_{j=1}^L a_j^{N+1} \\ \sum_{j=1}^L a_j^3 & \sum_{j=1}^L a_j^4 & \mathbf{L} & \sum_{j=1}^L a_j^{N+2} \\ \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} \\ \sum_{j=1}^L a_j^{N+1} & \sum_{j=1}^L a_j^{N+2} & \mathbf{L} & \sum_{j=1}^L a_j^{2N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^L a_j y_j[m] \\ \sum_{j=1}^L a_j^2 y_j[m] \\ \mathbf{L} \\ \sum_{j=1}^L a_j^N y_j[m] \end{bmatrix}. \quad (7)$$

В роботі ідентифікація ОРС здійснюється у вигляді перехідних функцій 1-го, 2-го і 3-го порядку.

3. Організація та методика експериментальних досліджень із застосуванням технології айтрекінгу.

При проведенні експериментальних досліджень здійснюються такі дії:

- респондент (людина, яка досліджується) розміщується перед комп'ютером таким чином, щоб його очі були на рівні центру монітору на відстані 40-50 см від нього (рис. 3);

- голова респондента фіксується щоб не допускати її рухів при дослідженнях та для забезпечення однакових умов експерименту;

- за готовністю респондента, слід запустити програму формування тестових візуальних стимулів Signal Manager (рис. 4);

- в центрі екрану (або від його краю) з'являється кружок червоного кольору – стартова позиція (рис. 4, а);

- після невеликої паузи (2-3 с) кружок в стартовій позиції зникає і з'являється кружок іншого кольору в точці з заданими координатами (рис. 4, б), який є візуальним стимулом (тестовим сигналом), що відображається протягом заданої тривалості 1-2 с (ця дія змушує око рухатись в напрямку на візуальний стимул);

- далі цей кружок зникає та з'являється кружок червоного кольору в стартовій позиції (це змушує око рухатись у зворотному напрямку до стартової позиції) і після цих дій експеримент завершується;

– за допомогою айтрекера визначаються координати зіниці ока в процесі його руху (реакції на візуальний стимул) в період між стартовими позиціями, і значення координат зберігаються у файлі типу xls (рис. 5).

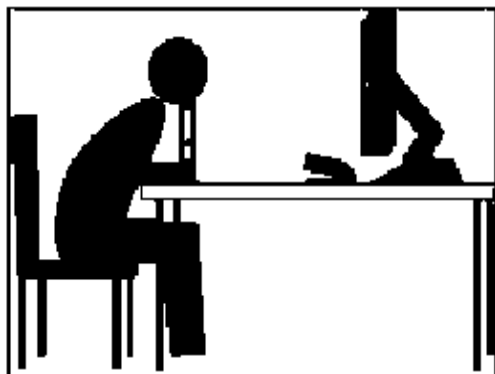


Рис. 3. Схема розташування респондента

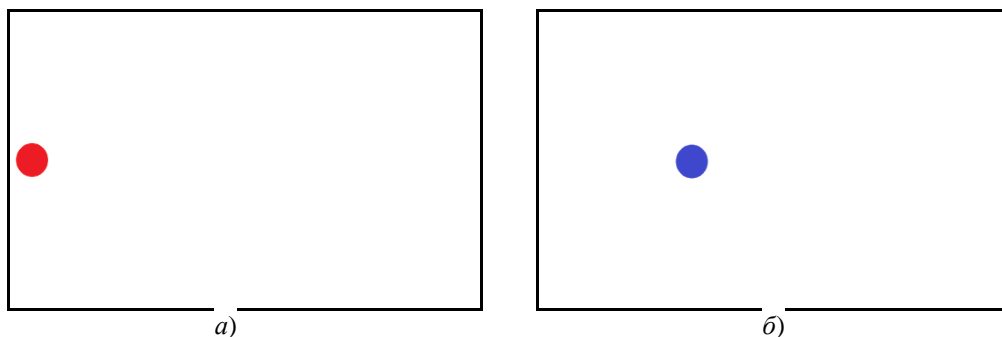


Рис. 4. Тестові візуальні стимули: а) – стартова позиція; б) – позиція стимула

У дослідженні кожного респондента послідовно реалізовані три експеримента для 3-х амплітуд тестових сигналів в напрямку "по горизонталі" (рис. 4, б). Між стартовою позицією та тестовими стимулами відстані дорівнюють: $0.33 l_x$, $0.66 l_x$, $1.0 l_x$, де l_x – довжина екрану монітора. Координати стартової позиції ($x = 0$; $y = 0.5 l_y$), l_y – ширина екрану монітора (рис. 4, а).

Експериментальні дослідження ОРС проводилися з використанням високотехнологічного обладнання – айтрекера TOBII PRO TX300 (300 Hz), наданого для досліджень Центром інновацій та просунутих технологій Люблінського технологічного університету (Люблін, Польща)

[17]. Відгуки ОРС при $L = 3$, що отримано за допомогою айтрекера ТОВІІ PRO TX300 наведено на рис. 5.

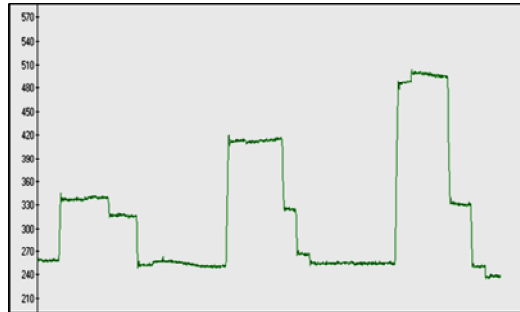
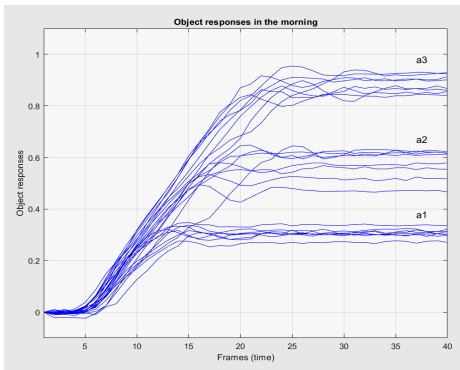
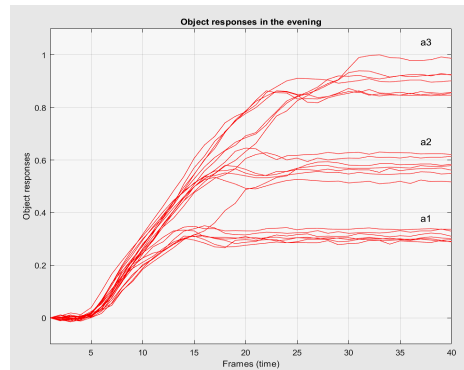


Рис. 5. Відгуки ОРС при $L = 3$, що отримано за допомогою айтрекера ТОВІІ PRO TX300

Результати досліджень. Експерименти були організовані з метою класифікації респондентів (інформантів) за станом втоми. Дані для побудови моделі – відгуки ГДС на однакові тестові сигнали, отримані за допомогою Айтрекера ТОВІІ PRO TX300 в різний час дня: "Вранці" (до роботи) і "Вечері" (після роботи). На рис. 6, *а*, *б* представлені графіки експериментальних даних при різних амплітудах тестових сигналів "Вранці" і "Вечері", що отримані від айтрекера. Усереднені значення відгуків ГДС "Вранці" і "Вечері" наведено на рис. 7.



а)



б)

Рис. 6. Відгуки ОРС при різних амплітудах тестових сигналів: *а)* – "Вранці"; *б)* – "Вечері"

За усередненими даними відгуків ОРС на візуальні стимули з різною відстанню від стартової позиції на основі обчислень за формулою (7) визначено перехідні функції ОРС при використанні апроксимаційних моделей різного ступеня N ($N=1, 2, 3$). Графіки перехідних функцій для

станів респондента "Вранці" та "Вечері" на основі моделі (1) при $N = 1$ представлені на рис. 8, при $N=2$ – на рис. 9 та при $N=3$ – на рис. 10.

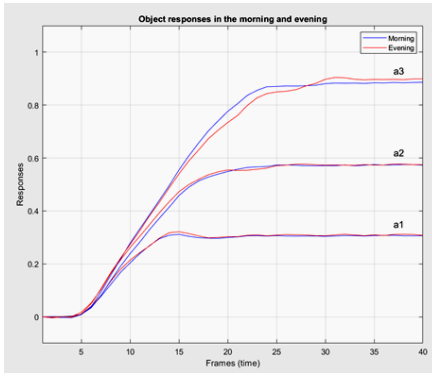


Рис. 7. Усереднені відгуки ОРС при різних амплітудах тестових сигналів "Вранці" і "Вечері"

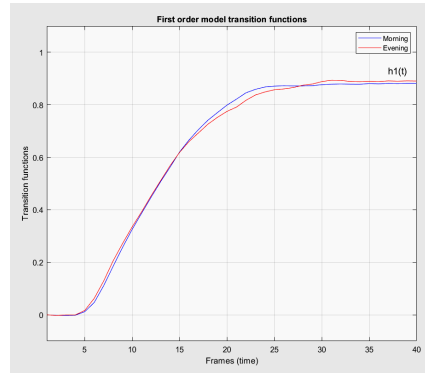


Рис. 8. Оцінки перехідних функцій при $N = 1$ "Вранці" і "Вечері"

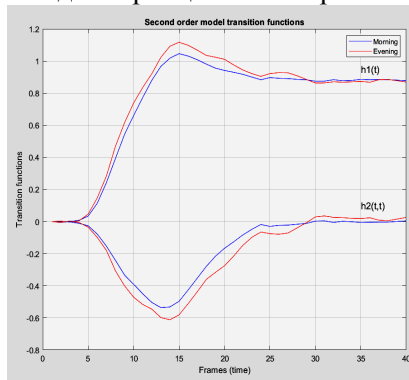


Рис. 9. Оцінки перехідних функцій "Вранці" і "Вечері" при $N=2$

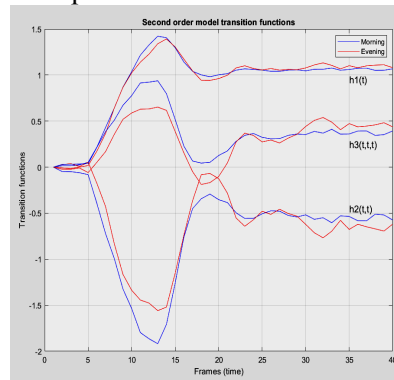


Рис. 10. Оцінки перехідних функцій "Вранці" і "Вечері" при $N=3$

Визначено відгуки за допомогою розрахунків на моделях при різних амплітудах тестових сигналів для аналогічних станів при $N=1, 2, 3$, графіки яких наводяться у порівнянні з подібними відгуками ОРС на рис. 11 та 12, відповідно.

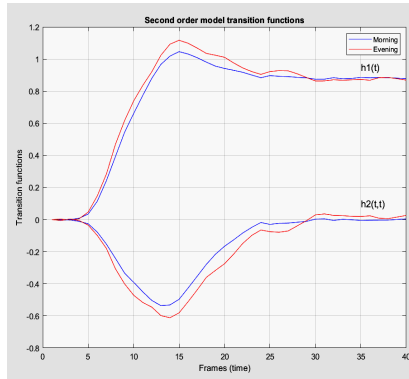


Рис. 11. Відгуки на моделях при різних амплітудах тестових сигналів при $N=2$

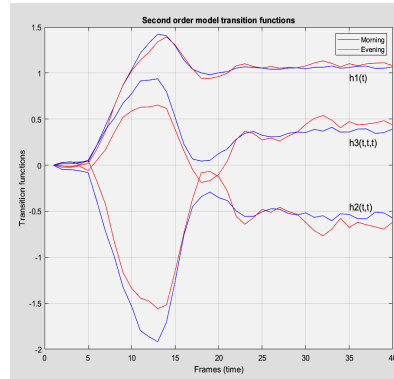


Рис. 12. Відгуки на моделях при різних амплітудах тестових сигналів при $N=3$

Як можна бачити з рисунків, отримані перехідні функції для станів "Вранці" та "Ввечері" першого порядку практично не залежать від стану респондента. Проте, діагональні перетини перехідних функцій другого та третього порядків істотно змінюються за величиною, отже, в подальшому можуть ефективно використовуватися, як джерело первинних даних при побудові діагностичних моделей класифікаторів психофізіологічних станів людини із застосуванням машинного навчання.

Аналіз відхилення усереднених відгуків ОРС для станів респондента "Вранці" і "Ввечері" $\bar{y}_e[m]$, $\bar{y}_m[m]$, відповідно, при різних значеннях амплітуд тестових сигналів a_1 , a_2 та a_3 засновано на обчисленнях наступних показників:

$$\sigma = \max_{m \in [0, M]} |\bar{y}_e[m] - \bar{y}_m[m]|, \quad (8)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\sum_{m=0}^M (\bar{y}_e[m] - \bar{y}_m[m])^2}{\sum_{m=0}^M \bar{y}_m^2[m]} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

– максимального (σ) і нормованого середньоквадратичного відхилення (НСКВ, ε) відгуків ОРС, відповідно. Результати обчислень зазначених показників наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Показники відхилення усереднених відгуків ОРС для станів респондента "Вранці" і "Ввечері"

Амплітуди тестових сигналів	Максимальне відхилення, σ	НСКВ, ε
a_1	0.013	0.019
a_2	0.027	0.025
a_3	0.045	0.027

Змінність (відхилення) перехідних функцій різних порядків n апроксимаційної моделі ОРС для станів респондента "Вранці" і "Ввечері" кількісно оцінюється за допомогою показників: σ_{nN} – максимального відхилення та ε_{nN} – нормованого середньоквадратичного відхилення, які обчислюються за формулами

$$\sigma_{nN} = \max_{m \in [0, M]} |\hat{y}_{ne}[m] - \hat{y}_{nm}[m]|, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{nN} = \left(\frac{\sum_{m=0}^M (\hat{y}_{ne}[m] - \hat{y}_{nm}[m])^2}{\sum_{m=0}^M (\hat{y}_{nm}[m])^2} \right)^{1/2}, \quad n = 1, 2, \mathbf{K}, N. \quad (11)$$

Результати розрахунків зазначених показників зведені в табл. 2

Таблиця 2

Показники відхилення перехідних функцій різних порядків апроксимаційної моделі ОРС для станів респондента "Вранці" і "Ввечері"

N	ε_{1N}	σ_{1N}	ε_{2N}	σ_{2N}	ε_{3N}	σ_{3N}
1	0,019	0,03	–	–	–	–
2	0,051	0,078	0,232	0,109	–	–
3	0,04	0,1	0,199	0,387	0,322	0,291

Максимальне відхилення відгуку апроксимаційної моделі різного порядку $\tilde{y}_N[m]$ від відгуку ОРС $y[m]$ при різних значеннях амплітуд тестових сигналів a_1 , a_2 та a_3 для станів респондента "Вранці" і "Ввечері" наведено в табл. 3. Відповідні оцінки НСКВ наведені в табл. 4.

Таблиця 3

Максимальне відхилення відгуку апроксимаційної моделі різного порядку N від відгуку ОРС при різних значеннях амплітуд тестових сигналів a_1 , a_2 та a_3 для станів респондента "Вранці" і "Ввечері"

N	a_1		a_2		a_3	
	Вранці	Ввечері	Вранці	Ввечері	Вранці	Ввечері
1	0.127	0.128	0.046	0.06	0.067	0.08
2	0.033	0.023	0.033	0.023	0.011	0.008
3	$\sim 1.0e-13$	$1.0e-13$	$1.0e-13$	$1.0e-13$	$1.0e-13$	$1.0e-13$

Таблиця 4

НСКВ апроксимаційної моделі різного порядку N від відгуку ОРС при різних значеннях амплітуд тестових сигналів a_1 , a_2 та a_3 для станів респондента "Вранці" і "Ввечері"

N	a_1		a_2		a_3	
	Вранці	Ввечері	Вранці	Ввечері	Вранці	Ввечері
1	0.198	0.209	0.043	0.063	0.042	0.054
2	0.057	0.05	0.033	0.028	0.007	0.007
3	$1.0e-13$	$1.0e-13$	$1.0e-13$	$1.0e-13$	$1.0e-13$	$1.0e-13$

Максимальне відхилення відгуків апроксимаційних моделей ОРС відповідних порядків N "Вранці" $\tilde{y}_{Nm}[m]$ і "Ввечері" $\tilde{y}_{Ne}[m]$ при різних значеннях амплітуд тестових сигналів наводяться в табл. 5.

Таблиця 5

Максимальне відхилення відгуків апроксимаційних моделей ОРС різних порядків N для станів респондента "Вранці" і "Ввечері" при різних значеннях амплітуд тестових сигналів a_1 , a_2 та a_3

N	a_1	a_2	a_3
1	0.01	0.02	0.03
2	0.018	0.022	0.043
3	0.013	0.027	0.045

Висновки. Розроблено методику та інструментальні програмні засоби побудови непараметричної динамічної моделі ОРС людини на основі даних експериментальних досліджень "вхід-вихід" із застосуванням тестових візуальних стимулів та інноваційної технології айтрекінгу. Здійснено експериментальні дослідження ОРС одного індивіда до початку та після робочого дня. На основі даних, отриманих за допомогою айтрекера, визначено перехідні функції 1-го, 2-го та 3-го порядків ОРС. Виявлено змінність перехідних функцій 2-го та 3-го

порядків для різних психофізіологічних станів індивіда (за рівнем втоми). Таким чином, моделі Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій можуть ефективно використовуватись в якості джерела первинних даних в діагностичних дослідженнях в області нейронаук та психології.

Список літератури:

1. Айтрекинг в психологической науке и практике / Отв. ред. *В.А. Барабанищikov*. – М.: Когито-Центр. 2015. – 410 с.
2. *Барабанищikov В.А.* Регистрация и анализ направленности взгляда человека / *В.А. Барабанищikov, А.В. Жегалло*. – М.: ИП РАН, 2013.
3. *Барабанищikov В.А.* Методы регистрации движений глаз в психологии: основы учебно-методического комплекса / *В.А. Барабанищikov, А.В. Жегалло* // Экспериментальная психология. – 2014. – № 1. – С. 132-137.
4. *Doyle F.J.* Identification and control using Volterra models / *F.J. Doyle, R.K. Pearson, B.A. Ogunnaike*. – Germany: Springer Publ, 2002. – 314 p.
5. *Jansson D.* Stochastic anomaly detection in eye-tracking data for quantification of motor symptoms in Parkinson's disease / *D. Jansson, A. Medvedev, H. Axelson, D. Nyholm* // *Advances in Experimental Medicine and Biology*. – 2015. – 823. – P. 63-82.
6. *Jansson D.* Parametric and Nonparametric Analysis of Eye-Tracking Data by Anomaly Detection / *D. Jansson, O. Rosén, A. Medvedev* // *IEEE Trans. Control Sys. Technol.* – 2015. – 23. – P. 1578-1586.
7. *Bro V.* Nonlinear Dynamics of the Human Smooth Pursuit System in Health and Disease: Model Structure and Parameter Estimation / *V. Bro, A. Medvedev* // *IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC), Melbourne, Australia, Dec. 12-15.* – 2017. – P. 4692-4697.
8. *Rigas I.* Biometric Recognition via the Complex Eye Movement Behavior and the Incorporation of Saccadic Vigor and Acceleration Cues / *I. Rigas, O. Komogortsev, R. Shadmehr* // *Trans. on Applied Perception*. – 2016. – 13 (2). – P. 1-21.
9. *Pavlenko V.D.* Identification of Human Eye-Motor System Base on Volterra Model / *V.D. Pavlenko, O.O. Fomin, A.N. Fedorova, M.M. Dombrovskiy* // *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling.* – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 74-85.
10. *Pavlenko V.* Estimation of the Multidimensional Transient Functions Oculo-Motor System of Human / *V. Pavlenko, D. Salata, M. Dombrovskiy, Yu. Maksymenko* // *Mathematical Methods and Computational Techniques in Science and Engineering: AIP Conf. Proc. MMCTSE 2017, Cambridge, UK, 24-26 February, Melville, New York.* – 2017. – Vol. 1872. – P. 110-117.
11. *Pavlenko V.D.* Identification of a Oculo-Motor System Human Based on Volterra Kernels / *V.D. Pavlenko, D.V. Salata, H.P. Chaikovskiy* // *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*. – 2017. – Vol. 11. – P. 121-126.
12. *Pavlenko V.* Estimation of the Multidimensional Dynamical Characteristic Eye-Motor System / *V. Pavlenko, I. Ivanov, E. Kravchenko* // *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017), 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania.* – 2017. – Vol. 2. – P. 645-650.
13. *Pavlenko V.* Nonlinear Dynamic Model of a Oculo-Motor System Human based on Volterra Kernels / *V. Pavlenko, D. Salata, Yu. Maksymenko* // *WSEAS Transactions on Systems.* – 2017. – P. 234-241.

14. Pavlenko V.D. Identification Eye-Motor System with Using Volterra Model / V.D. Pavlenko, D.V. Salata // System analysis and information technology: 19-th International conference SAIT 2017, Kyiv, Ukraine, May 22 – 25, Proceedings. ESC "IASA" NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". – 2017. – P. 28-31.
15. Pavlenko V. Constructing Nonlinear Dynamic Model of Oculo-Motor System based on Experimental Studies of Input-Output / V.D. Pavlenko, D.V. Salata // Proceedings of 4-th International Conference "Computational intelligence (Results, Problems and Perspectives)", (ComInt 2017), Taras Shevchenko National University of Kyiv, May 16-18. – 2017. – P. 184-185.
16. Pavlenko V. Deterministic Identification Methods for Nonlinear Dynamical Systems based on the Volterra Model / V. Pavlenko, S. Pavlenko // Applied Aspects of Information Technology. – 2018. – 01 (01). – P. 9-29.
17. Салата Д.В. Экспериментальные исследования глазодвигательной системы с помощью айтрекера ТОПИ PRO TX300 / Д.В. Салата, В.В. Чору, І. Mishchenko, В.Д. Павленко, М. Milosz, М. Dzienkowski // Матеріали VIII Міжнар. конф. студентів і молодих науковців "Сучасні інформаційні технології 2018" (MIT-2018), 23-25 травня 2018, Одеса, Україна. – Одеса: ОНПУ ІКС, 2018. – С. 38-43.

References:

1. Barabanschikov, V.A. (2015), *Eye-Tracking in psychological science and practice*, Ed. Moscow: Kogito Center, 410 p.
2. Barabanschikov, V.A., and Zhegallo, A.V. (2013), *Registration and analysis of the direction of the human gaze*, Moscow, IP RAS.
3. Barabanschikov, V.A., and Zhegallo, A.V. (2014), "Methods of eye movements in psychology: the bases of the education-methodological complex", *Experimental Psychology*, No. 1, pp. 132-137.
4. Doyle, F.J., Pearson, R.K., and Ogunnaike, B.A. (2002), *Identification and control using Volterra models*, Germany: Springer Publ., 314 p.
5. Jansson, D., Medvedev, A., Axelson, H., and Nyholm, D. (2015), "Stochastic anomaly detection in eye-tracking data for quantification of motor symptoms in Parkinson's disease", *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 823, pp. 63-82.
6. Jansson, D., Rosén, O., and Medvedev, A. (2015), "Parametric and Nonparametric Analysis of Eye-Tracking Data by Anomaly Detection", *IEEE Trans. Control Sys. Technol*, 23, pp. 1578-1586.
7. Bro, V., and Medvedev, A. (2017), "Nonlinear Dynamics of the Human Smooth Pursuit System in Health and Disease: Model Structure and Parameter Estimation", *IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, Melbourne, Australia, Dec. 12-15, pp. 4692-4697.
8. Rigas, I., Komogortsev, O., and Shadmehr, R. (2016), "Biometric Recognition via the Complex Eye Movement Behavior and the Incorporation of Saccadic Vigor and Acceleration Cues", *Trans. on Applied Perception*, 13 (2), pp. 1-21.
9. Pavlenko, V.D., Fomin, O.O., Fedorova, A.N., and Dombrovskiy, M.M. (2016), "Identification of Human Eye-Motor System Base on Volterra Model", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*, Kharkov: NTU "KhPI", 21 (1193), pp. 74-85.
10. Pavlenko, V., Salata, D., Dombrovskiy, M., and Maksymenko, Yu. (2017), "Estimation of the Multidimensional Transient Functions Oculo-Motor System of Human" *Mathematical Methods and Computational Techniques in Science and Engineering: AIP Conf. Proc. MMCTSE 2017*, Cambridge, UK, 24-26 February, Melville, New York, Vol. 1872, pp.110-117.

- 11.** Pavlenko, V.D., Salata, D.V., and Chaikovskiy, H.P. (2017), "Identification of a Oculo-Motor System Human Based on Volterra Kernels", *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*, Vol. 11., pp. 121-126.
- 12.** Pavlenko, V., Ivanov, I., and Kravchenko, E. (2017), "Estimation of the Multidimensional Dynamical Characteristic Eye-Motor System", *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2017)*, 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania, Vol. 2, pp. 645-650.
- 13.** Pavlenko, V., Salata, D., and Maksymenko, Yu. (2017), "Nonlinear Dynamic Model of a Oculo-Motor System Human based on Volterra Kernels", *WSEAS Transactions on Systems*, pp. 234-241.
- 14.** Pavlenko, V.D., and Salata, D.V. (2017), "Identification Eye-Motor System with Using Volterra Model", *System analysis and information technology: 19-th International conference SAIT 2017*, Kyiv, Ukraine, May 22 – 25, Proceedings. ESC "IASA" NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", pp. 28-31.
- 15.** Pavlenko, V., and Salata, D. (2017), "Constructing Nonlinear Dynamic Model of Oculo-Motor System based on Experimental Studies of Input-Output", *Proceedings of 4-th International Conference "Computational intelligence (Results, Problems and Perspectives)"*, (ComInt 2017), Taras Shevchenko National University of Kyiv, May 16-18, pp. 184-185.
- 16.** Pavlenko, V., and Pavlenko, S. (2018), "Deterministic Identification Methods for Nonlinear Dynamical Systems based on the Volterra Model", *Applied Aspects of Information Technology*, 01 (01), pp. 9-29.
- 17.** Salata, D., Chori, V., Mishchenko, I., Pavlenko, V., Milosz, M., and Dzienkowski, M. (2018), "Experimental studies of the oculo-motor system using the TOBII PRO TX300 eye-tracker", *8th Int. Conf. students and young scientists "Modern Information Technologies 2018"*, MIT-2018, May 23-25, 2018, Odessa, ONPU, ICS, pp.38-43.

Статью представил д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" В.И. Носков.

Поступила 30.04.2020

Pavlenko Vitaliy, Dr.Sci.Tech, Professor
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: +38(048) 705-8-436, e-mail: pavlenko_vitalij@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

Shamanina Tatyana, Magister
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: +38(093) 284-84-23, e-mail: tatanatv8@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-0864-3839

УДК 681.5.015.52

Побудова моделі Вольтерри око-рухової системи людини на основі даних айтрекінгу / Павленко В.Д., Шаманіна Т.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 1 (3). – С. 15 – 29.

Розроблено інструментальні, обчислювальні та програмні засоби побудови нелінійної динамічної моделі око-рухової системи (ОРС) людини на основі даних експериментів "вхід-вихід" з використанням тестових візуальних стимулів та інноваційної технології айтрекінгу. Для ідентифікації використовується модель Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій 1-го, 2-го та 3-го порядків, які враховують інерційні та нелінійні властивості ОРС. Розроблені в середовищі Matlab програмні засоби обробки даних айтрекінгу апробовано на реальних даних експериментального обстеження ОРС. Ил.: 12. Табл.: 5. Бібліогр.: 17 назв.

Ключові слова: око-рухова система; ідентифікація; модель Вольтерри; багатовимірні перехідні функції; тестові візуальні стимули; технологія айтрекінгу.

УДК 681.5.015.52

Построение модели Вольтерры глазо-двигательной системы человека на основе данных айтрекинга / Павленко В.Д., Шаманина Т.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2020. – № 1 (3). – С. 15 – 29.

Разработаны инструментальные, вычислительные и программные средства построения нелинейной динамической модели глазо-двигательной системы (ГДС) человека на основе данных экспериментов "вход-выход" с использованием тестовых визуальных стимулов и инновационной технологии айтрекинга. Для идентификации используется модель Вольтерры в виде многомерных переходных функций 1-го, 2-го и 3-го порядков, учитывающих инерционные и нелинейные свойства ГДС. Разработанные в среде Matlab программные средства обработки данных айтрекинга апробированы на реальных данных экспериментального исследования ГДС. Ил.: 12. Табл.: 5. Библиогр.: 17 назв.

Ключевые слова: глазо-двигательная система; идентификация; модель Вольтерры; многомерные переходные функции; тестовые визуальные стимулы; технология айтрекинга.

UDC 681.5.015.52

Constructing of the Volterra model of human oculomotor system based on the Eye tracking data / Pavlenko V.D., Shamanina T.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2020. – № 1 (3). – P. 15 – 29.

Instrumental computing and software tools have been developed for constructing a nonlinear dynamic model of the human oculomotor system (OMS) based on the data of input-output experiments using test visual stimuli and innovative technology Eye-tracking. For identification the Volterra model is used in the form of multidimensional transition functions of the 1st, 2nd and 3rd orders, taking into account the inertial and nonlinear properties of the OMS. Software tools for processing Eye-tracking data developed in the Matlab environment are tested on real data from an experimental study of OMS. Figs.: 12. Tabl.: 5. Refs.: 17 titles.

Keywords: oculomotor system; identification; Volterra model; multidimensional transient functions; test visual stimuli; Eye-tracking technology.