

**АНАЛІЗ ВТОМИ НАВИГАТОРІВ ЯК ФАКТОРУ ВПЛИВУ
НА ЕРГАТИЧНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СУДНОМ**

А. П. Бень, П. С. Носов*, С. М. Зінченко*, І. С. Попович***

**Херсонська державна морська академія, **Херсонський державний
університет*

**ANALYSIS OF NAVIGATOR FATIGUE AS A FACTOR OF INFLUENCE
ON ERGATIC VESSEL CONTROL SYSTEMS**

A. P. Ben, P. S. Nosov*, S. M. Zinchenko*, I. S. Popovych***

**Kherson State Maritime Academy, **Kherson State University*

**АНАЛИЗ УСТАЛОСТИ НАВИГАТОРОВ КАК ФАКТОРА ВЛИЯНИЯ
НА ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ**

А. П. Бень, П. С. Носов*, С. Н. Зинченко*, И. С. Попович***

**Херсонская государственная морская академия, **Херсонский
государственный университет*

Вступ. Одним з найбільш значущих причин виникнення негативного людського фактора на морському транспорті є показник втоми як у кадетів, так і у професійних моряків-судноводіїв [1–3]. Багато досліджень сконцентровані на управлінні режимами робот при несенні навігаційної вахти [4–7], однак досліджень про безпосередні показники втоми кадетів при несенні вахти в реальному часі вкрай мало. У той же час, ряд психологічних і медичних робіт у цьому напрямку вказує на неоднорідність прояви втоми у часі, що значно підвищує ступінь невизначеності у науковому пошуку.

У дослідженні розглядається альтернативний варіант ідентифікації втоми у кадетів в ході виконання складних навігаційних завдань на капітанському містку за непрямыми ознаками [8–10]. В ході експериментального аналізу поведінки кадетів-судноводіїв протягом чотирьох років увагу нашої наукової групи привернуло положення постави при роботі з навігаційними приладами, а також швидкість реакції при виконанні елементарних дій. Застосування датчиків-акселерометрів у вигляді екзо-хребта значно спростило визначення положення постави у кадетів в просторі у режимі реального часу, а автоматизований аналіз мікро-реакцій, дозволив підійти до результатів дослідження диференційовано [11].

Постановка завдання. У даному дослідженні розглядається підхід ідентифікації фактору втоми навігаторів з метою запобігання можливих негативних впливів на ергатичну систему управління судном. Таким чином, основним завданням є метод відображення даних про порушення постави судноводія як непрямої ознаки втоми, що дозволить попередити затухання реакцій і підвищити швидкість прийняття відповідальних рішень при несенні навігаційної вахти на капітанському містку.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. У цьому контексті екзо-хребет являє собою динамічну систему, що визначається рядом параметрів. Дані параметри можна представити як обмежувачі системи. Якщо розглядати даний підхід в рамках формальних досліджень [12], то найбільш значущими компонентами системи будуть: l – кут викривлення між суміжними плечима щодо екзо-хребця судноводія під час виконання маневру; m – складність виконуваного маневру; H – коефіцієнт втоми на даний момент часу i .

Тоді даний набір компонент, $\xi = \{l_i, m_i, H_i\} \in \Xi \subseteq E_N$, $i = 1, \dots, n$ має місце в умовах існування випадкового фактору моделі $\omega = q^0 \in Q \mid q = (q_1, \dots, q_n) \in Q_n$, що представляє початкове положення екзо-скелета судноводія в просторі [13].

Однак на відміну від штучних систем, динамічна система хребта судноводія не може відповідати формальній моделі градієнта такого, що: $g(\omega) = (q^0, 0) \in E_{2n}$, $\Phi^0(\xi, z) = C\|z\|^2$ при фазовому векторі системи, $z = (q, \dot{q}) \in Q_n \times \dot{Q}_n = Z \subseteq E_{2n}$ і штрафній константі C .

З кожним дискретним часовим етапом параметри системи змінюються в нелінійній залежності щодо фізіологічних особливостей судноводія під впливом ряду зовнішніх і внутрішніх факторів.

Залежно від положення судноводія автоматизована система дозволяє отримати інформацію, з яким навігаційним приладом він працює. Тому в ряді подібних ситуацій можна з достатнім ступенем впевненості стверджувати, що те чи інше відхилення постави буде нормальним, але на короткий проміжок часу, бо приладова панель знаходиться внизу. У той же самий час відслідковуються фактори, що безпосередньо впливають на психоемоційний стан судноводія [14], такі як пульс і температура тіла в сукупності зі швидкістю виконання маніпуляцій з джойстиком, кнопками і сенсорними панелями ECDIS, ARPA, GPS та інше.

Згідно з дослідженнями професора Поповича І. [15, 16], усвідомленого складного дії судноводія передуює план, що представляє ряд етапів впливу $u = \{u \in E_n \mid |u_i| \leq u'_i, i = 1, \dots, n\}$ на об'єкти управління судном в певний момент часу $u(t) \in V$. Визначивши множину допустимих керуючих впливів з боку судноводія у виді $X \times Y$, $x \in X$, такого, що $Y(x) \subseteq Y \subset E_m$, буде справедлива модель, $q(x) = \max_{y \in Y(x)} f^0(x, y) \rightarrow \min_{x \in X}$, де y – вертикальна вісь положення екзо-скелета, а x – горизонтальна.

Виклад основного матеріалу. Припустимо, що судноводій виконує маневр і звертається до навігаційних приладів та елементів управління. При цьому він сам визначає траєкторію і послідовність переходів відносно як свого досвіду, так і моделі поведінки у схожих ситуаціях. Таким чином формується план дій, який видається найбільш вигідним і результативним у даній конкретній ситуації [17]. Існують підходи, які дозволяють ідентифікувати траєкторії переходів і відслідковувати індивідуальні послідовності дій [18]. Але виникає проблема порівняння і класифікації таких траєкторій визначення їх

результативності на ранніх етапах виконання маневру. Отже передбачається, що основним фактором є показник часу взаємодії з навігаційними приладами або елементами управління.

Проведені експерименти з використанням TRANSAS NAVIGATIONAL SIMULATOR NTPRO 5000 of Kherson State Maritime Academy (Ukraine) із залученням досвідчених судноводіїв дозволили зробити висновок, що їх моделі поведінки успадковуються і рідко трансформуються в нові форми незалежно від локації і погодних умов. У той же час фактор втоми вносить значні зміни в поведінку судноводія і є відмінним від інших факторів за силою і ступенем впливу на кінцевий результат [19].

Розглянемо застосування даного підходу на експериментальних даних за допомогою аналізу log-файлів з сервера симулятора локації «Англійський канал». Так, траєкторія переходів характеризується 9 етапами, кожен з яких визначено часом фіксації уваги або затратами часу на керуючі маніпуляції (управління кермом, машинним телеграфом, підрулюючими пристроями, навігаційними сигналами та ін.).

Для визначення моделі поведінки окремого судноводія необхідно оперувати числом траєкторій виконання однотипного маневру як мінімум від 5 до 9. Для проведення експерименту було проаналізовано 11 траєкторій за участю одного і того ж судноводія і виконання типового маневру в різних локаціях. Для найбільшої наочності було розглянуто маневр з швартових операцій. Тимчасові діапазони роботи з об'єктами траєкторії мають 2–3 рівня уповільнення, що свідчить про наявність невідповідного супутнього фактору, що впливає на часові показники виконання маневру.

Для наочності зручно представити дану траєкторію у вигляді графа, отже опишемо особливості його побудови. Змінні графа представляють собою інтегральний показник готовності до виконання етапу маневру s_i і залежать як від втоми, ідентифікованої на основі показань викривлення екзо-скелета, так і від індивідуального порогу сприйняття навігаційної небезпеки:

α – реакція швидкого переходу до наступного елемента траєкторії;

β – показник втоми при викривленні постави;

γ – показник втоми при уповільненні реакції.

Переходи між етапами траєкторії s_i можуть бути як односпрямованими в разі реакції α , так і зворотними при наявності показників β або γ . Провівши експеримент, були визначені такі ситуації, коли судноводій повертається до елемента траєкторії за браком сприйнятої інформації або зміни стратегії управління. Така поведінка судноводія характерна при неявному формуванні плану дій на найближчий відрізок часу. При цьому метою дослідження є автоматизована ідентифікація подібних явищ, що дасть можливість визначити вплив людського фактору за неявними ознаками.

Для більш детального аналізу введемо рівні етапів, що характеризують взаємодію судноводіїв з навігаційними приладами і об'єктами локації (рис. 1). Дані рівні будуть відрізнятися за складністю від найменш складного l_1 до найбільш трудомісткого l_4 :

- l_1 – візуальне сприйняття ситуації;
- l_2 – аналіз поточних даних навігаційних приладів;
- l_3 – виконання маневрів (управління кермом, машинним телеграфом, підрулюючими пристроями, навігаційними сигналами та ін.);
- l_4 – розбіжність з цілями, швартування, розрахунок складних маневрів.

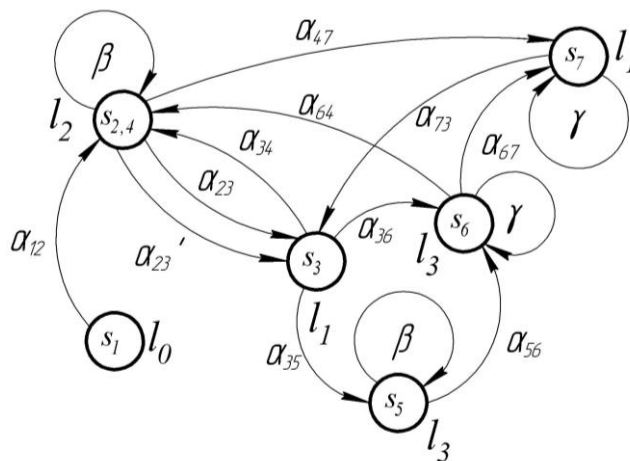
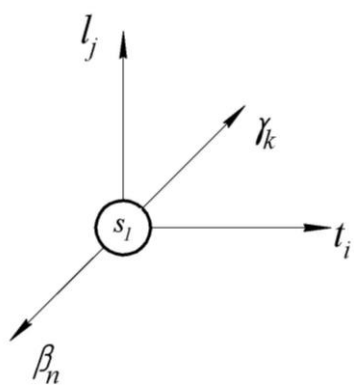
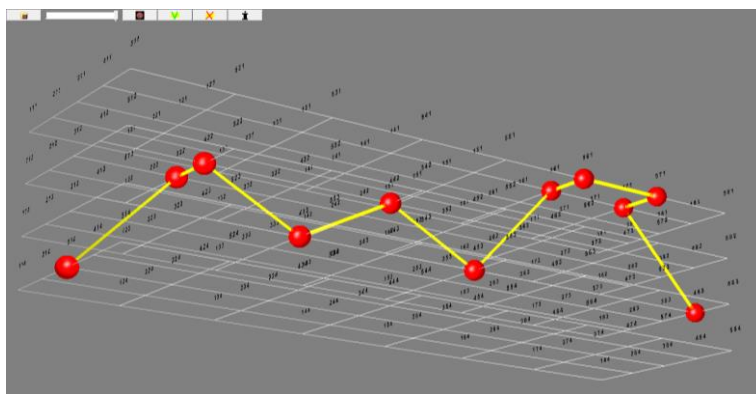


Рис. 1 – Визначення змінних у класичному графі

Таким чином, в ході дослідження було прийнято, що використання класичного графа недоцільно з огляду на те, що кожен елемент траєкторії вже не є тим же, що був у момент t_{i-1} . Все це обумовлено фактом зміни стану в томи судноводія і витрачених сил, тому доцільно застосовувати інтерпретацію запропонованого розгорнутого у часі графа, зазначеного на даному рисунку. Новий підхід особливо справедливий в ситуаціях, дослідження яких передбачає наявність тимчасових інтервалів для переходів, що явно простежується в даній статті [20]. У звичній інтерпретації не представляється можливим вказати визначник часу, якщо до елементу траєкторії виконується зворотне звернення. Також залишається проблемою, коли у циклі вказана одна або дві змінні, черговість і часовий діапазон впливу яких неявно виражені. У цьому випадку зручно застосувати третю вісь, яка дозволить з достатньою точністю визначити всі часові інтервали щодо активних елементів траєкторії. Тоді графічна інтерпретація буде описуватися наступної геометричною системою (рис. 2).



а



б

Рис. 2 – Трьох осьова геометрична система для побудови графа

Очевидно, що багатоетапні траєкторії у значній мірі важко описувати графом на площині без спеціально розроблених програмних засобів візуалізації. У зв'язку з цим було розроблено програмно-інструментальний засіб візуалізації траєкторій, що задовольняє зазначеним особливостям впровадження як часових показників, так і показників втоми (рис. 3).

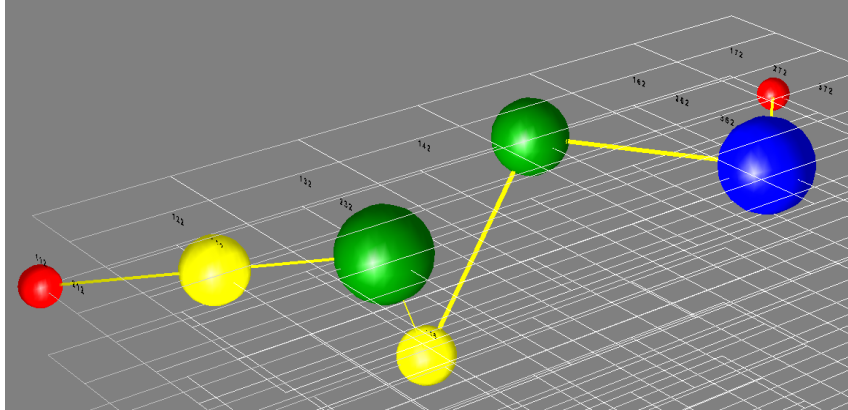


Рис. 3 – Візуалізація роботи програмного засобу

Висновки. В якості вирішення в першу чергу пропонується автоматизована геометрична апроксимація траєкторії, яка дозволяє управляти швидкістю переходу між її елементами у вигляді товщини і часом у вигляді діаметра вузла.

В ході експериментів у ряді випадків, пов'язаних з підвищеним загостренням навігаційної обстановки, особливо при негативному впливі відповідних факторів, підтвердилися часті повернення до попередніх елементів траєкторії, які свідчать про втрату впевненості у своїх діях з боку судноводія. При цьому у разі впевненого сприйняття навігаційної ситуації, коли судноводій з високим ступенем достовірності сприймає інформаційні параметри ψ , на вузлі x маємо $B(x, \varphi)$. Тоді на момент часу t_{x+1} формування зв'язків між в контексті вузла x буде розвиватися на підставі наступних принципів:

$$L_S(x, \varphi) \wedge \bigcirc B(x, \neg \varphi) \Rightarrow B(x, \varphi)$$

$$L_S(x, \varphi) \wedge \neg \bigcirc B(x, \neg \varphi) \Rightarrow B(x, \varphi)$$

$$\neg L_S(x, \varphi) \wedge \neg \bigcirc (B(x, \neg \varphi) \Rightarrow B(x, \varphi)) \Rightarrow B(x, \neg \varphi)$$

$$L_S(x, \varphi) \wedge \bigcirc B(x, \neg \varphi) \Rightarrow \neg B(x, \varphi)$$

При цьому $K(x, \varphi)$ свідчить про те, що судноводій знає про інформацію φ на вузлі x , тобто $\bigcirc B(x, \neg \varphi) \equiv \perp$, що також визначає ряд правил формування

$$\text{знань: } \bigwedge_{i=1}^{\omega} [L_S(x, \varphi) \wedge B(x, \varphi) \wedge L_E(x, \varphi)]_i \Rightarrow K(x, \varphi),$$

$$\bigwedge_{i=1}^{\omega} [\neg L_S(x, \neg \varphi) \wedge B(x, \neg \varphi) \wedge L_E(x, \neg \varphi)]_i \Rightarrow K(x, \neg \varphi),$$

$$\bigwedge_{i=1}^{\omega} [L_S(x, \neg \varphi) \wedge \neg B(x, \neg \varphi) \wedge \neg L_E(x, \neg \varphi)]_i \Rightarrow \neg K(x, \neg \varphi).$$

Отже, можна стверджувати, що кінцевою метою X є виконання послідовності дій-елементів траєкторії судноводієм, при цьому існує ряд умов Ψ , що визначають $\Box X$, і умови Φ для $\Diamond X$. Проходження всього запланованого маршруту буде виражатися наміром $\Box G(X, \Phi, \Psi)$, таким, що:

$$\Box G(X, \Phi, \Psi) \equiv B(X, \neg \Phi) \wedge G(X, \Diamond \Psi) \wedge \\ \wedge K\left(X, \left[\left(B(X, \Phi) \vee B(X, \neg \Box \Phi) \vee B(X, \neg \Psi) \right) \right] \right)$$

У свою чергу успішне проходження траєкторії може бути описано:

$$\Box G(X, \Phi, \Psi)' \equiv B(X, \neg \Phi) \wedge G(X, \Diamond \Psi) \wedge \\ \wedge K\left(X, \left[\left(B(X, \Phi) \vee B(X, \neg \Box \Phi) \vee B(X, \neg \Psi) \right) \cup \left(G(X, \Diamond \Psi) \right) \right] \right)$$

Таким чином, для управління безпекою судноводіння в ряді ситуацій довгу траєкторію доцільно розділити на однорідні фрагменти що характеризуються високою активністю прийнятих рішень, кожне з яких буде відділятися часовим інтервалом $t_{(\Delta+m)}$, де m – число відрізків глобальної траєкторії. При цьому приймемо, що якщо первинні фрагменти траєкторії подолані успішно, то формуються переконання судноводія, описані умовами в майбутньому $\bigcirc G(x, \varphi)$.

Література

1. Keller, M., Ziriach, J.M., Barns, W., Sheffield, B., Brungart, D., Thomas, T., Jaeger, B., Yankaskas, K.: Performance in Noise: Impact of Reduced Speech Intelligibility on Sailor Performance in a Navy Command and Control Environment. *Hearing Research* 349, 55–66 (2016). [doi:10.1016/j.heares.2016.10.007](https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.10.007)
2. Jones, C. B., Dorrian, J., Rajaratnam, S. M. W., Dawson, D.: Working hours regulations and fatigue in transportation: A comparative analysis. *Safety Science* 43(4), 225–252 (2005). [doi:10.1016/j.ssci.2005.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.06.001)
3. Bal E., Arslan, O., Tavacioglu, L.: Prioritization of the causal factors of fatigue in seafarers and measurement of fatigue with the application of the Lactate Test. *Safety Science* 72, 46–54 (2015). [doi:10.1016/j.ssci.2014.08.003](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.003)
4. Nosov P., Ben A., Safonova A., Palamarchuk I. Approaches going to determination periods of the human factor of navigators during supernumerary situations // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – № 2 (49). – 2019. – P. 140–150. Web of Science. [DOI:10.15588/1607-3274-2019-2-15](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-2-15).
5. Nosov P., Palamarchuk I., Zinchenko S., Popovych I., Nahrybelnyi Y., Nosova H. Development of means for experimental identification of navigator attention in ergatic systems of maritime transport // *Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics*, 2020. – № 1 (97). – P. 58–69. [DOI: 10.31489/2020Ph1/58-69](https://doi.org/10.31489/2020Ph1/58-69).
6. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mateichuk V. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. Use of navigation simulator for development and testing ship control systems.

МНПК пам'яті професорів Фоміна Ю. Я. і Семенова В. С. (FS-2019), 24–28 квітня 2019, Одеса – Стамбул – Одеса. Р. 350–355.

7. Pavlo Nosov, Ihor Popovych, Serhii Zinchenko, Vasyl Cherniavskiy, Viktor Plokhikh, Halyna Nosova (2020). The research on anticipation of vessel captains by the space of Kelly's graph. *Revista Inclusiones*, Vol: 7 num Especial, pp. 90–103.

8. Serhii Zinchenko, Oleh Tovstokoryi, Pavlo Nosov, Ihor Popovych, Vitaliy Kobets, Gennadii Abramov. Mathematical support of the vessel information and risk control systems // *CEUR Workshop Proceedings*, 2805. <http://ceur-ws.org/Vol-2805/paper25.pdf>.

9. Nosov P. S., Palamarchuk I.V., Safonov M.S., Novikov V.I. Modeling the manifestation of the human factor of the maritime crew // *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) № 5 (77)*. – 2018. Pages 82-92. <https://doi.org/10.15802/stp2018/147937>

10. Nosov P. S., Zinchenko S. M., Popovych I. S., Ben A. P., Nahrybelnyi Y. A., Mateichuk V. M. Diagnostic system of perception of navigation danger when implementation complicated maneuvers // *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020. – № 1. – P. 146–161. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-15>.

11. Косенко Ю. І., Носов П. С. Механізми ідентифікації та трансформації «знань» суб'єкта критичної інфраструктури // *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. Збірник наукових праць [Текст]*. – Вип. 3 (4). – Одеса: Наука і техніка, 2013. – С. 99–104.

12. de Blasiis, K., Mauvieux, B., Elsworth-Edelsten, C., Pez , T., Jouffroy, R., Hurdiel, R.: Photoperiod Impact on a Sailor's Sleep-Wake Rhythm and Core Body Temperature in Polar Environment. *Wilderness & Environmental Medicine* 30 (4), 343–350 (2019). <https://doi:10.1016/j.wem.2019.06.001>.

13. Nosov P. S., Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Prokopchuk Y. A., Makarchuk D. V. Automated identification of an operator anticipation on marine transport // *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020. – № 3. – P. 158–172. DOI: [10.15588/1607-3274-2020-3-15](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-15).

14. Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Dudchenko S. V., Zinchenko S. M., Nosov P. S., Yevdokimova O. O., Burak O. O. & Mateichuk V. M. (2020). Experimental Research of Effective “The Ship's Captain and the Pilot” Interaction Formation by Means of Training Technologies. *Revista ESPACIOS*, Vol. 41 (№ 11). P. 30.

15. Shevchenko, R., Cherniavskiy, V., Zinchenko, S., Palchynska, M., Bondarevich, S., Nosov, P. & Popovych, I. (2020). Research of psychophysiological characteristics of response to stress situations by future sailors. *Revista Inclusiones*, Vol: 7 num Especial. pp. 566–579.

16. Nosov P., Ben, A., Zinchenko S., Popovych I., Mateichuk V., Nosova H. Formal approaches to identify cadet fatigue factors by means of marine navigation simulators. *CEUR Workshop Proceedings*, 2732, 823–838 (2020).

17. Nosov P., Cherniavskiy V., Zinchenko S., Popovych I., Prokopchuk Y., Safonov M. Identification of distortion of the navigator's time in model experiment //

Bulletin of University of Karaganda. Instrument and experimental techniques, 2020. – № 4 (100). – P. 57–70. DOI:10.31489/2020Ph4/57-70.

18. Wu, S., Vera, A.H.: Capability considerations for enhancing safety on long duration crewed missions: Insights from a technical interchange meeting on autonomous crew operations. Journal of Space Safety Engineering, 7 (1), 78–82 (2020). doi:10.1016/j.jsse.2020.02.001.

19. Hu, X., Lodewijks, G.: Detecting fatigue in car drivers and aircraft pilots by using noninvasive measures: The value of differentiation of sleepiness and mental fatigue. Journal of Safety Research 72, 173–187 (2020). doi:10.1016/j.jsr.2019.12.015.

20. Ben, A.: Methods for constructing intelligent adaptive interfaces “man – computerized system” based on the user model. Master’s thesis, Kherson State Technical University (2000).

Відомості про авторів

Бень Андрій Павлович – к.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Херсонська державна морська академія. E-mail: a_ben@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-3489>.

Носов Павло Сергійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія. E-mail: pason@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5067-9766>.

Зінченко Сергій Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія. E-mail: srz56@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5012-5029>.

Попович Ігор Степанович – д.психол.н., професор, професор кафедри загальної та соціальної психології, Херсонський державний університет. E-mail: ihorpopovych999@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1663-111X>.

Information about authors

Ben Andrii Pavlovych – Ph.D., Professor, Vice-Rector for Research and Teaching, Kherson State Maritime Academy. E-mail: a_ben@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-3489>.

Nosov Pavlo Serhiiovych – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Navigation, Kherson State Maritime Academy. Email: pason@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5067-9766>.

Zinchenko Serhii Mykolaiovych – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Ship Management, Kherson State Maritime Academy. Email: srz56@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5012-5029>.

Popovych Ihor Stepanovych – Doctor of Psychology, Professor, Professor of General and Social Psychology, Kherson State University. Email: ihorpopovych999@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1663-111X>.

Сведения об авторах

Бень Андрей Павлович – к.т.н., профессор, проректор по научно-педагогической работе, Херсонская государственная морская академия. E-mail: a_ben@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-3489>

Носов Павел Сергеевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры судовождения, Херсонская государственная морская академия. E-mail: pason@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5067-9766>

Зинченко Сергей Николаевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры управления судном, Херсонская государственная морская академия. E-mail: srz56@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5012-5029>

Попович Игорь Степанович – д.психол.н., профессор, профессор кафедры общей и социальной психологии, Херсонский государственный университет. E-mail: ihorpopovych999@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1663-111X>