

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНИХ СТАНІВ
СУДНОВОДІЯ ПІД ВПЛИВОМ ВТОМИ ТА СТРЕСУ****Херсонська державна морська академія**

e-mail: alekseykoretsky@gmail.com

1. Вступ

Втома є однією з головних причин аварій у морських перевезеннях[1, 2]. Вона виникає під впливом стресу, тривалого перебування на борту, циркадних ритмів та недостатнього відпочинку, що поступово виснажує організм штурманів.

За даними ЕМСР[3], у понад 13% випадків людських помилок під час аварій виявлено вплив втоми, особливо у нічний час через зниження концентрації, по-милкове відключення систем безпеки та невикористання навігаційних технологій.

Попри існуючі дослідження та Конвенцію MLC 2006, більшість методів оцінки базуються на суб'єктивних опитуваннях, що не дозволяє своєчасно виявити проблему [4, 5]. Запропоновані алгоритми фіксації фізіологічних ознак поки що непридатні для морської галузі[6].

Отже, першочерговим завданням є створення автоматизованих систем прогнозування та виявлення втоми, здатних підвищити рівень безпеки морських перевезень.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

Офіційне визначення втоми як тимчасового зниження працездатності має суттєві недоліки [2], бо не враховує індивідуальні особливості та базується переважно на суб'єктивних самооцінках, які не завжди точні [1]. Більшість існуючих методів виявляють втому вже на пізніх стадіях, коли попередити критичні ситуації майже неможливо [7]. Серед запропонованих заходів боротьби – жорсткіший контроль робочого часу,

достатня укомплектованість вахтових змін, покращення командної взаємодії та безперервне використання систем електронної навігації без відключення функцій безпеки.

Сучасні досліді пропонують різні альтернативні підходи: аналіз мовних параметрів, рухів очей, електроенцефалографії, частоти серцевих скорочень, а також використання машинного навчання та розпізнавання міміки[8, 9]. Деякі методи дозволяють виявити втому за декілька хвилин до появи її видимих проявів. Проте значна частина таких рішень непридатна для морської сфери через її специфіку[10, 11].

Умови роботи моряків характеризуються поєднанням фізичних, когнітивних, інформаційних та емоційних навантажень[12, 13]. У таких умовах втому посилюють стрес, тривале перебування на борту та циркадні ритми [14]. Це обумовлює потребу у створенні спеціалізованих автоматизованих систем моніторингу, що здатні в режимі реального часу виявляти ранні ознаки втоми, прогнозувати ризики та підвищувати безпеку судноводіння.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка інноваційного методу своєчасного виявлення ознак втоми шляхом автоматизованого моніторингу стану штурмана як ключового елемента безпеки судноплавства. Такий підхід дозволить у режимі реального часу ідентифікувати вплив циркадних ритмів, тривалого перебування на борту, адаптаційних процесів, а також безпосередніх проявів втоми та стресу, що створить можливість завчасно виявляти негативний вплив

людського фактора на прийняття рішень у критичних ситуаціях та знизить ризик морських аварій.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

1. Розробити та протестувати мультиплікативну модель прогнозування частоти серцевих скорочень із урахуванням циркадних коливань, використовуючи середнє значення скоригованого тренду та коефіцієнт кореляції.
2. Провести імітаційне моделювання й створити метод аналізу індивідуальної фізіологічної активності штурмана за допомогою площини стану та поліномів із застосуванням робастної регресії Тьюкі в MATLAB.
3. Дослідити поведінку суднового оператора статистичними методами прогнозування як чинник, що впливає на безпеку морських перевезень.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого моніторингу психофізіологічних параметрів штурмана під час вахти, що зазнають впливу стресу та втоми.

Гіпотеза дослідження полягає у тому, що застосування інноваційних автоматизованих методів — зокрема мультиплікативних моделей, робастної регресії дозволить вчасно виявляти ранні ознаки втоми, прогнозувати критичні ситуації та знижувати ризики аварій у морському транспорті.

Важливим елементом є розробка математичних моделей, які інтегрують біологічні показники, зокрема циркадні ритми та параметри втоми, у єдину систему аналізу. Це забезпечує не лише виявлення небезпечних змін у стані штурмана в реальному часі, а й прогнозування можливих аварійних сценаріїв для підтримки прийняття рішень.

Особливу увагу приділено адаптивності моделей до змінних умов роботи судна та індивідуальних характеристик членів екіпажу. Використання даних сенсорів і біометричних вимірювань дозволяє формувати динамічний профіль штурмана, що відображає як поточний стан, так і історію змін показників втоми.

Результати дослідження впливу психофізіологічного стану штурмана на безпеку руху судна

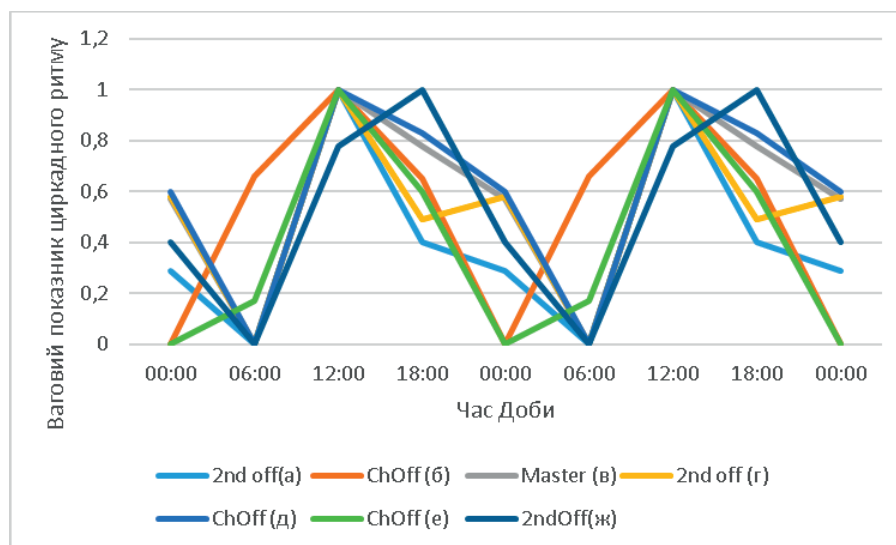


Рис 1. Циркадні ритми

5. Викладення основного матеріалу.

Циркадний ритм - біологічний годинник людини, що регулює добовий цикл активності. Для виявлення його хронологічного впливу на кожного приймаючого участь в експерименті взяли спостереження ЧСС за період від 15 до 46 діб, і кожен день розбили на шестигодинні проміжки. Розрахувавши середнє ЧСС для кожного моменту часу отримали вибірки для 00:00 годин, 06:00 годин, 12:00 годин та 18:00 годин. Скориставшись методом лінійної інтерполяції визначили вагові коефіцієнти для циркадного ритма від 0 до 1 і побудували графіки.

$$f(x) = f(x_1) + (x - x_1) \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

Проаналізували отримані вибірки на значущість за критерієм Стюдента за формулою для однакових вибірок:

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}} \quad (2)$$

де M_1, M_2 – середньоарифметичне вибірки, σ_1, σ_2 – стандартні відхилення, а N_1, N_2 – розміри вибірок [15]:

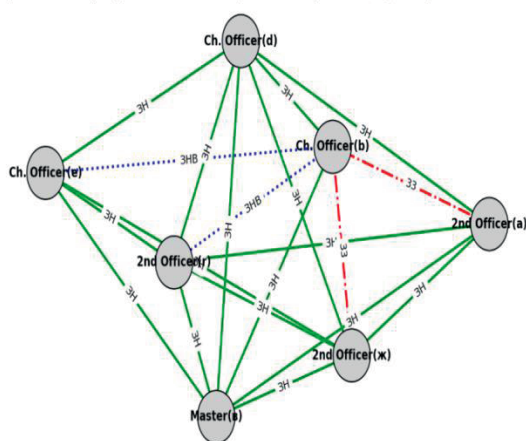


Рис 2. Розподіл циркадних ритмів за критерієм Стюдента. 3Н-Зона незначущості, 33-Зона значущості, 3НВ-Зона невизначеності

Статистично циркадні ритми відрізняються незначно, і їх можна було визнати однаковими, але відмінності,

якими нехтують спираючись на статистику, не завжди можна ігнорувати з фізіологічної точки зору. Через це прийнято використовувати графічне моделювання [16]. На графіку(1) чітко видно, що кожен з респондентів має свої особливі тенденції зміни станів, а також час максимумів та мінімумів активності, а отже і час прояву втоми буде різним.

5.1. Розробка та формалізація методу мультиплікативного прогнозування рівня ЧСС судноводія із врахуванням фізіологічних особливостей циркадного ритму

З літератури відомо що основний параметер організму це стан спокою на який впливають різні фактори: стрес, час перебування на судні, втома особисті адаптивні особливості, циркадний ритм [6]. Циркадний ритм задає добову тенденцію активності організму, а фізіологічні отклики організму завжди пов'язані між собою, на цій циклічності, щоб виявити генеральний стан спокою, побудовано часові ряди і проаналізовано їх як мультиплікаційний ряд [15].

Загальний вигляд мультиплікативної моделі:

$$Y = TSE, \quad (3)$$

Де Y - значення ЧСС в момент часу, а кожен рівень часового ряду представлений як добуток тренду (T), сезонної (S) і випадкової (E) компонент.

Розрахунок компоненти ряду зміни фізіологічного параметру ЧСС:

1) Ковзне середнє $\bar{y}_n$ для всіх моментів часу щоб позбавитись сезонної компоненти

$$\bar{y}_n = \frac{y_t + y_{t+1}}{2}, \quad (4)$$

де y_t - показник ЧСС для першого моменту часу, а y_{t+1} - показник для слідуєчого моменту періоду n .

Приведення значень у відповідність до фактичних моментів часу, для чого знайдено середні значення з двох послідовних ковзних середніх - центровані ковзні середні $\bar{y}'_n$

$$\bar{y}'_n = \frac{\bar{y}_{n_1} + \bar{y}_{n_2}}{m}, \quad (5)$$

де n_1 та n_2 - період часу, а m - кількість послідовних спостережень.

2) Оцінки сезонної компоненти як частки від ділення фактичних рівнів ряду

на центровані ковзні середні $y_t / \bar{y}_n$ використовуються для розрахунку сезонної компоненти S . Для цього знайдено середні за кожен період оцінки сезонної компоненти S_j . Сезонні впливи за період взаємопогашаються.

Середньої оцінки сезонної компоненти

$$\bar{S}_i = \sum_n^{n+1} \left(\frac{y_t}{\bar{y}_n} \right) / n + 1 \quad (6)$$

Скорегована сезонна компонента

$$S_i = \bar{S}_i \cdot k \quad (7)$$

У мультиплікативній моделі сума значень сезонної компоненти має дорівнювати числу періодів у циклі.

4. Коефіцієнт кореляції розраховали як

$$k = \frac{4}{\sum_n^{n+1} \left(\frac{y_t}{\bar{y}_n} \right) / n + 1_p}, \quad (8)$$

де $p = 1 \dots 4$.

Поділивши кожен рівень вихідного ряду на відповідні значення сезонної компоненти отримо величини $T \times E = Y / S$, що містять лише тенденцію і випадкову компоненту.

Знайдено параметри рівняння методом найменших квадратів.

$$a_0 n + a_1 + \sum t = \sum y, a_0 \sum t + a_1 \sum t^2 = \sum y t \quad (9)$$

Де a_0 - вільний член який представляє собою очікуване значення залежної змінної y , коли всі незалежні змінні x дорівнюють нулю

З першого рівняння знайдено a_0 , підставлено в рівняння (2) та отримано значення a та b . Розраховано середнє значення y за формулою:

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{m} \quad (10)$$

де m - кількість спостережень.

Компоненту T для моделі визначено методом аналітичного вирівнювання ряду $(T + E)$ за допомогою лінійного тренду, та отримано дані аналітичного вирівнювання, $a + bt$. Тренд показує загальний стан фізіологічного параметру у стані спокою. Підставляючи в це рівняння значення $t = 1, \dots, 100$, знайдено рівні T для кожного моменту часу.

Розраховали рівні ряду, помноживши значення T на відповідні значення сезонної компоненти. Знаходження помилки в мультиплікативній моделі проводиться за формулою:

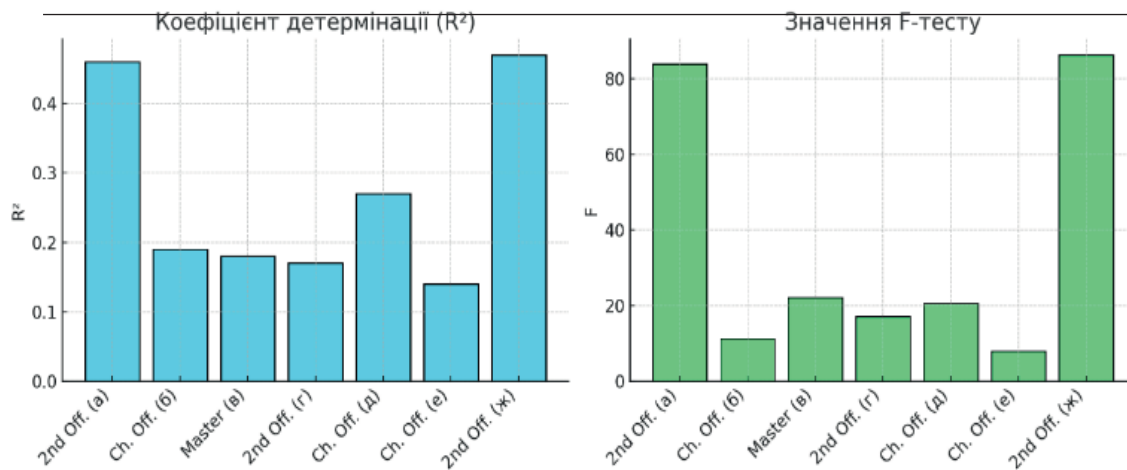
$$E = \sum Y / (TS) = 100 \quad (11)$$

Коефіцієнт детермінації R^2 - статистичу міру згоди, що визначає наскільки модель лінійної регресії відповідає даним, на яких її побудовано, та критерій Фішера F , що застосовують для перевірки дисперсії вибірок розраховано за формулами:

$$R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (12)$$

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m} \quad (13)$$

Рис 3 Коефіцієнти детермінації та критерію Фішера для приймаючих участь в експерименті



Прогнозне значення F_t рівня часового ряду в мультиплікативній моделі є добуток тренду та сезонної компонент. Для визначення тренду скористались рівнянням :

$$T = a + bx \quad (14)$$

Враховуючи, що для всіх випадків маємо $F > F_{kp}$ визнаємо, що показники мультиплікативної моделі статистично значущі і показують стан об'єкту в 14 - 47% випадків (Рис. 4).

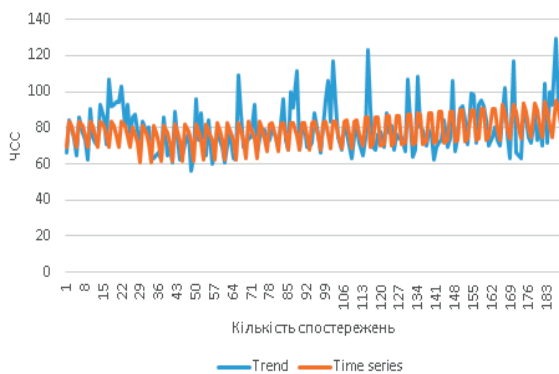


Рис 4. Тренд станів навігаційного помічника.

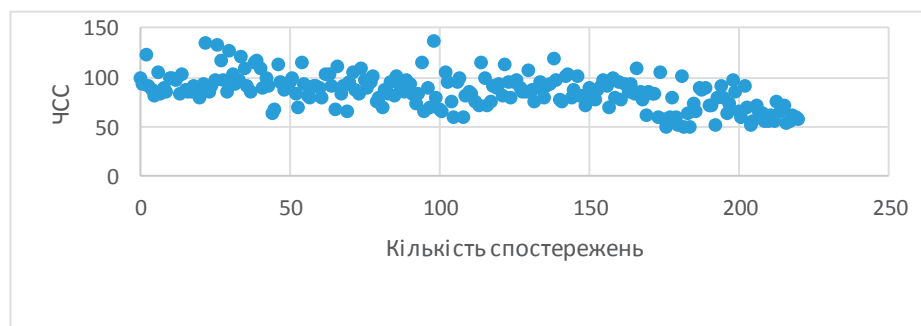
Для дослідження залежності в фізіології найчастіше використовують експоненціальні виміри [16].

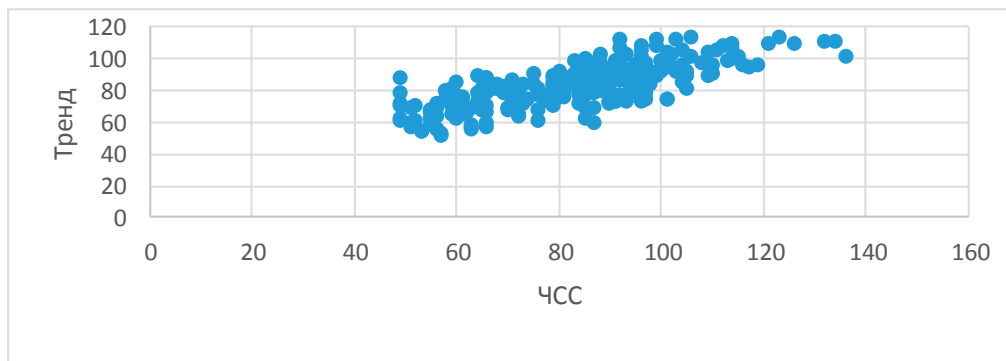
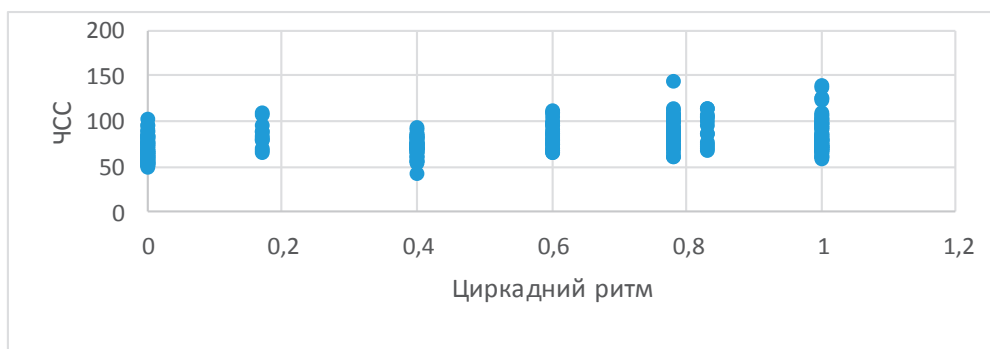
Щоб визначити впливи інших компонент на вихідний сигнал ЧСС проведено регресійний аналіз залежностей між часом t та відліками часового ряду, між трендом ($T \cdot S_t$) та часовим рядом, а також між часовим рядом та циркадним ритмом.

Для розрахунку регресії використано графічний метод. Для цього в прямокутній системі координат побудували графіки, відкладаючи індивідуальні значення результативної ознаки Y по осі ординат, а по осі абсцис - індивідуальні значення факторної ознаки X , отримавши поле кореляції, на підставі якого можна висунути гіпотезу про те, що зв'язок між усіма можливими значеннями X і Y має експоненціальний характер [15].

$$y = a \cdot e^{bx} \quad (15)$$

Рівняння лінійаризовано логарифмом з основою 10.

Рис. 5. Поле кореляції для Y_t

Рис. 6 Поле кореляції для $y_{T \cap S_i}$ Рис. 7. Поле кореляції відносно ваг циркадного ритму для y_{η}

Оціночне рівняння регресії матиме вигляд:

$$y = a \cdot e^{bx} + \varepsilon$$

Відхилення ε_i для кожного конкретного спостереження i - випадкові і їхні значення у вибірці невідомі, а за спостереженнями x_i і y_i можна отримати тільки оцінки параметрів a та β , оцінками параметрів яких є величини a та b , які мають випадковий характер, оскільки відповідають випадковій вибірці.

Після лінеаризації отримаємо:

$$\ln(y) = \ln(a) + bx$$

Для оцінки параметрів a та β - використовуємо метод найменших квадратів формальний запис якого:

$$S = \sum (y_i - y \cdot i)^2 \rightarrow \min \quad (16)$$

Система нормальних рівнянь буде:

$$a - n + b - \sum x = \sum y - x$$

Прирівнявши рівняння 1 до рівняння 2 за показником a ,

домноживши його на коефіцієнт $-\sum \frac{x}{n}$ та вирішивши систему рівнянь отримуємо коефіцієнт b , після чого підставивши його в перше рівняння отримуємо значення коефіцієнта a .

Розрахуємо параметри рівняння регресії для кожної вибірки:

$$1) \text{ Вибіркові середні: } \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}, \bar{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n} \quad (17)$$

$$2) \text{ Вибіркові дисперсії: } S(x)^2 = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2, S(y)^2 = \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2 \quad (18)$$

$$3) \text{ Середньоквадратичне відхилення: } S(x) = \sqrt{S^2(x)}, S(y) = \sqrt{S^2(y)} \quad (19)$$

Коефіцієнт кореляції b розраховано за формулою:

$$b = \frac{\bar{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s_x^2} \quad (20)$$

а коефіцієнт a :

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (21)$$

Для розуміння, на яку частину величини свого середнього квадратичного відхилення зміниться в середньому значення результативної ознаки в разі зміни факторної ознаки на величину її середньоквадратичного відхилення розраховано коефіцієнт β_i за формулою:

$$\beta_j = b_j \cdot \frac{S_{(x)}}{S_{(y)}} \quad (22)$$

Якість рівняння оцінено помилкою апроксимації за формулою:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - y_x|}{y_i}}{n} \cdot 100\% \quad (23)$$

Для розуміння тісноти зв'язу між ознаками, та надійності рівняння розраховано величину індексу кореляції R , межі якого лежать від 0 до 1:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - y_x)^2}{\sum (y_i - y)^2}} \quad (24)$$

Розраховано міру статистичної згоди R^2 та критерій Фішера.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y_x)^2}{\sum (y_i - y)^2} \quad (25)$$

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}, \quad (26)$$

де m – число факторів в моделі.

Отримано рівняння в яких 10^a -коефіцієнт показника, b - швидкість зростання чи спадання показника (Рис 8-10)

$$y_i = 10^{a_i} \cdot e^{b_i x_i} \quad (27)$$

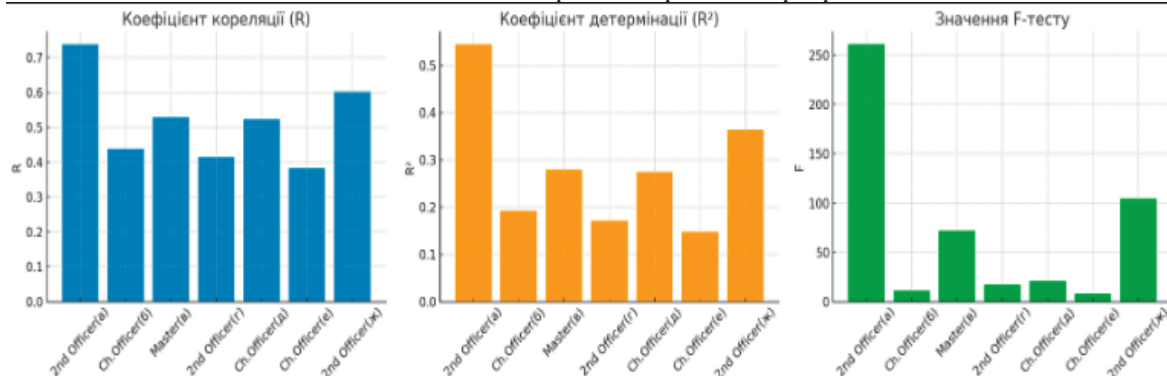
$$y_{T \cdot S_i} = 10^{a_{T \cdot S_i}} \cdot e^{b_{T \cdot S_i} \cdot x_{T \cdot S_i}} \quad (28)$$

$$y_u = 10^{a_u} \cdot e^{b_u x_u} \quad (29)$$

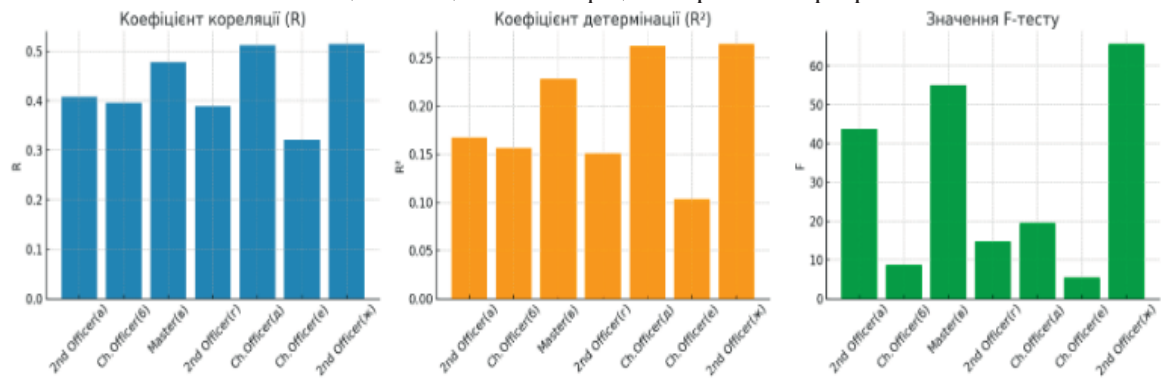
Рис 8. Оціночні коефіцієнти рівняння регресії



Рис 9. Оціночні коефіцієнти рівняння регресії



Таблиця 10. Оціночні коефіцієнти рівняння регресії



З графіків видно – час перебування на судні та циркадний ритм впливають на стан судноводія в цілому з різною силою, а тренд показує основну тенденцію спокою але здатен пояснити лише від 14% до 54% станів.

5.2. Аналіз поведінки психофізіологічної активності за допомогою множинної регресії та методу найменших квадратів

Для розуміння того, як час перебування на судні та циркадний ритм та тренд разом впливають основний часовий ряд розраховано множинну регресію виду [15].

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (30)$$

Рівняння множинної регресії представлене у вигляді:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon \quad (31)$$

де $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ – вектор незалежних змінних;

β – вектор параметрів що підлягають визначенню;

ε – випадкове відхилення;

Y – залежна змінна.

Теоретичне лінійне рівняння множинної регресії:

$$Y = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X_2 + \dots + \beta_mX_m + \varepsilon \quad (32)$$

Де β_0 – вільний член, що визначає значення Y , коли всі пояснювальні змінні X_j дорівнюють 0.

Емпіричне рівняння множинної регресії має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_mX_m + e \quad (33)$$

де $b_0, b_1, \dots, b_m$ – оцінки теоретичних значень $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$, а e – оцінка відхилення ε .

Для оцінки параметрів використаємо МНК згідно якого вектор s можна отримати з виразу:

$$S = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (34)$$

До матриці X_j додаємо одиничний стовпчик отримавши нову матрицю. Транспонуємо отримуючи матрицю X^T , та перемножуємо матриці X^T на X та X^T на Y . Знаходимо оборотну матрицю $(X^T X)^{-1}$.

Отримаємо вектор оцінки рівняння:

$$(X^T X)^{-1} X^T Y = y(x) = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (35)$$

Константа b_0 оцінює вплив всіх окрім врахованих в моделі x_j факторів на Y та показує значення Y за відсутності x_j . Коефіцієнти b_1, b_2 та b_3 показують збільшення або зменшення Y при зростанні X_1, X_2 та X_3 .

Для розуміння значущості рівняння в цілому, його коефіцієнтів, та дослідження відносних та абсолютних похибок апроксимації перейдемо до статистичного аналізу рівняння. Для незміщеної оцінки дисперсії виконаємо такі обчислення: x

Незміщена помилка (абсолютна помилка апроксимації):

$$\varepsilon = Y - Y(x) = Y - X \cdot s \quad (36)$$

Середня похибка апроксимації дорівнює:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^n \left| \frac{\varepsilon}{Y} \right|}{n} \cdot 100\% \quad (37)$$

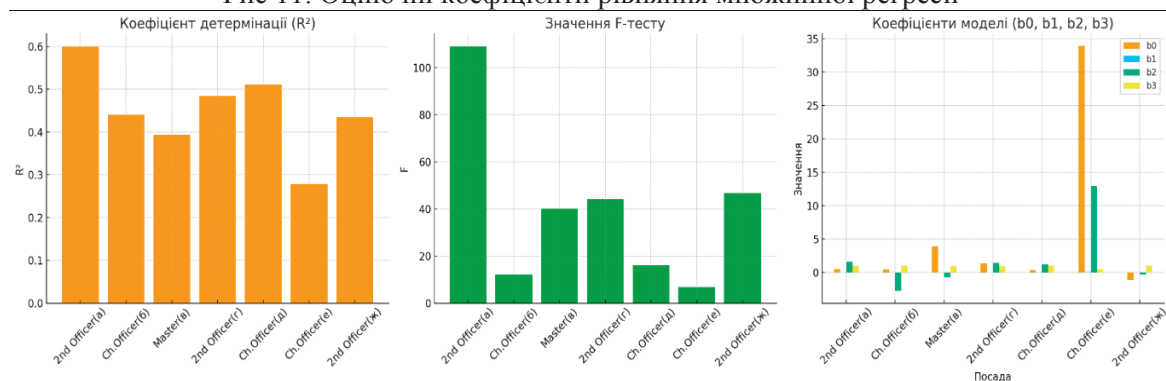
Оцінка дисперсії:

$$s_e^2 = (Y - Y(X))^T (Y - Y(X)) \quad (38)$$

$$y_{adap} = y_{T*Si} - (y_t + y_u) \quad (39)$$

Оцінимо значущості рівняння множинної регресії шляхом перевірки гіпотези про рівність нулю коефіцієнту детермінації R^2 , розрахованого за даними генеральної сукупності та F -критерію Фішера за формулами (25,26). За результатами розрахунку побудували графік (Рис 11):

Рис 11. Оціночні коефіцієнти рівняння множинної регресії



Як бачимо - $b_3 X_3$, де X_3 - є показником тренду у всіх випадках впливає на зростання вихідного сигналу ЧСС.

Таким чином, зроблено проміжні висновки. В часовій залежності існує компонента яка впливає на зниження стресу з часом перебування на судні у деяких респондентів, що може свідчити про наявність у них позитивної адаптивної функції. Всі елементи впливають один на одного та на вихідний сигнал в цілому, але їх спільний вплив не є ані сумарним, ані середнім впливом всіх елементів, що говорить про синергійність людини як системи. Також можна зробити висновок що існує ще одна компонента впливу на стан і яка свідчить що з часом перебування на судні будь яка ситуація може сприйматися як стресова.

5.3. Розробка принципової схеми СППР судноводія

Щоб зрозуміти вплив адаптаційної компоненти впливу розраховано коефіцієнт за формулою та побудували графіки (Рис. 12):

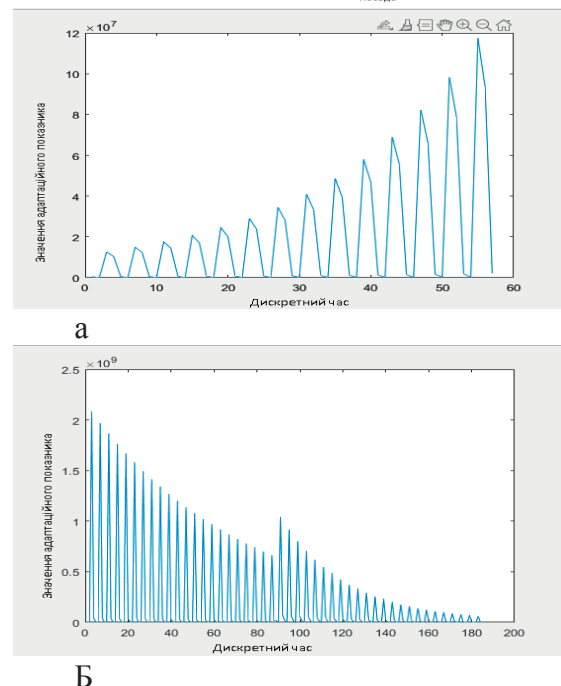


Рис.12 Графік коефіцієнту адаптації (а - зростання, б - зниження).

За допомогою MATLAB розраховано коефіцієнти рівняння:

$$y_1 = 10^a \cdot \text{power}(\exp(x), (x \cdot b))$$

$$y_2 = 10^{a_2} \cdot \text{power}(\exp(x_2), (x_2 \cdot b_2)),$$

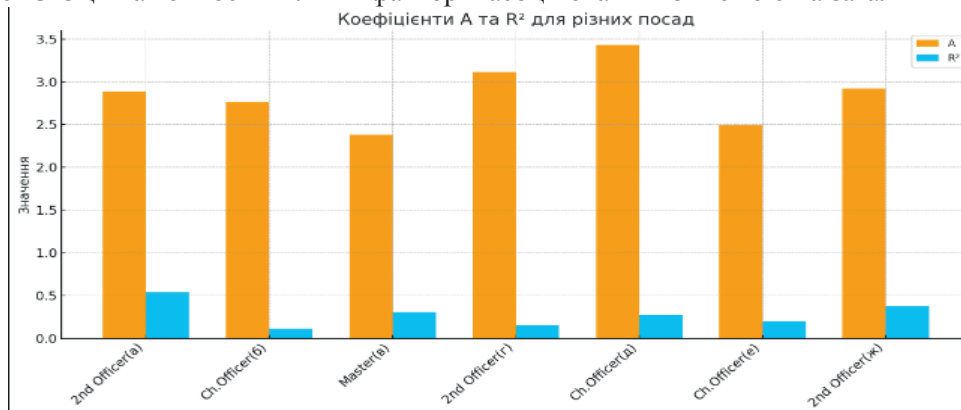
$$y_3 = 10^{a_3} \cdot \text{power}(\exp(x_3), (x_3 \cdot b_3)),$$

$$y_4 = y_2 - (y_1 + y_3).$$

З графіків видно - кожен піддослідний має свою поведінкову параметру, яка воліє чи то до зростання чи то до зниження біологічної активності,

що може свідчити про схильність до адаптації, і чим нижчий цей параметр тим швидше буде використання ресурсу для подолання дії стресора, а, отже, тим швидше і сильніше буде діяти фактор втоми, і тим вірогідніший фактор появи помилки [1].

Рис 13 Оцінка точності впливів факторів асоційованих із втомою на загальний стан



Проаналізували вплив компонент асоційованих з втомою на загальний ряд використавши метод множинної регресії за формулами 30-38.

За допомогою Matlab, Statistic and Optimization Tool Box Curve fitter розраховано поліноми рівняння площини станів та побудували графіки:

$$y = f(y_1), f(y_2), f(y_3), f(y_4),$$

де $f(y_3)$ використано в якості вагового коефіцієнту впливу циркадного ритму на стан піддослідного.

Для зменшення впливів викидів використали вагову біквадратну функцію робастної регресії Тьюкі, ваги якої зменшуються, як тільки e віддаляється від 0, і дорівнюють 0 для $|e| > k$ [18].

$$wB(e) = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{e}{k} \right)^2 \right]^2, & |e| \leq k \\ 0, & |e| > k \end{cases} \quad (40)$$

Значення k для біквадратної оцінки - константа налаштування, при цьому

менші значення k дають більшу стійкість до викидів.

Отримано поліноми для кожної групи спостережень та побудовано графіки площини станів за добу та за весь час спостережень:

Лінійна модель Poly 6 (Рис 12,(а)):

$$f(x, y) = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y +$$

$$p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot y + p_{02} \cdot y^2 + p_{30} \cdot x^3 +$$

$$p_{21} \cdot x^2 \cdot y + p_{12} \cdot x \cdot y^2 + p_{03} \cdot y^3 +$$

$$p_{40} \cdot x^4 + p_{31} \cdot x^3 \cdot y + p_{22} \cdot x^2 \cdot y^2 +$$

$$p_{13} \cdot x \cdot y^3 + p_{04} \cdot y^4 + p_{50} \cdot x^5 +$$

$$p_{41} \cdot x^4 \cdot y + p_{32} \cdot x^3 \cdot y^2 + p_{23} \cdot x^2 \cdot y^3 + p_{14} \cdot x \cdot y^4$$

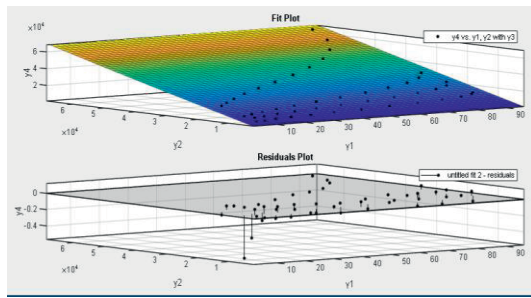
Лінійна модель Poly 51 (Рис 12,(б)):

$$f(x, y) = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + p_{20} \cdot x^2 + p_{11}$$

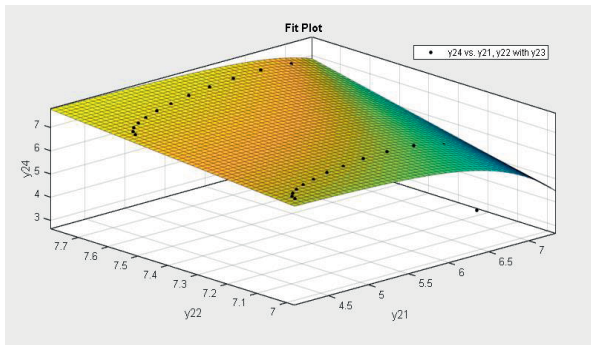
$$\cdot x \cdot y + p_{30} \cdot x^3 + p_{21} \cdot x^2 \cdot y + p_{40} \cdot x^4 +$$

$$p_{31} \cdot x^3 \cdot y + p_{50} \cdot x^5 + p_{41} \cdot x^4 \cdot y$$

В запропонованих моделях x та y нормалізовано по середньому та стандартному відхиленню, всі коефіцієнти розраховані із 95% точністю, R^2 Більше 90% що свідчить про дуже гарну відповідність полінома.



а



б

Рис 14. Площини залежності факторів асоційованих із втомою за 45 діб та її поліном

Модель станів людини за своєю природою синергічна, а кожен елемент моделі впливає на всі інші, і може бути ваговим коефіцієнтом, тому окрім критерію R^2 для вибору моделі було застосовано ще два

критерії точності. Мінімальний root mean square error (RMSE) -квадратичне правило оцінки, що вимірює середню величину помилки та, мінімальний sum of squares error (SSE) - міра випадкової помилки, що вимірює різницю між спостережуваними та прогнозованими значеннями[19]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}, \quad (41)$$

де i -змінна i , N = кількість непропущених точок даних x_i - часовий ряд фактичних спостережень, а $\hat{x}_i$ - розрахунковий часовий ряд,

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2, \quad (42)$$

де $e_i^2 = y_i - \hat{y}_i$ - різниця між фактичним значенням залежної змінної та прогнозованим значенням [2,13].

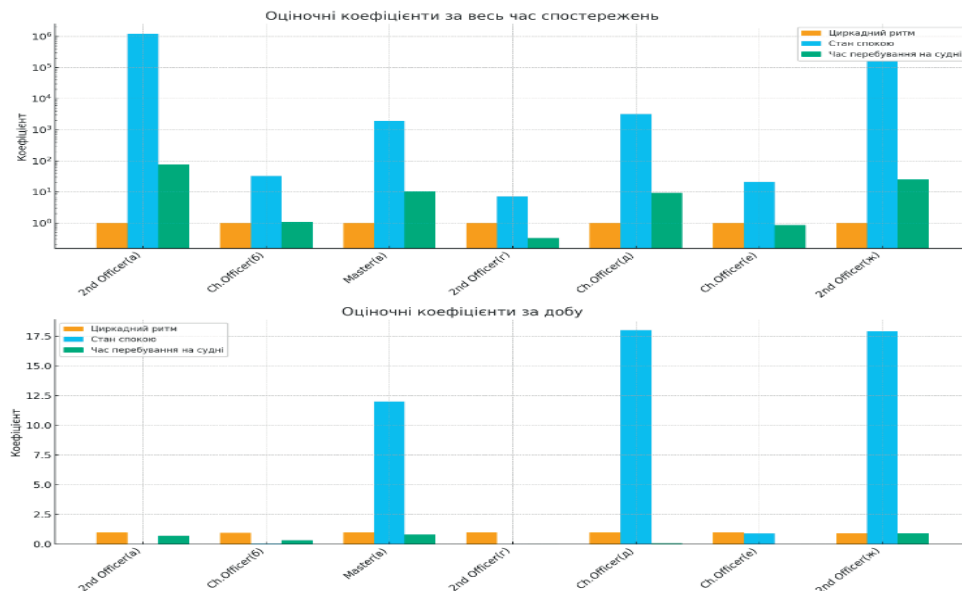


Рис 15 Оціночні коефіцієнти за весь час спостережень та за добу

З результатів розрахунків площин та регресійного аналізу видно, що хоча і справді фактори довгого перебування на судні, рутинна робота, спад циркадного

ритму дуже сильно характеризують прояви втоми, самі по собі вони впливають на загальний стан не більше як

в 54% випадків, що дає розуміння про існування компоненти стрес реакції.

Використавши логарифмування отримали відносні частки фізіологічного показника від факторів, асоційованих із втомою. Вилучивши ці показники з загального вихідного сигналу отримали залишковий

показник від стресу y_{stress} :

$$y_{stress} = y - (\log(y_{em}) + \log(y_{T*Si}) + \log(y_t) + \log(y_u)) \quad (43)$$

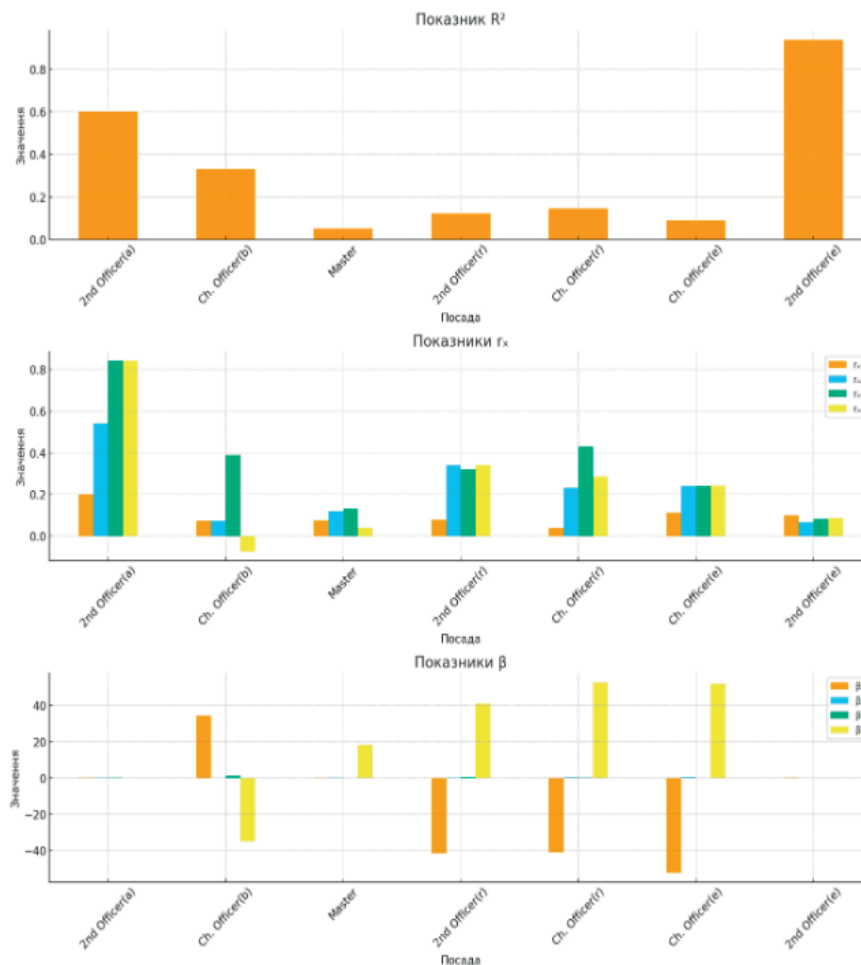
Провели регресійний аналіз залежностей між стресовою складовою та часовим рядом використовуючи графічний метод за процедурою, описаною в 5.1 та отримали рівняння:

$$y_{stress} = 10^{a_{stress}} \cdot e^{x_{stress} b_{stress}} \quad (44)$$

Та показники точності (Рис 16):



Рис 17. Показники залежності стресової складової від факторів асоційованих із втомою



Щоб побачити залежність стресової складової від впливу елементів асоційованих із втомою розраховали множинну регресію за формулами (30-38).

$$Y_{stress} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4, \quad (45)$$

де $Y_{stress} = y_{stress}$, $X_1 = y_t$, $X_2 = y_{T \cdot S_t}$, $X_3 = y_c$, $X_4 = y_{adop}$ (Рис17)

Як бачимо з показника R^2 фактори що асоціюються із втомою можуть майже повністю бути причиною стресу як у випадку 2nd Officer(ж) і свідчити про

дуже сильну втому, а можуть майже взагалі не впливати що може свідчити про дію реального стресора, а отже небезпеки.

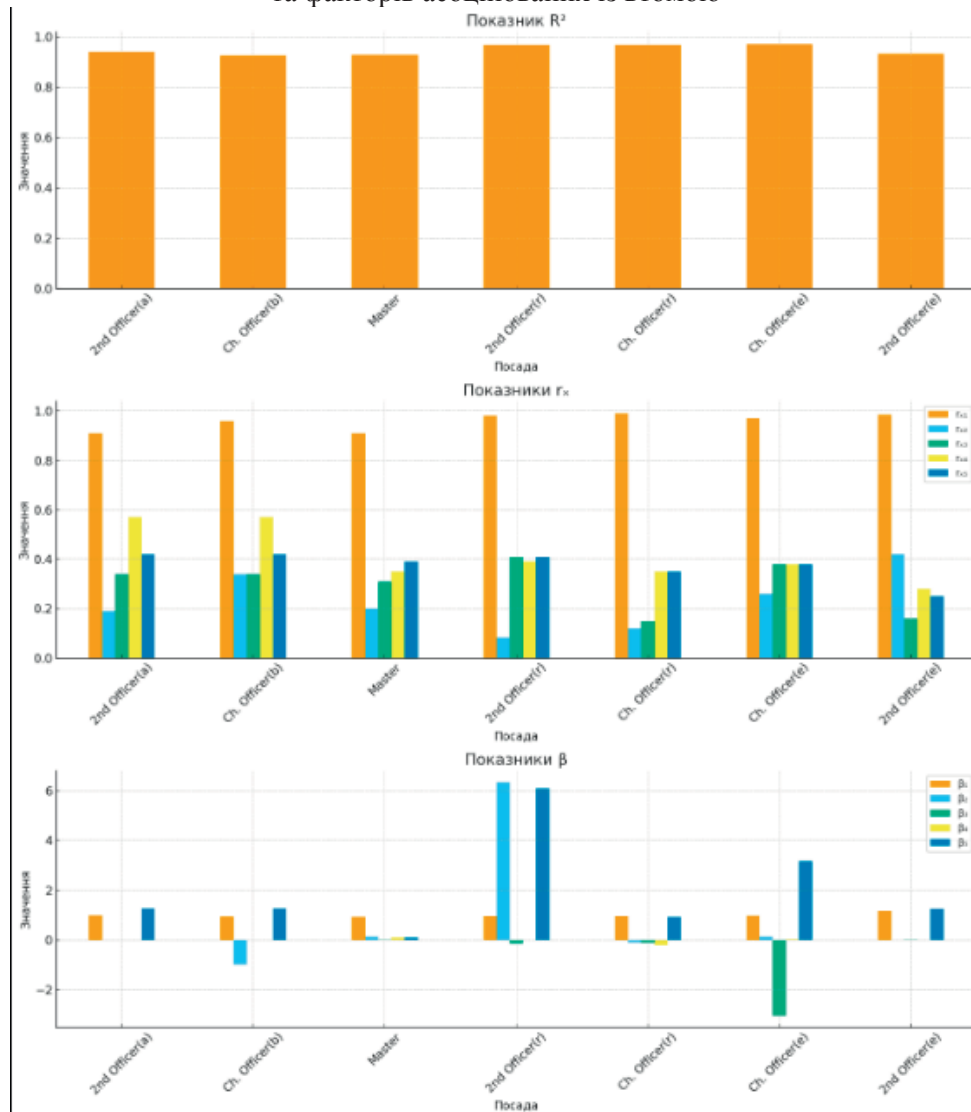
Щоб побачити як всі елементи впливають на оригінальний часовий ряд розраховали множинну регресію за формулами (30-38):

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5, \quad (46)$$

де

$Y = y$, $X_1 = y_{stress}$, $X_2 = y_t$, $X_3 = y_{T \cdot S_t}$, $X_4 = y_u$, $X_5 = y_{adop}$ (Рис18)

Рис 18 Показники залежності загальних станів від стресової складової та факторів асоційованих із втомою



З розрахунків бачимо – в більш як 90% випадків загальних станів судноводія можна описати формулою

$$f(y_{\text{стан}}) = (y_t), (y_{T \cdot S_i}), (y_c), (y_{\text{adop}}), (y_{\text{stress}}) = \\ (10^{a_t} \cdot e^{b_t \cdot x_t}), (10^{a_{T \cdot S_i}} \cdot e^{b_{T \cdot S_i} \cdot x_{T \cdot S_i}}), \\ (10^{a_c} \cdot e^{b_c \cdot x_c}) \cdot (y_{T \cdot S_i} - (y_t + y_u)) \cdot (10^{a_{\text{stress}}} \cdot e^{x_{\text{stress}} \cdot b_{\text{stress}}}). \quad (47)$$

В такому випадку відчуття втоми та стресу в момент часу можна описати передавальною функцією від впливу цих факторів. Так як для нелінійних експонентальних регресійних залежностей передавальної функції в її класичному розумінні не існує, але нам відомі значення як вхідних так і вихідних сигналів то можна побудувати емпіричну передавальну функцію виду $Y_{\text{state}} \approx f(Y_t, Y_{T \cdot S}, Y_{\text{circ}}, Y_{\text{adop}}, Y_{\text{stress}})$ (48)

Використавши MATLAB System identification tool box отримали передавальну функцію виду дням. (Рис19)

$$Y_{\text{state}} = c_0 + c_1 Y_t + c_2 Y_{T \cdot S} + \\ c_3 Y_{\text{circ}} + c_4 Y_{\text{adop}} + c_5 Y_{\text{stress}} \quad (49)$$

Де $c_0 \dots c_5$ - коефіцієнти передавальної функції, що визначають внесок кожного сигналу.

За аналізом передавальної функції відчуття, можна розпізнати тенденції зміни стану судноводія через вплив стресу, втоми, або обох факторів одночасно, ще на початкових стадіях. Такий підхід дозволяє вчасно визначити ситуації можливої помилки та попередити її, своєчасно зробивши корективи в керуванні безпекою.

В MATLAB SIMULINK побудували модель запропонованої системи, та протестували її на вибірці з 884 спостережень параметру ЧСС з дискретизацією в 1 годину, що дорівнює 37 дням, та 221 спостереження з дискретизацією в 6 годин, що дорівнює 55

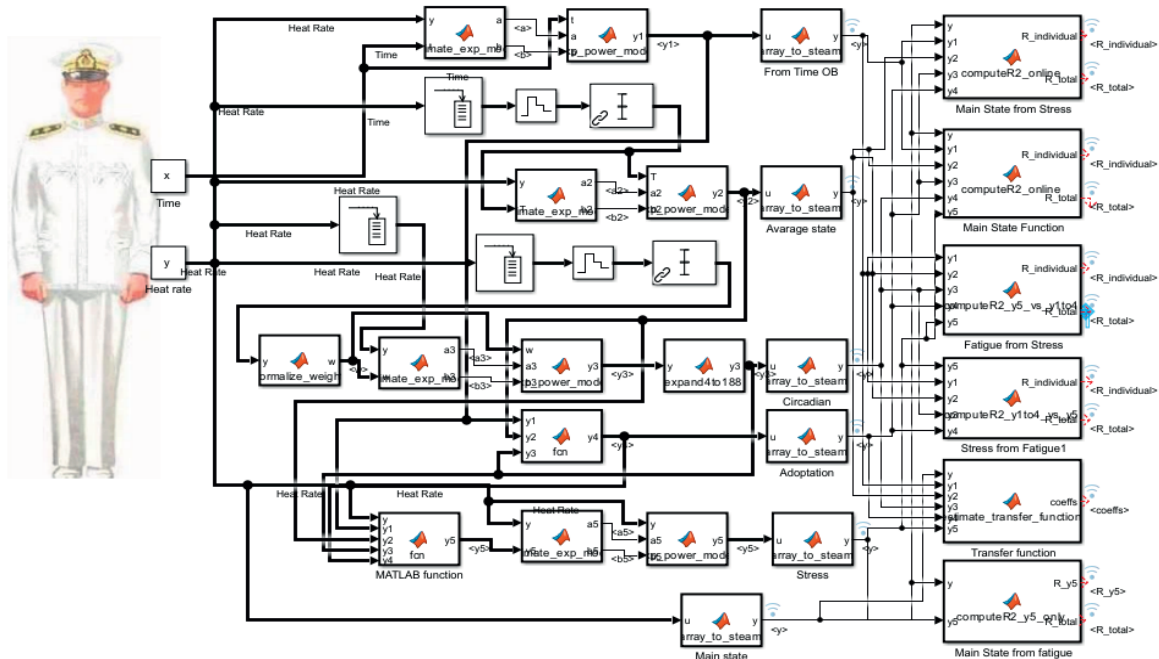


Рис 19 Модель системи моніторингу та прогнозування психофізіологічних станів судноводія

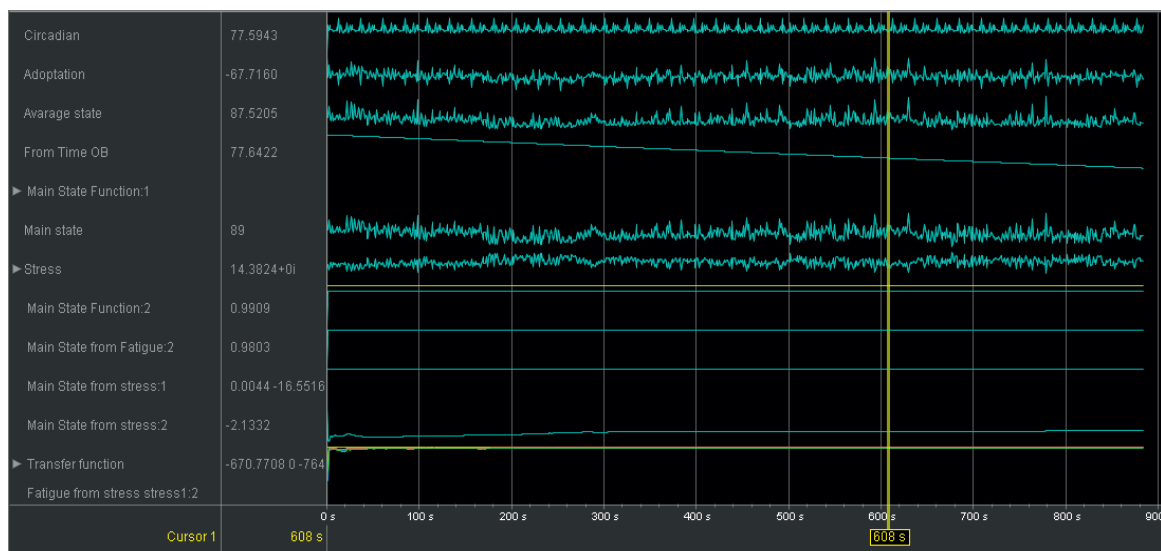


Рис 20. Симуляція стану з перевагою втоми

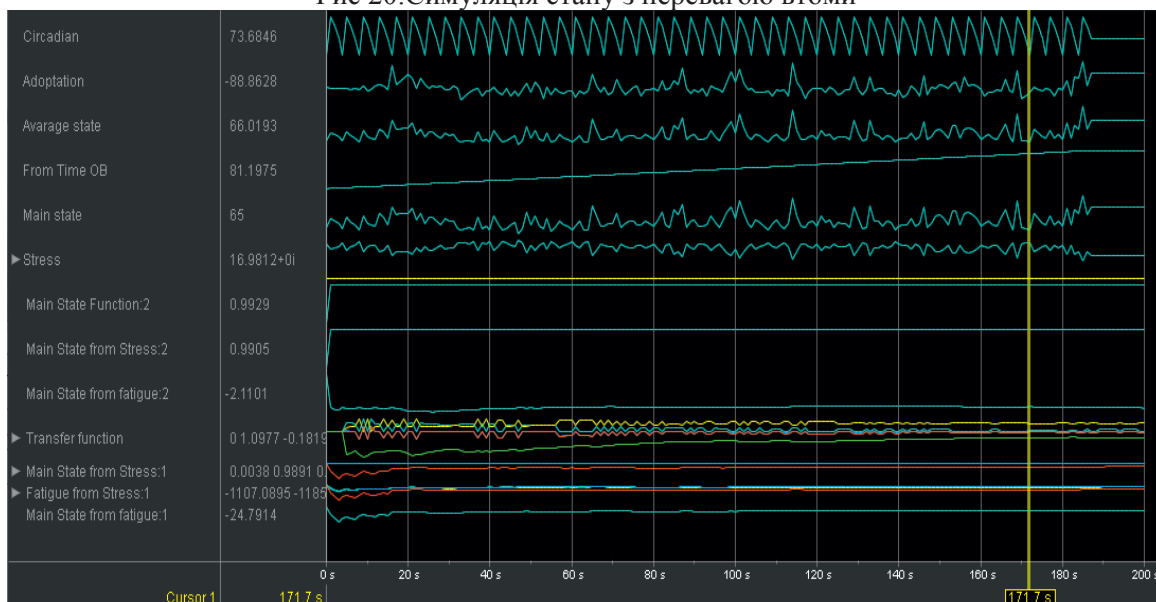


Рис 21 Симуляція стану з перевагою стресу

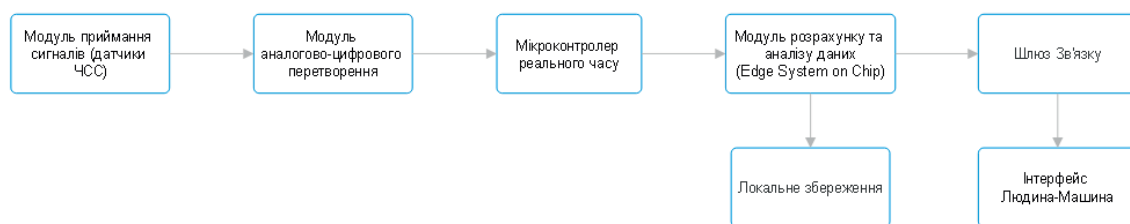


Рис 22 Архітектура системи прогнозування станів

На відміну від інших систем, які виявляють симптоми втоми, ця система визначає щільність впливу показників і їх зміни, що дозволяє виявити втому до появи перших візуальних симптомів.

Згідно із Сальє, людина постійно перебуває в стресі[1], і для розуміння стану необхідно враховувати всі фактори. Рівняння (43) демонструє кореляцію R^2 понад 90%, що дозволяє виявити частоту і

тенденцію впливу чинників, сприяючи довгостроковому плануванню безпеки судна.

У подальших дослідженнях важливо розширити функціональність системи, зокрема:

Інтеграція додаткових джерел даних (відеоаналітика, емоційні системи) для покращення оцінки стану судноводія.

Удосконалення моделей прогнозування за допомогою гібридних алгоритмів штучного інтелекту.

Вивчення впливу зовнішніх факторів (гідрометеоумови, щільність трафіку) на ефективність автоматизованих систем.

Ці напрями поглиблюють наукові результати та сприятимуть впровадженню інтелектуальних систем у морську навігацію.

6. Обговорення результатів дослідження щодо застосування розробленої системи управління безпекою керування рухом судна

Методи аналізу часових рядів дозволили виявити індивідуальні циклічності циркадних ритмів (рис. 1) та показників стану спокою (3)–(11). Експоненціальна регресія (15) та метод найменших квадратів (16) виявили індивідуальні тенденції розвитку впливу стресу та кожного з факторів асоційованих із втомою на загальний стан навігаційного помічника. Завдяки отриманим даним, використано багатфакторну регресію (30)–(38), (42), (43), проаналізовано вплив факторів асоційованих із втомою на стресову складову (табл. 9). Крім того, визначено загальний вплив, індивідуальну силу впливу кожного з факторів, при їх спільній дії на загальний стан судноводія (табл. 10). Також проведено спостереження щодо змін передавальної функції та її компонентів (45), що сприяло своєчасному виявленню зміни станів судноводіїв. Аналіз вищепрахованої інформації дав змогу щодо своєчасного корегування довгострокового та короткострокового планування безпекою несення вахти на судні.

Результати проведеного дослідження засвідчують високу перспективність розробленої моделі для інтеграції у автоматизовані процеси управління безпекою руху суден. Запропонований підхід забезпечує новий рівень когнітивної адаптивності автоматизованих систем, дозволяючи враховувати в режимі реального часу психофізіологічний стан людини-оператора – ключової ланки у системі управління судном, на відміну від більшості судових систем автоматизації, що орієнтовані переважно на технічні параметри руху та навігаційної ситуації.

Введення розробленої моделі у замкнене коло автоматизованого управління дозволяє створити адаптивний контур керування, де параметри роботи системи коригуються не лише залежно від зовнішніх умов плавання, а й від стану оператора. Зокрема, результати дослідження демонструють, що мультиплікативне моделювання ЧСС у поєднанні з аналізом циркадного ритму, адаптаційних змін та стресових впливів забезпечує понад 90% точності опису динаміки стану судноводія. Це дозволяє будувати надійні предиктивні моделі, придатні для впровадження у сучасні системи підтримки прийняття рішень (СППР) та у модулі управління рухом судна.

Інженерна цінність запропонованого підходу полягає у тому, що отримані передатні функції системи «людина-машина» можуть бути безпосередньо використані у автоматизованих системах для:

- динамічної корекції режимів роботи автопілота залежно від стану судноводія;

- активації превентивних сценаріїв керування у разі виявлення критичних рівнів стресу чи втоми (наприклад, автоматичного переходу у спрощені сценарії маневрування з підвищеним рівнем автоматизації);

- адаптивного планування вахтового навантаження через взаємодію з системами моніторингу екіпажу;

- інтелектуального управління інтерфейсами людино-машинної взаємодії (НМІ), зокрема автоматичного зменшення інформаційного навантаження в моменти виявленого когнітивного виснаження.

Особливо важливим є те, що розроблена система дозволяє здійснювати персоналізоване управління, оскільки отримані результати вказують на значну індивідуальну варіативність у поведінкових реакціях судноводіїв [20–22]. Відтак використання єдиної універсальної моделі управління без врахування персональних характеристик є недостатньо ефективним. Вбудований механізм персоналізації моделі на основі накопичених індивідуальних даних операторів є важливим кроком у бік побудови інтелектуальних ергатичних систем управління.

Здійснено ретроспективне аналізування сучасних досліджень хронічного стресу [23], захисних механізмів долаючої поведінки [24, 25], дії стресогенних чинників [26, 27] і психо-емоційної стабільності у період трансформаційних процесів [28]. Ці особливості вимагають пошуку нових методів контролю психічного стану оператора.

У практичному аспекті впровадження запропонованого підходу дає змогу підвищити стійкість автоматизованого управління рухом судна в умовах зростання когнітивних ризиків, пов'язаних із людським фактором [29, 30]. Це особливо актуально для плавання у складних умовах (стислі води, підвищена інтенсивність трафіку, обмежена оглядовість), де вплив втоми і стресу може мати критичне значення для забезпечення безпеки [31].

Таким чином, розроблена система може стати ключовим компонентом перспективних глибоко інтегрованих автоматизованих систем морського управління [33], що забезпечують:

- підвищення рівня адаптивності автоматизованих рішень ;

- динамічну оптимізацію режимів управління відповідно до психофізіологічного стану екіпажу;

- зниження ризику помилок, спричинених впливом втоми та стресу;

- інтеграцію людини-оператора як активного елемента у замкнене коло управління [33].

Однак даний підхід дозволяє ідентифікувати лише фізіологічний відгук організму на дію стресора та факторів асоційованих із втомою не даючи інформації про психофізіологічну реакцію організму, а отже і про характер дій та помилок. Даний недолік можливо усунути додавши в систему блок аналізу термальних карт найпростіших стрес реакцій організму під впливом цих факторів та перехідних процесів зміни стану, з використанням згорточних нейромереж.

Вказані результати створюють передумови для подальшого розвитку когнітивно-адаптивних автоматизованих систем керування рухом суден та відповідають актуальним тенденціям розвитку морських кіберфізичних систем нового покоління [34].

7. Висновки

1) Представлена автоматична система має дуже високі показники точності $R^2 \geq 90\%$, а її швидкодія дозволяє виявляти поточний стан навігаційного помічника і прогнозувати тенденції його зміни в реальному часі, що в поєднанні з іншими судновими системами моніторингу дає змогу отримати своєчасну, найбільш повну картину події і зберігає час на прийняття рішення по забезпеченню безпеки судна і судноплавства взагалом.

2) Запропонована мультиплікативна модель, що включає обчислення середнього значення скоригованої трендової компоненти та коефіцієнта кореляції для прогнозування частоти серцевих скорочень судноводія. Модель дозволяє враховувати індивідуальні,

фізіологічно значущі відмінності циркадного ритму. Проведена апробація підтвердила працездатність запропонованого алгоритму.

3) Проведено імітаційне моделювання, на основі якого було розроблено метод аналізу індивідуальної біологічної активності оператора-судноводія. Використання площини та поліномів станів у математичної моделі із застосуванням робастної регресії Тьюкі дозволило значно зменшити розходження з експериментом, порівняно з іншими моделями.

4) Досліджено поведінку оператора-судноводія за допомогою статистичних методів, зокрема множинної регресії та найменших квадратів.

При спостереженні людини маємо можливість аналізувати лише сигнали вихідних параметрів не знаючи ні кількості, ні сили дії вхідних. Запропонований метод дозволив розщепити вихідний сигнал на 5 показників, що асоціюються із стресом, часом перебування на судні, циркадним ритмом, станом спокою та адаптивними функціями. Загальний вплив цих елементів більш як на 90% пояснює поведінку вихідного фізіологічного сигналу. При цьому кожен з цих сигналів самостійно може не сильно впливати на загальний стан, а також впливає на інші, і лише разом демонструють реальний вплив. Також розрахунки демонструють що розглядаючи втому і стрес окремо припускаємось дуже великої помилки і лише розглядання картини впливу факторів разом можемо побачити реальний стан речей і впливів.

5) Базуючись на результатах дослідів було побудовано модель системи виявлення впливів стресу та факторів асоційованих із втомою на загальний стан судноводія.

На відміну від попередніх дослідів [35], які загалом констатують негативний вплив втоми, розроблений метод дитально демонструє, який з чинників

більше впливає на стан судноводія. Це дозволяє внести корективи як в короткострокове планування керуванням безпекою, такі як заміна або підсилення вахти чи надання додаткового відпочинку, так і в довгострокове, як прискорення зміни екіпажу. Відчуття втоми та/або стресу можна пояснити перехідним процесом зміни стану, аналіз якого також надає відповідь, чому в деяких випадках через стрес людина може не відчувати впливу втоми, а, отже, стає більш схильною до помилок.

Конфлікт інтересів

Автор декларує, що не має конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних

Література

1. Ovcharenko O. Yu. *Psykhologhiia stresu ta stresovykh rozladiv : navch. posib.* Kyiv : Universytet "Ukraina", 2023. 266 s.
2. Last J. M. *A Dictionary of Public Health.* Oxford University Press, 2007.
3. European Maritime Safety Agency. *Safety analysis of EMCIP data – Navigation accidents – Summary report V1.0.* European Maritime Safety Agency (EMSA), 2022.
4. Smith A., Allen P., Wadsworth E. *Seafarer fatigue: The Cardiff research programme.* Centre for Occupational and Health Psychology, Cardiff University, 2006.
5. Project MARTHA. *Project MARTHA: The final report.* InterManager/Tanker Operator. 2017.
6. Lyu H., Yue J., Zhang W., Cheng T., Yin Y., Yang X., Gao X., Hao Z., Li J. *Fatigue Detection for Ship OOWs Based on Input Data Features, From the Perspective of*

Comparison With Vehicle Drivers: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2023. P. 1-1. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3281068.

7. Gulhane M., Mohod P. S. Intelligent fatigue detection and automatic vehicle control system. *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*. 2014. 6, 3. 87–92. DOI: 10.5121/ijcsit.2014.6307

8. Weisser, M. DART – the Dialogue Annotation and Research Tool. *Corpus Linguistics and Linguistic Theory: Conference presentation. National Key Research Center for Linguistics and Applied Linguistics, Guangdong University of Foreign Studies*. 2016. 12. DOI: 10.1515/cllt-2014-0051.

9. Yang Zhe. Fatigue driving detection technology based on EEG signal. *Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research*. 2024. Vol. 5. P. 1022-1029. DOI: 10.62051/m0g3gr55.

10. Karim E., Pavel H.R., Nikanfar S., Hebri A., Roy A., Nambiappan H.R., Jaiswal A., Wylie G.R., Makedon F. Examining the Landscape of Cognitive Fatigue Detection: A Comprehensive Survey. *Technologies*. 2024. Vol. 12, 3, 38. DOI: 10.3390/technologies12030038

11. Aaronson L., Teel C., Cassmeyer V., Neuberger Geri, Pallikkathayil L., Pierce J., Press Allan, Williams Phoebe, Wingate A. Defining and measuring fatigue. *Image--the journal of nursing scholarship*. 1999. Vol. 31. P. 45-50.

12. Petrus Rodney, Solehah Syaimaa, Yunus Zulkifli, Makmud Mohamad, Boon Tang. Estimating prediction horizon of driver fatigue using Euclidean distance-based similarity score between electroencephalograms. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2024. Vol. 11. P. 249 - 256.

13. Meye Frank, Digirolamo Gregory. *Handbook of Psychophysiology* (3rd edn). By J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary and G. G. Berntson. (ISBN 0521844711 hb.) Cambridge University Press. 2007. *Psychological Medicine*. 2007. 37. P. 1818 - 1819. DOI: 10.1017/S0033291707001201.

14. Walker Matthew. *Why We Sleep: The New Science of Sleep and Dreams*. Penguin Random House. 2017. ISBN 9781501144318.

15. Yeriomina M.O. *Ekonometryka: Konspekt lektsii*. Kharkiv: UkrDUZT. 2015. 40 s.

16. Mintser O.P., Koshova S.P. *Informatsiini tekhnolohii otsiniuvannia vplyvu stresu na rezultaty testovoho kontroliu znan likariv. Analitychnyi ohliad. Pershe povidomlennia. Natsionalna medychna akademiia pidiplomnoi osvity imeni P. L. Shupyka*. 2017. DOI: 10.11603/mie.1996-1960.2017.4.8449.

17. van Leeuwen W. M. A., Pekcan C., Barnett M., Williams M., Kecklund G. Modelling watch keeper sleep and fatigue in the maritime industry. *Sleep Medicine*. 2017. 40, e334. DOI: 10.1016/j.sleep.2017.11.981

18. John Fox, Sanford Weisberg. *Robust Regression*. University of Minnesota. 2012.

19. Hyndman Rob J., Koehler Anne B. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*. 2006. 22, 4. P. 679–688. DOI:10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.

20. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Shcherbina O., Vasalatii N. Simulation-based method for predicting changes in the ship's seaworthy condition under impact of various factors. *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer. 2023. Vol. 481, P. 653–664 DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7_37

21. Melnyk O., Bychkovsky Y., Onishchenko O., Onyshchenko S., Volianska Y. Development of the method of shipboard operations risk assessment quality evaluation based on experts review. *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer. 2023. Vol. 481, P. 695–710 DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7_40

22. Melnyk O., Kuznichenko S., Onishchenko O. Impact of AIS manipulation on shipping safety and strategic countermeasures. *Lex Portus*. 2024. 10, 4. P. 31–39. DOI: 10.62821/lp10403

23. Limasheva L., Kariyev A., Berdibayeva S., Dautkaliyeva P. Chronic Stress and Resilience of Students in Conditions of Excessive Mobile Phone Usage. *Insight: the psychological dimensions of society*. 2025. 13. P. 174–194. URL: <https://insight.journal.kspu.edu/index.php/insight/article/view/293>
24. Kalamazh R., Voloshyna-Narozhna V., Tymoshchuk Y., Balashov E. Coping Styles and Self-Regulation Abilities as Predictors of Anxiety. *Insight: the psychological dimensions of society*. 2024. Vol. 12. P. 96–114. DOI: 10.32999/2663-970X/2024-12-3
25. Plokhikh V., Bilous R. Psychological Defenses of Students in Confronting the Stressors of Military Actions. *Insight: the psychological dimensions of society*. 2025. 13, P. 18–48. DOI: 10.32999/2663-970X/2025-13-2
26. Bokhonkova Y., Serbin I., Zavatska N., Danko D. Attributional Style as a Defense Mechanism of Student Activists' Behavior. *Insight: the psychological dimensions of society*. 2025. 13, 280–304. DOI: 10.32999/2663-970X/2025-13-12
27. Halian I., Halian O., Myshchyshyn M. Coping Strategies in the Behavioral Models of Youth in Martial Law Conditions. *Insight: the psychological dimensions of society*. 2024. (12), 44–65. DOI: 10.32999/2663-970X/2024-12-17
28. Raievska Y., Kulbida S., Lavlinsky R., Senytsia N. Psycho-Emotional Stability of the Individual in the Period of Societal Transformations. *Insight: the psychological dimensions of society*. 2025. Vol. 13, P. 519–543. DOI: 10.32999/2663-970X/2024-13-21
29. Nosov P., Zinchenko S., Ben A., Prokopchuk Y., Mamenko P., Popovych I., Moiseienko V., Kruglyj D. Navigation safety control system development through navigator action prediction by Data mining means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2, 9 (110). P. 55–68. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229237
30. Solovey O., Ben A., Dudchenko S., Nosov P. Development of control model for loading operations on Heavy Lift vessels based on inverse algorithm. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 5/2 (107), 48–56. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.214856
31. Ponomaryova V., Nosov P., Ben A., Popovych I., Prokopchuk Y., Mamenko P., Dudchenko S., Appazov E., Sokol I. Devising an approach for the automated restoration of shipmaster's navigational qualification parameters under risk conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, 3 (127). P. 6–26. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.296955
32. Kobets V., Popovych I., Zinchenko S., Nosov P., Tovstokoryi O., Kyrychenko K. Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3513. P. 130–140
33. Zinchenko S., Kyrychenko K., Grosheva O., Nosov P., Popovych I., Mamenko P. Automatic Reset of Kinetic Energy in Case of Inevitable Collision of Ships. 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland. 2023. P. 496–500. DOI: 10.1109/ACIT58437.2023.10275545.
34. Zinchenko S., Kobets V., Tovstokoryi O., Nosov P., Popovych I. Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3403. P. 582–594. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper44.pdf>
35. 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*.

Корецький О.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНИХ СТАНІВ СУДНОВОДІЯ ПІД ВПЛИВОМ ВТОМИ ТА СТРЕСУ

Судно це складна ієрархічна система керування людина-машина (ергати́чна сисема) в якій людина є ключовим компонентом, що відповідає за прийняття рішень на всіх рівнях, а отже і негативні впливи людського фактору, через втоми та стрес, на безпеку керування можливі на будь якому з цих рівнів незалежно від кваліфікації або досвіду оператора.

Сучасні системи автоматизованого управління суднами орієнтовані переважно на технічні параметри руху та навігаційні умови, проте майже не враховують психофізіологічний стан операторів. Це створює додаткові ризики для безпеки мореплавства, адже стрес і втоми суттєво впливають на працездатність штурмана та здатність приймати правильні рішення у складних ситуаціях.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого моніторингу та контролю змін психофізіологічних параметрів штурмана під впливом стресу та втоми під час виконання вахтової навігаційної служби.

Проблема полягає у відсутності ефективних технічних рішень, що забезпечували б своєчасне виявлення та компенсації негативних наслідків стресу й втоми, які не враховуються сучасними навігаційними автоматизованими системами.

У дослідженні запропоновано створення автоматизованого модуля моніторингу стану штурмана, що ґрунтується на мультиплікативному моделюванні часових рядів фізіологічних параметрів із урахуванням циркадних ритмів, адаптивної динаміки та факторів втоми. Для підвищення точності використано методи робастної регресії та аналізу передатних функцій у системі «людина – машина».

Наукова новизна полягає у застосуванні концептуальної моделі, яка розкладає фізіологічні фактори на коефіцієнти впливу та дозволяє моделювати і прогнозувати реакції штурмана в реальному часі.

Експериментальні випробування, проведені з використанням системи Navi Trainer 5000 та на реальному судні, підтвердили ефективність моделі: точність оцінки стану перевищила 90%.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості інтеграції моделі в інтелектуальні модулі судових систем управління. Це забезпечує автоматичне коригування графіків вахти, динамічну адаптацію параметрів автопілота та формування попереджувальних сигналів для екіпажу, що підвищує рівень безпеки мореплавства.

Ключові слова: безпека мореплавства, ергати́чні системи, управління судном, бортові технічні системи, людський фактор, психофізіологічний стан штурмана, автоматизована система моніторингу, MATLAB Simulink, мультиплікативна модель, машинне навчання, цифровий двійник, передавальна функція.

Koretsky O.

MATHEMATICAL MODELING OF AN AUTOMATED MONITORING AND PREDICTING SYSTEM OF THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATES OF A NAVIGATOR UNDER THE INFLUENCE OF FATIGUE AND STRESS

A ship is a complex hierarchical human-machine control system (ergatic system) in which a person is a key component responsible for decision-making at all levels, and therefore the negative effects of the human factor, due to fatigue and stress, on the safety of

control are possible at any of these levels, regardless of the operator's qualifications or experience.

Modern automated ship control systems are focused primarily on technical movement parameters and navigation conditions, but hardly take into account the psychophysiological state of operators. This creates additional risks for maritime safety, as stress and fatigue significantly affect the navigator's performance and ability to make the right decisions in difficult situations.

The object of the study is the process of automated monitoring and control of changes in the navigator's psychophysiological parameters under the influence of stress and fatigue during the performance of navigation watch duties.

The problem lies in the lack of effective technical solutions that would ensure the timely detection and compensation of the negative effects of stress and fatigue, which are not taken into account by modern automated navigation systems.

The study proposes the creation of an automated module for monitoring the navigator's condition, based on multiplicative modeling of time series of physiological parameters, taking into account circadian rhythms, adaptive dynamics, and fatigue factors. To improve accuracy, robust regression and transfer function analysis methods are used in the human-machine system.

The scientific novelty lies in the application of a conceptual model that decomposes physiological factors into influence coefficients and allows modeling and predicting the navigator's reactions in real time.

Experimental tests conducted using the Navi Trainer 5000 system and on a real ship confirmed the effectiveness of the model: the accuracy of the assessment exceeded 90%.

The practical significance of the results obtained lies in the possibility of integrating the model into the intelligent modules of ship control systems. This provides automatic adjustment of watch schedules, dynamic adaptation of autopilot parameters, and the formation of warning signals for the crew, which increases the level of maritime safety.

Keywords: maritime safety, ergatic systems, ship control, on-board technical systems, human factor, psychophysiological state of the navigator, automated monitoring system, MATLAB Simulink, multiplicative model, machine learning, digital twin, transfer function.