

Г.В. Мигаль¹, д-р техн. наук, доцент, О.Ф. Протасенко², канд. техн. наук, доцент
(¹Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»,
²Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця)

СТРЕСОСТІЙКІСТЬ ОПЕРАТОРА ЯК ПЕРЕДУМОВА БЕЗПЕКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ

Розглядається проблема безпеки ергатичних систем через призму індивідуальності людини-оператора. Показано, що індивідуальність людини найбільшою мірою проявляється в її стресостійкості, яка відображає багато взаємопов'язаних характеристик, що ускладнює її визначення. Застосування графічних образів функціонального стану оператора для аналізу експериментальних результатів досліджень дозволило встановити якісні та кількісні ознаки його зміни, що стало основою при визначенні стресостійкості оператора. Дослідження закономірності зміни показників варіабельності серцевого ритму показали наявність залежності стресостійкості від досвіду роботи оператора. Сигнатурний аналіз динаміки кардіосигналу людини під впливом стресу дав змогу візуалізувати психофізіологічну «ціну» стресу оператора (на прикладі діяльності водія-учня).

Ключові слова: стресостійкість, функціональний стан, людина-оператор, індивідуальність, безпека, сигнатура.

G.V. Mygal, O.F. Protasenko

STRESS TOLERANCE OF THE OPERATOR AS A PRECONDITION OF SAFETY OF ERGATIC SYSTEMS FUNCTIONING

The problem of ergatic systems safety through the prism of the personality of the human-operator is considered. It is shown that human personality is manifested most strongly in his stress tolerance that reflects many interconnected characteristics that complicates a stress tolerance definition. Application of graphic images of an operator functional state for the experimental results analysis of studies allowed establishing qualitative and quantitative characteristics of its change that became a basis for determining the stress tolerance of the operator. The study of patterns of change in heart rate variability showed a dependence of stress resistance on the operator's experience. Signature analysis of the human cardiac signal dynamics under the influence of stress allowed visualizing the psycho-physiological "price" of the operator's stress (on the example of a driver-pupil activity).

Key words: stress tolerance, functional state, human-operator, individuality, safety, signature.

Постановка проблеми. Життєздатність системи «людина-техніка-середовище» (СЛТС), тобто безпека, надійність, адаптивність її функціонування значною мірою залежить від людини-оператора. Відсутність контролю і управління людським чинником істотно знижує рівень безпеки будь-якої ергатичної системи. Управління людським чинником – це, в першу чергу, забезпечення психофізіологічної відповідності людини виконуваним функціям з урахуванням її індивідуальності. Найбільш складною для дослідження якістю людини-оператора є стресостійкість. Важливість її вивчення обумовлена безпосереднім впливом стресостійкості на безпеку людини-оператора. Отже, найважливішим чинником безпеки ергатичних систем є індивідуальність людини, її перехідних функціональних станів (ФС) і можливості виконувати діяльність під впливом стрес-чинників.

Таким чином, життєздатність СЛТС напряму залежить саме від визначення стресостійкості оператора необхідного типу та здатності до формування її у процесі навчання та роботи. На підставі цього **невирішеною частиною проблеми** є забезпечення надійності та ефективності діяльності оператора за умови врахування його індивідуальності, що відображується у стресостійкості та психофізіологічному ризику для його організму, тобто «ціни» діяльності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з найбільш яскравих прикладів виконання операторської когнітивної діяльності (оператор-дослідник) є процес навчання майбутнього водія на курсах водіння. Україна посідає одне з перших місць серед країн Європейського регіону за рівнем дорожньо-транспортного травматизму та смертності від дорожньо-

транспортних пригод. Це свідчить про неефективність наявних заходів безпеки дорожнього руху та необхідність системного аналізу цієї проблематики. Аналіз аварійності на транспорті свідчить, що інтенсивність взаємодії «людина-машина-дорога» сьогодні не відповідає індивідуальним психофізіологічним можливостям людини. Очевидно, що ігнорування індивідуальності людини, її психологічних особливостей і психофізіологічних можливостей призводить до появи статистики, згідно з якою в 93% дорожньо-транспортних пригод причиною є людський чинник [1 - 4]. При цьому, згідно з Наказом про затвердження Переліку робіт, де є потреба у професійному доборі, роботи, пов'язані з управлінням наземним, підземним, повітряним та водним транспортом потребують професійного добору та відносяться до робіт підвищеної небезпеки. Зазначимо, що в переліку важливих характеристик, за якими проводиться професійний добір, існує емоційна стійкість та почуття тривоги, стресостійкість, втома, здатність приймати рішення в екстремальних умовах.

Постановка завдання. Системний аналіз проблематики показав, що безпека системи «людина-автомобіль-дорога» найбільше залежить від:

- критичного рівня психоемоційного та інформаційного навантаження на водія (інформаційний стрес), що призводить до сумарного ефекту порушення індивідуальних механізмів стресової адаптації людини та її неадекватної адаптивно-компенсаторної поведінки в стані стресу;

- пізнавальних здібностей водія, когнітивна діяльність якого включає прийняття рішення в складних умовах та неперервний процес навчання, та їх природного поступового погіршення з віком.

Відомо, що системні причини небезпечної або ризикованої поведінки людини в системі «людина-автомобіль-дорога», що формують модель її поведінки, розміщені на перетині площин поінформованості людей, їхнього бажання використовувати наявну інформацію та психофізіологічних і психологічних особливостей. Відповідно і засоби їх регулювання потрібно вибирати з урахуванням особливостей цих впливів.

Загальна проблема – недосконалість урахування індивідуальності людини або часто навіть її повне ігнорування при організації процесу навчання водіїв. Учень-водій є типовим представником оператора-дослідника, від успішності та надійності когнітивної діяльності якого напряму залежить ефективність та ризику його діяльності у майбутньому. Особливістю когнітивної діяльності учня-водія є підвищена напруженість навчання, що виникає як наслідок таких взаємообумовлюючих чинників:

- відсутність профвідбору на етапі навчання дає змогу виконувати діяльність всім бажаним, тим самим допускаючи у дорожньо-транспортне середовище людей, які не відповідають вимогам до професії;

- занадто короткий термін навчання, за час якого неможливо сформувати професійно значущі якості та стресостійкість зокрема;

- існування відповідальності за якість своєї діяльності в адміністративній, правовій та карній сфері;

- діяльність водія – це один з небагатьох видів діяльності, для якої характерна дуже висока «ціна» помилки людини, що приймає рішення. Наявність тягаря відповідальності суттєво підвищує «ціну» помилки, що призводить до виникнення складного стресового функціонального стану та великої «ціни» психофізіологічної адаптації до такої діяльності.

Все це призводить до виникнення у людини складного стресового стану та підвищення «ціни» психофізіологічної адаптації до такої діяльності. По відношенню навіть до навчання водія-професіонала сучасні підходи базуються тільки на професійно важливих якостях, тоді як саме на початковому етапі когнітивної діяльності учня-водія необхідно визначення «ціни» його адаптації до діяльності, та подальше корегування процесу навчання з урахуванням індивідуальності людини, що навчається. У цьому зв'язку існує **науково-практична задача** контролю стресостійкості учня-водія.

Результати і обговорення. Дослідження «людського чинника» базуються на визначенні «ціни» діяльності, професійного здоров'я, індивідуальної норми, при аналізі яких складною проблемою є індивідуальність поведінки людини [5 - 7]. Саме індивідуальність – психологічна, психофізіологічна, особистісна – визначає, чи буде «ціна» діяльності оператора допустимою або стане непомірно високою для конкретної людини. Стресостійкість, як здатність людини протистояти негативному впливу стрес-чинників, обумовлена індивідуальним комплексом вроджених і набутих психофізичних, психологічних і фізіологічних властивостей і процесів. Саме стресостійкість забезпечує людині-оператору надійне і безпечне функціонування під час трудової діяльності в складних та екстремальних умовах. Згідно з С. Мадді, стресостійкість є передумовою життєстійкості та формується в процесі набуття досвіду. Життєздатність ергатичної системи на пряму залежить саме від стресостійкості оператора та здатності до її формування в процесі навчання та діяльності. Тому особливу увагу необхідно приділити визначенню і аналізу стресостійкості як психофізіологічної здатності людини до виконання діяльності, що дозволить виявляти приховану структуру індивідуальних особливостей особистості.

Спроби визначити стресостійкість за класичним ергономічним визначенням динаміки інтегральних параметрів ФС або кількості помилок в діяльності не дали змоги отримати результат. Це пов'язано з тим, що стани втоми та стресу добре маскуються психологічним піднесенням при наявності певної мотивації. Тобто маркери стресостійкості приховані у взаємозв'язках параметрів ФС людини. Виявити приховані зв'язки вдалося, застосувавши геометричний принцип аналізу сукупності параметрів стану. Результати вимірювань електрофізичних параметрів біологічно активних точок шкіри людини (БАТШ) подаються у вигляді певного графічного образу в площині функціональних станів, роль якої відіграє фазова площина, утворена дійсною й уявною частинами комплексної ємності [2]. Кожна точка в цій площині відповідає певному психофізіологічному стану однієї з 12 підсистем організму людини, тому потужність множини вимірюваних параметрів пропорційна площі, яку охоплює графічний образ та інтегративно характеризує ФС організму людини. Такий графічний метод оцінки стресостійкості оператора дав можливість інтегративно характеризувати поточний ФС підсистем організму та їх гомеостатичну взаємодію [2]. Аналіз експериментальних результатів більш ніж 500 операторів різних видів діяльності за допомогою такої геометризації дозволив виявити якісні ознаки зміни ФС за фазовою площиною: величина площі графічного образу, її зсув відносно попереднього вимірювання, відношення площ вимірювань при дії різних стрес-чинників [2].

Для виявлення індивідуальних змін психофізіологічних показників оператора при дії стрес-чинників проведено дослідження можливості контролю формування стресостійкості на прикладі діяльності водія за параметрами серцевого ритму за допомогою НПК «Олімп» та ПАК «Омега-Динаміка». Це дало змогу виявити закономірності зміни показників варіабельності серцевого ритму (частота пульсу (ЧСС), варіабельність (ВР), індекс напруженості (ІН), амплітуда моди (АМо) за Р. Баєвським) під впливом стрес-чинників. Наприклад, встановлено наявність залежності показників серцевого ритму від досвіду (табл. 1).

Таблиця 1

Типові значення показників варіабельності ритму серця у досліджуваних в спокої, з досвідом, в першій та 10-й виїзд з інструктором

Стани досліджуваних (або умови дослідження)	Показники серцевого ритму			
	ЧСС, уд./хв	ВР, с	ІН, од.	АМо, %
Спокій	60 – 90	0,10 – 0,2	200 – 500	25 – 40
Стрес	110 – 145	0,01 – 0,04	1000 – 5000	45 – 85
Хвороба	110 – 145	0,01 – 0,04	1000 – 4500	70 – 90
Досвід	60 – 90	0,10 – 0,2	30 – 500	25 – 45
Перший виїзд	100 – 145	0,01 – 0,04	1000 – 5000	70 – 90
10-й виїзд	90 – 120	0,18 – 0,32	100 – 200	30 – 50

Результати дослідження людини з високим рівнем стресостійкості після психоемоційного стресу (табл. 2).

Таблиця 2

Зміна показників ФС людини під впливом стресу

Психофункціональні показники	Значення		Норма
	до	після стресу	
Частота серцевих скорочень, ЧСС (уд./хв)	58	58	60 – 90
Індекс вегетативної рівноваги	212,77	277,27	35 – 145
Вегетативний показник ритму	0,23	0,20	0,25 – 0,6
Показник адекватності процесів регуляції	48,08	56,09	15 – 50
Індекс напруженості регуляторних систем	102,29	133,55	10 – 100

Результати дослідження людини з низьким рівнем стресостійкості після психоемоційного стресу (табл. 3).

Таблиця 3

Зміна показників ФС людини після стресу

Психофункціональні показники	Значення		Норма
	до	після стресу	
Психофункціональний рівень	0,82	0,01	0,6 – 1,0
Психофункціональні резерви	0,24	0,14	0,6 – 1,0
Рівень адаптації, що прогнозується	0,49	0,08	0,6 – 1,0
Резерви адаптації	0,40	0,08	0,6 – 1,0

З таблиці видно, як суттєво змінюються параметри серцево-судинної системи людини з кожним вимірюванням у процесі здобуття навичок водіння. Однак, необхідно звернути увагу, що параметри стану людини, отримані за допомогою НПК «Олімп», нестійкі та змінюються навіть при мінімальному впливі стрес-чинників. Діагностика ФС оператора такими системами базується на понятті норми з широкими діапазонами кожного з параметрів. Так, наприклад, індекс напруженості має норму 50-200, в реальності – від 5 до 400 у здорових людей. При цьому будь-які відхилення від основної множини значень параметра у людини трактуються як артефакт та не враховуються при аналізі, що також призводить до неврахування індивідуальності ФС людини. Звісно, суттєвим досягненням є надзвичайно малий для таких досліджень час вимірювань – 3...5 с, що дає можливість використовувати цей прилад для експрес-діагностики ФС. Однак, нормування результатів, чутливість до впливів, дихальні та інші артефакти є суттєвими недоліками. Таким чином, індивідуальність реагування ФС людини на діяльність та реагування організму на вплив стрес-чинників нівелюється або маскується широкими границями норми.

Найбільш інформативними виявились дослідження стресостійкості людини-оператора за допомогою розробленого міждисциплінарного підходу до дослідження індивідуальності функціонування об'єктів живої і неживої природи [2]. У рамках підходу просторово-часове представлення інформації (сигналу) доповнюється швидкістю її зміни та представлено в одному просторі. В його основі лежить перетворення одновимірного інформаційного потоку в тривимірну замкнуту траєкторію. Проекціями цієї траєкторії є індивідуальні графічні образи (сигнатури 1-го і 2-го порядків), у конфігураціях яких реалізується природна декомпозиція інформаційного потоку на динамічні, енергетичні і кібернетичні цикли. Така геометризація сигналу в просторі динамічних подій дозволяє візуалізувати: характеристичні ознаки функціонування елементів системи; динамічну упорядкованість складових циклу функціонування; енергетичну збалансованість циклу функціонування.

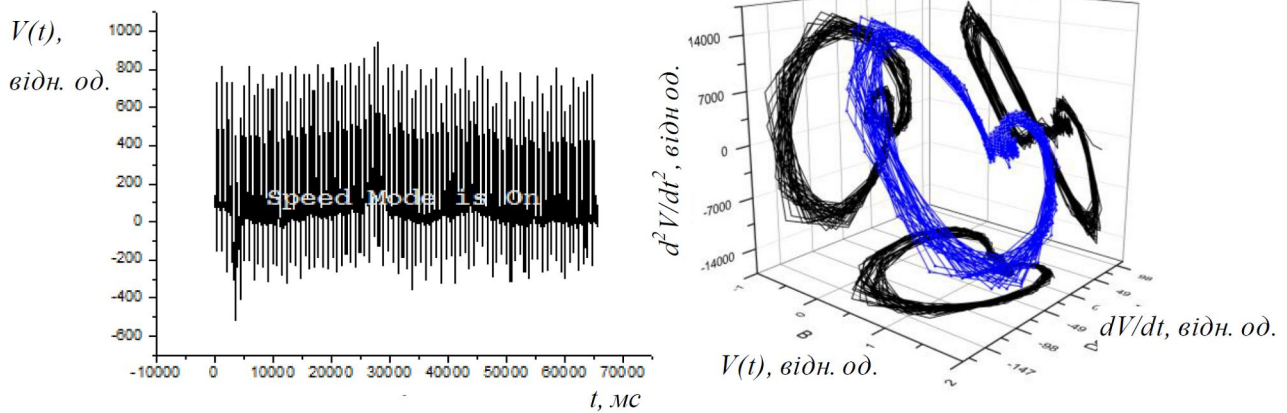


Рисунок 1 – Перетворення одновимірного інформаційного потоку (сигнал ЕКГ людини) в тривимірну замкнуту траєкторію

Пакет сигнатур $dV/dt - d^2V/dt^2$ відображає характер перебудови функціонування міокарда під стрес-впливом. Навіть при незначному впливі шуму на оператора в ньому проявляються (рис. 2 б, г) приховані порушення управління (синхронізація або десинхронізація процесів, характер адаптивних процесів та інші), а накопичення втоми, зменшення функціонального резерву проявляється як граничний цикл – аттрактор. При цьому аналіз пакетів сигнатур дозволяє отримати якісно нову інформацію про особливості динаміки адаптаційних процесів, повторюваність артефактів, варіаційний розмах, тобто цілісно оцінити індивідуальність перебудови структури кардіоциклу при дії стрес-чинників діяльності.

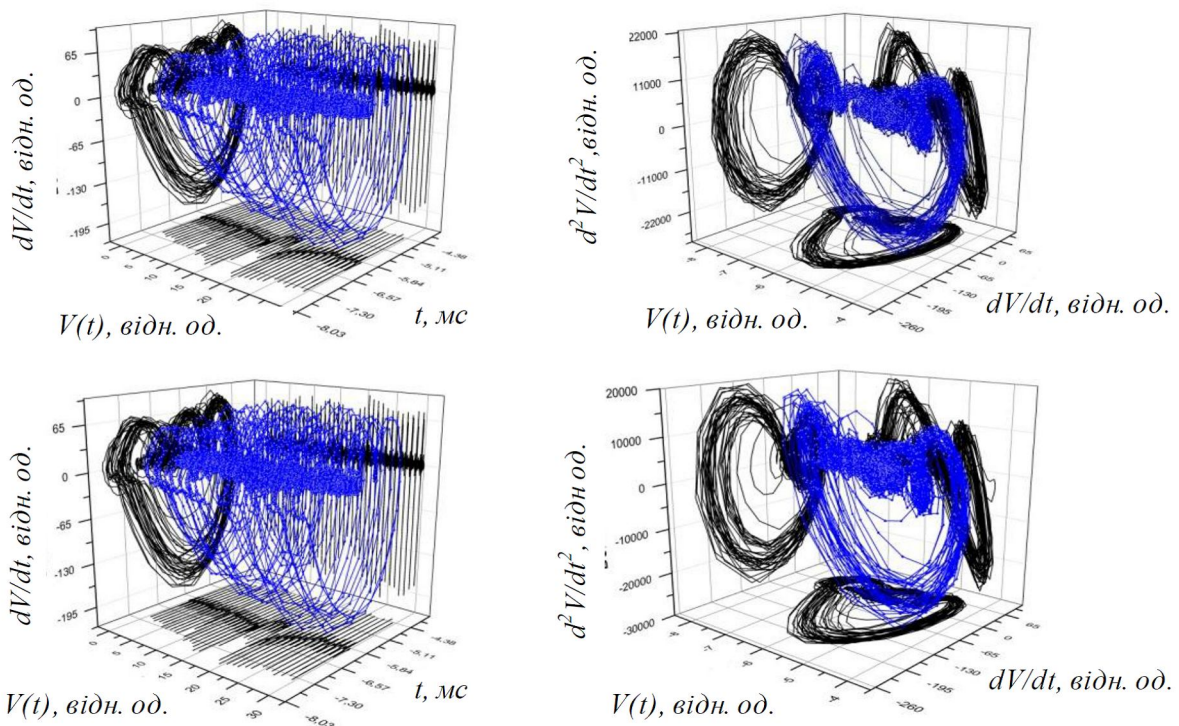


Рисунок 2 – Візуалізація реакції оператора на шумовий стрес (до (а, б) та після (в, г) впливу) у сигнатурах сигналу ЕКГ

Найбільш багатогранним є відображення впливу сильного психофізіологічного стресу, що проявляється в динаміці ЕКГ (рис. 3), наприклад, як при зміні перебігу шлуночкової тахікардії як передвісника аритмії та подальшої фібриляції, яку надзвичайно складно прогнозувати.

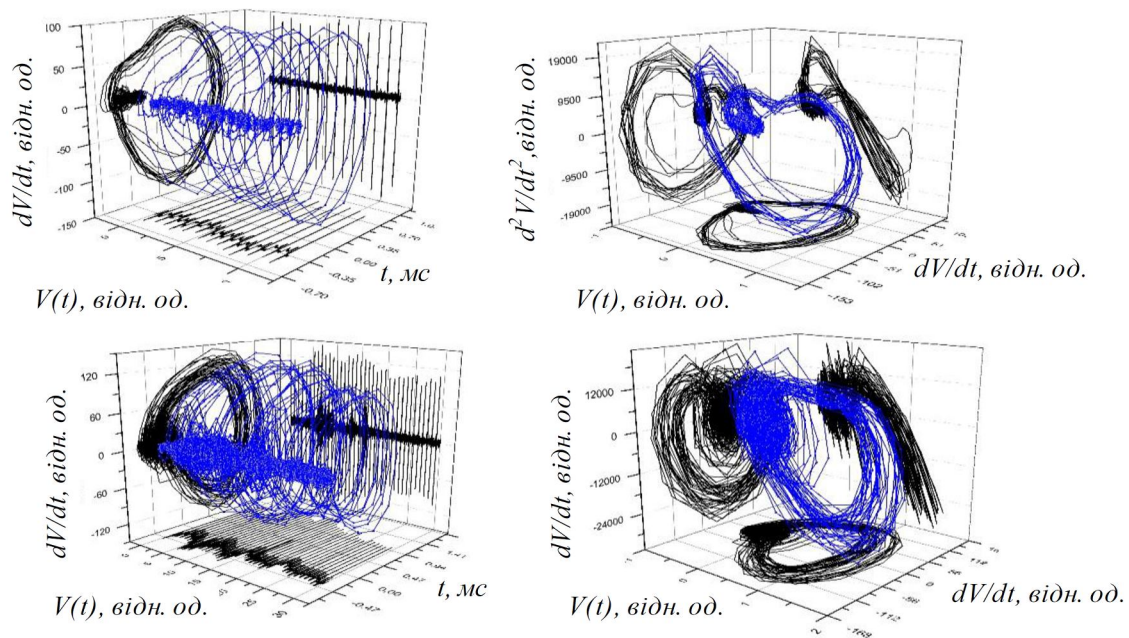


Рисунок 3 – Маркери перебудови структури управління кардіоциклом під значним стрес-впливом (а, б – немає аритмії, в, г – є аритмія)

Виявлені маркери перебудови структури сигналу при впливі стресу: збільшення асиметрії, зменшення збалансованості, неоднорідність щільності сигнатур в пакеті та інші, вказують на особливості адаптивної реакції на стрес-чинник. Таким чином, стає можливим контроль адаптації ФС людини до стресових умов, які, на відміну від інших, дають змогу виявити ергономічні закономірності його діяльності в складних умовах та на їх основі прогнозувати його стресостійкість.

Такий підхід до аналізу впливу стресу на людину дозволив візуалізувати психофізіологічну «ціну» стресу учня-водія при навчанні водінню. Побудовані сигнатури ЕКГ учнів-водіїв на початку та наприкінці циклу занять добре характеризують помірні наслідки стресу при водінні автомобіля стресостійкими учнями (рис. 4 а, б) та надмірну «ціну» стресу нестресостійкого учня (рис. 4 в). Результати підтверджувались використанням психологічних тестів на стрес та тривожність. Цікаво, що масштаб перших двох та третьої сигнатури суттєво відрізняється: сигнатура на рисунку (в) на порядок менша за геометричними розмірами і поєднує маркери функціонального зриву (прихований аттрактор малої площі, хаотичність керування ритмом).

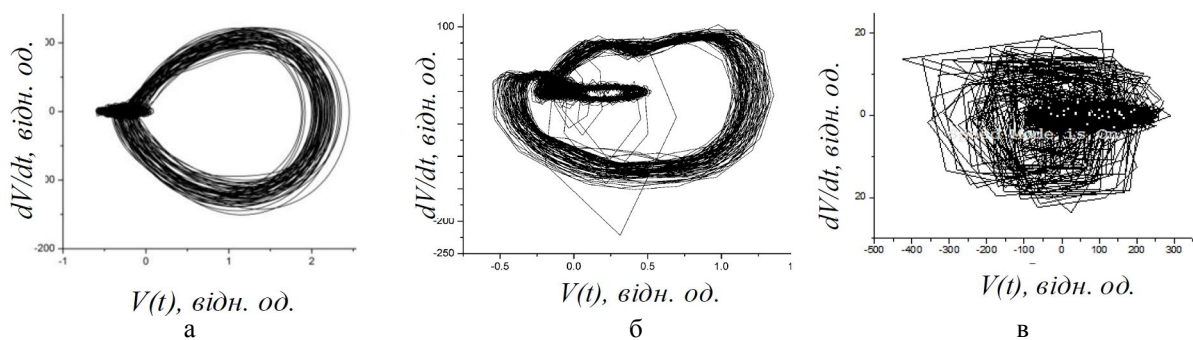


Рисунок 4 – Пакети сигнатур 1-го та 2-го порядків (а, б) сигналу ЕКГ при стресі учня-водія автомобіля

Встановлено універсальні *характеристичні ознаки індукованої стресом перебудови структури кардіоциклів у пакеті сигнатур ЕКГ*, а саме: а) зміна площі сигнатури, яку характеризує ентропія Больцмана як функція стану на 30% і більше; б) значна асиметрія конфігурації сигнатур; в) ступінь розмиття ΔX пакета, який відображає ентропія Колмогорова –

надто розмитий пакет або квазістійкий граничний кардіоцикл – аттрактор $dH/dt = 0$, вказує на напруженість процесів регулювання; г) неоднорідність щільності траєкторій в пакеті сигнатур, що вказує на перехідні процеси між різними стратегіями серцево-судинної системи; д) локальна нестійкість ΔX і незбалансованість протилежних фаз циклу $\Delta B/B$, що вказує на непропорційність адаптаційного відгуку на стрес-вплив.

Характеристичними ознаками стресостійкості є: а) симетричність конфігурації сигнатури; б) відносна зміна її площі, більша ніж в ϵ раз; в) рівномірність розмиття сигнатур в пакеті; г) відсутність різкої перебудови конфігурації сигнатур, тобто переходів між стійкими циклами.

Виявлені закономірності дають можливість за допомогою сигнатур ЕКГ та алгоритмів швидких оцінок показників серцевого ритму контролювати зміни ФС людини під впливом стрес-чинників діяльності (навчання), виявляти перехідні та ідентифікувати ФС за системоруйнівними ознаками для своєчасного корегування процесу навчання та діяльності. А головне, виявляти людей, що не придатні до певної діяльності через слабку здатність до формування стресостійкості.

Висновки. На підставі результатів проведених досліджень можна зробити висновок, що для ергатичних систем, для яких не проводять попередній професійний і психофізіологічний відбір, людина-оператор з невідомим рівнем стресостійкості є елементом, що підвищує загальний ризик системи. Тому в рамках цієї роботи:

– на прикладі діяльності водіїв з різним професійним досвідом встановлено значний вплив стресових чинників на них, що системно відбиваються на їхньому психофізіологічному стані і, як наслідок, на результатах діяльності. Для створення ефективної системи контролю формування стресостійкості операторів обґрунтовано необхідність врахування їхньої індивідуальності;

– для виявлення індивідуальних змін психофізіологічних показників оператора при дії стрес-чинників проведено дослідження можливості контролю формування стресостійкості на прикладі діяльності водія за параметрами серцевого ритму за допомогою НПК «Олімп» (Мінськ), що дало змогу встановити наявність залежності показників серцевого ритму від досвіду та закономірність їх зміни з отриманням досвіду;

– встановлено, що інформативним при визначенні стресу водія є сигнатурний аналіз кардіоциклів, що дало змогу візуалізувати психофізіологічну «ціну» стресу учня-водія.

Список літератури:

1. Европейский доклад о состоянии безопасности дорожного движения [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.euro.who.int/PubRequest>.

2. Mygal V. P. An interdisciplinary approach to study individuality in biological and physical systems functioning / V. P. Mygal, A. V. But, G. V. Mygal, I. A. Klimenko // Scientific Reports / Nature Publishing Group, Jul 14, 2016. № 6. P. 387 – 391.

3. Мигаль Г. В. Ергономічний підхід до організації навчання та підвищення його ефективності / Г. В. Мигаль, Ю. С. Выходец // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016. – № 2 (76). – С. 70 – 79.

4. Мигаль Г. В. Психофізіологічна індивідуальність: проблема управління безпекою пішохода / Г. В. Мигаль, О. Ф. Протасенко // Открытые информационные и компьютерные технологии. – 2016. – Вып. 71. – С. 220 – 228.

5. Hancock P. A. A dynamic model of stress and sustained attention / P. A. Hancock, Joel S. Warm // Human Factors. – 1989. – 31(5). – P. 519-537.

6. Nikolova R. Evaluation of the functional state of cardiovascular system under chronic stress / R. Nikolova, M. Kurtisheva, R. Dimitrova // Acta medica Bulgarica. – 2002. – Vol. XXIX. – P. 65-71.

7. Work-related stress. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, 2010 [Електронний ресурс] // Режим доступа: <https://www.eurofound.europa.eu/observatories/eurwork/comparative-information/work-related-stress>.

References:

1. Evropeyskiy doklad o sostoyanii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya // Electronic access: <http://www.euro.who.int/PubRequest>
2. Mygal, V. P., But, A. V., Mygal, G. V., Klimenko, I. A. (2016). An interdisciplinary approach to study individuality in biological and physical systems functioning. *Scientific Reports / Nature Publishing Group, № 6*. P. 387 – 391.
3. Mygal, G. V., Vyhodets, Yu. S. (2016). Ergonomichniy pidhid do organizatsiyi navchannya ta pidvischennya yogo effektivnosti. *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi, № 2 (76)*. 70 – 79.
4. Migal, G. V., Protasenko, O. F. (2016). Psychophysiological personality: the problem of pedestrian safety management. *Otkryitye informatsionnyie i kompyuternyye integrirovannyye tehnologii, 71*. 220 – 228.
5. Hancock, P. A., Warm, Joel S. (1989). A dynamic model of stress and sustained attention. *Human Factors, 31(5)*. 519-537.
6. Nikolova, R., Kurtisheva, M., Dimitrova, R. (2002). Evaluation of the functional state of cardiovascular system under chronic stress. *Acta medica Bulgarica, Vol. XXIX*. 65-71.
7. Work-related stress. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, 2010 // Electronic access: <https://www.eurofound.europa.eu/observatories/eurwork/comparative-information/work-related-stress>.

