

*В. П. Мигаль, д-р техн. наук, професор, Г. В. Мигаль, канд. техн. наук, доцент
(Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна)*

СТРУКТУРНО–ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ БЕЗПЕКИ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Запропоновано засоби геометризації сигналів сенсорів складної технічної системи в динамічному просторі. Для їх аналізу використано універсальні диференціально-геометричні параметри та інтегративні показники. Показано, що взаємозв'язок динамічних параметрів сигналу сенсора визначає геометричну модель структури його циклу управління. Таке моделювання спрощує аналіз сумісності і узгодженості функціонування різних за природою елементів технічної системи. Характер перебудови структури циклу управління елемента визначає особливості його функціонування в екстремальних умовах.

Ключові слова: оператор, безпека, функціональний стан, структура управління, геометризація сигналу, сигнатура сигналу.

В. П. Мигаль, Г. В. Мигаль

СТРУКТУРНО–ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложены средства геометризации сигналов сенсоров сложной технической системы в динамическом пространстве. Для их анализа использованы универсальные дифференциально-геометрические параметры и интегративные показатели. Показано, что взаимосвязь динамических параметров сигнала сенсора определяет геометрическую модель структуры его цикла управления. Такое моделирование упрощает анализ совместимости и соответствия деятельности различных по природе элементов технической системы. Характер перестройки структуры цикла управления элемента определяет особенности его функционирования в экстремальных условиях.

Ключевые слова: оператор, безопасность, функциональное состояние, структура управления, геометризация сигнала, сигнатура сигнала.

V. P. Mygal, G. V. Mygal

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL APPROACH TO SAFETY ANALYSIS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Means of complex technical system sensor signals geometrization in a dynamic space have been proposed. For the analysis differential geometry and integrative indicators have been used. The relationship between the dynamic parameters of the signal of the sensor determines the geometrical model of the structure of its management cycle. Such modeling simplifies the analysis of the compatibility and compliance of the different nature of the technical system elements. The nature of the restructuring of the management cycle defines a particular element of its operation in extreme conditions.

Key words: operator, safety, reliability, functional state, control structure, the geometrization of the signal, the signature of the signal.

Актуальність проблематики і ключова проблема

Прогнозування поведінки складних технічних систем (СТС), керованих людиною, в екстремальних умовах досить актуальне для аерокосмічної техніки [1]. Важливим є врахування людського чинника на всіх етапах життєвого циклу системи, що керується людиною-оператором [1, 2]. Без цього не може бути вирішена сукупність проблем управління СТС в екстремальних умовах (надійності, безпеки та ін.). Характерною особливістю діяльності людини-оператора при вирішенні диспетчерських, технологічних, управлінських завдань є не прогнозоване виникнення проблемних (складних, позаштатних, аварійних) ситуацій і вплив несприятливих, екстремальних екологічних та інформаційних стрес-чинників [3]. Зокрема, істотно знижує рівень безпеки СТС неефективність або відсутність: а) методів виявлення індивідуальної дії стрес-чинників діяльності та середовища; б) засобів прогнозування ризиків; в) методів та засобів відбору операторів та їх он-лайн допуску; г) методів оцінювання «ціни діяльності» для людини, тобто оцінки наслідків. Зазначені чинники суттєво підвищують ризики і, в підсумку, безпека СТС в екстремальних умовах стає мало прогнозованою [4].

Ефективність роботи оператора залежить від множини зовнішніх і внутрішніх чинників, які прямо чи опосередковано впливають на його функціональний стан (ФС). При цьому роботу оператора ускладнюють стрес-чинники діяльності (умови праці, процеси отримання інформації, вимоги до швидкості обробки інформації та прийняття рішення тощо) та навколишнього середовища (магнітні бурі, перепади тиску і температури, рівень забруднення і т.п.) [5]. Діяльність оператора в екстремальних умовах супроводжується зменшенням функціонального резерву і напругою регуляторних механізмів, тобто обумовлює індивідуальну динаміку адаптаційних процесів. Тому зміни в підсистемах організму людини та зв'язки між ними при переході з одного ФС в інший повинні проявлятися в індивідуальній динаміці різних фізіологічних сигналів. Отже, для системного аналізу результатів дослідження ФС необхідний пошук універсального підходу. В рамках якого можна здійснювати відбір операторів, та визначити нові критерії їх допуску до роботи.

Невирішеною частиною проблеми прогнозування безпеки є визначення сумісності структур управління всіх елементів СТС, включаючи і організм оператора. Існують системні суперечності між методами обробки сигналів функціонування елементів різної природи і засобами аналізу їх динаміки. Вони ускладнюють комплексне дослідження індивідуального характеру зміни функціональних станів оператора [6]. З одного боку, через необхідність застосування різних методів дослідження, моделей, параметрів і критеріїв системний аналіз ФС суперечливий. З іншого – інформація про вплив стрес-чинників діяльності на динаміку ФС прихована в особливостях фізіологічних сигналів (ЕКГ, ЕЕГ та ін.), а також в параметрах природних сенсорів (рецепторів, біосенсорів, біологічно активних точок шкіри (БАТШ), систем сприйняття – аналізаторів інформації) [7]. У кожному з них прихована динаміка перебування структури взаємозв'язків, на яку впливають стрес-чинники навколишнього середовища і професійної діяльності. Як бачимо, ключова проблема – в відсутності універсальних методів виявлення індивідуальності функціонування елементів (підсистем) СТС та їх аналізу. Тому метою роботи є пошук ефективних засобів виявлення сумісності та узгодженості функціонування всіх елементів СТС, за допомогою яких можна досліджувати і прогнозувати їх поведінку і безпеку в екстремальних умовах.

Сучасний стан проблеми

Зниження працездатності людини-оператора відбувається через послідовність його перехідних ФС і супроводжується зменшенням адаптаційних можливостей організму. Однак ідентифікація цих станів в режимі онлайн неоднозначна через різноманіття сигналів, методів їх обробки, параметрів і критеріїв. Тому, незважаючи на комплексні дослідження, перехідні ФС людини погано прогноуються. Наприклад, дослідження динаміки серцевого ритму проводиться на основі електрокардіограми (ЕКГ), аналіз якої залишається складним і неодно-

значним процесом. Не дає належних результатів аналіз варіабельності серцевого ритму, вейвлет-аналіз ЕКГ, спектральний аналіз ЕКГ на площині комплексних частот і образного уявлення ритмічної структури записаних ритмограм (інтервалограми, скаттерограми тощо), аналіз дисперсії інтервалу Q - T, аналіз ЕКГ у фазовому просторі (спектрограми, хаосграми та інші) [8]. Вони дають важливу, однак суперечливу, інформацію, тому що не враховують індивідуальності динаміки кардіоциклу людини.

Для визначення ФС людини-оператора сьогодні в основному застосовують два підходи – комплексний і ергономічний. В основі комплексного підходу – реєстрація багатьох психофізіологічних індикаторів (ЕЕГ, ЧСС, ЕМГ, дихальних рухів та ін.). Їх аналіз привів до розуміння ФС як інтегрального комплексу різних характеристик, якостей і властивостей організму людини. Саме в них відображаються різні аспекти професійної діяльності і поведінки. При цьому дослідження ФС в рамках комплексного підходу неоднозначне, трудомістке і часто суперечливе через різноманіття психофізіологічних індикаторів, параметрів, показників і т.ін. [9]. Адже ФС є зміною одного комплексу реакцій (відгуків, циклів, і т.ін.) іншими, причому всі ці реакції взаємопов'язані між собою. Однак засобів виявлення індивідуальності цих взаємозв'язків мало. Тому прогнозування більш-менш адекватного функціонування серцево-судинної підсистеми організму в екстремальних умовах є складним процесом.

В основі ергономічного підходу оцінювання ФС за результатами трудової та професійної діяльності. Результати подібної діяльності розглядаються як інтегральні показники ФС. При цьому зниження результативності діяльності розглядається як ознака погіршення ФС. Такий підхід дає змогу виділити два класи ФС: а) стан адекватної мобілізації, коли всі системи організму працюють оптимально і відповідають вимогам діяльності, б) стан динамічної неузгодженості, при якому різні системи організму частково забезпечують його діяльність або працюють на високому рівні втрат енергетичних ресурсів. В останньому випадку мова йде про так звані екстремальні стани (реактивні проміжні (пограничні) або патологічні стани). Звичайно, між станом оперативного спокою і екстремальними станами існує чимало інших станів (втоми, виснаження і т.ін.). Ергономічний спосіб оцінки ФС безумовно корисний при вирішенні завдань підвищення ефективності діяльності, а також для прогнозування розвитку таких небажаних ФС, як монотонія, стрес або високий ступінь втоми [10]. Однак, такий підхід не дає змоги підійти до вирішення проблеми індивідуального характеру перебування ФС через різний вплив стрес-чинників. Вони різні за природою походження, тривалістю та інтенсивністю впливу, а також специфічністю індивідуальності реакцій, що викликаються. В екстремальних же умовах домінує успадкований «сценарій» адаптації організму людини, який в першу чергу підтримує життєво важливі функції домінантних підсистем завдяки іншим [11].

Інформативність структурно-функціонального підходу

Інформацію про функціонування СТС надає безліч джерел (сенсорів різної природи), а також функціональні характеристики елементів СМС, включаючи і підсистеми організму людини. Всім елементам і підсистемам властива індивідуальність динаміки функціонування в екстремальних умовах. Вона обумовлена протидією системи зміні свого стану у відповідності з принципом Ле Шательє–Брауна. Особливості функціонування приховані в грубій (динамічній) і в тонкій (інформаційній) структурі їх управління [12]. Аналіз аварій на транспорті свідчить про те, що ключовою проблемою є сумісність управління технічними елементами і «чутливими» підсистемами організму оператора. Оскільки ФС оператора безперервно змінюється, то системний аналіз результатів комплексних досліджень не однозначний. Це обумовлено індивідуальними особливостями зв'язків між підсистемами організму, які проявляються в тонких, часом непомітних, змінах форми і структури фізіологічних сигналів. Подібні проблеми були виявлені при експлуатації сенсорів різної природи в екстремальних умовах. Вони також пов'язані з індивідуальністю їх характеристик і були вирішені за допомо-

гою аналогового сигнатурного аналізу [13]. В його основі порівняння сигнатур функціональних характеристик із сигнатурами, що прийняті за еталон [7]. Незважаючи на різноманіття елементів сучасних СТС, їх структури автоматичного управління, як правило, динамічно подібні. Це забезпечує узгодженість функціонування елементів системи. Остільки зв'язок структури і функцій лежить в основі біологічного та фізичного порядку [14], однією з ключових проблем в забезпеченні безпеки СТС, керованих людиною, є пошук універсальних засобів ефективного відбору операторів (пілота, диспетчера і т.ін.). Подальший розвиток сигнатурного підходу дає змогу виявляти індивідуальність різних за природою характеристик функціональних матеріалів [14 - 20]. Перенесення його засобів в область медичної діагностики розширило кількість характеристичних ознак і показників [21].

Вінер у своїх дослідженнях показав, що принципи керування і зв'язку в техніці і фізіології подібні [22]. Тому переходи від одного динамічного стану елемента СТС в інший причинно-наслідково пов'язані між собою. Для виявлення і дослідження характеру цих переходів сигнал $X(t)$ довільного сенсора представимо у просторі динамічних подій як певну траєкторію. Кожну подію можна відобразити в просторі (стан - швидкість - прискорення) точкою з координатами $(X, dX/dt, d^2X/dt^2)$. При цьому виявилось, що сигнатури різних за природою сигналів подібні за формою подання. Дійсно, після геометризації сигналів сенсорів різних за природою елементів (підсистем) в динамічному просторі (стан - швидкість - прискорення), вони перетворюються на траєкторії причинно-наслідково пов'язаних між собою динамічних подій. По суті, траєкторія є геометричною інтерпретацією варіаційного принципу найменшої дії Гамільтона. Тому ортогональні проєкції траєкторії є сигнатурами 1-го і 2-го порядків: $X - dX/dt$, $X - d^2X/dt^2$ та $dX/dt - d^2X/dt^2$. Перевагою такої геометризації сигналу сенсора будь-якої природи $X(t)$ є: а) природна декомпозиція на геометрично впорядковані ділянки; б) можливість диференційно-геометричним параметрам цих ділянок (довжина, кривизна, кривина) поставити у відповідність фізичні величини (стан, швидкість, прискорення). Тому сигнатура $X - dX/dt$ відображає динамічні складові сигналу, а сигнатура $X - d^2X/dt^2 -$ енергетичні складові. Це дає змогу використовувати фундаментальні закони, принципи і критерії динаміки і термодинаміки. Так, індивідуальність конфігурацій цих сигнатур природним чином поєднується зі статистичною впорядкованістю їх складових. Дійсно, просторово-часові кореляції динамічних подій перетворюються в геометрично впорядковані ділянки (динамічні і енергетичні складові конфігурацій сигнатур $X - dX/dt$, $X - d^2X/dt^2$). При цьому характер взаємозв'язку динамічних складових i -того елемента dX/dt та d^2X/dt^2 визначає індивідуальну структуру його циклу управління, яка є сигнатурою $dX/dt - d^2X/dt^2$. Протифазні складові конфігурації циклу розташовані в 4 квадрантах площини (швидкість-прискорення). Площа цієї сигнатури має розмірність потужності. Тому цю сигнатуру можна вважати геометричною моделлю структури управління, яка реалізує певний цикл функціонування i -того елемента. Для його аналізу запропонована матриця показників збалансованості потужностей основних його фаз. Аналіз сумісності систем управління елементів СТС істотно спрощує порівняння геометричних моделей їх елементів (підсистем).

Індивідуальність адаптаційних процесів проявляється в характері перебудови конфігурацій сигнатур сигналів, який відображається в пакетному їх поданні. Зміни конфігурації і площі сигнатур взаємопов'язані, що надає якісно нові можливості. Так, уявлення площі сигнатури $X - dX/dt$ як підмножини мікростанів, натуральний логарифм якого є ентропією, дозволяє здійснювати ентропійний аналіз функціонування [19]. У характері перебудови конфігурації і площі сигнатур фізіологічних сигналів природним чином відображається зв'язок динамічних і статистичних закономірностей функціонування системи.

Інформативна залежність $H(t)$, яка відображає результати інтегрування сигнатур сигналів в пакеті, а також її похідна $dH(t)/dt$. Узгоджена зміна конфігурації сигнатур і її площі (ентропії H) властива біологічним системам. Для дослідження біосистем нами вперше запропоновані інтегрально-диференціальні H -сигнатури $H(t) - dH/dt$, яким також властива циклі-

чність [4]. При цьому особливості перебудови Н-сигнатур відображаються в їх пакетах. Так, пакет Н-сигнатур кардіоциклів оператора являє собою хаосграму, в якій відображається хаотичність переходів порядок-безладдя. Отже, в Н-сигнатурах природним чином проявляються закономірності встановлення біологічного порядку. В його основі успадкований зв'язок структури і функцій. Тому ентропійний аналіз робить підхід своєрідним мостом між макроскопічними і мікроскопічними описом функціонування підсистем будь-якої природи.

Відображення впливу стрес-чинників на структуру кардіоциклів

Характер перехідних функціональних станів людини цілісно відображає динаміка функціонування серцево-судинної системи людини. Це підтверджує використання в галузі космічної медицини параметрів серцево-судинної системи як індикаторів адаптаційних реакцій цілісного організму на стрес-чинники [1]. Тому зміна параметрів серцево-судинної системи може служити джерелом інформації як про функціональний стан людини, так і про стрес-чинники середовища та діяльності. Однак ця інформація прихована в індивідуальних особливостях фізіологічних сигналів (ЕКГ, ЕЕГ, ЕОГ та інші). Так, очевидна складність інтерпретації послідовності ЕКГ (див. рис. 1 а). Дійсно, різні методи аналізу ЕКГ і ритму серця, статистичні та спектральні, не чутливі до поодиноких або рідкісних подій, що називаються артефактами (а іноді в цю категорію потрапляють ознаки аритмії або стенокардії). Однак, індивідуальність динаміки міокарда людини найбільш проявляється в сигнатурах ЕКГ 1-го та 2-го порядків. На рис. 1 а, б, с показано сигнал ЕКГ і характер його зміни з часом, тобто пакет сигнатур ЕКГ операторів при шумовому стресі. У конфігурації сигнатури $V(t) - dV/dt$ відображається динамічна структура кардіоциклу, а у зміні площі конфігурації – особливості еволюції ентропії Н. Конфігурація сигнатури $dV/dt - d^2V/dt^2$ відображає структуру управління кардіоциклу. В характер її перебудови приховані порушення управління (синхронізація або десинхронізація процесів характер адаптивних процесів та інші). Відзначимо також, що жорсткий, ригідний ритм серця відповідає граничним кардіоциклам і означає високу ймовірність переходу в стан шлуночкової фібриляції. Доведено клінічно, що варіабельність ритму знижується при фізичних навантаженнях, перенапруженні, істотно знижується в стані стресу. Жорсткий ритм серця проявляється в пакеті як граничний цикл – атрактор. Він ідентифікується як накопичення втомі і зменшення функціонального резерву (наприклад, в оператора чи спортсмена). При цьому аналіз пакетів сигнатур дає змогу отримати якісно нову інформацію – динаміку адаптаційних процесів, повторюваність уявних артефактів, виявити і визначити варіаційний розмах. Тобто можна цілісно оцінити індивідуальність перебудови структури управління кардіоциклом.

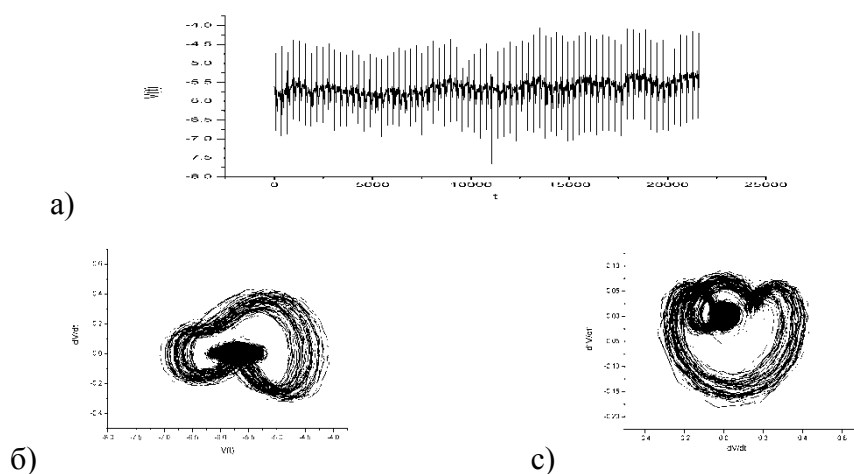


Рисунок 1 – Сигнал ЕКГ при шумовому стресі (а) і пакети сигнатур 1-го та 2-го порядків (б, с)

Встановлено універсальні характеристичні ознаки перебудови кардіоциклів у пакеті сигнатур ЕКГ, а саме: а) ступінь розмиття ΔX (ширина) пакета, який відображає ентропія Колмогорова [23]; б) однорідність щільності траєкторій в пакеті сигнатур, яка вказує на плавність перехідних процесів; в) неоднорідність щільності траєкторій в пакеті сигнатур, яка вказує на наявність квазістійких граничних кардіоциклів – атракторів [24]; г) протифазні процеси збудження і релаксації міокарда, що є діагностично значимими. Зазначимо, що різні стрес-чинники породжують локальну нестійкість ΔX і незбалансованість протилежних фаз циклу. Це дає змогу шляхом порівняння сигнатур з типовими (модельними) сигнатурами ідентифікувати перехідні функціональні стани людини в режимі реального часу (on-line).

Вплив інформаційного стресу на динаміку ЕКГ більш багатогранний (рис. 2). Як бачимо, в пакетах сигнатур 1-го та 2-го порядків (б, с) графічно відображається характер перебудови їх конфігурацій. У ньому особливості динаміки функціонування міокарда – збільшення асиметрії, зменшення збалансованості, неоднорідність ширини пакета сигнатур і інші ознаки.

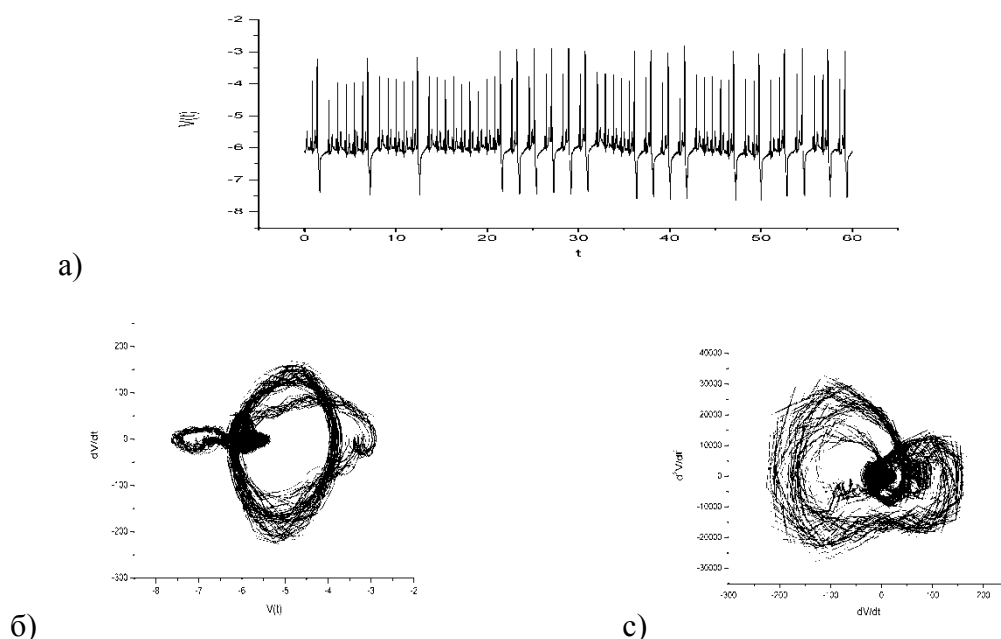


Рисунок 2 – Сигнал ЕКГ при інформаційному стресі (а), а також пакети його сигнатур 1-го та 2-го порядків (б, с)

Дослідження різних за природою фізіологічних сигналів показало, що характер зв'язку між динамічними та енергетичними параметрами сигнатур визначає особливості структури циклу управління відповідних підсистем. Як показали дослідження, конфігурація такого циклу найбільш чутлива до стрес-чинників професійної діяльності. Наприклад, стрес при водінні автомобіля проявляється в пакетах сигнатур 1-го та 2-го порядків (рис.3). Зокрема, аналіз пакетів сигнатур $V(t) - dV/dt$ свідчить про зменшення динамічної збалансованості та появу артефакту. Перебудова сигнатур $dV/dt - d^2V/dt^2$ QRS-комплексу в пакеті вказує зв'язок артефакту з короткотривалою зміною структури управління міокардом. Ширина сигнатури та характер її зміни в циклі має важливе значення для прогнозування характеру зміни ФС людини. Так, зниження працездатності оператора розглядається як перехідний процес до загрозливого стану. Відсутність розмиття сигнатур в пакеті є критичною для сталої роботи серця.

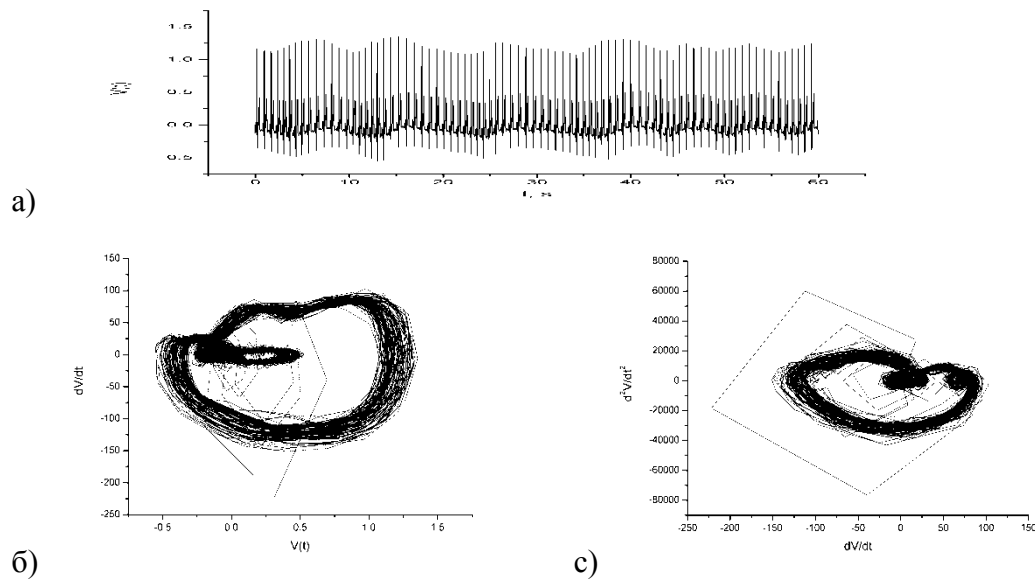


Рисунок 3 – Сигнал ЕКГ при стресі водія автомобіля (а) і пакети сигнатур 1-го та 2-го порядків (б, с)

На рис. 3 показано сигнал ЕКГ при стресі водія автомобіля (а) і пакети сигнатур 1-го та 2-го порядків (б, с). У пакетах проявляється локальна зміна конфігурації, яка вказує на характер структурно-функціональних змін у міокарді з часом. Важливе своєчасне виявлення операторів, сигнатури яких характеризуються малим значенням ентропії Колмогорова у спокої. Це дозволить уникнути можливих ускладнень і кризових станів. А виявлені закономірності дають можливість для реалізації алгоритмів миттєвих оцінок – за допомогою сигнатур – стану людини та ідентифікації її стану як стресу або перевтоми. Отже, структурно-функціональний аналіз сигнатур за допомогою універсальних засобів дає змогу не лише виявляти зовнішні стрес-чинники (середовища, професійної діяльності), але і більш обґрунтовано здійснювати допуск людини до керування СТС.

Аналіз та систематизація пакетів динамічних і енергетичних сигнатур ЕКГ дає змогу встановити типові для даного оператора пакети сигнатур, порівняння з якими допомагає швидко ідентифікувати перехідні стани оператора. Крім того, аналіз швидкості зміни ентропії кардіоциклу дає змогу прогнозувати перехід з одного класу функціональних станів в інший.

Висновки і перспективи

Діагностично важлива інформація про індивідуальність функціонування елементів СТС прихована в динаміці сигналів сенсорів, біосенсорів та різних функціональних характеристиках її елементів. Після геометризації цих сигналів в динамічному просторі (стан-швидкість-прискорення) стає можливим структурно-функціональний аналіз сумісності структур управління елементами СТС різної природи, включаючи і оператора. Важливо, що конфігурації сигнатур 1-го та 2-го порядків різних фізіологічних сигналів складаються з замкнутої послідовності геометрично впорядкованих ділянок-складових, конфігурації яких формують своєрідні цикли. При цьому їх індивідуальність обумовлена параметрами складових та площею, що охоплюють сигнатури. Унікальну інформацію про стрес-чинники професійної діяльності надає характер зміни перехідних функціональних станів людини, який відображається в перебудові конфігурацій сигнатур ЕКГ в пакеті [5, 21].

Показано, що взаємозв'язок динамічних параметрів сигналу сенсора визначає геометричну модель структури його циклу управління. Таке моделювання спрощує аналіз сумісності і узгодженості функціонування різних за природою елементів технічної системи. Характер перебудови структури циклу управління елемента визначає особливості його функціонування в екстремальних умовах.

Таким чином, сигнатури сигналів будь-якої природи містять інформацію про особливості функціонування елементів СТС, яку можна аналізувати, ґрунтуючись на фундаментальних рівняннях, законах і принципах динаміки. Шляхом математичного моделювання можна встановити однозначний зв'язок структури сигналів з певними функціями елементів (підсистем), а також вплив на нього певних стрес-чинників.

Список літератури

1. Баевский Р. М. Проблема стресса и вопросы прогнозирования состояния человека при экстремальных воздействиях / Р.М. Баевский // Актуальные проблемы стресса. – Кишинев: Штиинца, 1976. – С. 23-33.
2. Баевский Р. М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии / Р.М. Баевский. – М.: Медицина, 1979. – С. 291.
3. Боброва Э. С., Китаев-Смык Л.А. Стресс как психологический фактор операторской деятельности // Психологические факторы операторской деятельности. – М.: Наука, 1988. – С. 111-125.
4. Мигаль В. П., Мигаль Г. В. Сигнатурный поход к анализу и обеспечению безопасности системы «человек-машина» / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов. – Х.: Нац. аэрокосм. Ун-т «ХАИ», 2014.– Вып. 65. – С.152-159.
5. Пархоменко А.Н. «Детерминированный хаос» и риск внезапной сердечной смерти. – Кардиология, 1996. 4. – С. 44.
6. Мельник М. А. Взаимообусловленность порядка и хаоса и возможность прогноза в развитии сложных самоорганизующихся систем // Проблемы устойчивого развития: иллюзии, реальность, прогноз: Материалы шестого Всерос. науч. семин. – Томск, 2002. – С. 192-195.
7. Mygal, V.P., Klimenko, I.A., Mygal, G.V. Application of parametric and wavelet-signatures for sensor diagnostics. / Radioelectronic and computer systems 36, 143–148 (2009).
8. Fainzilberg, L.S. Information technology for signal processing of complex shape. Theory and Practice (Naukova Dumka, Kiev, 2008).
9. Goldberger, A.L., Amaral, L.A.N., Glass, L., Hausdorff, J.M. et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. Circulation 101, e215–e220 (2000).
10. But, A. V., Mygal, V.P., Bodnar, I.V. Spatial-temporal order of the photoresponse from the sensor materials. Optical Systems Design 2012, Proc. SPIE 8550, 85502B (2012).
11. Тимош І.М. Основи фізіології та психології праці. – Тернопіль: Економічна думка, 1999.– 168 с.
12. Kadomtsev, B.B. Dynamics and information. Phys. Usp. 37, 425–499 (1994).
13. Федоров Б.М. Стресс и система кровообращения. – М.: Медицина, 1991. –245 с.
14. Careri, G. Ordine e disordine nella materia (Latenza, Roma, 1982).
15. Komar, V., Gektin, A., Nalivaiko, D., Klimenko, I. et al. Characterization of CdZnTe crystals grown by HPB method. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 458, 113–122 (2001).
16. But, A.V., Mygal, V.P., Phomin, A.S. Photoelectric signatures of CdZnTe crystals. Semiconductors 43, 1217–1220 (2009).
17. But, A.V., Migal, V.P. and Fomin A.S. Structure of a time variable photoresponse from semiconductor sensors. Technical Physics 57, 575–577 (2012).
18. Mygal, V.P., But, A.V., Smatko, O.O. and Bodnar, I.V. Geometrization of the temporal photoresponse from the semiconductor sensor materials. Functional Materials **19**, 555–559 (2012).
19. Mygal, V.P., But, A.V., Phomin, A.S. and Klimenko, I.A. Geometrization of the dynamic structure of the transient photoresponse from zinc chalcogenides. Semiconductors 49, 634–637 (2015).

20. Komar, V.K., Migal, V.P., Chugai, O.N., Puzikov, V.M. et al. Investigation of localized states in cadmium zinc telluride crystals by scanning photodielectric spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4195–4197 (2002).

21. Мигаль В.П., Мигаль Г.В. Спосіб оцінювання електрокардіографічних даних для діагностичних цілей // Пат. №77203 UA, МПК (2006) А61В5/0402; Заявл.17.10.2005; Опубл. 15.11.2006. – Бюл.№11. 2006.11.

22. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине / Пер. с англ. И.В. Соловьева и Г.Н. Поварова; Под ред. Г.Н. Поварова. – 2-е издание. – М.: Наука; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983. – 344 с.

23. Kolmogorov, A.N. Entropy per unit time as a metric invariant of automorphism. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 124, 754–755 (1959) (Russian).

24. Goldberger, A. Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractal and complexity at bedside. *Lancet* 347, 1312-1314 (1996).

References

1. Baevskij R.M. Problema stressa i voprosy prognozirovaniya sostoyaniya cheloveka pri ehkstremaal'nyh vozdeystviyah // Aktual'nye problemy stressa. – Kishinev: SHtiinca, 1976. – S. 23-33.

2. Baevskij R.M. Prognozirovanie sostoyanij na grani normy i patologii / Moskva, Medicina, 1976. – 291 s.

3. Bobrova E.H.S., Kitaev-Smyk L.A. Stress kak psihologicheskij faktor operatorskoj deyatel'nosti // Psihologicheskie faktory operatorskoj deyatel'nosti. – М.: Nauka, 1988. – S. 111-125.

4. Migal' V.P., Migal' G.V. Signaturnij pohod k analizu i obespecheniyu bezopasnosti sistemy «chelovek-mashina» / Otkrytie informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii: sb. nauch. trudov. – H.: Nac. aehrokosm. Un-t «HAI». Vyp. 65. S.152-159. 2014.

5. Parhomenko, A.N. «Determinirovannyj haos» i risk vnezapnoj serdechnoj smerti. // Kardiologiya. 1996. 4. S. 44.

6. Mel'nik, M. A. Vzaimoobuslovlennost' porjadka i haosa i vozmozhnost' prognoza v razvitii slozhnyh samoorganizujushhhsja sistem. // Problemy ustojchivogo razvitija: illjuzii, real'nost', prognoz: Materialy shestogo Vseros. nauch. semin. – Tomsk, 2002. S. 192-195.

7. Mygal, V.P., Klimentko, I.A., Mygal, G.V. Application of parametric and wavelet-signatures for sensor diagnostics. / *Radioelectronic and computer systems* 36, 143–148 (2009).

8. Fainzilberg, L.S. Information technology for signal processing of complex shape. *Theory and Practice* (Naukova Dumka, Kiev, 2008).

9. Goldberger, A.L., Amaral, L.A.N., Glass, L., Hausdorff, J.M. et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation* 101, e215–e220 (2000).

10. But, A.V., Mygal, V.P., Bodnar, I.V. Spatial-temporal order of the photoresponse from the sensor materials. *Optical Systems Design 2012, Proc. SPIE 8550, 85502B* (2012).

11. Tymosh I.M. Osnovy fiziologii ta psihologii pratsi. – Ternopil: Ekonomichna dumka, 1999. – 168 s.

12. Kadomtsev, B.B. Dynamics and information. *Phys. Usp.* 37, 425–499 (1994).

13. Fedorov B.M. Stress i sistema krovoobrashcheniya. – М.: Medicina, 1991. –245 s.

14. Careri, G. Ordine e disordine nella materia (Latenza, Roma, 1982).

15. Komar, V., Gektin, A., Nalivaiko, D., Klimentko, I. et al. Characterization of CdZnTe crystals grown by HPB method. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 458, 113–122 (2001).

16. But, A.V., Mygal, V.P., Phomin, A.S. Photoelectric signatures of CdZnTe crystals. *Semiconductors* 43, 1217–1220 (2009).

17. But, A.V., Migal, V.P. and Fomin A.S. Structure of a time variable photoresponse from semiconductor sensors. *Technical Physics* 57, 575–577 (2012).

18. Mygal, V.P., But, A.V., Smatko, O.O. and Bodnar, I.V. Geometrization of the temporal photoresponse from the semiconductor sensor materials. *Functional Materials* **19**, 555–559 (2012).
19. Mygal, V.P., But, A.V., Phomin, A.S. and Klimenko, I.A. Geometrization of the dynamic structure of the transient photoresponse from zinc chalcogenides. *Semiconductors* **49**, 634–637 (2015).
20. Komar, V.K., Migal, V.P., Chugai, O.N., Puzikov, V.M. et al. Investigation of localized states in cadmium zinc telluride crystals by scanning photodielectric spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4195–4197 (2002).
21. Migal' V.P., Migal' G.V. Sposib ocinyuvannya elektrokardiografichnih danih dlya diagnostichnih cilej. // Pat. №77203 UA, MPK (2006) A61V5/0402. Zayavl.17.10.2005; Opubl. 15.11.2006; Byul.№11. 2006.11.
22. Viner N. Kibernetika, ili Upravlenie i svyaz' v zhivotnom i mashine. / Per. s angl. I.V. Solov'eva i G.N. Povarova; Pod red. G.N. Povarova. – 2-e izdanie. – M.: Nauka; Glavnaya redakciya izdanij dlya zarubezhnyh stran, 1983. – 344 s.
23. Kolmogorov, A.N. Entropy per unit time as a metric invariant of automorphism. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **124**, 754–755 (1959) (Russian).
24. Goldberger, A. Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractal and complexity at bedside. *Lancet* **347**, 1312-1314 (1996).

