

Геометризація ергономічного дослідження динамічної системи

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Необхідність збільшення кількості датчиків, сенсорів і т.п. в динамічних системах, що функціонують в складних умовах, призвело до виникнення ергономічних проблем безпеки, стійкості й надійності функціонування. Показано, що параметрична геометризація сигналів функціонування різних по природі елементів динамічної системи надає ергономічним дослідженням якісно нові можливості. Зокрема, запропоновано уніфікований інструментарій для аналізу результатів комплексного дослідження елементів систем «людина – техніка – середовище» різної природи.

Ключові слова: ергономіка, геометризація, людина-оператор, функціональний стан, перехідні стани, сигнали функціонування, сигнатури.

Актуальність та постановка проблеми

Проблеми безпеки, надійності й стійкості систем «людина – техніка – середовище» (СЛТС) є одними з пріоритетних в сучасній ергономіці. Особливо вони є актуальними для сучасних транспортних, енергетичних, технологічних комплексів. Аналіз функціональних відмов сучасної техніки свідчить, що рівень безпеки динамічних систем істотно знижує відсутність ефективних засобів: а) ідентифікації перехідних функціональних станів (ФС) їх елементів при дії стресчинників; б) прогнозування ФС людини-оператора; г) відбору сенсорів і відбору та допуску операторів. Отже при дослідженнях функціонування СЛТС в складних умовах процеси отримання, обробки, достовірності і відображення інформації про функціональний стан кожного елемента стають домінуючими.

Нові системні проблеми контролю та прогнозування стійкості, керованості і надійності свідчать про те, що безпека функціонування СЛТС у складних умовах залежить від збалансованості та узгодженості внутрішніх взаємозв'язків та їх стійкості. Різноманіття просторово-часових особливостей форми сигналів функціонування обумовило необхідність використання різних методів обробки і аналізу, які для окремих елементів СЛТС можуть бути не ефективними або не сумісними. Так, використання стандартизованих методів аналізу технічних та електрофізіологічних сигналів не дозволило уникнути проблем неоднозначності, перехідних станів, артефактів управління тощо. Тому для їх аналізу активно розвиваються як методи обробки (вейвлет-перетворення і т. ін.), так і нові підходи до моделювання (кіберфізичний тощо). Незважаючи на це, не вирішено коло взаємопов'язаних проблем людино-машинної взаємодії в складних і екстремальних умовах функціонування СЛТС.

Сучасний стан проблеми дослідження і аналізу функціонування систем «людина – техніка – середовище» в складних умовах

Проведений аналіз досліджень особливостей функціонування СЛТС у складних умовах показав, що прагнення подолати зростання ризиків техногенних катастроф призвело до збільшення кількості джерел інформації (сенсорів, біосенсорів, детекторів та ін.), засобів їх оброблення, відображення і аналізу.

Однак усупереч очікуванню і незважаючи на значні ресурси, що вкладені у забезпечення безпеки, наслідки техногенних катастроф зростають.

Результати ергономічного дослідження функціонування СЛТС у звичайних умовах знайшли своє відображення у різних стандартах, підходах, методах і засобах. Однак саме в складних і непередбачених умовах виявляється індивідуальність функціональних характеристик сенсорів і біосенсорів та їх залежність від зовнішніх і внутрішніх чинників. Звідси неоднозначність інформації і непрогнозоване виникнення проблемних (складних, аварійних, позаштатних) ситуацій при впливі стрес-чинників (екологічного, інформаційного та інших) на ФС сенсорів різної природи. Спроби вирішити ці проблеми в рамках існуючих підходів призвели до збільшення різноманітності: а) джерел інформації про ФС елементів СЛТС і б) методів отримання, обробки, представлення і аналізу інформації про їх функціонування. Однак це не дозволило забезпечити надійність і достовірність інформації про ФС елементів СЛТС і привело до розуміння обмеженості методів дослідження різних за природою елементів СЛТС шляхом нормування, згладжування і неврахування артефактів і т.п. Загалом, наслідком є складність моделей управління СЛТС: проблеми допуску оператора та контролю, он-лайн моніторингу і ідентифікації його ФС. Отже, на сьогодні існуючою різноманітністю методів не вирішується проблема надійності та безпеки СЛТС у складних умовах.

Існуючі методи дослідження не дозволили вирішити проблему прихованої індивідуальності перехідних ФС елементів СЛТС і впливу на їх еволюцію стрес-чинників різної природи. У цей час ідентифікація перехідних ФС сенсорів класичним ергономічним підходом – за сукупністю їх параметрів – неоднозначна, а інколи суперечлива через різноманітність методів оброблення сигналів, параметрів, показників і критеріїв. Так, перетворення послідовності кардіосигналів у графічні образи (фазові портрети, скатерограми, ритмограми і т.і.) дали можливість якісно аналізувати ФС людини у стаціонарних умовах. Однак очевидна їх обмеженість в складних умовах діяльності людини як елемента СЛТС, коли на передній план виходить проблема непрогнозованого переходу ФС організму людини до нестійких станів, що передують функціональному зриву. Оскільки існуючими методами аналізу одновимірного ряду параметрів неможливо виявити перехідні до функціональних зривів стани, то необхідним є виявлення маркерів тих перехідних функціональних станів сенсорів різної природи, що є передвісниками функціональних відмов.

Результати та обговорення

На сьогодні склалась ситуація, коли при аналізі сукупностей параметрів, показників та ідентифікаторів ФС отримується неоднозначна, а часом і суперечлива інформація, яка не дає змогу виявляти перехідні до критичних стани елементів СЛТС. Особливо критично це у випадку з людиною-оператором, невиявлений перехідний ФС якого може бути каталізатором системних проблем у всій системі. Так, теоретично хороші підходи до кількісного опису ФС людини як біосистеми, як правило, дають значний розкид величин на практиці, що суттєво знижує надійність та достовірність експертних оцінок. Суттєвою особливістю більшості вимірюваних медико-біологічних показників є те, що при тих чи інших змінах ФС людини як динамічної біосистеми вони носять різноспрямований характер. При цьому деякі з них знаходяться в межах або незначно виходять за межі статистичної норми. Обмеженість існуючих засобів дослідження ФС, що базуються на сукупності різних параметрів, унеможливають ідентифікацію

складних перехідних, нестабільних станів, що граничать з відмовою оператора. Також відсутні ефективні методи експрес-ідентифікації ФС інших елементів СЛТС.

Вказані проблеми існують завдяки різноманіттю форм сигналів функціонування різних елементів СЛТС, включаючи і оператора. Через різноманіття форм сигналів і наявності в них як грубих (динамічних), так і тонких (інформаційних) локальних і статистичних ознак не вирішена проблема вибору адекватних методів обробки. Крім того, циклічним сигналам функціонування властиві приховані зв'язки між фазами циклу і між циклами, характер перебудови яких важко виявити. Тому ергономісти, біофізики, інженери, медики, фізики-медики та ін. при дослідженні функціонування складних систем, керованих людиною, змушені застосовувати різні не взаємозв'язані підходи, моделі, методи обробки сигналів і засоби їх аналізу [1].

Разом з тим, введено Н. Вінером поняття організації сигналу (його структури) дозволило визначити найбільш загальну форму організації сигналу як упорядкованість його просторово-часової структури [2]. Структура майже не проявляється в сигналі як одновимірному ряді параметрів, що змінюються з часом. Однак інформацію про функціонування СЛТС приховано в характері взаємозв'язків динамічних параметрів функціонування, тому вирішення вказаних вище проблем потребує міждисциплінарного підходу, в основі якого – геометризація динаміки інформаційних потоків.

Вирішення нагальних проблем аналізу функціонування систем досягнуто шляхом геометризації. Зокрема це геометризація фізичних величин (Р. ді Бартіні), механіки (Пуанкаре), геометродинаміка (Уіллер). Геометризація динаміки також лежить в основі зв'язків: теорії розмірностей й динамічної подібності, симетрії й законів збереження (теорема Е. Нетер), кібернетики (Н. Вінер) й психології (Л. Веккер), а також в синтезі динамічного та статистичного опису динамічних систем (Ю. Климантович).

Геометризація в дослідженнях функціонального стану різних елементів СЛТС. Для визначення ФС людини сьогодні в основному застосовують комплексний підхід, в основі якого – реєстрація багатьох психофізіологічних індикаторів (ЕКГ, ЕЕГ, ЧСС, ЕМГ, спірограм тощо) і аналіз ФС як інтегрального комплексу характеристик різних підсистем організму людини. Такі дослідження ФС трудомісткі і часто суперечливі через різноманіття психофізіологічних індикаторів, параметрів, показників, критеріїв і т.п. Суттєвим кроком до підвищення надійності ергономічних досліджень було представлення характеристик на фазовій площині, на якій кожній області відповідає певний ФС людини (рис. 1, а).

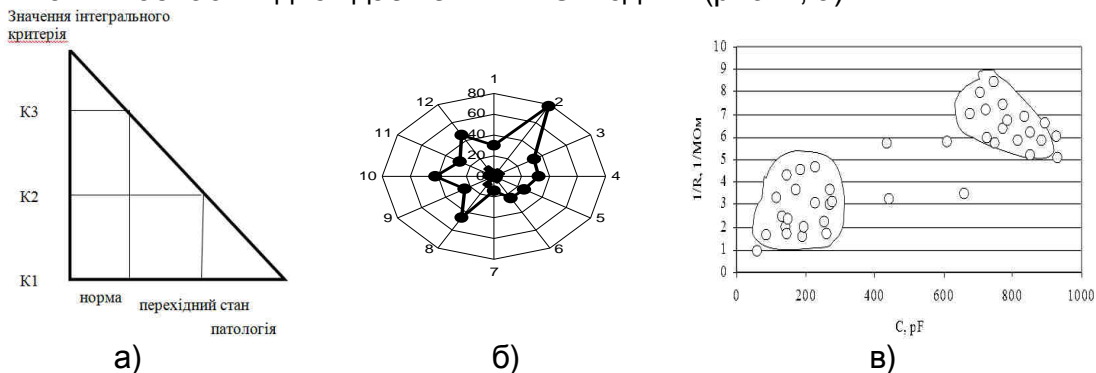


Рис. 1. Фазова площина оцінки фізичного стану людини (а), інтегративний графічний образ ФС людини (б) і зміна ФС людини у фазовій площині (в)

Це надало можливість комплексної оцінки ФС людини при впливі різних стрес-чинників як фізичного, так і психоемоційного характеру. Побудова графічних образів стану людини по 12 взаємозв'язаним параметрам (ємність C і опір R) біологічно активних точок шкіри (БАТШ) дозволило отримати надзвичайно чутливий до впливу стрес-чинників інтегративний портрет стану людини (рис. 1, б). Представлення у фазовій площині усіх 12-ти параметрів БАТШ людини в процесі виконання діяльності дозволило виявляти зміни стану оператора під впливом стрес-чинників діяльності (див. рис. 1, в).

Геометризація діелектричних параметрів (діелектричної проникливості та діелектричних втрат) сенсорів випромінювання та БАТШ людини дозволила досліджувати зміну їх ФС під стрес-впливом (рис. 2, б), а для людини – її стресостійкість (рис. 2, б, в).

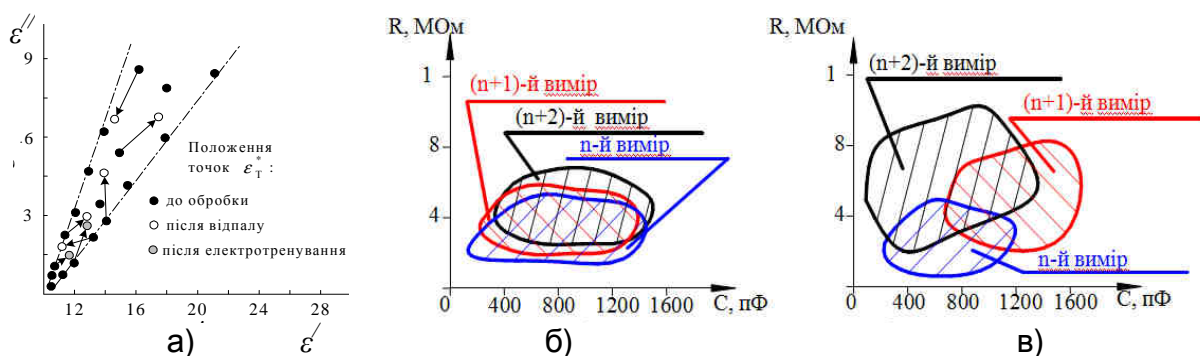


Рис. 2. Зміна при стрес-впливі розподілу параметрів ФС сенсорів (а) та біосенсорів (б, в) у фазовій площині

Представлення сукупності діелектричних параметрів БАТШ $\varepsilon^* = \{\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*, \dots, \varepsilon_i^*, \dots, \varepsilon_v^*\}$ у фазовій площині формує графічний образ ФС, конфігурація і площа якого є новими показниками ФС людини. Це дозволило аналізувати ФС та стресостійкість людини-оператора. Наприклад, ідентифікувати операторів з допустимою та неприпустимою стресостійкістю в процесі діяльності (рис. 2, б, в). На цій основі запропоновано нові критерії до аналізу зміни стану (симетрія, упорядкованість) та площа (ентропія як статистична величина). А застосування статистичного підходу до аналізу ФС людини дозволяє визначати перехідні стани, оцінювати функціональний резерв і прогнозувати зрив.

Геометризація динаміки функціонування елементів СЛТС. Із сукупності різних показників ФС елементів СЛТС не можна отримати інформацію про перехідні процеси, які представляють значний діагностичний інтерес. Так, дослідження динамічних вольтамперних характеристик (ВАХ) різних елементів СЛТС дозволило виявити переваги геометризації для аналізу динаміки функціонування сенсорів і БАТШ [3]. В ході комплексних досліджень динамічних ВАХ сенсорів і біосенсорів різної природи (напівпровідникові сенсори, детектори, БАТШ тощо), виявлена індивідуальність їх конфігурацій, що перетворює динамічні ВАХ в їх сигнатури. При впливі стрес-чинників форма сигнатур змінюється, що вказує на перебудову структури функціонування сенсорів і біосенсорів. Вона якісно проявляється в асиметрії конфігурації й локальному розмитті пакетів сигнатур ВАХ, яке відображає ентропія Колмогорова. У пакетах динамічних ВАХ також інформативні форма і екстремуми локальної щільності в 4 квадрантах, а також їх площі. Вони виявилися ефективними для визначення оптимальних режимів та

умов експлуатації сенсорів, відбору функціонально подібних сенсорів та виявлення потенційно вразливих підсистем організму людини.

Геометризація періодичного сигналу. Видатними вченими (Е. Бір, Н. Вінер, В. Богданов, І. Пригожин) показано, що в сигналі функціонування найбільш інформативна просторово-часова структура. Так, згідно з теоремою Такенса, в ній прихована вся інформація про функціонування об'єкту. Ю. Климантовичем показано необхідність поєднання динамічного і статистичного опису динамічних систем.

Файнзільбергом Л. С. промодельовані фазові портрети функціонування серцево-судинної системи людини для 6 основних діагностичних видів порушень роботи серця [4]. Розвиток ідеї геометризації набув в роботі В. А. Fraser та ін., в якій показано способи аналізу функціонування серця людини у фазовій площині та фазовому просторі [5].

Подальший розвиток ідеї параметричної геометризації динамічного сигналу покладено в основу розробленого міждисциплінарного підходу до аналізу функціонування динамічних систем, а також уніфікованого інструментарію для його реалізації [6]. Підхід базується на геометризації сигналів функціонування різних біологічних і фізичних елементів динамічної системи в просторі динамічних подій (стан-швидкість-прискорення). При цьому будь-який періодичний сигнал функціонування системи перетворюється в замкнену траєкторію динамічних подій, ортогональними проекціями якої є сигнатури 1-го і 2-го порядку, які є їх індивідуальними графічними образами. В їх конфігураціях відображаються динамічні, енергетичні й кібернетичні (інформаційні) аспекти функціонування [6]. Їх можна також аналізувати як параметричні цикли, площі яких можна представити як потужності підмножин станів.

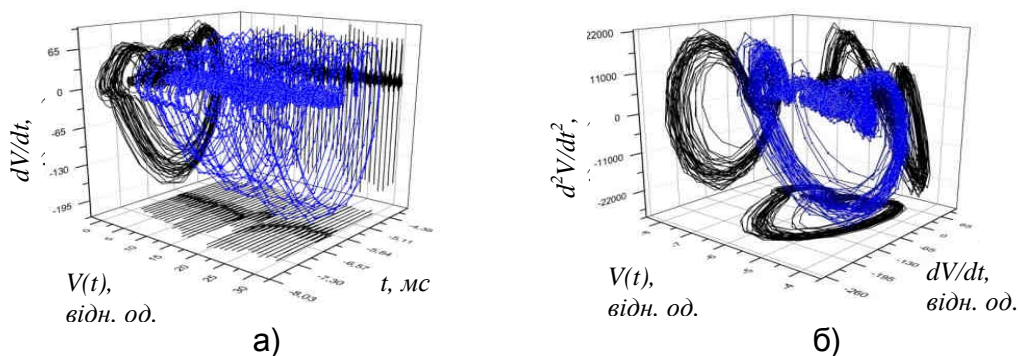


Рис. 3. Геометризація послідовності кардіосигналів людини: а) формування пакету фазових портретів (сигнатури 1-го порядку); б) пакети сигнатур 1-го і 2-го порядків

Для виявлення статистичних закономірностей перебудови структури цикли сигналу не усереднюють, а визначають характер їх розподілу в пакеті сигнатур. Він проявляється у перебудові структури сигналу, що спрощує виявлення перехідних станів і артефактів управління системою. Системний аналіз зміни структури сигналу функціонування за допомогою взаємозв'язаних конфігурацій і площ сигнатур дозволяє виявляти перехідні ФС, а також їх аналізувати за допомогою універсальних динамічних параметрів і статистичних інтегративних показників упорядкованості та збалансованості протифазних складових функціонування [6]. Це дозволяє доповнити динамічний аналіз функціонування статистичним аналізом та виявляти перехідні ФС, які є провісниками функціональних відмов, а також

оцінювати стійкість і стресостійкість елементів динамічної системи до стрес-чинників.

В рамках теоретико-множинного підходу кожен сигнал, який відображає функціонування елемента динамічної системи, можна розглядати як потужність підмножини $|W|$ станів. Вони визначають динамічні і статистичні особливості ФС сенсора чи людини-оператора. В конфігураціях сигналів відображається просторово-часовий розподіл складових, кожна з яких є лінійною підмножиною причинно-наслідково зв'язаних станів. Тому для геометричної ілюстрації сигналів можна використовувати діаграми Венна (рис. 4).

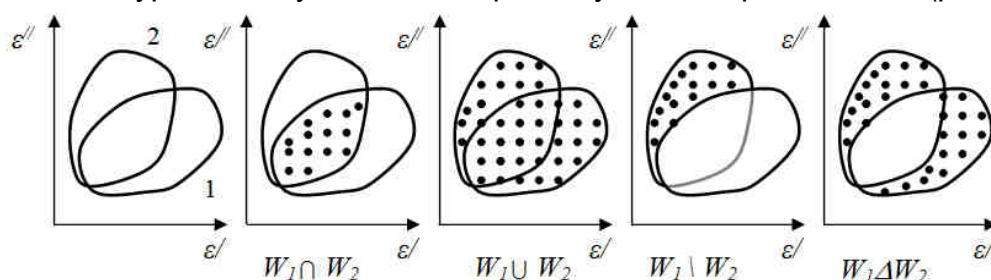


Рис. 4. Сигнатури сигналу до (1) і після дії стрес-чинників (2)

При цьому стає можливим відмінності в конфігураціях сигналів двох ФС виявляти за допомогою простих операцій над підмножинами W_1 і W_2 системно аналізувати шляхом операції відношення між ними. Це дозволяє досліджувати характер зміни взаємозв'язків в динамічній системі при стрес-впливі. Через операцію відношення між підмножинами W_1 і W_2 можна оцінювати динамічну подібність конфігурацій сигналів та ступінь взаємозв'язку складових сигналів. Таким чином, теоретико-множинний аналіз сигналів функціонування елементів різної природи динамічної системи дозволяє виявляти їх індивідуальність, аналізувати їх структури, а також інтегративно оцінювати просторово-часову упорядкованість їх структури.

Висновки

Параметрична геометризація результатів комплексного дослідження елементів динамічної системи надає нові можливості. Вони обумовлені природною декомпозицією інформаційних потоків на складові структури функціонування елементів динамічних систем. Отже, інформація, що прихована в одновимірному сигналі будь-якого елемента динамічної системи, стає доступною для аналізу після його параметричної геометризації в просторі динамічних подій та отриманні конфігурацій графічних образів-сигналів 1-го і 2-го порядків. Зокрема, природна декомпозиція сигналу на його просторово-часові складові дозволяє виявляти системоформуючі взаємозв'язки. При аналізі складових конфігурацій сигналів можна застосувати універсальні диференціально-геометричні параметри (довжини, крутизни та кривизни), які відповідають фізичним величинам (стан, швидкість, прискорення) та застосувати інтегративні показники їх динамічної упорядкованості та енергетичної збалансованості.

Параметрична геометризація сигналів функціонування різних елементів СЛТС у складних умовах дозволяє системно досліджувати їх особливості і використовувати при ергономічному аналізі безпеки фундаментальні принципи, закони та критерії.

Список літератури

1. Venda V.F. Dynamics in ergonomics, psychology, and decisions: Introduction to Ergodynamics / V.F. Venda, Y.V. Venda. – Norwood, NJ.: Ablex Publishing Corporation. – 1995. – 503 с.
2. Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине / под ред. Г. Н. Поварова. 2-е изд. М.: Наука, 1983. 344 с.
3. Применение параметрических и вейвлет сигнатур для диагностики сенсоров / В. П. Мигаль, И. А. Клименко, Г. В. Мигаль, А. С. Фомин, А. В. Бут // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2009. № 2 (36). С. 35–44.
4. Файнзильберг Л. С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы: теория и практика. Киев: Наук. думка, 2008. 333 с.
5. Time-Delay Lifts for Physiological Signal Exploration: An Application to ECG Analysis / B. A. Fraser et al // Electrical and Computer Engineering (CCECE), IEEE 30th Canadian Conference, 2017, Canada. DOI: 10.1109/CCECE.2017.7946619.
6. 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, July 14, 2016. № 6. P. 387–391. DOI: 10.1038/srep29512.

Поступила в редакцію 19.12.2017

Геометризация эргономического исследования динамической системы

Необходимость увеличения количества датчиков, сенсоров и т.п. в динамических системах, функционирующих в сложных условиях, привело к возникновению эргономических проблем безопасности, устойчивости и надежности. Показано, что параметрическая геометризация сигналов функционирования различных по природе элементов динамической системы предоставляет эргономическим исследованиям качественно новые возможности. Предложен унифицированный инструментарий для анализа результатов комплексного исследования элементов систем «человек – техника – среда» различной природы.

Ключевые слова: геометризация, эргономика, человек-оператор, функциональное состояние, переходные состояния, сигналы функционирования, сигнатуры.

Geometrization of ergonomic research dynamic system

The need to increase the number of sensors etc. in dynamic systems that function in difficult conditions, led to the emergence of ergonomic problems of safety, stability and reliability of functioning. It is shown that the parametric geometrization of the signals of the functioning of various elements of the dynamic system by the nature provides ergonomic researches with qualitatively new possibilities. A unified toolkit was proposed for analyzing the results of a comprehensive research of the elements of man-machine-environment systems of various nature.

Keywords: geometrization, ergonomics, human operator, functional state, transitional states, signals of functioning, signatures.

Мигаль Галина Валеріївна – д-р техн. наук, доцент, доцент каф. 107 «Автомобілів та транспортної інфраструктури», Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.