

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

### **БЕЗПЕКА ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ АСПЕКТИ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ В СКЛАДНИХ УМОВАХ**

Для виявлення та аналізу інформаційних аспектів функціонування динамічних систем розвивається міждисциплінарний підхід. В його основі геометризація будь-якого сигналу функціонування в просторі динамічних подій, яка супроводжується природною декомпозицією сигналу на складові. Вони формують сигнатури сигналів 1-го і 2-го порядків, в яких найбільш відображаються динамічні і інформаційні особливості структури сигналів. Для аналізу структури сигналів застосовано універсальні диференційно-геометричні параметри і запропоновано інтегративні показники, в яких відображаються чинники, що формують і руйнують систему. Показано, що в пакетах сигнатур циклічних сигналів найбільш проявляються особливості перебудови функціонування сенсорів в складних умовах. Геометризація структури сигналів функціонування різної природи дає змогу виявляти перехідні функціональні стани елементів динамічної системи в режимі реального часу. Характер перебудови структури управління становить інтерес для системного аналізу різних аспектів безпеки функціонування динамічних систем.

*Ключові слова:* сенсори випромінювання, сигнали сенсорів, геометризація сигналів, структура сигналу, сигнатури сигналів, пов'язана інформація, цикл функціонування.

*В. П. Мигаль, Г. В. Мигаль*

### **БЕЗОПАСНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ**

Для выявления и анализа информационных аспектов функционирования динамических систем развивается междисциплинарный подход. В его основе геометризация любого сигнала функционирования в пространстве динамических событий, которая сопровождается естественной декомпозицией сигнала на составляющие. Они формируют сигнатуры сигналов 1-го и 2-го порядков, в которых наиболее отображаются динамические и информационные особенности структуры сигналов. Для анализа структуры сигналов применены универсальные дифференциально-геометрические параметры и предложены интегративные показатели, в которых отображаются системообразующие и системоразрушающие факторы. Показано, что в пакетах сигнатур циклических сигналов наиболее проявляются особенности перестройки функционирования сенсоров в сложных условиях. Геометризация структуры сигналов функционирования разной природы позволяет выявлять переходные функциональные состояния элементов динамической системы в режиме реального времени. Характер перестройки структуры управления представляет интерес для системного анализа различных аспектов безопасности функционирования динамических систем.

*Ключевые слова:* сенсоры излучения, сигналы сенсоров, геометризация сигналов, структура сигнала, сигнатуры сигналов, связанная информация, цикл функционирования.

## SAFETY OF DYNAMIC SYSTEMS AND INFORMATIONAL ASPECTS OF THEIR FUNCTIONING IN DIFFICULT CONDITIONS

To identify and analyze the information aspects of dynamical systems is proposed multi-disciplinary approach. The universal means of processing, presentation and analysis of the signals of sensors of different nature. They are based on the geometrization of operation signals in the space of dynamic events. This leads to a natural decomposition of the signal into the dynamic, energetic and cybernetic components. They form the signature signals of the 1st and 2nd order. These configurations contain coarse (dynamic) and thin (information) component of the signal structure. Apply differential-geometric parameters for signal analysis signature. Proposed integrative indicators that display order and balance of components of the sensor signal structure. It is shown that in difficult conditions, there is a reorganization of the structure, which is shown in the signal signature packages. This enables the system to predict safety in challenging environments.

**Key words:** radiation sensors, sensor signals, geometrization signals, signal structure, signatures of signals, associated information, functioning cycle.

**Актуальність проблематики і ключова проблема.** Для безпечного функціонування складних динамічних систем атомної енергетики та аерокосмічної техніки необхідно аналізувати різні джерела інформації про функціональний стан (ФС) елементів системи, включаючи і людину (диспетчера, пілота, оператора і ін.). Інформація – багатоаспектне поняття і має ряд визначень. Вона може позначати: зміст, отриманий від зовнішнього світу в процесі пристосування до нього (Н. Вінер); негативну ентропію (Л. Бріллюен); комунікацію і зв'язок, в процесі яких усувається невизначеність (К. Шеннон); засіб передачі різноманітності (У. Ешбі). Кожне з цих визначень розкриває той чи інший аспект інформації як міри змін, якими супроводжуються всі процеси, що протікають в динамічній системі. Інформація міститься у всіх доступних сигналах (відгуках, характеристиках). Для управління будь-якою динамічною системою важливі всі аспекти, які приховані в формі сигналів функціонування [1]. Тонкі індивідуальні особливості управління динамічною системою приховані в її структурі, виявлення та аналіз яких дасть можливість прогнозувати безпеку функціонування системи в складних умовах. При цьому достовірність інформації про функціонування елементів системи залежить від функціонального стану численних сенсорів (детекторів, спектрометрів, датчиків і ін.) контролю, а також від засобів обробки і аналізу їх сигналів. У складних умовах через розмаїття сенсорів різної природи в динамічній системі і методів обробки їх сигналів аналіз інформації суперечливий, що породжує труднощі в дослідженні системи [2]. У той же час подальше неминуче збільшення складності динамічних систем тягне за собою зростання ризиків техногенних катастроф, а прагнення подолання цих ризиків в свою чергу веде до збільшення кількості джерел інформації (сенсорів, біосенсорів, детекторів і ін.), а також засобів обробки і аналізу. Це сприяло появі кіберфізичних систем, яким властива підвищена керованість і надійність [3].

**Стан проблеми та мета роботи. Динамічні та інформаційні аспекти функціонування елементів системи.** В динамічних системах сигнали сенсорів відіграють особливу, дуже важливу роль. При цьому джерелами взаємодоповнюючої інформації про функціонування елементів системи є динамічні особливості всіх доступних сигналів системи (сенсорів, детекторів і ін.). Широке застосування інформаційних технологій знизило невизначеність аналізу сигналів, але породило нові проблеми. Так, велике значення має вибір сумісних методів обробки та засобів аналізу їх сигналів. При цьому виявилось, що класичні методи обробки є малопридатними для сигналів, які мають нерівномірний розподіл інформації [4]. В складних (екстремальних) умовах сигнали фізичних і біологічних сенсорів функціонального

стану (ФС) елементів (підсистем) мають складну структуру, яку важко однозначно описати навіть великою кількістю параметрів. Розмаїття локально зосереджених ознак сигналів обумовлює необхідність застосування різних методів їх аналізу (вейвлет-перетворення та ін.). Як наслідок, поява безлічі характеристичних ознак і показників, експертна оцінка яких не завжди забезпечує необхідну достовірність результатів аналізу. На це вказує збільшення кількості техногенних аварій внаслідок впливу людського чинника та збоїв в людино-машинній і машино-машинній взаємодії. Їх причинами є, з одного боку, неоднозначність і суперечливість функціональної діагностики операторів (пілотів, диспетчерів і ін.), зумовлені різноманіттям засобів обробки і аналізу електрофізіологічних сигналів людини. Незважаючи на ефективність інформаційного підходу до дослідження психічних процесів [5], не вирішено проблеми ефективного відбору та допуску операторів (пілотів і ін.) до роботи в складних умовах. З іншого боку – проблема динамічної індивідуальності відгуку сенсорів (детекторів і спектрометрів випромінювання і ін.) ускладнює дублювання, необхідне для забезпечення надійності атомної енергетики та аерокосмічної техніки. Сьогодні стало очевидним, що для вирішення проблем безпечного управління в складних умовах (інформаційні артефакти управління й ін.) необхідний моніторинг перехідних ФС сенсорів і біосенсорів різної природи. Особливо важлива експрес-ідентифікація тих перехідних функціональних станів людини (оператора, диспетчера, пілота та інших, які приймають рішення), від яких на 80-90% залежить ефективність і надійність управління системою [6].

**Інформаційні аспекти функціонування** динамічної системи приховані в тонкій структурі сигналів біологічних і фізичних сенсорів ФС її елементів. На це вказує подібність принципів управління і зв'язку в техніці і фізіології [7], а також в психології [5]. Введене Н.Вінером поняття організації сигналу (його структури) дозволило визначити найбільш загальну форму організації сигналу як його просторово-часову упорядкованість, а саме, її лінійний інваріант. Одновимірний ряд параметрів, що змінюються з часом, зручний для передачі сигналу по різних каналах зв'язку, але неефективний для цілей управління, оскільки простір тривимірний. Тому, попри розмаїття підходів, методів, параметрів і критеріїв до дослідження відгуку напівпровідникових сенсорів випромінювання, вирішувати проблеми достовірності наданої інформації в екстремальних умовах важко [8]. Дійсно, функціонування сенсорів різної природи в складних умовах може супроводжуватися перебудовою зв'язків між підсистемами і локальними змінами їх характеристик. В таких умовах випадкове спотворення інформації може призвести до артефактів управління складною динамічною системою. Крім того, в кібернетиці, як і в психології, інформація має безпосереднє відношення до динаміки процесів управління і пізнання, які забезпечують такі якості природних динамічних систем, як стійкість і життєздатність [7].

Взаємозв'язок динаміки і структури відгуку сенсора впливає з ряду фундаментальних принципів. Так, принцип механічного детермінізму визначає причинно-наслідкові зв'язки в послідовності динамічних станів сенсора. Принцип структурної детермінації пов'язує впорядкованість структури управління системою з її функцією [9]. В характері перебудови взаємозв'язків підсистем для протидії зовнішнім чинникам відображається принцип Ле Шательє. Тому можна припустити, що ці принципи визначають взаємопов'язані динамічні, енергетичні та інформаційні аспекти структури сигналів. На це, зокрема, вказує технологічно успадкована динамічна індивідуальність відгуку напівпровідникових сенсорів. Вона обумовлена дефектами структури та залишковими напруженнями, вплив яких найбільш проявляється в графічних образах сигналів сенсорів і біосенсорів. Так, інформативні: динамічні ВАХ [10], діаграми комплексної площини [11] та ін. Однак в них інформаційні аспекти приховані, що робить системний аналіз функціонування системи в складних умовах неоднозначним, а часом і суперечливим [12]. Тому **ключовою проблемою** у забезпеченні безпечного управління є виявлення взаємозалежних інформаційних аспектів функціонування елементів системи. У динамічних особливостях відгуку кожного сенсора і біосенсора прихована інформація про

природну структуру його функціонування. В екстремальних умовах слід очікувати прояву зв'язку між динамікою відгуку сенсорів різної природи і зміною їх структури управління. Тому **метою** нашої роботи був подальший пошук універсальних засобів виявлення і відображення структури сигналів сенсорів різної природи, а також засобів аналізу її перебудови в складних умовах.

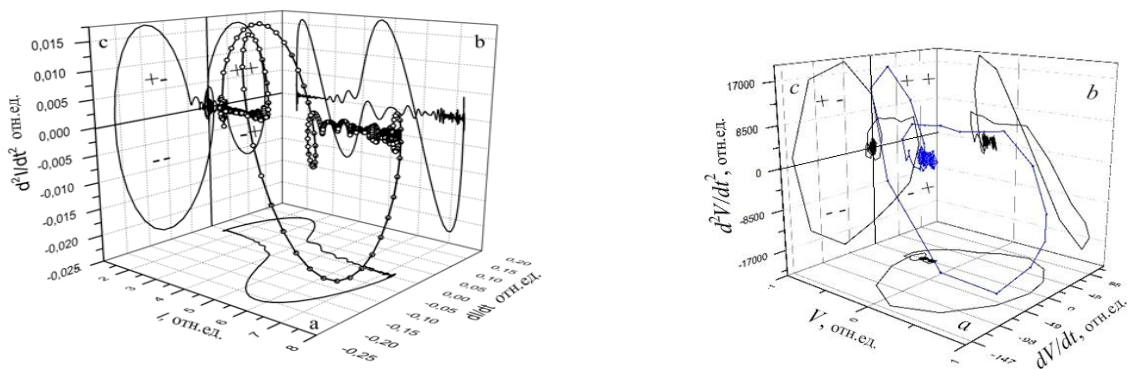
**Експериментальна частина. Взаємопов'язані динамічні особливості функціонування сенсорів і біосенсорів.** Досліджувалися сенсори різної природи (сенсори випромінювання, детектори, спектрометри і сцинтилятори випромінювання на основі сполук  $A_2B_6$  та ін.), а також природні біосенсори функціонального стану (ФС) людини-оператора (ЕКГ, ЕЕГ та ін.). Динамічна індивідуальність властива відгукам і характеристикам сенсорів і біосенсорів різної природи, а саме: а) динамічним вольт-амперним характеристикам (ВАХ); б) кінетиці і спектральному відгуку; в) польовим, температурним і частотним характеристикам; г) електрофізіологічним сигналам. Індивідуальність динамічних ВАХ сенсорів і біосенсорів якісно проявляється в їх асиметрії, ступінь якої пропорційний відношенню площ, що охоплює ВАХ в протилежних квадрантах. Комплексні дослідження динамічних ВАХ напівпровідникових сенсорів показали, що їх форма і площа чутливі до довжини хвилі і інтенсивності фотозбудження, частоти і температури, що дає змогу перетворити їх в багатофункціональні сенсори. Відзначимо також різноманіття і подібність динамічних ВАХ різних за своєю природою сенсорів (детекторів випромінювання на основі сполук  $A^2B^6$ , природних біосенсорів ФС людини, якими є репрезентативні біологічно активні ділянки шкіри людини) [10]. При впливі стрес-чинників форма динамічних ВАХ змінюється, що вказує на перебудову структури функціонування сенсорів і біосенсорів. Її характер проявляється при пакетному поданні послідовності циклів динамічних ВАХ. У пакетах динамічних ВАХ інформативні форма і екстремуми локальної щільності в 4 квадрантах, а також їх площі. Вони виявилися ефективними для: а) визначення оптимальних режимів та умов експлуатації сенсорів; б) відбору функціонально подібних сенсорних матеріалів і сенсорів; в) виявлення біосенсорів ФС вразливих підсистем організму людини.

В роботі [13] показано, що при представленні простого перехідного фотовідгуку (ФВ) сенсора  $I(t)$  і складного кардіосигналу  $V(t)$  людини в фазовому просторі (швидкість - стан-час), відбувається перетворення  $I(t)$  и  $V(t)$  сигналів в послідовності динамічних станів. При цьому виділяються ділянки, які відрізняються лінійною щільністю станів. Просторово-часовий взаємозв'язок цих ділянок найбільше проявляється в проекціях цих послідовностей на площину (стан-швидкість). Вони є сигнатурами 1-го порядку фотовідгуку  $I(t) - dI/dt$  и кардіоциклу  $V(t) - dV/dt$ . Їх конфігурації можна аналізувати як: а) динамічний цикл, утворений протифазовими процесами, б) послідовність геометрично впорядкованих ділянок постійної крутизни або кривизни, добуток яких на їхню довжину пропорційний парціальним внескам відповідних динамічних складових структури [14-17]. Особливий інтерес представляє площа сигнатури, яку можна уявити як потужність підмножини індукованих мікростанів  $W$ . Натуральний логарифм  $W$  статистично характеризує ентропію  $H$  сигналу, тобто  $H \propto \ln W$ , яка є універсальною мірою впорядкованості фізичних процесів різної природи [17]. Тому відношення площі верхньої  $S_+$  і площі нижньої  $S_-$  частин сигнатури, тобто  $B_{дин} = S_+ / S_-$ , є інтегральним показником динамічної збалансованості  $B_{дин}$ . Також фізично значущий показник динамічної упорядкованості протифазових процесів в параметричному циклі  $\beta_{дин} = 1 - \frac{|S^+ - S^-|}{S}$ . Площа сигнатури 1-го порядку сигналу  $S = S_+ + S_-$  та показники

$B_{дин}$  й  $\beta_{дин}$  є індивідуальними для кожного сенсора. Отже, конфігурації сигнатур сигналів сенсорів різної природи можна також аналізувати статистично, використовуючи ентропію  $H$  та інтегративні показники  $B_{дин}$  протифазових процесів. Вони найбільш чутливі до зовнішніх і

внутрішніх чинників та можуть бути ефективними для виявлення системоруйнівних чинників функціонування сенсорів в екстремальних умовах. Будь-який перехідний сигнал  $X(t)$  і його похідні  $dX(t)/dt$ ,  $d^2X(t)/dt^2$  можна подати в одному просторі, а саме в просторі динамічних подій (стан-швидкість-прискорення). При цьому сигнал перетворюється в траєкторію динамічних подій [17-19]. Так, траєкторія фотовідгуку сенсора і кардіосигналу складається з криволінійних ділянок, які відрізняються лінійною щільністю динамічних подій (див. рис. 1 а, б). Просторово-часова кореляція зазначених ділянок найбільш проявляється в ортогональних проєкціях цієї траєкторії, які є сигнатурами 1-го і 2-го порядку. В них проєкції кожної ділянки перетворюються в динамічні, енергетичні складові, сукупності яких формують конфігурації трьох сигнатур. Отже, кількість складових і їх парціальні внески є ознаками, що утворюють систему. Так, в площині (стан-швидкість) відображається конфігурація сигнатури сигналу 1-го порядку  $X - dX/dt$ , особливості аналізу якої розглянуто вище. Проєкція траєкторії на площину (стан-прискорення) є сигнатурою сигналу 2-го порядку  $X - d^2X/dt^2$ , екстремуми якої збігаються з максимумами  $X(t_i) - (dX(t_i)/dt)^2$ . Відповідно, площі екстремумів сигнатури  $X - d^2X/dt^2$  відображають енергетичні складові сигналу сенсора (див. рис. 1 а, площину б). При цьому інформативними є відношення площин протифазових екстремумів  $B_{en} = S_{max} / S_{min}$ , що є показниками їх енергетичного балансу.

Характер взаємозв'язку динамічних змінних  $dX/dt$  и  $d^2X/dt^2$  визначається принципом найменшої дії і відображається в конфігурації сигнатури 2-го порядку  $dX/dt - d^2X/dt^2$ . Вона розташована в 4 квадрантах площини (швидкість-прискорення), площа яких є потужністю основних фаз сигналу.



а) б)  
**Рисунок 1** – Фотовідгук сенсора (а) і кардіосигнал (б) як траєкторії динамічних подій в просторі (стан-швидкість-прискорення), а також ортогональні проєкції цих траєкторій – сигнатури: а)  $I(t) - dI/dt$ ; б)  $I(t) - d^2I/dt^2$ ; в)  $dI/dt - d^2I/dt^2$ ,  
 (на рис. 1 б представлено аналогічні сигнатури кардіоциклу)

Тому конфігурація  $dX/dt - d^2X/dt^2$  відображає цикл функціонування, просторово-часова узгодженість складових в основних фазах якого може слугувати його геометричною моделлю [17]. Для аналізу цієї моделі запропонована матриця, що відображає структуру управління. Її утворюють безрозмірні показники збалансованості потужностей функціонування  $B_{ij}$  між основними його фазами. Вони дорівнюють відношенню площ квадрантів сигнатури між собою  $B_{12} = S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{++}$  і т.ін. (див. табл. 1) [17].

Матриця управління

Квадранти	“+ +”	“+ -”	“- -”	“- +”
“+ +”	1	$S_{pow}^{++} / S_{pow}^{+-}$	$S_{pow}^{++} / S_{pow}^{--}$	$S_{pow}^{++} / S_{pow}^{+-}$
“+ -”	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{++}$	1	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{--}$	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{+-}$
“- -”	$S_{pow}^{--} / S_{pow}^{++}$	$S_{pow}^{--} / S_{pow}^{+-}$	1	$S_{pow}^{--} / S_{pow}^{+-}$
“- +”	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{++}$	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{+-}$	$S_{pow}^{+-} / S_{pow}^{--}$	1

Застосування цієї матриці дає можливість вирішувати проблеми функціонування сенсорів різної природи (не суперечливі дослідження, ідентифікації та класифікації сенсорів, калібрування, артефактів управління і ін.). Так, для ефективного управління необхідне узгодження динамічного і енергетичного балансів між основними фазами циклу, що призводить до просторово-часової впорядкованості структури сигналу (див. рис. 1). Сигнатури  $dX/dt - d^2X/dt^2$  різних електрофізіологічних сигналів здорової людини (ЕКГ, ЕЕГ, ЕОГ й ін.) складаються з геометрично подібних системоутворюючих складових. Відзначимо високу чутливість показників  $B_{ij}$  електрофізіологічних сигналів кардіоциклу до зовнішніх і внутрішніх чинників (магнітні бурі, ліки, їжа та ін.). Про функціональну сумісність різних сенсорів динамічної системи свідчить подібність зміни конфігурацій їх сигналів  $dX/dt - d^2X/dt^2$  різних характеристик або подібність матриць управління. Отже, аналіз сигналів відгуків сенсорів і біосенсорів ФС різної природи за допомогою матриці управління надає унікальні можливості для виявлення технологічно і генетично успадкованих особливостей їх циклу функціонування. Так, подібність сигналів спектральних смуг фоточутливості і рентгенолюмінесценції кристалів селеніду цинку дала змогу створити на їх основі нові сцинтиляційні композиційні матеріали. В них реалізовано пряме детектування випромінювання, яке забезпечують однорідно розподілені в прозорій полімерній матриці сцинтиляційні і фоточутливі мікрокристалічні гранули з близькими структурами смуг рентгенолюмінесценції і фоточутливості [20].

**Інформаційні аспекти функціонування системи** приховані також в характері перебудови структури циклічних сигналів і проявляються в пакетах їх сигналів 1-го і 2-го порядку. Їх виявленню в сенсорах різної природи сприяв аналіз перебудови конфігурацій сигналів циклічного сигналу і характеру зміни їх площі в пакеті. Так, характеристичними ознаками циклу функціонування сенсора випромінювання  $I(t) - dI/dt$  є симетричність конфігурації і їх оборотність в пакеті. Стійкості відповідає критерій  $\Delta H=0$ , а також динамічна  $B_{дин}$  й енергетична  $B_{ен}$  збалансованість відповідних циклів. Ці ознаки взаємопов'язані та поєднуються з мінімумом площі, що охоплює сигнатура, тобто з мінімумом ентропії їх відгуку. Вплив стрес-чинників середовища (обробки) на функціонування сенсорів (функціональних матеріалів) в екстремальних умовах зумовлює зміну конфігурації і площі сигналів. Їх можна оцінити за допомогою відносного показника впорядкованості  $R = I - H / H_{max}$ , а також його абсолютного показника  $\Delta R = RH_{max} = H_{max} - H$ . При цьому в пакеті сигналів відгуку  $dI/dt - d^2I/dt^2$  змінюється структура функціонування.

При поданні конфігурацій сигналів фізіологічних сигналів у вигляді пакета найбільше проявляються ознаки, що утворюють і руйнують систему: а) перехід від симетричної конфігурації до асиметричної; б) характер перебудови структури сигналу; в) ступінь зміни впорядкованості; г) характер переходу від максимальної до мінімальної щільності сигналів. Ці особливості функціонування видно в пакетах сигналів ЕКГ трьох осіб (див. рис 2 а, б, в). При цьому експрес-ідентифікацію ФС людини легко здійснити за допомогою порівняння пакетів сигналів, які є в базі даних.

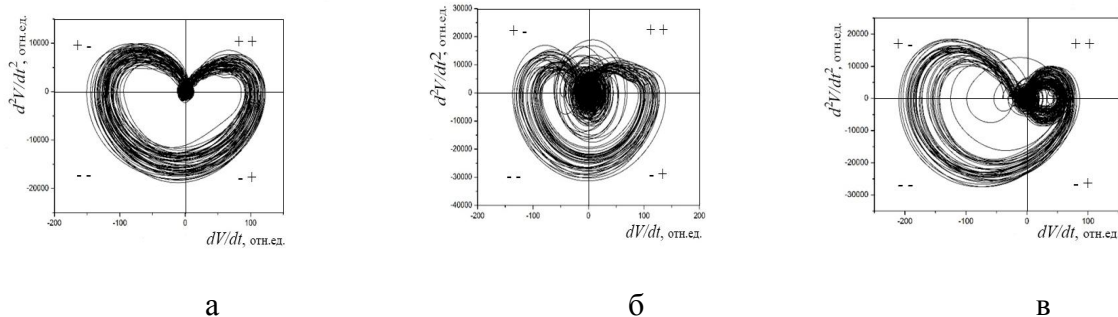


Рисунок 2 – Пакети сигнатур  $dV / dt - d^2V / dt^2$  ЕКГ 2-го порядку (а, б, в)

Важливо, що чинники функціонування, які утворюють і руйнують систему, можна аналізувати – динамічно (змінюється конфігурація сигнатур в пакеті) і статистично – (змінюються площа і щільність сигнатур в пакеті), використовуючи при цьому універсальні засоби і фундаментальні закони і принципи.

Якісно нові можливості надає параметричне інтегрування послідовності сигнатур  $X - dX / dt$ ,  $dX / dt - d^2X / dt^2$  в пакеті. В побудованій на їх основі залежності площі сигнатури від часу  $S(t)$ , а також її похідної  $dS(t)/dt$  прихована зв'язана інформація. Вона стає доступною для аналізу після їх представлення у вигляді інтегрально-диференціальних  $H$ -сигнатур  $H - dH / dt$  та  $F$ -сигнатур  $F - dF / dt$ . Можна припустити, що вони дадуть змогу виявляти приховані фізичні та кібернетичні залежності функціонування елементів динамічної системи в екстремальних умовах.

Слід зазначити, що в рамках підходу, що розвивається, природним чином реалізуються основні принципи системного аналізу. Так, принцип абсолютного пріоритету реалізується в структурі управління, а принципи єдності і пов'язаності – в конфігураціях сигнатур як сукупності протифазових складових. Розташування конфігурації сигнатури в 4-х квадрантах дає змогу виділити основні фази сигналу, відображаючи тим самим принцип модульності. Принцип функціональності і розвитку проявляється в характері перебудови сигнатур в пакеті, а також в інтегрально-диференціальних сигнатурах.

**Висновки.** У просторі динамічних подій одновимірний часовий ряд параметрів (сигнал, відгук, характеристика), що відображає ФС елемента динамічної системи, перетворюється в замкнуту траєкторію. Її ортогональними проекціями є сигнатури 1-го і 2-го порядків. Це дає змогу: а) здійснити природну декомпозицію сигналу, в якій проявляються просторово-часові взаємозв'язки системоутворюючих складових; б) при аналізі їх конфігурацій застосувати універсальні диференційно-геометричні параметри (довжини, крутизни і кривизни), яким поставлено у відповідність фізичні параметри (стан, швидкість, прискорення); в) подати сигнал як потужність підмножини мікростанів і запропонувати інтегративні показники динамічної упорядкованості і енергетичної збалансованості протифазових процесів. Все це дало змогу виявляти взаємозв'язки, що утворюють систему, та чинники, що її руйнують, які можна системно аналізувати під різними кутами зору.

В цілому, візуалізація просторово-часових кореляцій складових сигналів різної природи за допомогою сигнатур 1-го і 2-го порядків, а також  $H$ -сигнатур та  $F$ -сигнатур, надає якісно нові можливості для аналізу безпеки функціонування динамічної системи в складних умовах. Зокрема, сигнатури сигналів спрощують виявлення елементів системи, в яких з'являються провісники функціональних зривів (відмов, руйнувань і т.ін.). Тому засоби підходу, що пропонується, перспективні для контролю, управління і моніторингу функціонування різних за своєю природою елементів динамічної системи в складних умовах.

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф64-5862.

### Список літератури:

1. *Клир Дж.* Системология [Текст] / Дж. Клир. // М.: Радио и связь. – 1990. – 539с.
2. *Mygal V. P., But A. V., Mygal G. V. & Klimentko I. A.* An interdisciplinary approach to study individuality in biological and physical systems functioning // Nature Publishing Group, Scientific Reports. – 2016. – №6, Article number: 29512.
3. *Suh, S.C., Carbone, J.N., Eroglu, A.E.* Applied Cyber-Physical Systems. // Springer. – 2014.
4. *Файнзильберг Л.С.* Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика [Текст] / Л.С. Файнзильберг // К.: Наукова думка: – 2008. – 333с.
5. *Веккер Л.М.* Психика и реальность. Единая теория психических процессов [Текст] / Л.М. Веккер // М.: "Смысл": – 1998. – 625 с.
6. *Шараевский Г. И.* Проблемы валидации исходного аварийного события Чернобыльской катастрофы // Г.И. Шараевский // Ядерна та радіаційна безпека. – 2016. – №1(69). – С. 20-27.
7. *Винер Н.* Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине [Текст] / Н. Винер // М.: Наука: – 1983. – 344 с.
8. *Komar V., Gektin A., Nalivaiko D., Klimentko I. et al.* Characterization of CdZnTe crystals grown by HPB method. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2001. –A 458. – PP. 113–122.
9. *Кнорринг В.И.* Теория, практика и искусство управления [Текст] / В. И. Кнорринг // М.: Норма, 2001.
10. *Мигаль В.П.* Применение параметрических и вейвлет сигнатур для диагностики сенсоров / В.П. Мигаль, И.А. Клименко, Г.В. Мигаль, А.В. Бут // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Х: НАУ ХАІ, – 2009. – №2 (36). – С.35-44.
11. *Komar V.K., Migal V.P., Chugai O.N. et al.* Investigation of localized states in cadmium zinc telluride crystals by scanning photodielectric spectroscopy. // Appl. Phys. Lett. – 2002. – №81. – P. 4195–4197.
12. *Мигаль В.П.* Технологически унаследованные состояния кристаллов  $A_2B_6$ : Автореф. дис... докт. техн. наук. – Х., 2002. – 36 с.
13. *But A.V., Migal V.P. and Fomin A.S.* Structure of a time variable photoresponse from semiconductor sensors. // Technical Physics. – 2012. №57. – P. 575–577.
14. *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.
15. *Mygal V.P. and Mygal G.V.* Method of electrocardiographic data evaluation for diagnostic purposes. Ukrainian patent 77203 (15 November 2006).
16. *Migal V.P., Fomin A.S.* Effect of structural inhomogeneities on the dynamic stability of the photoelectric response of  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  Crystals. // Inorganic Materials. – 2007. – №43. – P. 1179–1183.
17. *Mygal V.P., But A.V., Phomin A.S. and Klimentko I.A.* Geometrization of the dynamic structure of the transient photoresponse from zinc chalcogenides. // Semiconductors. – 2015. – №49. – P.634–637.
18. *Мигаль В.П.* Сигнатурный подход к анализу и обеспечению безопасности системы «человек-машина» [Текст] / В.П. Мигаль, Г.В. Мигаль // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов. – Х.: НАУ «ХАИ»: – 2014. – Вып. 65. – С.152-159.
19. *Migal V.P., But A.V., Migal G.V., Klymenko I.A.* Hereditary functional individuality of semiconductor sensors. // Funct.Mater. – 2015. – №22(3). – P. 387-391. <http://dx.doi.org/10.15407/fm22.03.387>
20. *Мигаль В.П.* «Киберфизический подход к исследованию функционирования динамических систем» [Текст] / В.П. Мигаль, Г.В. Мигаль // Электротехнические и компьютерные системы. – 2016. – №22(98). – С. 354-358.



## References:

1. *Kly`r Dzh.* (1990), "Systemology" [Sy`stemology`ya], M.: Rady`o y` svyaz`, 539 s. (Rus)
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. Nature Publishing Group: Scientific Reports: #6, Article number: 29512.
3. *Suh, S.C., Carbone, J.N., Eroglu, A.E.* (2014), Applied Cyber-Physical Systems., Springer. (In English).
4. *Fainzilberg, L.S.* (2008), "Information technology for signal processing of complex shape", [Informatsionnyie tehnologii obrabotki signalov slozhnoy formy], Kyiv: Naukova Dumka. (Rus)
5. *Vekker, L.M.* (1998), Psihika i realnost. Edinaya teoriya psihicheskikh protsessov, [Mind and Reality. The unified theory of mental processes], Moskva: "Smysl", p. 625. (Rus)
6. *Sharaevskiy, G.I.* (2016), Problemyi validatsii ishodnogo avariynogo sobyitiya Chernobylskoy katastrofyi [Problems in Validation of the Chornobyl Accident Initiating Event], Kyiv: Yaderna ta radlatsIyna bezpeka, #1(69), pp. 20-27. (Rus)
7. *Viner, N.* (1983), Kibernetika, ili Upravlenie i svyaz v zhyvotnom i mashine [Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine], Moscow: Nauka, 344 p. (Rus)
8. *Komar, V., Gektin, A., Nalivaiko, D., Klimenko, I. et al.* (2001), Characterization of CdZnTe crystals grown by HPB method, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., A 458, p. 113–122.
9. *Knorring, V. I.* (2001), Teoriya, praktika i iskusstvo upravleniya [Theory, practice and art of management], Moskva: NORMA.
10. *Migal, V.P.* (2009), Primenenie parametriceskikh i veyvlet signatur dlya diagnostiki sensorov [Application of parametric and wavelet-signatures for sensor diagnostics], H: NAU HAI, RadIoelektronni I komp'yuterni sistemi, #2 (36), p. 35-44. (Rus)
11. *Komar, V.K., Migal, V.P., Chugai, O.N., Puzikov, V.M. et al.* (2002), Investigation of localized states in cadmium zinc telluride crystals by scanning photodielectric spectroscopy. Appl. Phys. Lett., #81, p. 4195–4197. (In English). url: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/81/22/10.1063/1.1525883>
12. *Migal, V.P.* (2002), Technologically inherited states of  $A_{II}B_{VI}$  crystals: Author's thesis [Tehnologicheski unasledovannyye sostoyaniya kristallov: avtoref. dis. ... dokt. tehn. nauk], Harkov, 36 p.
13. *But, A.V., Migal, V.P. and Fomin A.S.* (2012), Structure of a time variable photoresponse from semiconductor sensors, Technical Physics, #57, p.575–577.
14. *But, A.V., Mygal, V.P., Bodnar, I.V.* (2012), Spatial-temporal order of the photoresponse from the sensor materials, Optical Systems Design, Proc. SPIE 8550, 85502B. (In English).
15. *Mygal, V.P. and Mygal, G.V.* (2006), Method of electrocardiographic data evaluation for diagnostic purposes. Ukrainian patent #77203.
16. *Migal, V.P., Fomin, A.S.* (2007), Effect of structural inhomogeneities on the dynamic stability of the photoelectric response of Cd<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>Te Crystals, Inorganic Materials, #43, p. 1179–1183. (In English).
17. *Mygal, V.P., But, A.V., Phomin, A.S. and Klimenko, I.A.* (2015), Geometrization of the dynamic structure of the transient photoresponse from zinc chalcogenides, Semiconductors, # 49, p. 634–637. (In English).
18. *Migal, V.P., Migal, G.V.* (2014), Signaturniy podhod k analizu i obespecheniyu bezopasnosti sistemyi «chelovek-mashina» [The signature approach to the analysis and safety "man-machine" system], Harkov: Ukraine, NAY "HAI", Otkryitye informatsionnyie i kompyuternyye integrirovannyye tehnologii, Vol. 65, p. 152-159. (Rus). url: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/OIKIT>
19. *Migal, V.P., But A.V., Migal G.V., Klymenko I.A.* (2015), Hereditary functional individuality of semiconductor sensors, Funct. Mater., #22(3), p. 387-391. <http://dx.doi.org/10.15407/fm22.03.387>. (In English).
20. *Migal, V.P., Migal G.V.* (2016), «Kiberfizicheskiy podhod k issledovaniyu funktsionirovaniya dinamicheskikh sistem» [Cyber physical approach to study the functioning of dynamic systems], Elektrotehnicheskie i kompyuternyye sistemyi, #22(98), p. 354-358. (Rus)

