

## ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕНСОРІВ РІЗНОЇ ПРИРОДИ

В. П. Мигаль, І. А. Клименко, Г. В. Мигаль

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

**Анотація.** Розроблено засоби для параметричного моделювання динаміки функціонування сенсорів різної природи. Геометризація моделей функціонування сенсорів дозволила запропонувати універсальний інструментарій їх аналізу. Його використання при моделюванні функціонування сенсорів в екстремальних умовах надає для аналізу якісно нові можливості.

**Ключові слова:** сенсори, параметричні моделі, сигнатури, структура сигналу, геометризація, фазовий портрет, упорядкованість.

### Вступ

Високі вимоги до безпеки і надійності функціонування складних систем в енергетиці та транспорті можуть забезпечуватися розробкою засобів одержання достовірної інформації (від сенсорів різної природи) [1], методів її обробки і аналізу [2]. Також триває інтенсивний пошук ефективних методів моделювання та алгоритмів управління складними системами і фізичними процесами [3]. Зокрема в установках вирощування сенсорних кристалів процеси теплообміну супроводжуються різними потоками, хімічними реакціями, кристалізацією тощо. Тому вирішення проблем ефективного керування вирощуванням сенсорних кристалів потребує універсального інструментарію для дослідження їх на всіх етапах життєвого циклу. Чутливість параметрів структури функціонування сенсорів різної природи як до зовнішніх так і до внутрішніх чинників дозволяє використовувати їх для дослідження і моделювання різних по природі процесів. При цьому в складній динаміці керування такими процесами спостерігаються нелінійні явища, які технологічно успадковані. Зокрема, мають місце нерегулярні і хаотичні коливання, бифуркації тощо. Очевидно, що інформація про них прихована в структурі сигналів їх функціонування. Для її виявлення та моделювання нами розвивається міждисциплінарний підхід, в якому геометризація сигналів функціонування дозволяє використовувати динамічні і статистичні методи аналізу [4]. В основу підходу покладено перетворення будь-якого сигналу функціонування сенсора в траєкторію динамічних подій параметричного простору (стан-швидкість-прискорення). Таке перетворення супроводжується природною декомпозицією траєкторії на геометрично впоряд-

ковані ділянки, що відрізняються довжиною, крутизною чи кривиною. Ортогональними проєкціями послідовності цих ділянок є конфігурації сигнатур сигналу 1-го і 2-го порядку, в яких ділянки набувають певного фізичного змісту - становляться динамічними і енергетичними складовими циклу функціонування. Їх просторово-часовий розподіл на площині (швидкість-прискорення) відображає характер взаємозв'язку динамічних параметрів і є структурою циклу функціонування, яку можна досліджувати динамічними і статистичними методами [5]. Отже параметри структури циклу функціонування є універсальними. Їх можна застосовувати для структурно-функціонального аналізу фізичних і біологічних процесів, а також для моделювання функціонування сенсорів різної природи в екстремальних умовах. Оскільки структура параметричного циклу сенсора визначає його функціональні можливості, то виявлення якісно нових можливостей моделювання функціонування сенсорів різної природи було основною метою даної роботи.

### 1. Динамічні і статистичні особливості параметричного циклу функціонування сенсора.

В рамках підходу індивідуальні особливості фазового портрету довільного відгуку  $X(t)$  сенсора на площині (швидкість-стан) перетворюють його в сигнатуру  $X-dX/dt$  1-го порядку, яка є більш інформативною [6]. Так, її конфігурація розділяє протифазні складові певного циклу [7]. З одного боку, на відміну від фазового портрету, конфігурацію сигнатури сигналу  $X-dX/dt$  можна аналізувати динамічно як сукупність геометрично (значить, і динамічно) упорядкованих складових. Їх парціальні внески  $P$  пропорційні добутку довжини ділянок  $L$  на крутизну  $dX/dt$  (кривизну  $d^2X/dt^2$ ), тобто внесок лінійних ділянок  $P = L \times \frac{dX}{dt}$ , а інших  $P = L \times \frac{d^2X}{dt^2}$  [8]. Отже конфі-

гурація сигнатури є набором певних функцій, які визначають відповідний функціонал. Тому рівняння Ейлера-Лагранжа можуть слугувати математичною моделлю функціонування сенсора. З іншого боку, суттєвою перевагою запропонованого підходу є новий параметр – площа, яку охоплює конфігурація сигнатури. Вона пропорційна потужності підмножини можливих динамічних мікростанів  $W$ , що характеризується статистичною вагою. Її натуральний логарифм є ентропією  $H$  [9]. Для параметричного моделювання функціонування сенсорів різної природи досить інформативними є сигнатури їх сигналів 2-го порядку  $X-d^2X/dt^2$ . Такі, сигнатури розташовані на площині (стан-прискорення). В ній екстремуми в квадрантах збігаються з максимумами енергії  $(dX(t_i)/dt)^2$ . Тому аналіз сигнатури  $X-d^2X/dt^2$  дозволяє не тільки визначити енергетичні складові сигналу сенсора та їх природу (пружну, дисипативну), а й визначити енергетичний баланс протифазних складових, тобто  $B_{en}=S_{max}/S_{min}$ , який дорівнює відношенню площ екстремумів [10].

Найбільш інформативним є характер взаємозв'язку динамічних і енергетичних складових. Він визначає конфігурацію сигнатури 2-го порядку  $dX/dt-d^2X/dt^2$ . В 4 квадрантах площини (швидкість-прискорення) вона охоплює площі, які відображають потужності підмножин мікростанів основних його фаз [4]. Дійсно, перехід до нової динамічної змінної  $Y = dY/dt$  перетворює сигнатуру сигналу 2-го порядку в сигнатуру 1-го порядку  $Y-dY/dt$ , яка також є фазовим портретом. Тому конфігурація сигнатури  $dX/dt-d^2X/dt^2$  відображає характер взаємозв'язку динамічних параметрів системи (швидкості  $dX/dt$  і прискорення  $d^2X/dt^2$ ) в параметричному циклі функціонування і є його геометричною моделлю. Її також можна аналізувати динамічними і статистичними методами. Таким чином, конфігурація і площа сигнатури  $dX/dt-d^2X/dt^2$  може слугувати: а) природною геометричною моделлю параметричного циклу функціонування будь-якого сенсора, б) множиною мікростанів, яка включає 4 підмножини мікростанів. Крім цього, конфігурація сигнатури є набором певних функцій, що визначають відповідний функціонал.

Оскільки в основі геометризції динаміки сигналів функціонування різних за своєю природою біологічних і фізичних сенсорів в просторі динамічних подій є природна їх декомпозиція, то не дивно, що геометричні моделі фотовідгуку  $I(t)$  сенсора випромінювання і кардіоциклу  $V(t)$  можуть бути подібні (див. рис. 1, 2).

Просторово-часова кореляція складових параметричного циклу функціонування сенсора випромінювання відображає характер взає-

мозв'язку швидкості і прискорення в фотовідгуку. Конфігурація сигнатури фотовідгуку 2-го порядку, характер розташування якої в 4 квадрантах відображає просторово-часову декомпозицію основних фаз його функціонування. Отже, конфігурація сигнатури фотовідгуку сенсора  $dI/dt-d^2I/dt^2$  геометрично являє собою параметричний цикл, який включає два підцикли. Просторово розділені підцикли зростання (квадранти "+ +", "+ -") і спаду (квадранти "- -", "- +") фотовідгуку (рис. 1) можна аналізувати динамічними і статистичними методами.

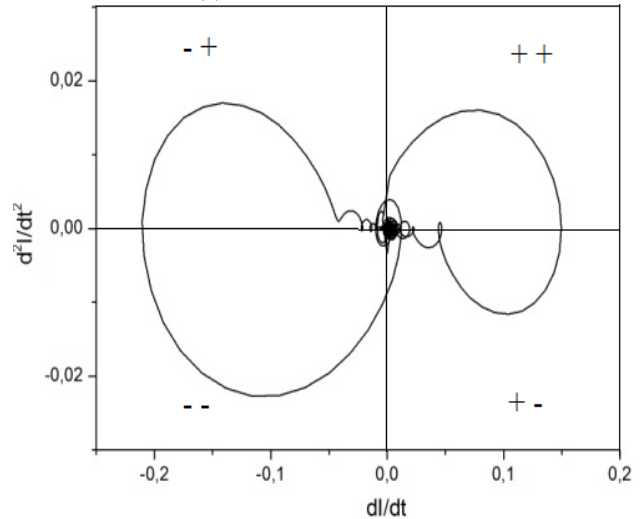


Рис. 1. Структура фотовідгуку спектрометра випромінювання

Геометризація параметричного циклу функціонування сенсора дозволила застосувати для аналізу матрицю управління. Вона сформована безрозмірними показниками збалансованості потужностей функціонування  $B_{ij}$  між основними його фазами. Вони рівні відношенню площ всіх квадрантів сигнатури між собою  $B_{12}=S_{++}/S_{+-}$  і т.д. Їх можна представити у вигляді квадратної матриці управління параметричним циклом функціонування. Матриця для сенсора-спектрометра випромінювання приведена в таблиці 1. Її аналіз дозволяє виявляти приховані взаємозв'язки між основними фазами управління.

Таблиця 1

Матриця параметричного циклу функціонування сенсора-спектрометра випромінювання

Квадранти	"+ +"	"+ -"	"- -"	"- +"
"+ +"	1	2.217	0.561	0.82
"+ -"	0.453	1	0.255	0.37
"- -"	1.764	3.913	1	1.451

"- +"	1.215	2.695	0.688	1
-------	-------	-------	-------	---

Так, відношення показників  $B_{ij}$  1 і 2 рядків близько до 2.3, а 3 і 4 - до 1.4. Подібність проти-фазних складових процесів в конфігурації і близькі відношення площ їх показників збалансованості ( $B_{13}=S_{++}/S_{--}$  і інші) може свідчити про певну просторово-часову узгодженість цих процесів та їх взаємозв'язок. Відношення площ в підциклах наростання і спаду фотовідгуку вказує на наявність енергетичного розбалансу між синфазними і зміщеними на  $\pi/2$  процесами в підциклах наростання і спаду фотовідгуку. Зокрема, в спектрометрах випромінювання симетричність і збалансованість циклу пов'язана з оборотністю фотовідгуку і стійкістю сенсора як динамічної системи. Інформативна також відмінність прямого (за годинниковою стрілкою) і зворотного циклу функціонування сенсора-спектрометра (див. табл. 1). Отже аналіз циклу дозволив встановити збалансованість потужностей управління між основними його фазами і отримати діагностично значиму інформацію про структуру взаємозв'язків між ними. Тому матриця управління дозволяє аналізувати ступінь узгодженості природного управління функціонуванням сенсора (елемента системи) наростання і спаду фотовідгуку. Так, більш висока збалансованість взаємозв'язків між основними фазами перехідного відгуку свідчить про просторову - часову узгодженість складових структури управління. Вона властива сенсорам високої якості.

Геометричною моделлю кардіоциклу  $V(t)$  є конфігурація сигнатури  $dV/dt-d^2V/dt^2$ . Вона приведена на рис. 2.

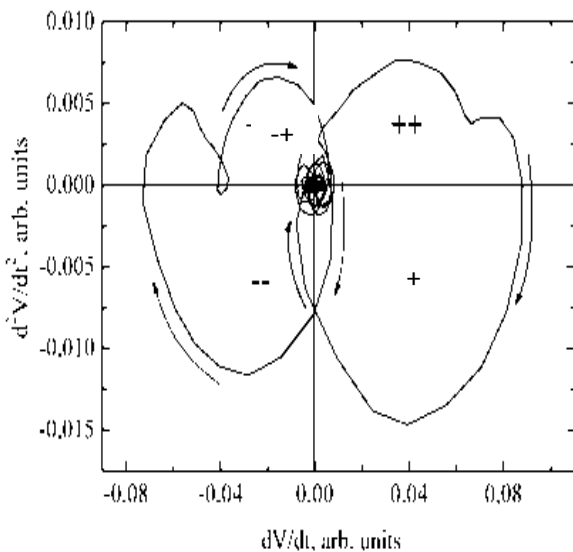


Рис. 2. Структура кардіоциклу людини

На основі співставлення геометричних моделей фотовідгуку  $I(t)$  сенсора випромінювання і

кардіосигналу  $V(t)$  в просторі (стан-швидкість-прискорення) (див. рис. 1 і 2), видно, що їх структури управління можуть бути подібні.

Матриця параметричного циклу функціонування міокарда приведена в таблиці 2. З аналізу таблиці 2 для міокарда, який є своєрідним біосенсором серцево-судинної системи організму людини, видно, що матриця показників по іншому впорядкована ніж у сенсора-спектрометра.

Таблиця 2

Упорядкована матриця циклу функціонування міокарду людини

Квадранти	"+ +"	"+ -"	"- -"	"- +"
"+ +"	1	0.690	0.49	1.166
"+ -"	1.441	1	1.72	1.688
"- -"	2.01	1.388	1	2.344
"- +"	0.857	0.592	0.426	1

Так, значення показників в кожному стовпці і в кожному рядку неупорядковані. Однак, відношення показників 1 і 2 рядків дорівнює 0.69 за винятком  $B_{23}=S_{+}/S_{-}$ . Для 3 і 4 рядків всі показники рівні 2.34. Це свідчить про високу упорядкованість кардіоциклу. Також інформативною є відмінність складових конфігурації в основних фазах циклу функціонування міокарду.

Тому конфігурації сигнатур 2-го порядку спектрометра випромінювання і ЕКГ є геометричними моделями параметричного циклу їх функціонування. Це підтверджує, що конфігурація сигнатури 2-го порядку сигналу функціонування будь-якого сенсора, по суті, є універсальною геометричною моделлю його параметричного циклу. Отже матриця управління містить інформацію про структуру циклу функціонування сенсора, яка визначає його якість і функціональні можливості.

### 2. 3-D моделювання параметричного циклу функціонування сенсора.

Динамічна і енергетична розбалансованість циклу функціонування сенсора (біосенсора) виникає при дії зовнішніх та внутрішніх стресчинників. Вона найбільше проявляється в динаміці протилежних фаз циклу. Для параметричного моделювання функціонування найбільше підходять сенсори-детектори випромінювання, кристали яких були вирощені в сильно нерівноважних умовах [1]. Саме в таких умовах формується в кристалі дефектна структура, яка обумовлює індивідуальність перехідного фотовідгуку сенсо-

ра (див. рис. 2, площина а). Енергетичні особливості проявляються в конфігурації сигнатури 2-го порядку  $I-d^2I/dt^2$  (див. рис. 2, площина б). Ця сигнатура розташована в площині (стан-прискорення). Вона не містить ділянок постійної крутизни, а складається тільки з послідовності дугоподібних ділянок. В сигнатурі домінують протифазні екстремуми, що відображають найбільш енергоємні складові відгуку.

Складність форми протифазних екстремумів та їх асиметричність вказує на сильне поле, яке протидіє зміні стану сенсора-детектора у відповідності з принципом Ле Шательє (рис. 3, площина б).

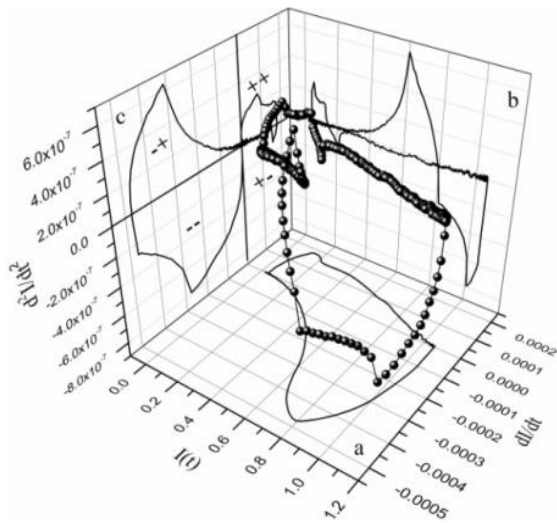


Рис. 3. Перехідний фотовідгук детектора випромінювання як траєкторія динамічних подій (точки на траєкторії), проєкції траєкторії - сигнатури 1-го і 2-го порядків (площини а, б і с відповідно)

Очевидно, що при фотозбудженні відбувається перебудова внутрішнього поля і системоутворюючих зв'язків сенсора. Тому таким сенсорам властива висока енергетична розбалансованість, яка і визначає характер перебудови зв'язків в структурі перехідного відгуку. Як бачимо, в сигнатурі 1-го порядку (рис.2, а) проявляються динамічні, а в сигнатурі 2-го порядку (рис. 2, б) енергетичні особливості відгуку сенсора. Як і очікувалось, в сигнатурі 2-го порядку (рис. 2, с) проявилась структура системоутворюючих зв'язків. Так, показник розбалансованості потужностей підциклів наростання (++, + -) і спаду (--, -+) перехідного фотовідгуку, який визначається через відношення площ,  $B_{pow} = S_{pow1} / S_{pow2}$ , де

$S_{pow1} = S_{pow}^{++} + S_{pow}^{+-}$  і  $S_{pow2} = S_{pow}^{--} + S_{pow}^{-+}$ , приймає значення 0,2. Ця асиметрія вказує на фотополяризаційні процеси, які є складовими перехідного фотовідгуку. Про це ж свідчить невпорядкована матриця циклу функціонування сенсора

(див. табл. 3). Отже, вищевказані процеси обумовлені перебудовою при фотозбудженні внутрішнього поля, що породжено дефектно-структурним ансамблем кристала [11].

Очевидно, динаміка перехідного фотовідгуку технологічно успадкована, а інформація закодована в складному потенціальному рельєфі. Виходячи з наведеного, можна припустити, що в структурі циклу функціонування природним чином відображається системоутворюючі зв'язки між підсистемами кристала. Дійсно, нерівність відношення площ протифазних підциклів, але подібність їх форм свідчить про причинно-наслідковий взаємозв'язок між протифазними процесами в циклі. Різниця відношень же площ пов'язаних підциклів вказує на розбаланс потужностей між синфазними і зміщеними на  $\pi/2$  процесами в підциклах наростання і спаду фотовідгуку відповідно (див. табл. 3).

Таблиця 3  
Матриця циклу функціонування сенсора-детектора випромінювання

Квадранти	"+ +"	"+ -"	"- -"	"- +"
"+ +"	1	2.58	0.136	0.202
"+ -"	0.388	1	0.053	0.078
"- -"	7.354	18.96	1	1.485
"- +"	4.952	12.77	0.673	1

З аналізу таблиці 3 видно, що для даного детектора  $B_{pow}$  і  $B_{ij}$  суттєво відрізняються.

В цілому в матриці показників  $B_{ij}$  і  $B_{pow}$  міститься найбільш повна інформація про приховані взаємозв'язки і процеси. Так, наявність збалансованих (стійких) зв'язків між різними фазами перехідного відгуку зумовлює стабільність сенсора. У той же час наявність розбалансованих (нестійких) взаємозв'язків проявляється в характері розподілу мікростанів, які вказують на зменшення упорядкованості в структурі відгуку. Зокрема, виявилось, що серед показників  $B_{ij}$  існують досить чутливі (і найменш чутливі) до зовнішніх (зміна температури, напруженості поля і т.п.) чинників. Як бачимо, показники  $B_{ij}$  мають фізичну значимість. Введемо інтегративний показник енергетичної збалансованості перехідного відгуку як циклу  $\beta_{pow}$ , який визначається виразом:

$$\beta_{pow} = 1 - \frac{|S_{pow1} - S_{pow2}|}{S_{pow}}$$

Для даного перехідного фотовідгуку  $\beta_{pow} = 0,49$ , що вказує на важливу роль технологічно успадкованих дефектів структури в стійкості зв'язків між різними фазами відгуку. Зокрема, даним сенсорам властиві великі значення збільшення діелектричної проникності (до 40) і діелектричних втрат при фотозбудженні (до 7).

Таким чином, аналіз 3-D моделювання параметричного циклу функціонування сенсора дозволяє: а) виявити просторово-часові кореляції між різними фазами циклу; б) доповнити засоби аналізу динаміки функціонування; в) чисельно оцінювати розбалансованість синфазних та протифазних процесів у відгуку; г) ідентифікувати сенсори, найбільш близькі за показниками збалансованості, для покращення роботи мульти-сенсорних систем.

### 3. Висновки.

Успадкований характер взаємозв'язку динамічних і енергетичних параметрів функціонування відображається двоєю: динамічно в конфігурації циклу і статистично – у відношеннях площ квадрантів сигнатури, що відображають потужності просторово розділених процесів в параметричному циклі. В його геометричній моделі, тобто в конфігурації сигнатури 2-го порядку  $dX/dt - d^2X/dt^2$ , параметрично відображається принцип найменшої дії. Тому інформативними є потужності основних фаз. Відношення між ними формують сукупність показників збалансованості, яку можна представити у вигляді матриці структури управління. Вона дозволяє досліджувати характер взаємозв'язку ключових показників, від узгодженості яких залежить ефективність управління. Важливо, що взаємозв'язок між параметрами можна аналізувати під трьома кутами зору. Тому, геометрична модель структури циклу управління, представлена в координатах  $dX/dt - d^2X(t)/dt^2$ , надає якісно нові можливості. Так, перевагою 3-D параметричного моделювання функціонування сенсорів є природна декомпозиція сигналів на: а) взаємопов'язані динамічні і енергетичні складові їх функціонування; б) на підмножини мікростанів, характер розподілу яких визначає упорядкованість і збалансованість основних фаз їх функціонування. Тому можна промоделювати вплив зовнішніх і внутрішніх чинників на характер взаємозв'язку між основними фазами циклу функціонування.

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантової підтримки Державного

фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф64-5862.

### Список використаної літератури

1. Komar, V., Gektin, A., Nalivaiko, D., Klimenko, I. et al. Characterization of CdZnTe crystals grown by HPB method. [Text] // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2001. – А 458. – PP. 113–122.
2. Файнзильберг, Л. С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. [Текст] – К.: Наукова думка: – 2008. – 333с.
3. Кнорринг, В. И. Теория, практика и искусство управления [Текст] / В. И. Кнорринг // М.: Норма, 2001.
4. Mygal, V. P., But, A. V., Mygal, G. V. & Klimenko, I. A. An interdisciplinary approach to study individuality in biological and physical systems functioning [Text] // Nature Publishing Group, Scientific Reports. – 2016. – № 6, Article number: 29512.
5. 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. – 2015. – № 49. – P.634–637.
6. But, A. V., Migal, V. P. and Fomin, A. S. Structure of a time variable photoresponse from semiconductor sensors. [Text] // Technical Physics. – 2012. №57. – P. 575–577.
7. Migal, V. P., Fomin, A. S. 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. [Text] // Inorganic Materials. – 2007. – № 43. – P. 1179–1183.
8. But, A. V., Mygal, V. P., Bodnar, I. V. Spatial-temporal order of the photoresponse from the sensor materials. [Text] // Optical Systems Design. – 2012. Proc. SPIE 8550, 85502B.
9. Keith, A. Entropy. American Journal of Physics 52, 492–496 (1984).
10. Migal, V. P., But, A. V., Migal, G. V., Klymenko, I. A. Hereditary functional individuality of semiconductor sensors. [Text] // Funct.Mater. – 2015. – № 22(3). – P. 387–391. <http://dx.doi.org/10.15407/fm22.03.387>
11. 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. 354–58.

### References

1. 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.
2. Fainzilberg, L. S. (2008), “Information technology for signal processing of complex shape”, [Informatsionnyie tehnologii obrabotki signalov slozhnoy formy], Kyiv: Naukova Dumka. (Rus)
3. Knorring, V. I. (2001), Theory, practice and art of management [Teoriya, praktika i iskusstvo upravleniya], Moskva: NORMA.
4. 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.
5. 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, pp. 634–637. (In English).
6. 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.
7. 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).
8. 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).
9. Keith, A. Entropy. American Journal of Physics 52, 492–496 (1984).
10. 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).
11. Migal, V. P., Migal G. V. (2016), Cyber physical approach to study the functioning of dynamic systems [Kiberfizicheskii podhod k issledovaniyu funktsionirovaniya dinamicheskikh sistem], Elektrotehnicheskie i kompyuternye sistemy, № 22(98), p. 354–358. (Rus)

## PARAMETRIC MODELING OF THE FUNCTIONING DYNAMICS OF DIFFERENT NATURE SENSORS

**V.P. Mygal, I.A. Klymenko, G.V. Mygal**  
National Aerospace University

**Abstract.** *The means for parametric modeling of the dynamics of the functioning of sensors of different nature are proposed. In models, the structure of control of physical processes in semiconductor and biological sensors is displayed. The hidden features of the sensor function are manifested after the transformation of its signal  $X(t)$  and the derivatives ( $dX/dt$ ,  $d^2X/dt^2$ ) into the parametric signatures  $X-dX/dt$ ,  $X-d^2X/dt^2$  and  $dX/dt-d^2X/dt^2$ . Their configurations are geometric models of the sensor. They clearly show the dynamic and energy components of the sensor. The nature of the interconnection of these components determines the parametric cycle of the sensor in its main phases. Therefore, the informative powers of the main phases of the sensor functioning. The relations between them form the matrix of the system management structure. It allows you to explore the nature of the relationship between key management parameters, on which consistency depends on its effectiveness. The interrelation of the parameters can be analyzed in 3-D. Therefore, the geometric model of the structure of the control cycle, represented in the coordinates  $dX/dt-d^2X(t)/dt^2$ , provides qualitatively new possibilities. Firstly, information aspects of sensor functioning can be analyzed by complementary dynamic and statistical methods. Secondly, to use natural and interrelated dynamic parameters in the analysis, as well as universal indicators of dynamic order and energy balance. Third - to form a matrix of indicators of the balance of management capacities between the main phases of functioning. The advantage of 3-D parametric modeling of sensors is: a) the natural decomposition of signals into the interrelated dynamic and energy components of their operation; B) the natural decomposition of signals into subsets of microstates, the nature of their distribution determines the order and balance of their functioning. Therefore, it is possible to model the influence of external and internal factors on the nature of the relationship between the indicators of balance. With a comparative analysis of parameters and performance indica-*



tors, the reasons for the inefficiency of parametric control are visible. 3- D parametric modeling allows us to identify and analyze hidden spatio-temporal correlations in the dynamics of the functioning of sensors of different nature.

**Keywords:** sensors, parametric model, the signature, structure signal, geometrization, phase portrait, ordering.

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕНСОРОВ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ

**В. П. Мигаль, И. А. Клименко, Г. В. Мигаль**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
"Харьковский авиационный институт"*

**Аннотация.** Разработаны средства для параметрического моделирования динамики функционирования сенсоров разной природы. Геометризация моделей функционирования сенсоров позволила предложить универсальный инструментарий их анализа. Его использование при моделировании функционирования сенсоров в экстремальных условиях открывает для анализа качественно новые возможности.

**Ключевые слова:** сенсоры, параметрические модели, сигнатуры, структура сигнала, геометризация, фазовое пространство.

Отримано 15.04.2017



**Мигаль Валерий Павлович**, доктор технических наук, профессор кафедры физики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт". Ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, E-mail: mygal@mail.ru, тел. +38-057-720-26-79

**Valerii Mygal**, Dr. of Science, Professor, Department of Physics, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Chkalova ave., 17, Kharkiv, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0003-3622-5423



**Клименко Игорь Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры физики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт". Ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, E-mail: ig-or.klymenko@khai.edu, тел. +38-057-788-41-78

**Igor Klymenko**, Associate Professor, Department of Physics, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Chkalova ave., 17, Kharkiv, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0003-2400-8317



**Мигаль Галина Валерьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортной инфраструктуры НАУ «ХАИ», g.mygal@khai.edu, тел. +38-050-636-87-17

**Galina Mygal**, Associate Professor, Department of of Automobile and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Chkalova ave., 17, Kharkiv, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0002-9862-9338