

УДК 548.55:544.2

Мигаль В. П., д-р техн. наук,
Мигаль Г. В., канд. техн. наук

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

***Аннотация.** Обоснована необходимость междисциплинарного подхода к выявлению особенностей функционирования динамических систем разной природы и предложены универсальные средства для его реализации. Сигналы полупроводниковых и биологических сенсоров преобразованы в сигнатуры динамического пространства, в которых отображаются составляющие их структуры. Подход упрощает контроль согласованности функционирования разных подсистем сложной технической системы.*

***Ключевые слова:** полупроводниковые сенсоры, сигналы, биосенсоры, подсистемы, индивидуальность отклика, сигнатуры сигналов, геометризация сигнала, структура управления.*

Мигаль В. П., д-р техн. наук,
Мигаль Г. В., канд. техн. наук

КИБЕРФІЗИЧНИЙ ПІДХІД ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

***Анотація.** Обґрунтовано необхідність міждисциплінарного підходу до виявлення особливостей функціонування динамічних систем різної природи і запропоновано універсальні засоби для його реалізації. Сигнали напівпровідникових і біологічних сенсорів перетворено в сигнатури динамічного простору, в яких відображаються складові їх структури. Підхід спрощує контроль узгодженості функціонування різних підсистем складної технічної системи.*

***Ключові слова:** напівпровідникові сенсоры, сигнали, біосенсоры, підсистемы, індивідуальність відгуку, сигнатури сигналів, геометризація сигналу, структура управління.*

Mygal V. P., ScD,
Mygal G. V., PhD.

CYBER PHYSICAL APPROACH TO STUDY THE FUNCTIONING OF DYNAMIC SYSTEMS

***Abstract.** The necessity of an interdisciplinary approach to the identification of the functioning of dynamical systems of different nature and proposed a generic means for its realization. Signals semiconductor and biological sensors transformed into a signature dynamic space in which components of the structure are displayed. The approach simplifies control of consistency of the various subsystems of complex technical systems.*

***Key words:** semiconductor sensors, signals, biosensors, sub-system, response individuality, signature signals, geometrization signal, management structure.*

Введение

Неизбежное увеличение сложности технических динамических систем влечет за собой рост рисков техногенных катастроф, а стремление преодоления этих рисков в свою очередь ведет к усложнению технических систем. Поэтому тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами, сегодня крайне необходима: на транспорте, в энергетике и робототехнике, а также в управлении технологическими процессами. В них мониторинг и управление физическими процессами связаны обратной связью. Интеграция вычислительных ресурсов с физическими процессами реализуется в киберфизических системах (КФС), способных функционировать в сложных условиях

[1]. Для создания таких систем, необходим инжиниринг моделей, который позволит преодолеть ряд фундаментальных проблем (совместимости, согласованности, детерминированности и др.). В этой связи особый интерес представляет отклик сенсоров живой и неживой природы, которые являются самоорганизованными динамическими системами. Функционирование их взаимосвязанных элементов (подсистем) согласовано, а поведение в сложных условиях генетически и технологически унаследовано [2]. Поэтому структуры их сигналов представляют интерес для КФС, как уникальные естественные модели. *Целью* данной работы являлся поиск универсальных средств выявления и анализа структуры сигналов сенсоров.

Структура сигналов разной природы

Н. Винер показал, что принципы управления и связи в технике и физиологии подобны [3]. Он также ввел понятие организации сигнала (его структуры) и определил наиболее общую форму организации сигнала как его пространственно-временную упорядоченность, а именно, ее линейный инвариант. При этом общим компонентом пространства и времени является одномерный ряд параметров, так как пространство трехмерно, а время одномерно. Временной ряд параметров удобен для передачи сигнала по разным каналам связи, но содержит минимум информации об его структуре и неэффективен для управления разными элементами системы. В сложных условиях функционирования сенсоров разной природы нарушается синхронизация информационных потоков от сенсоров разных подсистем, что затрудняет управление сложными динамическими системами. Основная проблема в различии формы сигналов сенсоров и биосенсоров разной природы, что обуславливает необходимость применения разных методов их обработки, моделей, параметров, показателей и критериев. Такое многообразие затрудняет сопоставительный анализ динамики функционирования сенсоров различной природы. Для согласования человеко-машинного взаимодействия необходимы универсальные средства обработки, отображения и анализа информации.

Особенности структуры отклика полупроводниковых сенсоров скрыты в динамической индивидуальности их функционирования. Она, в свою очередь связана с внутренними факторами (дефектами структуры, напряжениями и др.), «замороженная» динамика которых технологически унаследована [4].

В динамике отклика сенсора отображается ряд принципов. Так, принцип механического детерминизма определяет причинно-следственные связи между динамическими состояниями сенсора. Принцип структурной детерминации связывает упорядоченность структуры управления системой с ее функцией. Принцип Ле Шателье определяет характер перестройки структуры взаимосвязей

подсистем для противодействия внешним факторам. Дополняя друг друга, эти принципы позволяют динамическую индивидуальность сигнала связать с особенностями структуры отклика сенсора.

Индивидуальность динамических ВАХ

Исследовались сенсоры и биосенсоры разной природы (полупроводниковые сенсоры, детекторы и спектрометры и др.). В ходе комплексных исследований сенсоров измеряли циклы динамических вольтамперных характеристик (ВАХ) $U - I(\Delta U)_{f,\lambda}$, а также спектральный отклик сенсоров. Установлено, что конфигурации их динамических ВАХ состоят из последовательности участков постоянной крутизны и кривизны, параметры которых зависят от интенсивности и длины волны фотовозбуждения, частоты f и температуры (см. рис.1). Они являются индивидуальными характеристиками сенсора, что превращает динамические ВАХ в сигнатуры отклика. Их применение расширяет возможности сенсоров, превращая их в многофункциональные устройства.

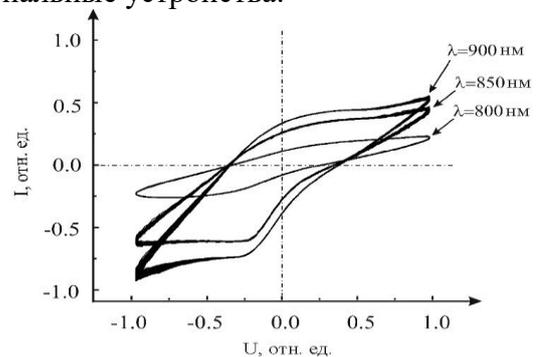


Рис.1. Динамические ВАХ кристаллов ZnSe(Te)

При этом действие внешних и внутренних факторов проявляется в локальном размывии и асимметрии конфигураций сигнатур ВАХ, представленных в виде пакета. Они являются характеристическими признаками локальной перестройки динамики ВАХ, которые положены в основу методики отбора функционально подобных сенсоров. Анализ пакета сигнатур сенсоров эффективен для определения оптимальных режимов и условий их эксплуатации. Отметим, что эти же характеристические признаки присущи сигнатурам

динамических ВАХ естественных биосенсоров, которыми являются репрезентативные биологически активные участки кожи и миокард человека [5].

Геометризация сигналов сенсоров

Более информативным оказалось параметрическое представление сигналов сенсоров в виде последовательности динамических событий. Так, в пространстве (состояние – скорость – ускорение) каждое динамическое событие можно отобразить точкой с координатами $(X, dX/dt, d^2X(t)/dt^2)$. Поэтому сигнал $X(t)$, отображающий цикл функционирования любого сенсора или биосенсора, можно представить в виде последовательности динамических событий. Причинно-следственно связанные между собой события образуют в пространстве (состояние–скорость–ускорение) замкнутую траекторию. Ее ортогональные проекции являются сигнатурами 1-го и 2-го порядка. Конфигурации сигнатур $X-dX/dt$ и $X-d^2X(t)/dt^2$ геометрически отображают динамические и энергетические особенности цикла функционирования сенсора. Охватываемые сигнатурами площади можно представить в виде мощности подмножеств индуцированных микросостояний [6]. При этом характер взаимосвязи динамических и энергетических параметров наиболее проявляется в проекции траектории на плоскость (скорость – ускорение). Она является сигнатурой сигнала 2-го порядка $dX/dt - d^2X(t)/dt^2$. Площади, которые охватывает конфигурация этой сигнатуры в каждом из 4 квадрантов, отображают мощности микросостояний. Следовательно, конфигурация сигнатуры $dX/dt - d^2X(t)/dt^2$ отображает естественную декомпозицию сигнала на основные фазы цикла функционирования сенсора [7]. Их мощности связаны между собой отношениями, которые определяют структуру функционально и информационно. Поэтому, сигнатура $dX/dt - d^2X(t)/dt^2$ является геометрической моделью структуры цикла управления, для анализа которого предложена матрица управления [8, 9].

Универсальными средствами анализа структуры сигнала являются: а) дифференциально-геометрические параметры составляющих, б) подмножества отношений со-

ставляющих, отображающих упорядоченность системы, в) подмножества микросостояний и их отношений, отображающих степень взаимосвязи составляющих; г) подобие конфигураций сигнатур, указывающее на совместимость функционирования разных сенсоров.

Возможности подхода рассмотрим на примере фотоотклика и рентгенолюминесценции кристаллов селенида цинка, на основе которых созданы фотоприемники, сцинтилляторы и детекторы рентгеновского излучения. На рис. 2 и 3 представлены сигнатуры 1-го и 2-го порядков спектрального фотоотклика и рентгенолюминесценции.

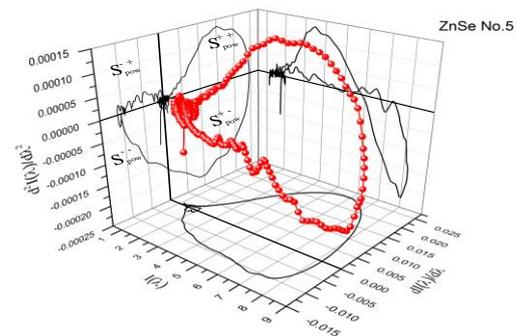


Рис. 2. Сигнатуры спектра сенсора излучения 1-го и 2-го порядков

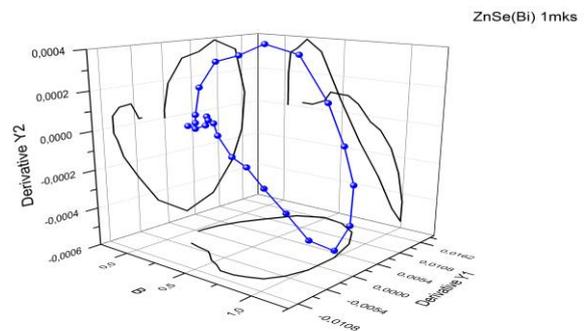


Рис. 3. Сигнатуры 1-го и 2-го порядков спектра рентгенолюминесценции

Несмотря на различие природы и формы этих сигналов конфигурации их сигнатур и матрицы управления подобны, что указывает на совместимость их циклов функционирования. Это позволило предложить комбинированный детектор радиоактивного излучения нового типа. При этом применение матриц управления упростило контроль совместимости откликов кристаллов.

Высокая чувствительность параметров сигнатур миокарда человека к внешним и внутренним факторам позволяет

рассматривать его как биосенсор. Конфигурации сигнатур кардиоцикла 1-го и 2-го порядков чувствительны к стресс-факторам среды и деятельности. Встречаются конфигурации сигнатур миокарда (см. рис.4), которые подобны сигнатурам сенсоров, приведенным на рис.2 и 3. Это экспериментальное подтверждение подобия принципов управления и связи в живой и неживой природе.

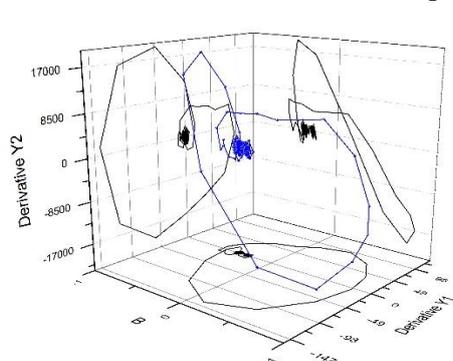


Рис. 4. Сигнатуры ЭКГ- 1-го и 2-го порядков и ЭКГ человека

Для выявления и анализа индивидуальности приведенных выше сигнатур сенсоров и биосенсоров использовали универсальные дифференциально – геометрические параметры, а также интегративные показатели упорядоченности и сбалансированности динамических и энергетических составляющих цикла функционирования [10]. Дополнительную информацию о структуре предоставляет преобразование вейвлет-спектрограммы отклика сенсора или ЭКГ в разномасштабные вейвлет-сигнатуры, что позволило применить универсальные средства подхода. Установлено, что динамическая индивидуальность может проявляться и на различных масштабных уровнях.

Заключение

Таким образом, информация об индивидуальности функционирования сенсоров разной природы скрыта в структуре их сигнала $X(t)$. Она наиболее проявляется в пространственно-временной упорядоченности составляющих конфигурации сигнатуры $dX/dt - d^2X(t)/dt^2$. В ней геометрически отображается цикл управления, математической моделью которого является матрица управления. Ее применение упрощает контроль совместимости циклов функционирования

разных по природе сенсоров.

В целом развиваемый киберфизический подход и средства его реализации позволяют повысить безопасность и надежность функционирования динамических систем в сложных условиях. Публикация содержит результаты исследований, проведенных при грантовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по конкурсному проекту Ф64-5862.

Литература

1. Suh S.C. Applied Cyber-Physical Systems / S.C Suh, Carbone, J.N. Eroglu A.E. // Springer. – 2014.
2. Файнзильберг Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика [Текст] / Л.С. Файнзильберг. –К.: Наукова думка.–2008. – 333 с.
3. Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине [Текст] / Н. Винер. –М.: Наука. – 1983. – 344 с.
4. Investigation of localized stated in cadmium zinc telluride crystals by scanning photo-dielectric spectroscopy/ V.K. Komar, V.P. Migal, O.N. Chugai, V.M. Puzikov// Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 81. P. 4195–4197.
5. Применение параметрических и вейвлет сигнатур для диагностики сенсоров / В.П. Мигаль, И.А. Клименко, Г.В. Мигаль, А.В. Бут // Радиотехнические и компьютерные системы. – X: НАУ ХАІ. – 2009. – №2 (36). – С. 35-44.
6. Migal, V.P. Effect of structural inhomogeneities on the dynamic stability of the photoelectric response of Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te Crystals / V.P. Migal, A.S. Fomin // Inorganic Materials – 2007. – Vol. 43. – P. 1179–1183.
7. Geometrization of the Dynamic Structure of the Transient Photoresponse from Zinc Chalcogenides / V. P. Migal, A. V. But, A. S. Phomin, I. A. Klimenko // Semiconductors. – 2015. – Vol. 49, no. 5. – P. 634–637. <http://link.springer.com/article/10.1134%2FS1063782615050152>.
8. 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 техноло-

гии: сб. науч. трудов. – Х.: НАУ «ХАИ»: – 2014. – Вып. 65. – С. 152-159.

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

10. Hereditary functional individuality of semiconductor sensors / V. P. Migal, A. V. But, G. V. Migal and I. A. Klimenko // *Funct. Mater.* – 2015. – Vol. 22, no. 3. – P. 387–391. <http://functmaterials.org.ua/contents/22-3/387>.

Получено 28.04.2016

References

11. Suh S.C. Applied Cyber-Physical Systems / Suh, S.C. Carbone, J.N. Eroglu A.E. // Springer. – 2014. (In English).

12. Fainzilberg, L.S. Information technology for signal processing of complex shape/ L.S. Fainzilberg // Kiev: Naukova Dumka. – 2008. (In Russian).

13. Viner N. Kibernetika, ili Upravlenie i svyaz v zhivotnom i mashine [Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine], (1983), Moscow: Nauka. – 344 p. (In Russian).

14. Investigation of localized states in cadmium zinc telluride crystals by scanning photo-dielectric spectroscopy/ V.K. Komar, V.P. Migal, O.N. Chugai, V.M. Puzikov// *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 81. P. 4195–4197. (In English). url: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/81/22/10.1063/1.1525883>

15. Application of parametric and wavelet-signatures for sensor diagnostics/ V.P. Mygal, I.A. Klimenko, G.V. Mygal, A.S. Phomin, A.V. But//. *Radioelectronic and computer systems*. – 2009. – Vol. 36, pp. 143–148. (In Russian). <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/REKS/2009/REKS209/Migal.pdf>

16. Migal, V.P. Effect of structural inhomogeneities on the dynamic stability of the photoelectric response of CdZnTe Crystals/ V.P. Migal, A.S. Fomin//. *Inorganic Materials*. – 2007. – Vol. 43, pp. 1179–1183. (In English).

17. Geometrization of the Dynamic Structure of the Transient Photoresponse from Zinc Chalcogenides / V. P. Migal, A. V. But, A. S.

Phomin and I. A. Klimenko // *Semiconductors*. – 2015. – Vol. 49, no. 5. – P. 634–637. <http://link.springer.com/article/10.1134%2FS1063782615050152>. (In English).

18. Migal V.P. and Migal G.V. Signaturniy podhod k analizu i obespecheniyu bezopasnosti sistemyi «chelovek-mashina» [*The signature approach to the analysis and safety "man-machine" system*], (2014), *Otkrytyie informatsionnyie i kompyuternyye integrirovannyye tehnologii* – Harkov, Ukraine, НАУ "ХАИ". Vol. 65, pp. 152-159. (In Russian).

19. But, A.V. Structure of a time variable photoresponse from semiconductor sensors / A.V. But, V.P. Migal, A.S. Fomin // *Technical Physics*. – 2012. – Vol. 57, pp. 575–577. (In English).

20. Hereditary functional individuality of semiconductor sensors / V. P. Migal, A. V. But, G. V. Migal and I. A. Klimenko // *Funct. Mater.* – 2015. – Vol. 22, no. 3: – P. 387–391. <http://functmaterials.org.ua/contents/22-3/387>. (In English).



Мигаль Валерий Павлович

доктор технических наук, профессор кафедры физики НАУ «ХАИ»,
mygal@mail.ru,
050-756-08-29



Мигаль Галина Валерьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортной инфраструктуры НАУ «ХАИ»
mygal@mail.ru
050-636-87-17