

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF UKRAINE
Odesa I. I. Mechnikov National University

СЕНСОРА ЕЛЕКТРОНІКА І МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ 2026 – Т. 23, № 2

Науково-технічний журнал

Заснований 13.11.2003 року
Виходить 4 рази на рік

УДК 681.586

Засновник Одеський національний
університет імені І. І. Мечникова

За підтримки Українського фізичного
товариства і Академії наук вищої школи
України

Ідентифікатор медіа: R30-03678
(zareestrovano Natsionalnoyu Radoyu
Ukrayini z pytany telobachennya
i radiomovlennya vid 28.03.2024 za № 1050)

Журнал включено до Переліку наукових фа-
хових видань України з присвоєнням катего-
рії «Б» у кластері Фізика, ядерна фізика та
астрономія за спеціальностями Е5 Фізика та
астрономія та Е6 Прикладна фізика та нано-
матеріали

Журнал реферується українським рефера-
тивним журналом «Джерело» та індексується
у міжнародних базах Index Copernicus Inter-
national Journals Master List, Directory of Re-
search Journal Indexing, General Impact Factor,
Crossref і EBSCO

Видається за рішенням Вченої ради
Одеського національного університету
імені І. І. Мечникова
Протокол № 11 від 23.06.2026 р.

Адреса редакції:
вул. Всеволода Змієнка, 2, МННФТЦ,
Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова, Одеса, 65082, Україна
Тел./Факс: +38(048)723-34-61

SENSOR ELECTRONICS AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES 2026 – VOL. 23, No. 2

Scientific and Technical Journal

Established on 13.11.2003
Published 4 times a year

UDC 681.586

Founded by Odesa I. I. Mechnikov
National University

With the support of the Ukrainian Physical
Society and Higher School Academy of Sciences
of Ukraine

The Media Identifier: R30-03678
(registered by the National Council on
Television and Radio Broadcasting of Ukraine
as of 28.03.2024, No.1050)

The journal is included in the List of Scientific
Professional Journals of Ukraine and assigned
the B category in the cluster Physics, Nuclear
Physics and Astronomy, specialities E5 Physics
and Astronomy and E6 Applied Physics and
Nanomaterials

The journal is abstracted in the Ukrainian
journal of abstracts “Dzherelo” and indexed
in international databases Index Copernicus
International Journals Master List, Directory
of Research Journal Indexing, General Impact
Factor, Crossref and EBSCO

Published as per the resolution of the Academic
Council of Odesa I. I. Mechnikov National
University
Minutes No. 11 dated 23.06.2026

Editorial Board address:
2 Vsevoloda Zmienka St, ISEPTC,
Odesa I. I. Mechnikov National University,
Odesa, 65082, Ukraine
Tel/Fax: +38(048)723-34-61

E-mail: semst-journal@onu.edu.ua, semst.onu.edu.ua
© ОНУ імені І. І. Мечникова, 2026

Редакційна колегія

Головний редактор:

Лепіх Я. І. (Одеса, Україна)

Заступник головного редактора:

Жуков С. О. (Одеса, Україна)

Відповідальний секретар:

Балабан А. П. (Одеса, Україна):

Члени редколегії:

Андрієвський Б. В. (Кошалін, Польща)

Беляєв О. Є. (Київ, Україна)

Вербицький В. Г. (Київ, Україна)

Віш Гжегож (Жешув, Польща)

Голомб Р. М. (Ужгород, Україна)

Гусовський Марек (Вроцлав, Польща)

Дзядевич С. В. (Київ, Україна)

Єралієва Бахит (Астана, Казахстан)

Жолудов Ю. Т. (Харків, Україна)

Ільченко В. В. (Київ, Україна)

Ільчук Г. А. (Львів, Україна)

Калінчак В. В. (Київ, Україна)

Коваленко О. В. (Дніпро, Україна)

Лабуз Мірослав (Жешув, Польща)

Мельник В. Г. (Київ, Україна)

Мица В. М. (Ужгород, Україна)

Музыка К. М. (Харків, Україна)

Никируй Л. І. (Івано-Франківськ, Україна)

Оліх О. Я. (Київ, Україна)

Рябченко С. М. (Київ, Україна)

Сеті Ю. О. (Львів, Україна)

Скришевський В. А. (Київ, Україна)

Сліпченко М. І. (Харків, Україна)

Стріха М. В. (Київ, Україна)

Черненко О. С. (Одеса, Україна)

Editorial Board

Editor-in-Chief:

Lepikh Ya. I. (Odesa, Ukraine)

Vice Editor-in-Chief:

Zhukov S. O. (Odesa, Ukraine)

Responsible Editor:

Balaban A. P. (Odesa, Ukraine):

Editorial Board Members:

Andriyevskyy B. V. (Koszalin, Poland)

Belyaev A. E. (Kyiv, Ukraine)

Verbitsky V. G. (Kyiv, Ukraine)

Wisz Grzegorz (Rzeszow, Poland)

Holomb R. M. (Uzhhorod, Ukraine)

Gusowski Marek (Wroclaw, Poland)

Dzyadevych S. V. (Kyiv, Ukraine)

Yeraliyeva Bakhyt (Astana, Kazakhstan)

Zholudov Yu. T. (Kharkiv, Ukraine)

Ilchenko V. V. (Kyiv, Ukraine)

Ilchuk H. A. (Lviv, Ukraine)

Kalinchak V. V. (Kyiv, Ukraine)

Kovalenko O. V. (Dnipro, Ukraine)

Labuz Mirosław (Rzeszow, Poland)

Melnyk V. G. (Kyiv, Ukraine)

Mitsa V. M. (Uzhhorod, Ukraine)

Muzyka K. M. (Kharkiv, Ukraine)

Nykyrui L. I. (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

Olikh O. Ya. (Kyiv, Ukraine)

Ryabchenko S. M. (Kyiv, Ukraine)

Seti Yu. O. (Lviv, Ukraine)

Skryshevsky V. A. (Kyiv, Ukraine)

Slipchenko M. I. (Kharkiv, Ukraine)

Strikha M. V. (Kyiv, Ukraine)

Chernenko O. S. (Odesa, Ukraine)

Науковий редактор випуску

та відповідальний за випуск – **Я. І. Лепіх**

ЗМІСТ CONTENTS

Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors

I. V. Bilynskyi, R. Ya. Leshko, O. V. Leshko, Ya. Yu. Melnyk, A. V. Tymkiv, P. P. Khomyn
GEOMETRIC EFFECTS ON THE ENERGY SPECTRA OF CHARGE CARRIERS AND EXCITONS IN TETRAPOD-LIKE NANOSTRUCTURES 4

I. B. Білінський, Р. Я. Лешко, О. В. Лешко, Я. Ю. Мельник, А. В. Тимків, П. П. Хомин
ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ СПЕКТРИ НОСІЇВ ЗАРЯДУ ТА ЕКСИТОНІВ У ТЕТРАПОДОПОДІБНИХ НАНОСТРУКТУРАХ

Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори Optical and optoelectronic and radiation sensors

I. V. Padalka, I. S. Virt
DEVELOPMENT OF A UV PHOTOSENSOR MODULE BASED ON A ZnO/Si HETEROSTRUCTURE USING AN ARDUINO MICROCONTROLLER.. 14

I. B. Падалка, І. С. Вірт
РОЗРОБКА МОДУЛЯ УФ-ФОТОСЕНСОРА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ ZnO/Si З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЕРА ARDUINO

Акустoeлектронні сенсори Acoustoelectronic sensors

S. N. Fedosov, A. E. Sergeeva
FEATURES OF MANUFACTURING PYRO- AND PIEZOELECTRIC SENSORS BASED ON FERROELECTRIC POLYMER POLYVINYLIDENE FLUORIDE (PVDF) 26

С. Н. Федосов, О. Є. Сергеева
ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОТА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛІМЕРУ ПОЛІВІНІЛІДЕНФТОРИДУ (ПВДФ)

Ya. Lepikh, V. Yanko, A. Karpenko, A. Balaban
INTELLECTUALIZATION OF ACOUSTOELECTRONIC SURFACE ACOUSTIC WAVE SENSORS 32

Я. Леніх, В. Янко, А. Карпенко, А. Балабан
ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ АКУСТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

Сенсори та інформаційні системи Sensors and information systems

D. O. Mruga, Ye. R. Vakhovskyi, S. V. Dzyadevych, O. O. Soldatkin
DEVELOPMENT OF A MULTIENZYME BIOSENSOR SYSTEM FOR SIMULTANEOUS DETERMINATION OF ALANINE AMINOTRANSFERASE AND ASPARTATE AMINOTRANSFERASE ACTIVITY..... 36

Д. О. Мруга, Є. Р. Ваховський, С. В. Дзядевич, О. О. Солдаткін
РОЗРОБКА МУЛЬТИЕНЗИМНОЇ БІОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОДНОЧАСНОГО ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ АЛАНІНАМІНОТРАНСФЕРАЗИ ТА АСПАРТАТАМІНОТРАНСФЕРАЗИ

V. Bosyi
RELIABILITY PREDICTION MODELS FOR SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEXES OF MOBILE SENSOR SYSTEMS BASED ON TECHNICAL CONDITION MONITORING 52

В. Босий
МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ КОМПЛЕКСІВ МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

Персоналії
ДО 65-РІЧЧЯ З ДНЯ НАРОДЖЕННЯ ПРОФЕСОРА СТІХИ МАКСИМА ВІТАЛІЙОВИЧА 67

Інформація для авторів.
Вимоги до оформлення статей..... 70
Information for authors.
Paper preparation requirements 73

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

PACS: 73.21.La, 73.22.-f, 71.35.-y

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.360778>

GEOMETRIC EFFECTS ON THE ENERGY SPECTRA OF CHARGE CARRIERS AND EXCITONS IN TETRAPOD-LIKE NANOSTRUCTURES

I. V. Bilynskyi^{ab}, <https://orcid.org/0000-0002-4221-9225>

R. Ya. Leshko^a, <https://orcid.org/0000-0002-9072-164X>

O. V. Leshko^a, <https://orcid.org/0000-0001-9646-3189>

Ya. Yu. Melnyk^b, <https://orcid.org/0009-0007-7128-2024>

A. V. Tymkiv^a, P. P. Khomyn^a

^aDepartment of Physics and Information Systems,
Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, 3 Stryiska St, Drohobych, 82100, Ukraine

^bDepartment of Physics, Kryvyi Rih State Pedagogical University,
54 Universytetska St, Kryvyi Rih, 50086, Ukraine

e-mail: iv.bilynskyi@gmail.com; leshkoroman@gmail.com; leshkoolya9@gmail.com;
melniyaroslav.qa@gmail.com; andrii.tymkiv@dspu.edu.ua; pavlo.homyn@dspu.edu.ua

Abstract. This paper presents a theoretical study of the energy spectra of electrons, holes, and excitons in tetrapod-shaped semiconductor quantum dots. To provide an adequate physical description of the complex three-dimensional morphology of the nanocrystals, three realistic macroscopic geometric models are proposed and systematically compared. The calculations are performed within the effective mass approximation using a finite potential barrier model. The numerical solution of the stationary Schrödinger equation for single-particle electron and hole states, as well as the calculation of the total exciton energy, is carried out using the Finite Element Method. It is established that the spatial overlap at the geometric core-arm junction determines the regime of strong spatial quantum confinement. The analysis of the results reveals a complex non-monotonic dependence of the electron and exciton ground-state energies on the height of the tetrapod arms. This behavior is driven by a strong physical competition between the localization of charge carriers within the central core and their penetration into the available volume of the epitaxial arms. It is demonstrated that when the core volume dominates, the geometric narrowing at the junction creates an effective potential barrier that locks the carrier wave function in the center of the nanostructure, inevitably leading to an increase in energy. Conversely, it is convincingly shown that the fundamental exciton transition energy is practically independent of the overall arm length and is primarily determined by the core radius and the arm thickness. The theoretical results from the cylindrical model demonstrate excellent quantitative agreement with the optical spectroscopy data of synthesized long-arm CdSe tetrapod. The discrepancy observed for short-arm tetrapod highlights the sensitivity of the energy spectrum to surface states and structural imperfections at the nanoscale.

Keywords: tetrapod-like quantum dot; exciton; electron and hole energy spectrum

1. INTRODUCTION

Tetrapod-shaped semiconductor quantum dots (QDs) attract significant attention in the fields of computational nanophysics and materials science due to their unique characteristics, which open up broad possibilities for applications in modern nanotechnologies. Their branched three-dimensional structure, consisting of a central core and four epitaxially grown arms, creates conditions for strong and asymmetric quantum confinement of electrons, holes, and excitons. Due to the ability to fine-tune the energy spectrum, such nanostructures (particularly GaAs/AlGaAs) are highly promising for the development of high-speed optoelectronic devices, infrared detectors, and quantum computing systems, where nonlinear optical effects, such as nonlinear optical rectification, play a significant role [1, 2]. Furthermore, the ability of the tetrapod arms (for example, in CdSe/CdS structures) to act as dynamic levers allows them to transform local mechanical strains into shifts in photoluminescence peaks, making them ideal nanoscale strain gauges [3, 4]. The integration of such fluorescent probes into polymer matrices enables the creation of "smart" nanocomposites for the precise measurement of microscopic mechanical stresses with a high dynamic range, which is of importance for both fundamental biomechanics and monitoring the structural integrity of materials [5].

The formation of complex tetrapod-shaped nanostructures is the result of fine control over crystallographic polymorphism during colloidal synthesis [6]. The process is typically initiated by the nucleation of a central core in the cubic zinc blende phase. Since the {111} facets of this cubic lattice are structurally equivalent to the basal planes of the hexagonal wurtzite phase, they serve as ideal nucleation sites for the epitaxial growth of the arms. By rapidly changing thermodynamic conditions (specifically, temperature and precursor concentration), the reaction is driven into a strict kinetic regime. This stimulates the rapid anisotropic growth of four hexagonal arms along the c-axes, while thermodynamically blocking further isotropic growth of the cubic core itself.

Such a mechanism allows for precise and independent control over both the diameter of the central core and the geometric parameters (length and thickness) of the arms, which is a critical tool for the spatial engineering of wave functions and tuning the energy spectrum of charge carriers in such heterostructures. Furthermore, the introduction of transition metal impurities, such as copper, into the base CdSe structures allows for additional modification of their nonlinear optical characteristics and control over photoluminescence processes [7, 8].

From a theoretical perspective, accurately modeling the electronic structure and excitonic states of tetrapod-shaped QDs requires sophisticated numerical approaches due to their complex three-dimensional geometry. Initial computational studies focused on determining the energy spectra of electrons, holes, and excitons in bare II-VI tetrapods, such as CdTe, utilizing the effective mass approximation and 3D numerical solutions. These studies demonstrated how the spatial localization of charge carriers sensitively transitions between the central core and the arms depending on the geometric dimensions of the structure [9, 10]. Furthermore, theoretical frameworks were subsequently extended to complex core-shell architectures (e.g., CdTe/CdS tetrapods) by incorporating continuum elasticity theory. This allowed researchers to calculate the spatial distribution of internal mechanical stresses caused by lattice mismatch, which modifies the band alignment and the overall optical properties of the nanocrystals [11]. More recently, the theoretical analysis of these nanostructures has been generalized to account for external macroscopic perturbations. For instance, detailed computational models have been employed to evaluate the photoionization cross-section, revealing how variations in hydrostatic pressure, temperature, and the polarization direction of the incident light critically impact the optical transitions and electronic confinement within tetrapod QDs [12].

Building upon these theoretical foundations, the exact geometric representation of the tetrapod structure remains an important factor in accurately

determining the energy states. In a recent study [13], a geometric model of a tetrapod-like QD was proposed where the arms were approximated as spheres with their centers located precisely on the surface of a central spherical core. However, a primary limitation of this approach was the strict dimensional constraint applied to the arm radii to prevent their spatial intersection. To overcome this limitation and provide a more physically realistic description of the nanostructures, the aim of the present work is to investigate the energy spectra of electrons, holes, and excitons in tetrapod QDs by employing and comparing more advanced structural models. Specifically, we explicitly account for the mutual intersection of the arms in the modified spherical-arm configuration and introduce an alternative conical-arm and cylindric-arm model. In those novel geometries, the central core remains a sphere (or absent), while the four arms are modeled as cones (or cylinders) whose theoretical vertices converge at the exact center of the core. The calculations of the single-particle and excitonic states for both geometric configurations are performed numerically using the Finite Element Method (FEM). Therefore the main aim of this manuscript is systematically comparing the resulting energy states between these distinct morphological models, this study aims to demonstrate how the geometric shape of the arms and their interfacial overlap affect the spatial confinement of charge carriers and the overall optical properties of the system.

2. TETRAPOD MODEL

To calculate the energy states of charge carriers (electrons and holes) in tetrapod-shaped QDs, we employ the single-band effective mass approximation. The spatial confinement of the carriers is described by a three-dimensional rectangular potential barrier model. Within this framework, the single-particle Hamiltonian for an electron or a hole is written

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2} \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{m(\vec{r})} \vec{\nabla} \right) + U(\vec{r}), \quad (1)$$

where $\hbar$ is the reduced Planck constant, and m is the position-dependent effective mass of the charge carrier, which takes distinct values inside

the semiconductor nanostructure and in the surrounding matrix. The confinement potential U is modeled as a finite 3D rectangular well, defined as $U = 0$ inside the tetrapod domain and $U = U_0$ outside the structure, where U_0 is the barrier height determined by the band alignment of the chosen materials.

The complex three-dimensional morphology of the tetrapod QD is defined by a central core and four symmetric arms oriented along the axes of a regular tetrahedron. To systematically investigate the influence of the nanostructure's shape on the carrier energy spectra, we consider two distinct geometric models.

A. The Intersecting Spheres Model

In the first configuration, the tetrapod is constructed as a union of five spherical domains. The central core is represented by a sphere of radius a_{core} centered at the origin of the coordinate system at (0,0,0). The four arms are modeled as identical spheres of radius a_{arm} . The centers of these four arm-spheres are distributed symmetrically along the four tetrahedral directions. Unlike previous restricted models [13], this configuration explicitly allows and accounts for the spatial intersection of the arm-spheres both with the central core and with one another (Fig. 1a). This mutual overlap creates a continuous, complex morphological boundary that naturally reflects the volumetric blending of the arms during growth.

B. The Conical-Arm Model

The second configuration provides an alternative morphological representation, combining a central spherical core with conical arms. Here, the central core remains a sphere of radius a_{core} located at the origin. The four arms are modeled as identical circular cones, each characterized by a height H and a base radius a_{base} . A defining feature of this model is that the theoretical vertices of all four cones converge exactly at the center of the core (the origin). Consequently, the height H is measured from the origin to the center of the cone's base along its central axis. The central axes of these cones are aligned with the four tetrahedral directions. The physically meaningful domain of the tetrapod is

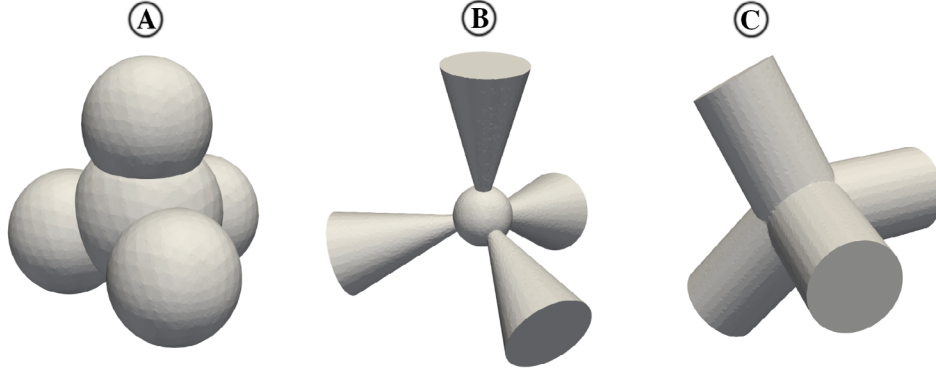


Figure 1. Geometric models of tetrapods.

thus formed by the union of the central sphere and the expanding volumes of the cones that protrude beyond the core's surface (Fig. 2b). This geometric model closely mimics the epitaxial growth dynamics, where the arm cross-section gradually increases from the nucleation center outward.

C. The Cylindrical-Arm Model.

The third configuration presents a geometric model consisting exclusively of four intersecting cylindrical arms, without a distinct central spherical core. The arms are modeled as four identical right circular cylinders, each defined by a length L (measured from the center of the structure) and a constant cross-sectional radius a_{cyl} . The longitudinal axes of these cylinders are aligned strictly with the four symmetric tetrahedral directions, converging directly at the origin $(0,0,0)$. The physically meaningful domain of the tetrapod is formed by the spatial union of these four cylindrical volumes, which naturally creates a branched central junction through their mutual intersection. This model accurately represents the morphology of highly anisotropic, elongated tetrapods typically obtained in colloidal synthesis, where the wurtzite arms maintain a nearly constant diameter along their entire epitaxial growth axis and seamlessly fuse at the nucleation center.

To determine the electron and hole energy spectra, the stationary Schrödinger equation with the Hamiltonian (1) must be solved. Due to the complex, non-trivial boundaries of the intersecting spheres and conical-arm models,

analytical solutions are not feasible. Therefore, the calculations of the single-particle and excitonic states for both geometric configurations are performed numerically using the FEM. In our work, this numerical approach is implemented using the FEniCS open-source computing platform. The 3D physical domain of the quantum dot and the surrounding matrix is discretized into an unstructured tetrahedral mesh. The continuous stationary Schrödinger equation is then transformed into its weak variational form. This reduces the differential equation to a sparse generalized algebraic eigenvalue problem, which is solved to obtain the energy levels (eigenvalues) and the corresponding 3D probability density distributions (wave functions) for the electrons and holes.

For the correlated electron-hole pair (exciton), the physical model must account for the electrostatic attraction between the charge carriers. The corresponding exciton Hamiltonian is constructed by combining the single-particle Hamiltonians (1) with the Coulomb interaction term:

$$\hat{H}_{exc} = \hat{H}_e(\vec{r}_e) + \hat{H}_h(\vec{r}_h) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon|\vec{r}_e - \vec{r}_h|}, \quad (2)$$

where $\hat{H}_e(\vec{r}_e)$ and $\hat{H}_h(\vec{r}_h)$ are the single-particle operators for the electron and hole in form (1), respectively, e is the elementary charge, ϵ_0 is the vacuum permittivity, and ϵ is the average dielectric permittivity of the heterostructure.

Because a direct numerical solution of the full 6D two-particle Schrödinger equation is computationally prohibitive for such complex geom-

etries, we employ a self-consistent iterative procedure based on the coupled Schrödinger-Poisson system. The calculation of the excitonic state is performed within the mean-field approximation using the FEM through the following algorithm. Initially, the single-particle stationary Schrödinger equation is solved for the electron (assuming no hole is present) to determine its unperturbed ground-state wave function, $\Psi_e(\vec{r})$. Using this wave function, the spatial charge density of the electron is evaluated. Subsequently, the 3D Poisson equation is solved numerically to find the electrostatic potential $\Phi_e(\vec{r})$ generated by the electron distribution:

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \epsilon \vec{\nabla} \Phi_e(\vec{r})) = e |\Psi_e(\vec{r})|^2. \quad (3)$$

The resulting Coulomb potential energy, $V_{eh}(\vec{r}) = -e\Phi_e(\vec{r})$, is then incorporated into the single-particle Hamiltonian of the hole as an additional attractive confinement term. The modified Schrödinger equation for the hole is solved to obtain its localized wave function, $\Psi_h(\vec{r})$.

In the next step, the charge density of the hole is computed to solve the corresponding Poisson equation for the hole-generated electrostatic potential. This new potential is then fed back into the electron's Schrödinger equation, updating its potential energy landscape.

This coupled Schrödinger-Poisson iterative loop is continuously repeated, recalculating the wave functions and potentials at each step, until the energy eigenvalues of both the electron and the hole converge within a strictly predefined numerical tolerance. Once self-consistency is achieved, the total ground-state energy of the exciton is calculated by summing the converged kinetic and potential energies of the interacting charge carriers.

In the final step, once self-consistency is achieved, the total ground-state energy of the exciton E_{ex} is calculated. It is important to note that the converged single-particle eigenvalues for the electron E_e and the hole E_h both inherently include the Coulomb interaction energy. Therefore, a direct summation of these eigenvalues would result in double-counting the electron-hole electrostatic attraction. To obtain

the correct total energy of the excitonic state, this interaction energy must be subtracted:

$$E_{exc} = E_e + E_h - E_C, \quad (4)$$

where E_C is the Coulomb interaction energy of the electron-hole pair. In the framework of our computational model, this term is calculated by integrating the hole probability density over the effective Coulomb potential landscape generated by the electron:

$$E_C = \int_V V_{eh}(\vec{r}) |\Psi_h(\vec{r})|^2 d\vec{r}. \quad (5)$$

Therefore, the exciton energy has been calculated.

III. ANALYSIS OF THE OBTAINED RESULTS

The proposed geometric models of tetrapods, evaluated numerically using the FEM in FEniCS, were applied to calculate the energy states of a CdSe tetrapod quantum dot embedded in an organic matrix. For the QD, the effective masses are $m_e = 0.11m_0$ and $m_h = 0.44m_0$ [10,13], the dielectric permittivity is $\epsilon = 9.6$, and the band gap is $E_g = 1.74$ eV [10]. In the surrounding organic matrix, the carrier masses are assumed to be $m_e = m_h = m_0$. The environmental influence at the phase interface is accounted for through a finite-height potential barrier. Due to the marked disparity in ionization energies and electron affinities between the semiconductor and the organic medium, the barrier heights were set to $U_e = 4$ eV for electrons and $U_h = 2$ eV for holes.

Initially, we considered the first geometric configuration, where the tetrapod is modeled as a system of intersecting spheres. A similar geometric model was previously proposed in [13], where the electron, hole, and exciton energy spectra were calculated using the plane wave expansion method. However, a primary limitation of that earlier approach was the dimensional constraint applied to the arm radii to prevent their spatial intersection. Specifically, to avoid the overlapping of the peripheral spherical arms, the geometric parameters were mathematically restricted to the condition $a_{arm} \leq 0.816 a_{core}$. In this

work we do not use this condition. To validate our current computational framework, we calculated the single-particle states within this restricted, non-intersecting regime. The results of our numerical modeling, obtained using the FEM in FEniCS in this work, perfectly coincide with the data derived from the plane wave method in [13]. The corresponding comparative analysis of the energy spectra is illustrated in the Fig. 2 below.

In the presented Fig 2, the vertical solid line indicates the critical arm radius that separates two distinct geometric regimes. To the left of this line, the arm spheres do not intersect with one another, corresponding to the strict geometric constraint established in our previous work [13]. Within this region, the energy spectra calculated using both the FEM and the plane wave expansion method from [13] are shown to be in perfect agreement. To the right of the vertical line, the arms begin to spatially intersect. Because the plane wave approach in [13] was limited to the non-intersecting configuration, the energy states in this overlapping regime are computed exclusively using the FEM developed in the present study.

A completely analogous comparative analysis was performed for the hole energy states. The results similarly demonstrated excellent agreement between the two numerical techniques

in the non-intersecting regime, although the corresponding graphical representation is omitted here for brevity.

Having successfully validated our FEM approach and confirmed its consistency with the plane wave method for the five-sphere model (Geometry A), we can confidently extend our numerical framework to investigate the alternative morphological configuration. Consequently, the validated FEM is subsequently applied to calculate the both electron and exciton states in the conical-arm tetrapod model (Geometry B) and cylindrical-arm model (Geometry C).

Fig. 3 presents the non-monotonic dependence of the electron ground-state energy on the height of the conical arms H . The overall difference between the curves is governed by the quantum confinement effect: a smaller core radius a_{core} confines the electron wave function more strongly, which naturally shifts the entire energy spectrum upwards. The non-monotonicity itself is determined by the competition between the core and the arms. If the cone base radius is comparable to the core, a transitional geometry forms at small H , hindering the electron's penetration into the arms, so the energy initially increases, as the electron density spreads into the arms (see inset 3, Fig. 3). Only when the cones elongate

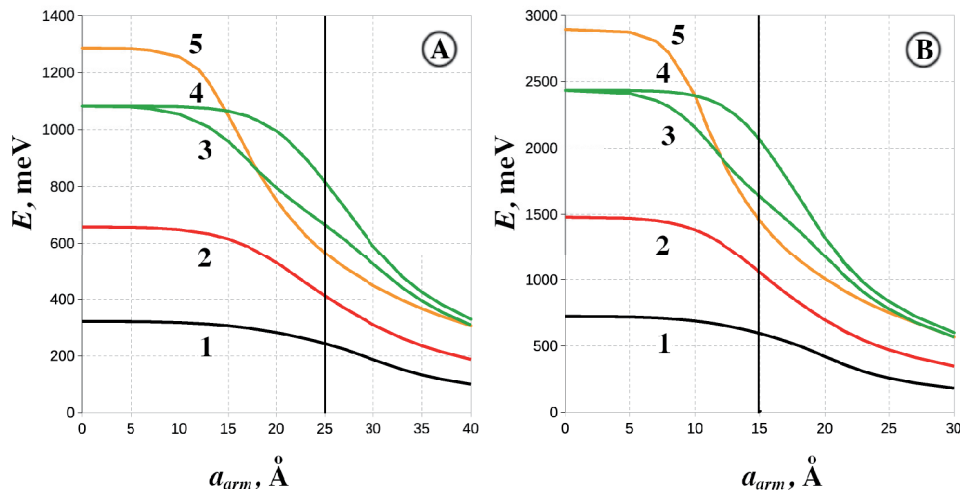


Figure 2. Electron energy spectra in the tetrapod QD as a function of tetrapod arm radius with fixed core radius. A – core radius $a_{core} = 30$ Å, B – core radius $a_{core} = 20$ Å. Black curve (1) corresponds to the ground 1s-state; red curve (2) corresponds to the first 1p-state; green curves (3,4) represent the split components of the first 1d-states; orange curve (5) is the first excited 2s-state.

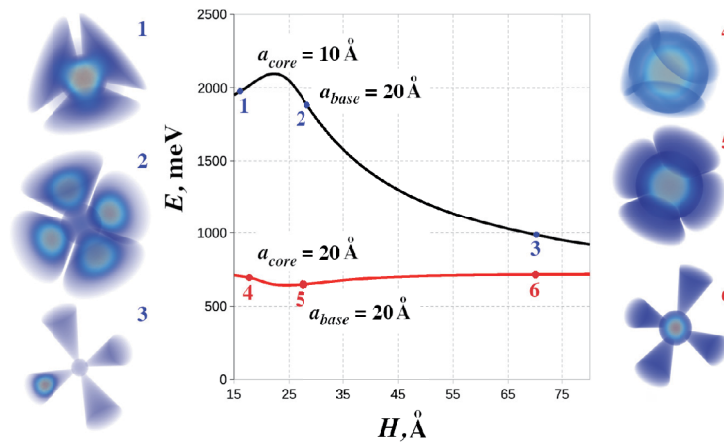


Figure 3. Electron ground-state energy in the conical-arm tetrapod QD as a function of the arm height H for different core sizes. The arm base radius is fixed at $a_{base} = 20$ Å. The left and right insets visualize the 3D spatial distribution of the electron probability density for the specific geometric configurations marked by numbers 1, 2, 3, 4, 5, and 6 on the energy curves.

sufficiently, increasing the available volume, does the energy begin to decrease. In contrast, if a larger core dominates over a narrow cone base, the electron density is always concentrated in the center. As long as the cone grows within the sphere, the confinement is slightly relaxed, and the energy locally drops. However, once the arms protrude outward, the aperture of their intersection with the core constantly narrows. This creates an effective geometric barrier that strictly locks the electron within the core (visualized in insets 1 and 2 Fig. 3), leading to a rapid increase in energy.

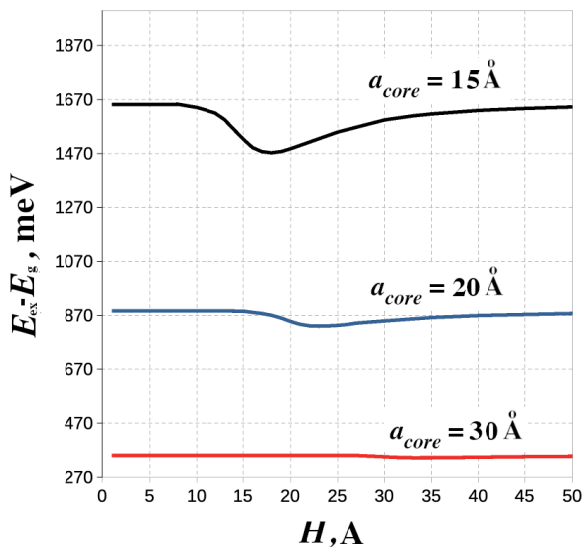


Figure 4. Exciton ground-state energy in the conical-arm tetrapod QD as a function of the arm height H for different core sizes. The arm base radius is fixed at $a_{base} = 15$ Å.

The revealed localization patterns of the individual charge carriers directly determine the behavior of the exciton energy. Since the total ground-state energy of the exciton comprises the single-particle energies of the electron and the hole minus their mutual Coulomb attraction, the non-monotonic behavior of the carriers (governed by the competition between the core and arm volumes) leads to a similar dependence of the exciton energy on the height H . Furthermore, the analysis demonstrates that at sufficiently large values of H , the exciton energy practically ceases to depend on the cone height (the length of the arms). Instead, it is predominantly determined by the core radius and the arm thickness (the base radius). This theoretical finding is in excellent agreement with experimental observations [7, 8], which confirmed that the fundamental exciton transition energy in tetrapod-shaped nanocrystals is dictated by the arm thickness rather than their overall length.

A more realistic morphological representation for synthesized colloidal nanocrystals is provided by a tetrapod model consisting of four cylindrical arms (Geometry C). We performed numerical simulations of the energy states using cylindrical parameters that correspond to the experimental data reported in Refs. [7, 8]. To facilitate a direct comparison with the optical spectroscopy measurements, the calculated ground-state exciton energies were converted into the

corresponding wavelengths λ_{ex} . These theoretical results, alongside the experimental values for the investigated samples, are summarized in Table 1.

Table 1

Ground-state exciton energy of tetrapod QD

Sample	λ_{ex} , nm (theory)	λ_{ex} , nm (experiment [7-8])
Long-arm tetrapod CdSe ($L = 80 \text{ \AA}$, $a_{core} = 25 \text{ \AA}$)	535.56	535.00
Short-arm tetrapod CdSe ($L = 45 \text{ \AA}$, $a_{core} = 25 \text{ \AA}$)	615.59	552.00

For the long-arm sample, the theoretical and experimental results agree within 0.1%, confirming the adequacy of the proposed cylindrical model. In contrast, for the short-arm tetrapod, the discrepancy is 11.5%. This difference is due to the extreme sensitivity of the exciton energy to the arm thickness, coupled with significant experimental measurement uncertainty ($\pm 0.5 \text{ nm}$ tolerance for the width [7, 8]). Furthermore, in small nanocrystals, the wave function is highly sensitive to surface states and deviations from an ideal cylindrical shape at the core-arm junction, which makes the actual spatial confinement somewhat weaker than assumed in the strict theoretical model.

A comparison of three different nanostructures with the same total volume (a cylindrical-short-arm tetrapod, a spherical-arm tetrapod with $a_{core} = 32 \text{ \AA}$, $a_{arm} = 23.5 \text{ \AA}$, and a simple spherical QD $R = 40.5 \text{ \AA}$) clearly demonstrates the decisive influence of geometric shape on the quantum confinement effect. Despite the identical amount of semiconductor material, the branched spatial morphology of both tetrapod models creates significantly stronger conditions for charge carrier localization compared to an ideal sphere. Consequently, the simple spherical structure is characterized by the weakest spatial confinement and the longest exciton transition wavelength 649.92 nm , whereas the complex tetrapod-like geometries induce an increase in energy and a corresponding blue shift in the spectrum (specifically, to 623.15 nm for the spherical-arm model).

IV. CONCLUSIONS

In this work, we theoretically investigated the energy spectra of charge carriers and excitons in tetrapod-shaped QDs using the FEM. We proposed and compared three realistic geometric configurations: intersecting spheres, conical arms, and cylindrical arms, which accurately reflect the morphology of synthesized nanocrystals. The numerical calculations confirmed that the geometric shape and the degree of spatial overlap at the core-arm interface determine the quantum confinement regime.

Our analysis revealed a non-monotonic dependence of the electron and exciton ground-state energies on the height of the tetrapod arms. This complex behavior is driven by the physical competition between the carrier localization in the central core and their penetration into the expanding arm volumes. Specifically, the narrowing of the intersection aperture during growth can create an effective geometric barrier that strongly locks the charge carriers within the core.

Furthermore, we demonstrated that the fundamental exciton transition energy is predominantly determined by the core radius and arm thickness, rather than the overall arm length. The results obtained for the cylindrical-arm model showed excellent quantitative agreement with experimental optical spectroscopy data for long-arm CdSe tetrapod. For short-arm nanocrystals, the observed theoretical discrepancies highlight the extreme sensitivity of the energy spectrum to surface states and structural imperfections at the nanoscale.

REFERENCES

- [1]. Cherni A., Zeiri N., Hayrapetyan D. B., Ed-Dahmouny A., El Sayed M. E., Samir A., Duque C. A. Machine learning models for predicting the hydrogenic impurity nonlinear optical rectification in GaAs/AlGaAs Tetrapod core/shell quantum dots under the effect of temperature. *Materials Today Physics*. 2025. Vol. 58. P. 101833. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2025.101833>.

- [2]. Zeiri N., Ed-Dahmouny A., Hayrapetyan D. B., Başer P., Sali A., El Sayed M. E., Samir A., Duque C. A. Machine learning-based prediction of nonlinear optical rectification in GaAs/AlGaAs tetrapod core/shell quantum dots under pressure and central hydrogenic impurity effects. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2025. Vol. 200. P. 110010. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.110010>.
- [3]. Raja S. N., Olson A. C. K., Thorkelsson K., Luong A. J., Hsueh L., Chang G., Gludovatz B., Lin L., Xu T., Ritchie R. O., Alivisatos A. P. Tetrapod Nanocrystals as Fluorescent Stress Probes of Electrospun Nanocomposites. *Nano Letters*. 2013. Vol. 13, no. 8. P. 3915–3922. <https://doi.org/10.1021/nl401999t>.
- [4]. Choi C. L., Koski K. J., Olson A. C., Alivisatos A. P. Luminescent nanocrystal stress gauge. *Applied Physical Sciences*. 2010. Vol. 107, no. 50. P. 21306–21310. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016022107>.
- [5]. Raja S. N., Ye X., Jones M. R. et al. Microscopic mechanisms of deformation transfer in high dynamic range branched nanoparticle deformation sensors. *Nature Communication*. 2018. Vol. 9. P. 1155:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03396-5>.
- [6]. Manna L., Milliron D., Meisel A. et al. Controlled growth of tetrapod-branched inorganic nanocrystals. *Nature Mater*. 2003. Vol. 2. P. 382–385. <https://doi.org/10.1038/nmat902>.
- [7]. Smirnov A. M., Golinskaya A. D., Kotin P. A., Dorofeev S. G., Palyulin V. V., Mantsevich V. N., Dneprovskii V. S. Photoluminescence and nonlinear transmission of Cu-doped CdSe quantum dots. *Journal of Luminescence*. 2019. Vol. 213. P. 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.05.001>.
- [8]. Smirnov A. M., Golinskaya A. D., Kotin P. A., Dorofeev S. G., Zharkova E. V., Palyulin V. V., Mantsevich V. N., Dneprovskii V. S. Damping of Cu-Associated Photoluminescence and Formation of Induced Absorption in Heavily Cu-Doped CdSe Quantum Dots. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2019. Vol. 123, no. 45. P. 27986–27992. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b09918>.
- [9]. Sakoda K., Yao Y., Kuroda T., Dirin D. N., Vasiliev R. B. Exciton states of CdTe tetrapod-shaped nanocrystals. *Optical Materials Express*. 2011. Vol. 1, no. 3. P. 379–390. <https://doi.org/10.1364/OME.1.000379>.
- [10]. Yao Y., Kuroda T., Dirin D. N., Irkhina A. A., Vasiliev R. B., Sakoda K. Exciton states of II-VI tetrapod-shaped nanocrystals. *Optical Materials Express*. 2013. Vol. 3, no. 7. P. 977–987. <https://doi.org/10.1364/OME.3.000977>.
- [11]. Yao Y., Kuroda T., Dirin D. N., Sokolikova M. S., Vasiliev R. B. Strain effects on optical properties of tetrapod-shaped CdTe/CdS core-shell nanocrystals. *Superlattices and Microstructures*. 2014. Vol. 76. P. 244–252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spmi.2014.10.017>.
- [12]. Ed-Dahmouny A., Althib H. M., Alkhalidi A., El Kharrim A., Jaouane M., Arraoui R., Fakkahi A., Zeiri N., Sali A., Duque C. A. Photoionization Cross-Section in Tetrapod Quantum Dots: Impact of Pressure, Temperature, and Polarization Direction. *Adv. Theory Simul*. 2025. Vol. 8, no. 12. P. e01286. <https://doi.org/10.1002/adts.202501286>.
- [13]. Leshko R. Ya., Leshko O. V., Bilynskyi I. V., Melnyk Ya. Yu., Ocheretyanyi A. O., Chekin O. I., Kvyk M. V. Energy spectrum of electrons, holes, and excitons in tetrapod-like quantum dots. *Physics Letters A*. 2026. Vol. 587. P. 131726. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2026.131726>.

Стаття надійшла до редакції: 13.05.2026
прийнята до друку: 01.06.2026
опублікована: 30.06.2026

PACS: 73.21.La, 73.22.-f, 71.35.-y

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.360778>

ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ СПЕКТРИ НОСІЇВ ЗАРЯДУ ТА ЕКСИТОНІВ У ТЕТРАПОДОПОДІБНИХ НАНОСТРУКТУРАХ

I. В. Білінський^{ab}, Р. Я. Лешко^a, О. В. Лешко^a, Я. Ю. Мельник^b, А. В. Тимків^a, П. П. Хомин^a

^a Кафедра фізики та інформаційних систем,
Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
вул. Стрийська 3, Дрогобич, 82100, Україна

^b Кафедра фізики, Криворізький державний педагогічний університет,
вул. Університетська 54, Кривий Ріг, 50086, Україна
e-mail: iv.bilynskyi@gmail.com; leshkoroman@gmail.com; leshkoolya9@gmail.com;
melnikeyaroslav.qa@gmail.com; andrii.tymkiv@dspu.edu.ua; pavlo.homyn@dspu.edu.ua

Анотація. У цій роботі представлено теоретичне дослідження енергетичних спектрів електронів, дірок та екситонів у тетраподоподібних напівпровідникових квантових острівцях. Для забезпечення адекватного фізичного опису складної тривимірної морфології нанокристалів запропоновано та систематично порівняно три реалістичні макроскопічні геометричні моделі. Розрахунки виконано в наближенні ефективної маси з використанням моделі скінченного 3D потенціального бар'єра. Чисельне розв'язання стаціонарного рівняння Шредінгера для одночастинкових електронних та діркових станів, а також розрахунок повної енергії екситона, здійснено за допомогою методу скінчених елементів. Встановлено, що просторове перекриття на геометричному стику ядро-рукав визначає режим сильного просторового квантового обмеження. Аналіз результатів виявляє складну немонотонну залежність енергій основного стану електрона та екситона від висоти рукавів тетрапода. Така поведінка зумовлена сильною фізичною конкуренцією між локалізацією носіїв заряду всередині центрального ядра та їхнім проникненням у доступний об'єм епітаксціальних рукавів. Продемонстровано, що коли домінує об'єм ядра, геометричне звуження на стику створює ефективний потенціальний бар'єр, який жорстко замикає хвильову функцію носіїв у центрі наноструктури, що неминуче призводить до зростання енергії. Натомість переконливо показано, що енергія основного екситонного переходу практично не залежить від загальної довжини рукавів і визначається переважно радіусом ядра та товщиною рукавів. Теоретичні результати, отримані з використанням циліндричної моделі, демонструють відмінний кількісний збіг з даними оптичної спектроскопії синтезованих довгорукавних квантових острівців CdSe. Розбіжність, що спостерігається для короткорукавних зразків, підкреслює чутливість енергетичного спектра до поверхневих станів та структурних недосконалостей на нанорівні.

Ключові слова: тетраподоподібний квантовий острівець; екситон; електронний і дірковий спектр

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

PACS 42.79.Pw, 29.40.-n

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.359587>

РОЗРОБКА МОДУЛЯ УФ-ФОТОСЕНСОРА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ ZnO/Si З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЕРА ARDUINO

I. B. Падалка, <https://orcid.org/0009-0007-4071-5878>

I. C. Biptm, <https://orcid.org/0000-0001-7200-6055>

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
факультет фізики, математики, економіки та інноваційних технологій
вул. Івана Франка, 24, м. Дрогобич, 82100, Україна
e-mail: ivan.padalka@dspu.edu.ua; isvirt@dspu.edu.ua

Анотація. Розроблено універсальний фотоприймаючий пристрій на базі Arduino Nano (мікроконтролер ATmega328P), оптимізований для детекції УФ-випромінювання. Ключовим елементом системи є фотодетектор на основі гетероструктури ZnO/Si з максимумом фотовідгуку на довжині хвилі 367 нм. Інтерфейсом пристрою є інтегрований перетворювач USB–UART, який дозволяє програмувати модуль та передавати дані на ПК без зовнішніх програматорів через Arduino IDE. Технічна схема забезпечує достатню частоту дискретизації, що уможливило точну реєстрацію часових послідовностей УФ-сигналу. Конструкція містить світлодіодну індикацію робочого стану пристрою. Крім того, передбачено стандартизовані інтерфейси для синхронізації та обміну даними із зовнішніми модулями й периферійними пристроями. Завдяки масштабованості та точності синхронізації пристрій є ефективним інструментом для прототипування і лабораторних досліджень фотодетекторів, а також їх застосування для реєстрації випромінювання, зокрема в ультрафіолетовому діапазоні.

Ключові слова: портативний вимірювальний пристрій, УФ-сенсорний модуль, гетероструктура оксид цинку/кремній, мікроконтролер Arduino

Вступ

Сенсорні пристрої, передусім детектори випромінювання різного типу, є критично важливими елементами у промисловій автоматизації. Ефективність таких систем безпосередньо залежить від обґрунтованого вибору

параметрів датчика згідно зі специфікою конкретного завдання [1]. Розгортання інтелектуальних мереж *Smart Grid* (SG) та мікромереж *Smart Microgrid* (SMG) вимагає забезпечення взаємосумісності сенсорів та електронного обладнання, а також оптимізації режимів їх-

ньої роботи. Традиційно для моніторингу таких систем застосовують надійне промислове устаткування, зокрема програмовані логічні контролери – *Programmable Logic Controller* (PLC) у зв'язці зі системами диспетчерського контролю та збору даних – *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA). Сучасною тенденцією є інтеграція рішень із відкритим вихідним кодом, як-от платформи Arduino. Попри свою економічність та функціональність у зборі даних, Arduino потребує створення спеціалізованих фреймворків для повноцінної синхронізації з промисловими стандартами автоматизації. У роботі [2, 3] запропоновані методології безшовної інтеграції контролерів PLC та платформ Arduino в єдину систему SCADA. Ця взаємодія реалізується завдяки протоколам сімейства програмних технологій – *Open Platform Communications* (OPC), що забезпечують необхідні комунікаційні можливості. При цьому пристрої з відкритим програмним кодом використовуються переважно як інтелектуальні вузли для збору даних із датчиків.

Зокрема, існують рішення для безшовної інтеграції апаратних платформ Arduino та відповідного ПЗ (Arduino OPC – сервер) з промисловими системами (PLC та SCADA) через відкриті протоколи OPC. У таких архітектурах мікроконтролери відповідають за збір даних, тоді як інтелектуальні мікромережі (SMG) слугують еталоном для апробації цих рішень у реальних умовах через Ethernet-мережу. Робота з такими сенсорами потребує високої часової точності керуючих імпульсів та швидкої дискретизації сигналів. У поєднанні зі спеціалізованою фронтальною електронікою ці пристрої становлять економічно ефективну альтернативу для маломасштабних приладів та систем повільного керування. Інтеграція плат реєстрації даних розширює можливості системи до збору та аналізу сигналів на середніх швидкостях [4]. Попри високу цінність для експериментальних установок, у складних проектах із підвищеними вимогами до продуктивності платформу Arduino доцільно замінювати професійними мікроконтролерами з розширеним функціоналом. Основною концепцією таких

проектів є інтеграція сенсорних пристроїв із вбудованими системами. Така архітектура забезпечує злагоджену роботу всіх електронних компонентів для формування відповідного керуючого сигналу [5, 6].

Платформа Arduino також є ключовим апаратним засобом для створення доступних медичних біосенсорів та портативних діагностичних пристроїв – *Point-of-Care* (PoC) і систем. Використання мікроконтролерів Atmel у поєднанні з методами машинного навчання дозволяє значно підвищити точність і функціональність використовуваних прототипів [7]. Згідно з [8, 9], інтеграція Arduino в біомедичні пристрої забезпечує прецизійне керування фізичними параметрами (температура, тиск) та ефективну реєстрацію даних. У майбутньому адаптивність Arduino позиціонує його як ключовий фактор розвитку біосенсоріки.

Авторами [10] розроблено активний пристрій для виявлення радону в повітрі. Монітор працює в режимі підрахунку імпульсів для безперервних вимірювань у реальному часі. Пристрій, що використовується як датчик, це планарний фотодіод SLCD-61N5 Si-PIN, чутливий до альфа-частинок. Як система збору даних використано мікроконтролер Arduino Uno. За належного налаштування, плати Arduino здатні обробляти дані з 1D- та 2D-оптичних датчиків. Завдяки простоті, універсальності та розгалуженій екосистемі бібліотек, Arduino стала стандартом як у лабораторіях, так і в промисловості. Окрему увагу приділено розробці електрооптичних УФ-детекторів та впровадженню додаткових функцій, як-от передача даних через Bluetooth.

Універсальність та надійність плат Arduino добре відомі, а можливість знайти значну кількість датчиків на ринку за низькою ціною, а також отримати в Інтернеті коди для їх інтерфейсу, робить їх пристроями, які широко можна використовувати. Комбінація Arduino/фотосенсор може бути дійсним пристроєм для вимірювань, що використовують випромінювання, таким як спектрометр або зчитувач штрихкодів, або навіть для систем візуалізації [11].

Відмінною особливістю комбінації Arduino/фотосенсор є акцент на доступності, цінній доступності та інтелектуальному дистанційному управлінні. Конструкція інтегрує механізм дистанційного перемикачання на базі систем комунікації – *Global System for Mobile Communications* (GSM), керований за допомогою мікроконтролера Arduino Uno, що дозволяє здійснювати моніторинг у режимі реального часу та підвищувати зручність використання. Є можливість інтелектуального дистанційного керування з інтеграцією механізму.

Фотоелектричні (PV) системи генерують змінну вихідну потужність фотоелектричних систем з використанням PI-коректора що поєднує пропорційний (P) та інтегральний (I) закони керування для покращення точності та стійкості систем [12, 13]. На даний час актуальні питання моделювання, проектування та впровадження стратегії пристроїв для фотоелектричних систем, що працюють в однорідних умовах реального часу з використанням PI-контролера. Точка максимальної потужності вимірюваної панелі отримується за допомогою математичного розрахунку, який виконується прошивкою центрального процесора – *Central Processing Unit* (CPU) Arduino [14]. Система керує сигналами напруги та струму осьового сонячного трекера з використанням Arduino як основного компонента модуля керування. Доведено [15], що двовісні фотовольтаїчні трекери з використанням Arduino є кращими порівняно з фіксованими похилими панелями, оскільки система сонячного відстеження може ефективно захоплювати випромінювальну енергію. Зокрема підхід спрямований на вимірювання кольору панелі для моніторингу її роботи на основі компонентів TCS3200 та Arduino Uno представлений у дослідженнях [16].

За допомогою плати Arduino було успішно реалізовано фотовольтаїчні системи наприклад трекери, який автоматично відстежують сонячне випромінювання запрограмовані за допомогою мікроконтролера. Розроблені системи сонячного відстеження, які використовують світлозалежні резистори – *Light Dependent Resistors* (LDR) для виявлення сонячного світ-

ла і у яких Arduino Uno служить основою для схеми керування відстеженням випромінювання [17, 18]. Плати Arduino є недорогим та простим у впровадженні інструментом для відстеження сонячної енергії. Як варіант, наприклад смартфон може показати, як пов'язані між собою інтенсивність та кут проходження сонця. Інші методи включають електронне керування кутом за допомогою крокових двигунів. Існують методи використання датчиків та плат Arduino для збору даних про кут та потужність вхідних сигналів [19, 20]. Запропоновані системи є недорогими та компактними – порівняно з іншими системами [21]. Наприклад у розробленій системі [22] дані з реєстратора в режимі реального часу отримуються на пристрій Android.

Інтеграція мікроконтролера Arduino з фотодетекторами – фоторезисторами, або фотодіодами – забезпечує перетворення простого давача на компонент інтелектуальної вимірювальної системи. Це уможливило не лише реєстрацію випромінювання, а й його аналіз у реальному часі та керування суміжними пристроями. На відміну від простої порогової реакції на світловий потік, програмоване середовище Arduino дозволяє реалізовувати складні алгоритми керування залежно від зовнішніх умов. Вбудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера перетворює зміну напруги на виході фотодетектора у дискретні цифрові значення в діапазоні від 0 до 1023, що забезпечує точне вимірювання сигналу випромінювання. Модульна архітектура платформи дозволяє з'єднувати компоненти без застосування паяння, що суттєво скорочує час розробки та налагодження пристроїв. Кросплатформеність середовища розробки Arduino IDE – сумісність з операційними системами Windows, macOS та Linux – забезпечує гнучкість у розробці програмного забезпечення для обробки сигналів фотодетекторів.

Подальший розвиток модульних компонентів та доступних сенсорних технологій сприятиме інтеграції Arduino в сучасні системи біосенсорики. Це відкриває нові перспективи для інновацій у сферах моніторингу довкіл-

ля, промислової автоматизації та діагностики in vitro (PoC). Завдяки своїй універсальності, економічній доцільності та низькому порогу входження, Arduino зберігає статус провідної платформи з відкритим кодом для розробки біосенсорних рішень.

Метою даних досліджень було створення фотомодульного детектора для реєстрації випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні на основі фоточутливої гетероструктури ZnO/Si з можливістю передачі даних на базі програтатора Arduino.

1. Проектування та схема пристрою.

Основним елементом фотомодуля є фоточутлива в ультрафіолетовому діапазоні гетероструктура n-ZnO/p-Si. Гетероструктура виготовлена методом імпульсного лазерного напilenня – *Pulsed Laser Deposition* (PLD) плівки оксиду цинку на кремнієву підкладку. Для розпилення мішені з оксиду цинку використовували імпульсний твердотільний *YAG:Nd*-лазер. Тривалість імпульсу технологічного лазера становила 20 нс, частота 1 Гц, а густина потужності 100 МВт/см². Температура кремнієвої підкладки, під час технологічного

процесу нарощування плівки оксиду цинку у вакуумі, підтримувалась біля 300 °С. Було отримано плівку ZnO товщиною ~ 200÷300 нм. Як струмоведачі контакти використано срібні електроди. Фотоелектричні та електрофізичні характеристики гетероструктури ZnO/ Si описані в роботі [23].

У схемі УФ підсилювача як центральний керуючий елемент використовується мікроконтролерна плата Arduino Nano, побудована на мікроконтролері ATmega328P. Плата обробляє сигнали, керує периферійними пристроями та забезпечує обмін даними із зовнішніми модулями. Живлення схеми здійснюється напругою 5 В, яка може подаватися через USB-інтерфейс або на відповідний вивід плати. Працюючи від 5В використовується стабілізатор живлення, який зменшує напругу до 3.3В. Для стабільної роботи мікроконтролера використовується вбудований кварцовий резонатор з частотою 16 МГц підключеним до виводів XTAL1 та XTAL2 (рис. 1). Така конфігурація забезпечує точну синхронізацію роботи ядра мікроконтролера та його периферійних модулів.

Arduino Nano має 14 цифрових входів/виходів, з яких 6 підтримують широтно-імпуль-

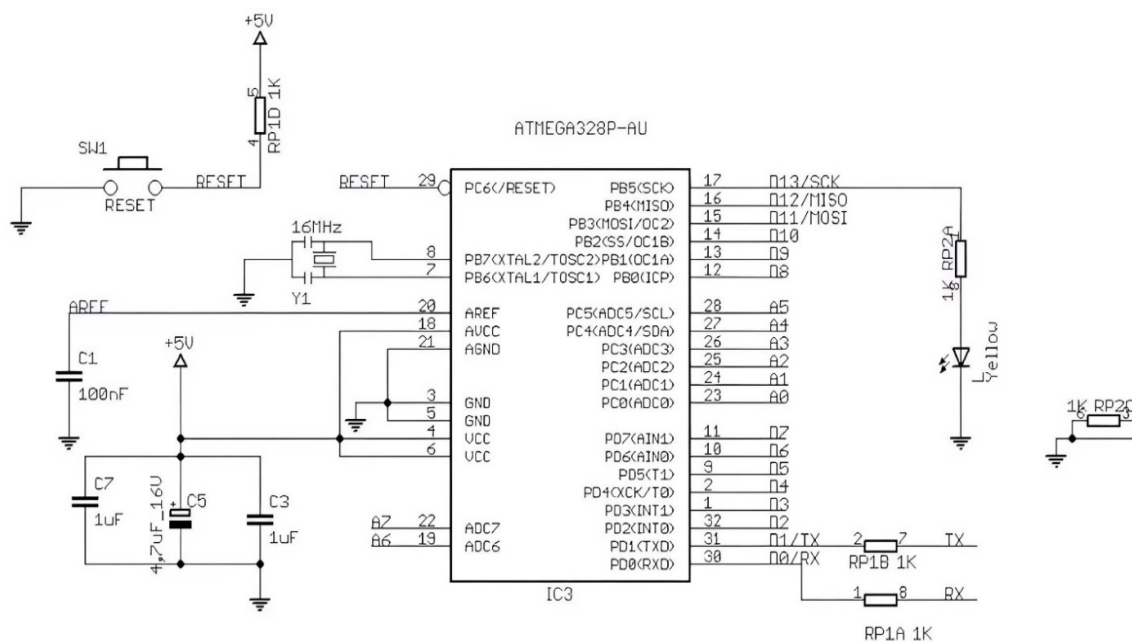


Рис. 1. Принципова електрична схема контролера Atmega328p.

сну модуляцію (PWM), а також 8 аналогових входів з розрядністю АЦП 10 біт. Аналогові входи застосовуються для зчитування сигналів з датчиків, тоді як цифрові виводи використовуються для керування виконавчими елементами або обміну даними. Обмін інформацією з периферійними пристроями реалізовано за стандартними інтерфейсами:

- UART — для серійного зв'язку;
- I²C — для підключення цифрових датчиків та модулів;
- SPI — для високошвидкісного обміну даними.

Програмування мікроконтролера здійснюється через USB-інтерфейс за допомогою середовища Arduino IDE. Програмне забезпечення відповідає за ініціалізацію портів, зчитування та обробку вхідних сигналів, а також формування керуючих впливів відповідно до заданого алгоритму.

Для зменшення пульсацій та забезпечення стабільної роботи цифрової й аналогової частин використано систему фільтрувальних та розв'язувальних конденсаторів. Конденсатори малої ємності (100 нФ) застосовані для придушення високочастотних завад, тоді як електrolітичні та танталові конденсатори більшої ємності забезпечують згладжування низькочастотних коливань напруги. Аналогова земля AGND з'єднана із загальною землею схеми. Лінія скидання RESET реалізована за допомогою підтягувального резистора до напруги живлення та вимикача, яка при натисканні замикає лінію на землю. Це дозволяє виконувати апаратний перезапуск мікроконтролера під час налагодження або експлуатації. Додатково стабільність сигналу RESET забезпечується відповідною схемою підтягування.

Для індикації стану використано світлодіод, підключений до одного з цифрових виводів мікроконтролера через обмежувальний резистор. Це дозволяє реалізувати візуальну індикацію режимів роботи або тестових сигналів програмного забезпечення.

Схема також передбачає використання інтерфейсу UART, виводи RX та TX якого підключені через послідовні резистори. Це

забезпечує обмін даними з зовнішніми пристроями або комп'ютером для програмування та моніторингу роботи системи. Крім того, доступні цифрові та аналогові виводи мікроконтролера можуть використовуватися для підключення датчиків, виконавчих елементів і модулів зв'язку.

2. Архітектура фотодетекторного модуля

Ключовим компонентом каскаду фотодетекторного модуля виступає мікросхема FT232RL, яка здійснює конвертацію сигналів USB в асинхронний послідовний інтерфейс UART. Наведена схема (рис. 2) реалізує інтерфейс USB–UART, який використовується в Arduino Nano для програмування мікроконтролера та обміну даними з персональним комп'ютером.

Підключення до комп'ютера здійснюється через роз'єм USB (J3), лінії D+ та D– якого з'єднані з відповідними виводами мікросхеми FT232RL. Дана мікросхема має вбудований стабілізатор напруги, який формує рівень 3.3 В з 5.0 В для внутрішніх потреб і може використовуватися для допоміжних кіл. Виводи землі мікросхеми об'єднані та з'єднані з загальною землею плати.

Послідовний обмін даними між USB-інтерфейсом і мікроконтролером здійснюється через виводи TXD та RXD FT232RL, які підключені до відповідних ліній UART мікроконтролера Arduino. Лінія DTR через розділовий конденсатор підключена до входу RESET мікроконтролера, що забезпечує автоматичний перезапуск під час завантаження програми з середовища Arduino IDE.

Для індикації процесу передавання та приймання даних використано світлодіоди, підключені до конфігурованих виводів FT232RL через струмообмежувальні резистори. Світлодіод TX індикує передавання даних від комп'ютера до мікроконтролера, а світлодіод RX — приймання даних у зворотному напрямку.

Завдяки цій схемі Arduino повністю інтегрується з USB-інтерфейсом комп'ютера. Це дозволяє прошивати мікроконтролер, викону-



Пристрій ATmega328P має три типи пам'яті. Flash-пам'ять обсягом 32 КБ використовується для зберігання скетчу, приблизно 2 КБ з них зайняті бутлоадером, тож для програми доступно близько 30 КБ. SRAM становить 2 КБ — у ній зберігаються змінні під час роботи програми, і саме її нестача найчастіше спричиняє нестабільну роботу. EEPROM має 1

Зліва на платі (рис. 3) розташовані цифрові піни від D0 до D12. Піни D0 і D1 підписані як RX і TX — це апаратний UART для серійного зв'язку. D2 і D3 підтримують зовнішні переривання (INT0 та INT1), при цьому D3 також має апаратний PWM. Піни D3, D5, D6, D9, D10 та D11 підтримують PWM і мо-



жуть використовуватись для керування яскравістю світлодіодів або швидкістю двигунів. D10, D11, D12 і D13 задіяні в SPI-інтерфейсі: D10 — SS, D11 — MOSI, D12 — MISO, D13 — SCK. На D13 також підключений вбудований світлодіод плати.

3. Результати моделювання сигналів фотодетектора на платформі Arduino

Зовнішній вигляд друкованої плати Arduino Nano (рис. 4) дозволяє ідентифікувати елементну базу та простежити трасування провідників. Модуль реалізовано на двошаровому склотекстоліті FR-4 з металізованими наскрізними отворами для штирових роз'ємів, що забезпечує його безпосереднє встановлення на макетні плати або з'єднання з іншими модулями. На зворотній стороні плати локалізовано мікросхему USB-UART перетворювача у корпусі SOIC-16, що забезпечує інтерфейс зв'язку між USB та апаратним UART мікроконтролера. Поруч розташовано стабілізатор напруги в корпусі SOT-223 або SOT-89, який формує стабілізовану лінію 5 В при живленні від входу VIN або USB. Біля стабілізатора та мікроконтролера встановлено керамічні конденсатори малої ємності, що виконують функцію локального розв'язування живлення та фільтрації високочастотних завад. Трасування силових шин виконано провідниками збільшеної ширини, тоді як сигнальні лінії мають тонші доріжки з мінімізацією перехрещень між шарами. В кінці документу наведено універсальний код програми, який можна запустити на всіх мікроконтролерах сімейства Arduino, зокрема і на представлений Nano [24].

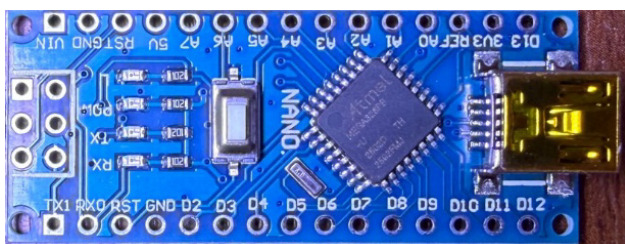


Рис. 4. Розташування елементів та трасування провідників Arduino Nano (двошаровий склотекстоліт FR-4).

На зображенні (рис. 5) показано експериментальне устаткування, використане для дослідження відгуку фоточутливого елемента на ультрафіолетове випромінювання [25, 26]. Для забезпечення стабільного підключення фоточутливого елемента було виготовлено експериментальний стенд, на якому розміщено гетероструктура та елементи його електричного підключення [27]. Фоточутливий елемент закріплено на ізолюючій підкладці, що дозволяє мінімізувати механічні зміщення та паразитні електричні контакти під час проведення вимірювань. До виводів фоточутливого елемента підключено провідники, через які сигнал передається до вимірювального модуля, що включає аналого-цифровий перетворювач для подальшої обробки отриманих даних.

Освітлення фотомодуля здійснювалося за допомогою портативного ультрафіолетового джерела випромінювання. Джерело випромінювання виконане у вигляді компактного ручного приладу з металевим корпусом, що забезпечує механічну міцність та ефективне відведення тепла від світлодіодного випромінювача. Джерело формує ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі приблизно 380 нм та потужністю в межах 1÷2 Вт, що належить до діапазону ближнього ультрафіолету. Під час експерименту джерело випромінювання розташовувалося безпосередньо над фотодіодом на невеликій відстані, що забезпечувало достатню інтенсивність освітлення та формування стабільного фотоструму у фоточутливому елементі.

На рис. 5 також представлено процес опромінення фотодіода ультрафіолетовим

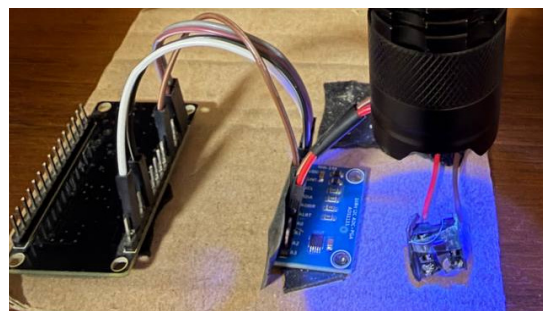


Рис. 5. Опромінення фотомодуля за допомогою УФ джерела.

випромінюванням, у результаті чого на поверхні підкладки спостерігається характерне фіолетово-блакитне світіння, що є наслідком часткового переходу випромінювання у видимий спектр. Таке розташування елементів експериментальної системи дозволяє проводити контрольовані вимірювання електричного сигналу фотодетектора залежно від інтенсивності оптичного випромінювання та забезпечує повторюваність отриманих результатів.

Живлення вимірювальної системи здійснюється від зовнішнього портативного акумулятора (power bank), підключеного до мікроконтролерної плати через USB-кабель. Портативне джерело живлення забезпечує стабільну напругу 5 В та дозволяє виконувати вимірювання незалежно від стаціонарних джерел живлення, що є зручним під час лабораторних експериментів. Центральним елементом системи є мікроконтролерна плата, яка виконує функції керування процесом вимірювання, обробки сигналів та передачі даних до комп'ютера або іншого пристрою для подальшого аналізу [28].

Для оцифрування сигналу з фотодетектора з підвищеною роздільною здатністю до мікроконтролера додатково підключено зовнішній модуль АЦП. Сигнальні провідники від цього модуля виведені до кінцевої частини макета, де сформовано два окремі контакти для підключення досліджуваних зразків. Наявність таких виводів дозволяє легко змінювати фоточутливі елементи або інші експериментальні структури, що досліджуються, без внесення змін у основну частину електронної схеми.

Для підвищення зручності експлуатації та забезпечення більш надійного механічного розміщення електронних компонентів експериментальну макетну схему було перенесено до захисного корпусу. Використання корпусу дозволяє захистити елементи вимірювальної системи від механічних пошкоджень, випадкового короткого замикання та впливу зовнішніх факторів, а також спрощує транспортування та використання пристрою під час проведення експериментальних досліджень.

У конструкції корпусу передбачено спеціальну клему для підключення зовнішнього джерела живлення через роз'єм USB-C, що

забезпечує подачу стабілізованої напруги живлення на мікроконтролерну плату та периферійні модулі. Крім того, на корпусі виконана окрема клемка для встановлення фотодетектора, який забезпечує його безпосередній доступ до досліджуваного оптичного випромінювання та водночас дозволяє фіксувати положення сенсора відносно джерела світла. Для керування роботою пристрою передбачено кнопку ввімкнення, яка забезпечує зручне подання або відключення живлення під час експлуатації.

Для того щоб оцінити як міняється рівень сигналу від кількості зчитувань в секунду було зібрано дані з УФ датчика. Графічна залежність (рис. 6) демонструє часову послідовність виміряного сигналу УФ-фотодетектора, отриманого при частоті дискретизації, коли істинне значення напруги є практично сталим і становить близько 30 мВ. Крива не є гладкою, а має стохастичний характер з випадковими відхиленнями від середнього рівня, що зумовлено сумарною дією власного шуму фотодетектора, теплового шуму резистивних елементів, квантування АЦП та зменшенням часу інтегрування при максимальному режимі вибірок за секунду.

Залежність сигналу УФ детектора від кількості зчитувань (ADS1115)

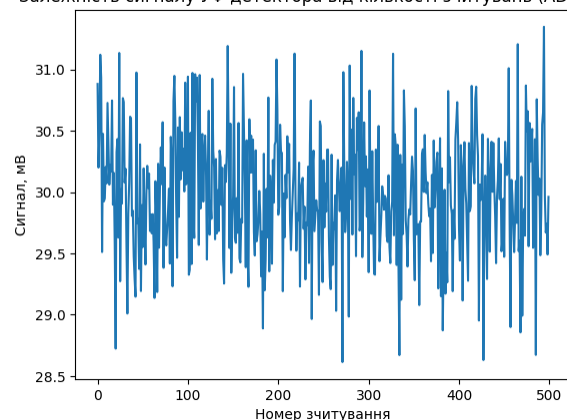


Рис. 6. Отримані експериментальні значення сигналу УФ-модуля.

Для базових плат Arduino Uno (чип ATmega328P) за замовчуванням швидкість квантування становить приблизно 9600 вибірок за секунду (9.6 kSPS). Одне вимірювання за допомогою стандартної функції `analogRead()` триває близько 104–112 мікро-

секунд, що є достатнім для вибраного режиму. Портативні УФ-датчики видають оцифроване значення (наприклад, через I2C/SPI інтерфейси в Arduino-модулях) з частотою 1–20 Гц [29]. Розроблений модуль протестовано на трансмісію сигналу фотовідгуку ультрафіолетового випромінювання з частотою дискретизації 1 Гц. Цей режим підходить для перетворення сигналів ультрафіолетового діапазону, оскільки УФ-фотодетектори зазвичай характеризуються значною інерційністю [30].

Миттєві значення сигналу флюктуують у вузькому інтервалі навколо середнього, утворюючи гаусоподібний розподіл без помітного тренду або дрейфу, що свідчить про відсутність систематичної похибки та стабільність оптичного потоку протягом інтервалу спостереження. Візуально графік являє собою щільну шумоподібну траєкторію, центровану відносно горизонтальної лінії, що відповідає постійній складовій фотоструму, причому збільшення кількості зчитувань призводить не до зміни рівня сигналу, а до статистичного уточнення його середнього значення при подальшому усередненні.

Висновки

На основі гетероструктури ZnO/Si та мікроконтролерної платформи Arduino Nano розроблено вимірювальний модуль, оптимізований для реєстрації ультрафіолетового випромінювання. Отримані під час вимірювань з пристрою сигнали, при реєстрації ультрафіолетового випромінювання, можна передати у вигляді даних до персонального комп'ютера для подальшої обробки та аналізу. Передача інформації може здійснюватися двома способами: через дротове з'єднання за допомогою USB-інтерфейсу або (за наявності додаткових модулів чи інших модифікацій контролера) через бездротові інтерфейси Bluetooth та Wi-Fi. Така організація обміну даними забезпечує гнучкість використання вимірювальної системи та дозволяє інтегрувати її у різні експериментальні та дослідницькі середовища. Застосування Arduino Nano дозволяє реалізувати компактну, енергоефективну та масштабовану систему,

придатну для експериментальних досліджень і прототипування електронних пристроїв. Ефективність детектуючих систем, зокрема при реєстрації випромінювання ультрафіолетового діапазону, безпосередньо залежить від обґрунтованого вибору параметрів датчика згідно зі специфікою конкретного завдання.

Список використаної літератури

- [1]. Y. Chen, H. R. Kim, Y. J. Ahn, J. B. Kim Characteristic curves of the photodiode and phototransistor with Arduino// Physics Education, 58(5), 055018, p. 1–6 (2023). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ace8e8>
- [2]. I. González, A. J. Calderón Integration of open source hardware Arduino platform in automation systems applied to Smart Grids/ Micro-Grids// Sustainable Energy Technologies and Assessments, 36(100557), p. 1–12 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100557>
- [3]. D. Murra, S. Bollanti, P. D. Lazzaro, F. Flora, L. Mezi Interfacing Arduino Boards with Optical Sensor Arrays: Overview and Realization of an Accurate Solar Compass// Sensors, 23(24), 9787, p. 1–23 (2023). <https://doi.org/10.3390/s23249787>
- [4]. M. Köhli, J. Weimar, S. Schmidt, F. P. Schmidt, A. Lambertz, L. Weber, J. Kaminski, U. Schmidt Arduino-Based Readout Electronics for Nuclear and Particle Physics// Sensors, 24(2935), p. 1–18 (2024). <https://doi.org/10.3390/s24092935>
- [5]. V. Venkataramanan, D. Shah, I. Panda, S. Shah, R. Davawala, K. Shah, K. Salot Smart automatic COVID door opening system with contactless temperature sensing//e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 6(100284), p. 1–9 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100284>
- [6]. I. Risi, A. R. C. Amakiri, N. N. Tasie Arduino Uno Controlled Robotic Radar System Object Detector Using Ultrasonic Sensor// American Journal of Engineering Research, 9(12), p. 01–08 (2020).
- [7]. T. Kamble, H. Shinde, Y. Dorage, V. Chavan Object Detection Machine Using Arduino// International Journal of Advanced Research in Science-Communication and

- Technology, 5(8–2), p. 335–340 (2025). <https://doi.org/10.48175/568>
- [8]. N. T. Tsebesebe, K. Mpofu, S. Sivarasu, P. Mthunzi Kufa Arduino based devices in healthcare and environmental monitoring // Discover Internet of Things, 5(46), p. 1–31 (2025). <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00139-z>
- [9]. V. M. Aroutiounian, A. Hovhannisyan Breath Semiconductor Metal Oxide Gas Detector using Arduino Nano//Biomedical Journal of Scientific & Technical Research, 4(3), p. 145–152 (2022). <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2020.27.004442>
- [10]. S. Elísio, L. Peralta Development of a low-cost monitor for radon detection in air// Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 969(164033), p. 1–5 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164033>
- [11]. C. M. Nkinyam, T. T. B. Clausel, A. Aziz, P. U. Akpan, O. C. Sampson Design and construction of an affordable and portable solar kit for remote areas with Arduino-based remote switching capability // Unconventional Resources, 12(100361), p. 1–11 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.unres.2026.100361>
- [12]. S. A. E. Ouahab, F. Bakkali, A. Amghar, H. Sahsah, L. E. Mentaly, L. E. Mahfoud Design and implementation of temperature-parametric for maximum power point tracking of photovoltaic systems: Experimental validation using PI controller // Computers and Electrical Engineering, 120(109707), Part A, p. 1–16 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109707>
- [13]. M. R. Amin, M. F. Wahyudi, M. R. Mak'ruf, T. B. Indrato, A. Pudji, S. Palanisamy Analysis of the Capture Output on Flat Panel Detector using Arduino-Based BPW34 Photodiode Sensor with mA and kV Setting Parameters// Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics, 4(3), p. 145–152 (2025). <https://doi.org/10.35882/ijeemi.v4i3.148>
- [14]. M. Vestenicky, S. Matuska, R. Hudec Simple method of photovoltaic panel power characteristic measurement based on Arduino hardware platform//Transportation Research Procedia, 40, p. 579–585 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.083>
- [15]. S. Ahmad, A. N. Razali, M. I. Misrun Effective and Low-Cost Arduino based Dual-Axis Solar Tracker //Journal of Physics: Conference Series, 1878(012049), p. 1–10 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012049>
- [16]. B. O. Olorunfemi, N. I. Nwulu, O. A. Ogbolumani Solar panel surface dirt detection and removal based on arduino color recognition//MethodsX, 10(101967), p. 1–9 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101967>
- [17]. Dr. N. S. Rao, G. Devanand, V. Addagarla, G. Paila, N. T. Methukumelli, L. S. S. R. Lakkoju Arduino based Dual Axis Smart Solar Tracker// International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education, 10(2), 22787, p. 728–735 (2024).
- [18]. M. Muhammad, B. Ragadita, S. Prayogi, S. Saminan Design of an optical rotation value measurement tool using an arduino device Jurnal Pijar Mipa, 18(5), p. 753–758 (2023). <https://doi.org/10.29303/jpm.v18i5.4811>
- [19]. G. Kamela, T. Zeundjua, M. Oduetse Wind load analysis and cost assessment of a dual-axis stand-alone photovoltaic structure // Engineering Research Express, 6, (1), p. 1–18 (2024). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad2b25>
- [20]. S. Ahmad, A. N. Razali and M. I. Misrun Effective and Low-Cost Arduino based Dual-Axis Solar Tracker// Journal of Physics: Conference Series, 1878(1):012049, p. 1–9 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012049>
- [21]. A. Y. Pratama, C. G. Irianto The novel algorithm of dual-axis solar tracker in severe weather condition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 753(1):012019, p. 1–7 (2021). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/753/1/012019>
- [22]. J. Mishra, R. Thakur, A. Deep Arduino based Dual Axis Smart Solar Tracker// International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS), 3(5), p. 532–535 (2017). <https://doi.org/10.24001/ijaems.3.5.20>
- [23]. I. Virt, I. Padalka, M. Chekailo, B. Cieniek, P. Potera Nanocomposite Thin Films:

Structural, Electrical, and Optoelectronic Properties of n-ZnNiO/p-Si Heterostructures// Applied Science, 16, 2392, p. 1–15 (2026). <https://doi.org/10.3390/app16052392>

[24]. D.-H. Park, S.-T. Oh, J.-H. Lim Development of a UV Index Sensor-Based Portable Measurement Device with the EUVB Ratio of Natural Light//Sensors, 19(754), p. 1–12 (2019). <https://doi.org/10.3390/s19040754>

[25]. J. Graeme Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions, New York: McGraw-Hill, 1996.

[26]. R. Pallas-Areny, J.G. Webster Sensors and Signal Conditioning, 2nd ed, Hoboken: John Wiley & Sons, 2001.

[27]. I. S. Virt, I. V. Padalka UV photodetector module based on thin film zinc oxide Sensor// Sensor Electronics and Microsystem Technologies, 22(4), p. 15–29 (2025). <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.339704>. [in Ukrainian].

[28]. Arduino. Arduino Nano Board Documentation: <https://docs.arduino.cc>

[29]. R. J. Kovács, J.-Z. Kovács and L. A. Szolga Device for Identifying the UV Emission Spectrum// Sensors, 22(13), 4852, p. 1–16 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22134852>

[30]. W. Fang, Q. Li, J. Li, Y. Li, Q. Zhang, R. Chen, M. Wang, F. Yun and T. Wang Deep Ultraviolet Photodetector: Materials and Devices // Crystals, 13(6), 915, p. 1–40 (2023). <https://doi.org/10.3390/cryst13060915>

Додаток А.

Код програми зчитування сигналу

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
Adafruit_ADS1115 ads; /* Construct an
ads1115 at the default address 0x48 */
void setup(void)
{
    // Ініціалізація серійного порту для ви-
    воду даних
    Serial.begin(115200);
    Serial.println(«Hello!»);
    // Ініціалізація I2C зі вказанням пінів
```

```
Wire.begin(21, 22);
// Ініціалізація ADS1115
Serial.println(«Getting single-ended
readings from AIN0»);
Serial.println(«ADC Range: +/- 6.144V (1
bit = 0.1875mV)»);
// Налаштування діапазону підсилення до
+/- 6.144V (нульове підсилення)
ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);
// Налаштування частоти вибірки на 860
вибірок за секунду
ads.setDataRate(RATE_
ADS1115_860SPS);
if (!ads.begin()) {
    Serial.println(«Failed to initialize ADS.»);
    while (1);
} else {
    Serial.println(«ADS initialized
successfully.»);
}
}
void loop(void)
{
    int16_t adc0;
    float voltage_after_gain;
    // Зчитування даних з А0
    adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
    // Переведення значень ADC у вольти
    після підсилення
    voltage_after_gain = adc0 * 0.0001875; //
    1 bit = 0.1875mV
    // Перевірка чи зчитане значення є мак-
    симальним
    if (adc0 == 32767) {
        Serial.println(«Warning: ADC reading is
at the maximum value.»);
    }
    // Вивід даних у серійний порт
    Serial.print(«AIN0: «); Serial.print(adc0);
    Serial.print(« (ADC Value), «);
    Serial.print(voltage_after_gain, 6); Serial.
println(« V (Voltage after gain)»);
    Serial.println(« «);
    delay(1000);
```

Стаття надійшла до редакції: 30.04.2026

прийнята до друку: 15.06.2026

опублікована: 30.06.2026

PACS 42.79.Pw, 29.40.-n

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.359587>

DEVELOPMENT OF A UV PHOTODetECTOR MODULE BASED ON A ZnO/Si HETEROSTRUCTURE USING AN ARDUINO MICROCONTROLLER

I. V. Padalka, I. S. Virt

Drohobych State Pedagogical University of Ivan Franko, Department of Physics,
Institute of Physics, Mathematics, Economics and Innovative Technologies;
24 Ivan Franko St, Drohobych, 82100, Ukraine;
e-mail: ivan.padalka@dspu.edu.ua; isvirt@dspu.edu.ua

Abstract. A universal photo-receiving device based on the Arduino Nano (ATmega328P microcontroller) has been developed, optimized for UV radiation detection. The key element of the system is a photodetector based on a ZnO/Si heterostructure with a maximum photoresponse at a wavelength of 367 nm. The device interface is: an integrated USB–UART converter, which allows programming the module and transferring data to a PC without external programmers via Arduino IDE. The technical scheme provides a high sampling frequency for accurate recording of UV signal time sequences. LED status indication and standard interfaces for synchronization with external modules are provided. Due to its scalability and synchronization accuracy, the device is an effective tool for prototyping, laboratory research of photodetectors and their application for recording radiation, in particular the ultraviolet range.

Keywords: portable measurement device, UV sensor modules, zinc oxide/silicon heterostructure, Arduino microcontroller

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

PACS 85.50.-n, 77.84.-s, 73.61.Ph

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.351024>

ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ПІРО- ТА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛІМЕРУ ПОЛІВІНІЛІДЕНФТОРИДУ (ПВДФ)

С. Н. Федосов, <https://orcid.org/0000-0002-5775-1468>

О. Є. Сергєєва, <https://orcid.org/0000-0002-5534-9563>

Одеський національний технологічний університет,
кафедра комп'ютерних та фізико-математичних наук
вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039, Україна
e-mail: snfedosov@ukr.net

Анотація. У роботі розглянуто технологічні аспекти проектування та виготовлення сенсорів на основі полівініліденфториду (ПВДФ). Оптимальні режими активації поверхні, нанесення електродів та поляризації обґрунтовані результатами власних досліджень авторів щодо формування та стабілізації сегнетоелектричної фази в ПВДФ. Встановлено, що комбінована обробка поверхні (хімічне знежирення та тліючий розряд протягом 20 хв) забезпечує високу адгезію електродів, знижуючи кут змочування до 23°. Розроблені сенсори продемонстрували високі значення п'єзоефіцієнта ($d_{31} = 28$ пКл/Н) та пірокоефіцієнта ($p = 34$ мкКл/(м²·К)), що забезпечує стабільну роботу в широкому динамічному діапазоні. Порівняльний аналіз із закордонними аналогами підтвердив конкурентоспроможність розробленої технології.

Ключові слова: ПВДФ, полівініліденфторид, п'єзоелектричні сенсори, піроелектричні сенсори, сегнетоелектричні полімери, адгезія, коронний розряд

1. Вступ

Сегнетоелектричні полімери, зокрема полівініліденфторид (ПВДФ), є перспективними матеріалами для створення гнучких та біосумісних сенсорів [1,2]. Проте стабільність їхніх характеристик суттєво залежить від технологічних параметрів виготовлення.

Дана робота є узагальненням циклу досліджень авторів щодо оптимізації технологічного циклу виробництва ПВДФ-сенсорів та аналізу їхніх експлуатаційних характеристик у порівнянні зі світовими аналогами [5-8].

2. Методика експерименту та підготовки зразків

2.1. Активация поверхні та нанесення електродів

Для досліджень використовувалися одноосово орієнтовані плівки ПВДФ товщиною 28 ± 1 мкм (виробництва «Пластполімер»). Орієнтація проводилася вздовж осі витягування (вісь 1). Поляризація здійснювалася за віссю 3 (нормаль до площини плівки), що забезпечує максимальний поперечний п'єзоефіцієнт d_{31} .

Для покращення адгезії алюмінієвих електродів застосовувалася комбінована обробка: хімічне знежирення (етиловий спирт) та активація у тліючому розряді. Час обробки розрядом було уніфіковано до 20 хвилин (оптимальний режим для стабілізації поверхневої енергії). Ефективність активації оцінювали за кутом змочування дистильованою водою (табл. 1).

Таблиця 1

Вплив режимів обробки на кут змочування поверхні ПВДФ

Метод обробки поверхні ПВДФ	Час обробки	Кут змочування, град.
Без обробки (вихідна плівка)	–	75±6
Хімічне знежирення (спирт)	–	73±5
Тліючий розряд (без знежирення)	20 хв	40±3
Знежирення + тліючий розряд	20 хв	23±4

Алюмінієві електроди товщиною 1000 Å наносилися методом термічного випаровування у вакуумі (10^{-4} мм рт. ст.) з вольфрамових резистивних випарників. Використання вольфраму (W) зумовлене його тугоплавкістю та хімічною інертністю до алюмінію при робочих температурах.

2.2. Режими поляризації та конструкція

Поляризація здійснювалася в коронному розряді при $E_p=160$ МВ/м, що значно перевищує коерцитивне поле матеріалу $E_c \approx 50-80$ МВ/м [8]. Обрано термостимульований режим: нагрів до 80 °С, витримка 20 хв, охолодження під полем. Для стабілізації характеристик проведено фінальний відпал при 70 °С (2 години). Це початкова точка стабілізації.

На основі аналізу комерційних аналогів (зокрема Куреха, Японія) обрано прямокутну форму активної зони площею 3,6 см², що забезпечує оптимальне співвідношення сигнал/шум.

3. Результати та обговорення

При проектуванні сенсорів на основі ПВДФ враховано, що сегнетоелектричні полімерні плівки не придатні для статичних

вимірювань, оскільки вони генерують відгук лише у відповідь на динамічну зміну механічного навантаження або температури. Водночас плівки ПВДФ демонструють надзвичайно широкий динамічний діапазон: від реєстрації впливу космічних мікрочастинок масою 10^{-12} г [4] до фіксації ударних хвиль амплітудою до $3 \cdot 10^5$ атм [5].

3.1. Частотні характеристики

Для використання сенсорів в ультразвуковому діапазоні (режим d_{33}) критичним параметром є частота механічного резонансу по товщині. Резонансна частота f_r визначається швидкістю поширення поздовжніх акустичних хвиль v та товщиною плівки d :

$$f_r = \frac{v}{2d} \cdot \quad (1)$$

Використовуючи значення швидкості звуку для орієнтованого ПВДФ $v=2260$ м/с [4] та товщину $d=28$ мкм, отримуємо $f_r \approx 37.5$ МГц. Це дозволяє проектувати на основі даних плівок широкосмугові ультразвукові перетворювачі.

3.2. Температурна стабільність

Дослідження залежності d_{31} від часу (Рис. 1) та струмів деполяризації [6-8] дозволили встановити робочий діапазон сенсорів. Нижня межа (–25 °С) зумовлена температурою склування аморфної фази ПВДФ, а верхня (+80 °С) – початком інтенсивної необоротної деполяризації матеріалу.

Вимірювання п'єзоелектричного коефіцієнта d_{31} проводилося методом прямого п'єзоефекту при статичному навантаженні.

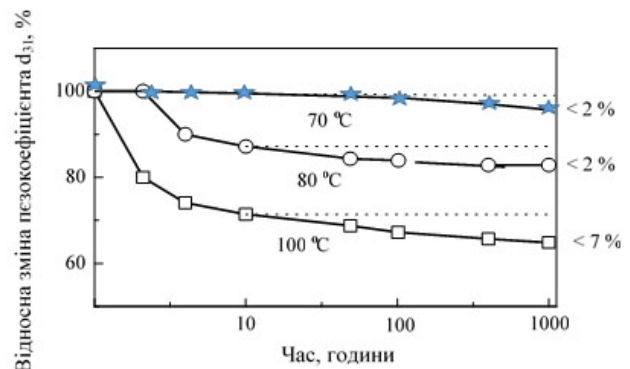


Рис. 1. Кінетика спаду п'єзоефіцієнта d_{31} при тривалому нагріві. Точки – експеримент, лінії – апроксимація.

Піроелектричний коефіцієнт p визначався квазістатичним методом при швидкості нагріву 1 К/хв.

Як видно з Рис. 1, п'єзомодуль d_{31} демонструє високу часову стабільність. Пунктирні лінії відповідають екстраполяції того, як процес піде далі через 1000 годин. Чисельна оцінка показує, що навіть при тривалому тепловому впливі (+100 °С) деградація п'єзоефекта не перевищує 7%, що підтверджує можливість використання розроблених сенсорів у зазначеному температурному діапазоні

3.3. Електричні характеристики та порівняння

Вимірювання параметрів проводилося після поляризації зразків за оптимізованим термостимульованим режимом (N -подібна кінетика струму). Вимірювання d_{31} проводилося методом прямого п'єзоефекту, а пірокоефіцієнта p – квазістатичним методом.

Результати комплексних випробувань наведені в табл. 2.

Результати порівняння з японським аналогом Куреха наведено в табл. 3.

Значення п'єзоефективності наших зразків **співмірні** зі зразками Куреха. Розрахована відносна розбіжність становила близько 10–12%, що повністю перекривається сумарною похибкою вимірювальної установки. Це дозволило стверджувати, що розроблена нами технологія поляризації (у коронному розряді) забезпечує таку саму ефективність орієнтації диполів, як і промислові методи японського виробника

Виявлено, що розроблені сенсори досягають рівня світових аналогів, а за пірокоефіцієнтом дещо перевищують їх.

Лінійна залежність заряду Q від навантаження (Рис. 2) підтверджує стабільність п'єзоефекта в широкому діапазоні сил.

Напруга вихідного сигналу розраховувалася за виразом:

$$V = \frac{p \cdot d \cdot \Delta T}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (2)$$

Таблиця 2

Зведені характеристики розроблених сенсорів ПВДФ (Т = 20 °С)

Параметр	Позначення	Значення	Похибка	Метод визначення
П'єзоелектричний коефіцієнт	d_{31}	28 пКл/Н	±3 (10.7%)	Механічне навантаження
Піроелектричний коефіцієнт	p	34 мкКл/(м²·К)	±4 (11.8%)	Квазістатичний
Діелектрична проникність	ε	12	±0.3 (2.5%)	Імпедансна спектроскопія
Тангенс діелектричних втрат	$\tan \delta$	0.018	±0.002	Імпедансна спектроскопія
Коефіцієнт зв'язку	k_{31}	13.5%	±0.5 (3.7%)	Частотний резонанс
Резонансна частота (по товщині)	f_r	37.5 МГц	±1.6 (4.2%)	Розрахунковий ($v/2d$)
Піроелектрична добротність	F_v	3.1 мкКл/(м²·К)	±0.2 (6.0%)	

Таблиця 3

Характеристики виготовлених сенсорів у порівнянні з аналогом фірми Куреха (Kureha), Японія [2]

Параметр	Одиниця виміру	Дана робота	Аналог [2]
П'єзоефективність d_{31}	пКл/Н	28±3	25
Пірокоефіцієнт p	мкКл/(м²·К)	34±4	30
Коефіцієнт зв'язку k_{31}	%	13.5	12
Діелектрична проникність ε	безрозмірна	12±0.5	12

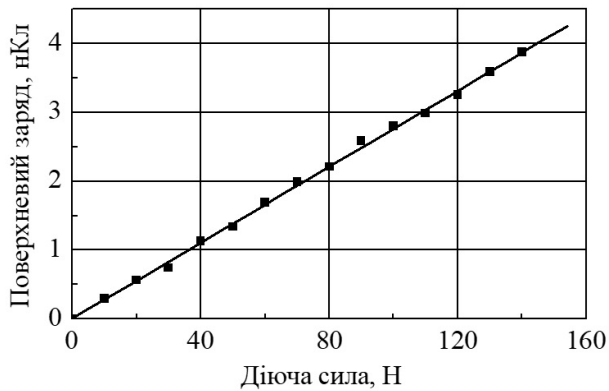


Рис. 2. Статична характеристика сенсора: залежність індукованого заряду Q від прикладеної сили F .

Зокрема, для сенсора товщиною 20 мкм ($\epsilon=12$, $p=30$ мКл/(м²·К)) зміна температури на 1 К генерує напругу $V=5.6$ В, що демонструє високу чутливість розроблених структур.

3.4. Оптимізація інтерфейсу підключення

Через високий вихідний імпеданс ($Z \approx 12$ кОм на частоті 1 кГц) розроблено буферний каскад на основі польового транзистора (Рис. 3) з вхідним опором >20 МОм. Схема є стандартним технічним рішенням для узгодження імпедансу. Це критично для запобігання втратам заряду при низькочастотних вимірюваннях.

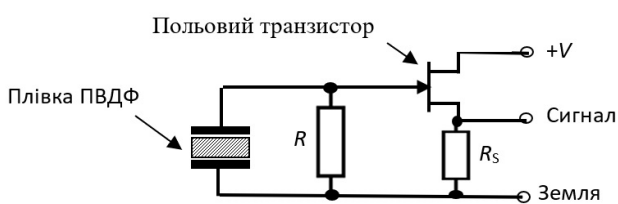


Рис. 3. Типова принципова схема буферного підсилювача на польовому транзисторі.

3.5. Аналіз стабільності та частотних характеристик

Дослідження частотної залежності ϵ (рис. 4) підтверджує сегнетоелектричну природу матеріалу з характерним релаксаційним зміщенням максимуму при підвищенні температури. Випробування на тривалу стабільність (рис. 1) показали, що після попереднього від-

палу зміна d_{31} не перевищує 2-3% за 1000 годин експлуатації при 70 °С.

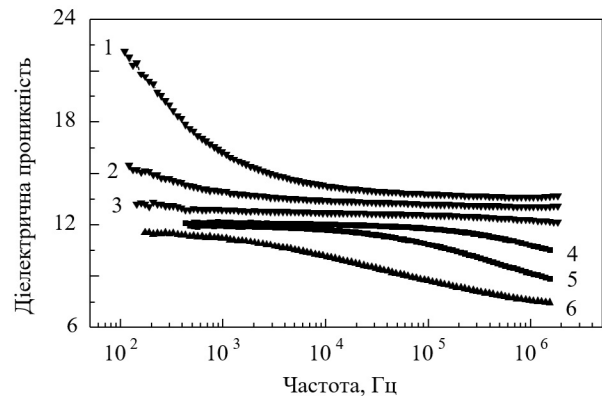


Рис. 4. Залежність діелектричної проникності від частоти при різних температурах (1 – 80 °С; 2– 60 °С; 3 – 40 °С; 4 – 20 °С; 5 – 0 °С; 6 – (-20 °С)).

Інверсія струму в режимах із діелектричною прокладкою пояснюється переважною релаксацією гетерозаряду (дипольної поляризації) порівняно зі стабільним гомозарядом, локалізованим у глибоких енергетичних пастках атомів фтору.

Проведений аналіз дозволяє виділити три ключові фактори, які забезпечили високі експлуатаційні показники розроблених сенсорів:

Синергія методів поляризації: На відміну від стандартних заводських регламентів, у даній роботі використано метод термостимульованої поляризації з безперервною реєстрацією струму. Виявлена N-подібна кінетика струму дозволила з високою точністю фіксувати момент завершення формування сегнетоелектричної фази, що гарантує максимальну залишкову поляризацію для кожного конкретного зразка.

Підвищена адгезія електродів: Експериментально доведено, що комбінована обробка (хімічне знежирення у поєднанні з 20-хвилинним тліючим розрядом) знижує кут змочування поверхні ПВДФ з 75° до 23°. Це призвело до різкого зростання вільної поверхневої енергії полімеру, забезпечивши надійний механічний контакт металевого електрода з плівкою, що є критичним для довговічності сенсора.

Висока часова стабільність: Отримані результати щодо 2–3% зміни п'єзо- та піро-

коефіцієнтів після 1000 годин безперервної роботи (за умови попереднього стабілізуючого відпалу) свідчать про високу надійність розроблених структур. Це дозволяє рекомендувати дану технологію для промислового виробництва сенсорів, що працюють в умовах тривалих теплових та механічних навантажень.

4. Висновки

1. Комбінована обробка поверхні (знежирення + 20 хв дії тліючого розряду) знижує кут змочування до 23° , забезпечуючи високу адгезію електродів.

2. Режим поляризації при напруженості 160 МВ/м дозволив отримати стабільні значення $d_{31}=28$ пКл/Н та $p=34$ мкКл/(м²·К), що відповідає кращим світовим стандартам та аналізу комерційно доступних сенсорів (зокрема фірми Куреха).

3. Попередній відпал при 70 °С гарантує довгострокову стабільність характеристик (зміна не перевищує 7% за 1000 годин).

4. Стабільність піро- та п'єзоефекту при температурах до 80 °С обумовлена фіксацією дипольної поляризації полем глибоко захопленого гомозаряду.

Список використаної літератури

[1]. Z.-G. Ye Handbook of Advanced Dielectric, Piezoelectric and Ferroelectric Materials: Synthesis, Properties and Applications. Elsevier, 1072 p. (2008). eBook ISBN: 9781845694005, https://www.researchgate.net/publication/291924197_Handbook_of_Advanced_Dielectric_Piezoelectric_and_Ferroelectric_Materials_Synthesis_Properties_and_Applications

[2]. J. S. Harrison, Z. Ounaies Piezoelectric polymers. Encyclopedia of Smart Materials,

1, p.p. 860–873, (2002). <https://doi.org/10.1002/0471216275.esm067>

[3]. A. Vesel and others Non-Equilibrium Plasma Methods for Tailoring Surface Properties of Polyvinylidene Fluoride: Review and Challenges (ed. Jian-Zhang Chen) // Polymers (Basel), 2021, 13(23):4243. <https://doi.org/10.3390/polym13234243>

[4]. P. Bloomfield, W. Lo, B. Wittmershaus Experimental study of the acoustical properties of PVDF. //IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 47(6), p.p. 1397–1405, (2000). <https://doi.org/10.1109/58.883528>

[5]. S. N. Fedosov, A. E. Sergeeva Formation and relaxation of polarized state in ferroelectric polymers. LAP Lambert Academic Publishing, 124 p. (2020).

[6]. S. N. Fedosov, A. V. Sergeeva, J. A. Giacometti, P. A. Ribeiro Corona poling of a ferroelectric polymer (PVDF) // Proceedings-Spie the International Society for Optical Engineering, 2000, pp. 53-58

[7]. S. N. Fedosov, A. E. Sergeeva, Eberle G., Eisenmenger W. Piezoelectric properties of PVDF films polarized by corona discharge. Journal of Physics D: Applied Physics, 29, p.p. 75–81, (1996). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/29/12/028>

[8]. S. N. Fedosov, H. von Seggern Pyroelectricity in polyvinylidene fluoride: influence of polarization and charge. Journal of Applied Physics, 103(1), p.p. 014105-014109, (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2824940>

Стаття надійшла до редакції: 29.01.2026
прийнята до друку: 16.04.2026
опублікована: 30.06.2026

PACS 85.50.-n, 77.84.-s, 73.61.Ph

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.351024>

FEATURES OF MANUFACTURING PYRO- AND PIEZOELECTRIC SENSORS BASED ON FERROELECTRIC POLYMER POLYVINYLIDENE FLUORIDE (PVDF)

S. N. Fedosov, A. E. Sergeeva

Odesa National University of Technology,
Department of Computer, Physical and Mathematical Sciences,
112 Kanatna St, Odesa, 65039, Ukraine,
e-mail: snfedosov@ukr.net

Abstract. The paper discusses the technological aspects of designing and manufacturing sensors based on polyvinylidene fluoride (PVDF). Optimal modes of surface activation, electrode deposition, and polarization are justified by results of the authors' own research on the formation and stabilization of the ferroelectric phase in PVDF. It was found that combined surface treatment (chemical degreasing and glow discharge for 20 minutes) ensures high electrode adhesion, reducing the contact angle to 23° . The developed sensors demonstrated high values of the piezoelectric coefficient ($d_{31} = 28$ pC/N) and pyroelectric coefficient ($p = 34$ $\mu\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), ensuring stable operation in a wide dynamic range. A comparative analysis with foreign analogues confirmed the competitiveness of the developed technology.

Keywords: PVDF, polyvinylidene fluoride, piezoelectric sensors, pyroelectric sensors, ferroelectric polymers, adhesion, corona discharge

PACS 43.38.Rh

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.365141>

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ АКУСТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

Я. Леніх, <https://orcid.org/0000-0001-6769-835X>

В. Янко, <https://orcid.org/0000-0002-4711-4211>

А. Карпенко, <https://orcid.org/0009-0002-9577-9928>

А. Балабан, <https://orcid.org/0000-0002-6372-479X>

Науково-дослідний інститут фізики
Одеського національного університету імені І. І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, 65082, Україна
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Анотація. В статті розглянуто проблему інтелектуалізації мікроелектронних датчиків фізичних величин. Показані особливості і відмінності побудови таких датчиків, які базуються на різних фізичних принципах.

Сформульовано підхід до вирішення задачі інтелектуалізації акустoeлектронних датчиків на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). На прикладі датчика на ПАХ лінійного переміщення описано конкретну структуру і послідовність обробки сигналу та його представлення для використання в інформаційних системах.

Ключові слова: датчики фізичних величин, поверхневі акустичні хвилі, інтелектуалізація

Вступ

Однією з задач сенсорної електроніки на даному етапі її розвитку є інтелектуалізація сенсорів, що обумовлюється також необхідністю забезпечення інформаційних систем, особливо інтелектуального рівня, сигналами високої якості в режимі он-лайн і забезпечення реалізації інших функцій їх інтелектуальності [1-3].

При підході до вирішення цієї задачі треба брати до уваги певну відмінність сенсорів, які базуються на різних фізичних принципах. Такими є, зокрема, напівпровідникові сенсори різного функціонального призначення, особливістю яких є аналоговий (струмовий) вихідний сигнал, і класи сенсорів, які мають вихідний сигнал частотного виду, такі, наприклад, як акустoeлектронні на об'ємних чи поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Фізичні основи роботи тих та інших сенсорів загалом відомі.

В інтелектуальному сенсорі напівпровідникового типу до аналогової частини, що

підсилює, нормує і фільтрує сигнал чутливого елемента, підключають цифрову частину, створену на базі мікропроцесорів із вбудованою архітектурою. При цьому цифрова частина не лише забезпечує якісне оброблення сигналів і виявлення відмов апаратних засобів сенсора, а й організує обмін інформацією через мережні канали інформаційно-вимірювальних систем. Останні в кінцевому етапі виконують функції, що зазвичай реалізується на мікро-ЕОМ вищого рівня і здійснюють градування, оцінку результатів вимірювання, самодіагностику, програмування архітектури, формування і передавання інформації з мережних каналів тощо [4].

Основна частина

Відмінності напівпровідникових і акустoeлектронних проявляються при інтелектуалізації сенсорів, зокрема, в тому, що напівпровідникові вимагають додаткової обробки первин-

ного аналогового сигналу при трансформації його в цифровий вигляд.

Додаткова обробка сигналу зазвичай призводить до певної втрати якості сигналу, а, крім того, вимагає додаткового застосування відповідної елементної бази. Акустoeлектронні

сенсори з вихідним частотний сигналом не потребують цієї операції.

В цьому основна відмінність структурних, схемотехнічних і алгоритмічних рішень інтелектуалізації, що відображено схематично на (рис. 1).

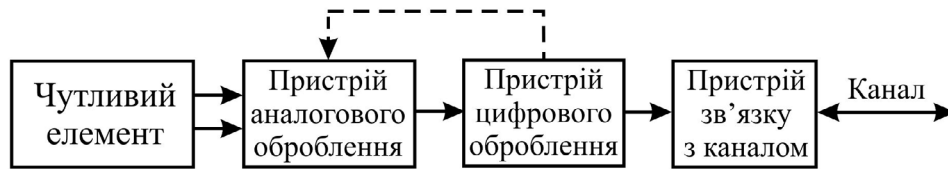


Рис. 1. Типова структурна схема інтелектуального сенсора фізичних величин.

У випадку сенсора на ПАХ структурна схема спрощується внаслідок відсутності необхідності в аналоговій частині, що показано пунктиром. Тобто після аналогового оброблення сигналу послідовно блоку інтелектуалізації сенсорів і інтеграції в інформаційні системи принципово не відрізняються та визначаються в основному досвідом і «смаком» розробника і вибором елементної бази.

При цьому, як правило, здійснюється спряження датчика з мікроелектронною технікою і реалізується інтелектуалізація його за рахунок вбудови кібернетичних пристроїв, алгоритмізації методів виміру корисного сигналу з застосуванням сучасних методів машинного навчання і аналізу даних [2, 5].

Сам датчик, як чутливий елемент може бути конструктивно відокремлений від наступних вимірювальних перетворювачів, або включати вторинний перетворювач, мікроконтролер, та інші менш інтелектуальні пристрої.

На засаді вище описаного підходу нами розроблено інтелектуалізований акустoeлектронний датчик кута повороту на ПАХ, структурна схема якого наведена на рис. 2.

Вихідний сигнал таких датчиків генерується схемою з лінійним підсилювачем і частотозадаючим елементом у ланцюгу зворотного зв'язку лінією затримки (ЛЗ) на ПАХ, яка утворюється вхідним і вихідним зустрічно-штирковими перетворювачами (ЗШП) 1, 5. Залежність частоти вихідного сигналу є монотонною, квазілінійною, слабо і монотонно

залежить від температури, і залежить від кута між кристалічною віссю звукопровода і напрямом поширення ПАХ.

Для визначення поточної температури у конструкцію датчика вбудовані інтегральні цифрові датчики температури, що мають те-

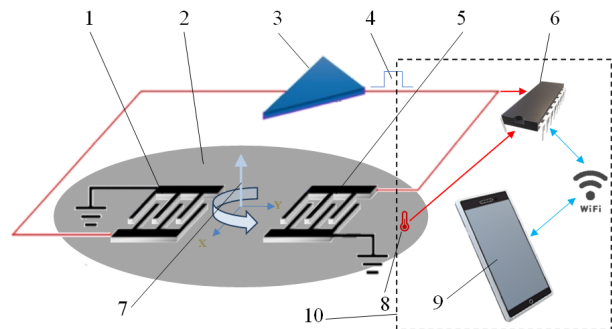


Рис. 2. Структурна схема датчика кута повороту на ПАХ з блоком інтелектуального забезпечення (БІЗ), де:

- 1 – нерухомий (приймальний) зустрічно-штирковий перетворювач (ЗШП);
- 2 – п'єзоелектрична підкладка - звукопровід що обертається;
- 3 – лінійний підсилювач у контурі зворотного зв'язку забезпечує підсилення генерації вимірювального сигналу з частотою що залежить від ультразвукової лінії затримки;
- 4 – вимірювальний сигнал;
- 5 – нерухомий ЗШП передавальний (генеруючий);
- 6 – мікроконтролер з блоком бездротового зв'язку;
- 7 – вісь обертання вимірювального штоку;
- 8 – датчик температури, що контролює мікроконтролер;
- 9 – мобільний термінал;
- 10 – блок інтелектуального забезпечення (БІЗ).

пловий контакт із залежними від температури компонентами. Цифрові дані цих датчиків як і вихідний сигнал є вхідними для БІЗ.

Усі вхідні дані задіяні у реалізації алгоритму цифрової обробки в БІЗ. Може бути введений ще один канал з кнопкою керування інтерфейсом користувача.

Залежність частоти від величини переміщення є основною метрологічною характеристикою датчика. Немає економічно виправдані методики отримання аналітичного вираження цієї залежності. Проблему можна вирішити запам'ятовуванням експериментально отриманої характеристики. Ефективно для цього застосувати мікропроцесорні цифрові технології. Доцільно використовувати алгоритми, що вимагають меншої кількості елементів пам'яті. Більш економічними є алгоритми запам'ятовування емпіричних залежностей, засновані на математичних методах апроксимації нелінійних функцій, оскільки потрібно менше даних, а частина даних задається аналітично.

Крім основних функцій, що забезпечують метрологічні характеристики, БІЗ виконує інтерфейсні та сервісні функції. Ці функції служать для забезпечення налаштування та вдосконалення конструкції датчика, вибору експлуатаційних параметрів під конкретне задання застосування датчика.

Формалізація шматково-лінійної функції з урахуванням температурної нестабільності на програмному рівні (у програмуванні вбудованих процесорів переважно використовується мова C/C++), реалізована двовимірним масивом $\text{Dat}[N][T+1]$ константних змінних типу const float (з плаваючою точкою). Тобто масив довжиною $T+1$ масивів довжиною N , де N – число апроксимуючих точок залежності дистанції від частоти; T – число значень температури, у яких було отримано експериментальні залежності. Масив $\text{Dat}[N][0]$ є незалежною змінною, набір обраних для апроксимації значень частоти, монотонно зростаючих у міру збільшення індексу.

Ці дані є константними для програми мікропроцесора, що вбудовується, і можуть бути згодом скориговані або замінені. Дані одержу-

ють за допомогою алгоритмізованих вимірювальних процедур.

Отримані результати можуть бути корисними при створення датчиків різного функціонального призначення що мають частотний вигляд вихідного сигналу.

Висновки

Результати розробки і досліджень акустоелектронних датчиків на ПАХ показали переваги над датчиками з аналоговим сигналом при інтелектуалізації і спряженні їх в інформаційні системи високого рівня.

В цілому наведений підхід до вирішення проблеми інтелектуалізації може бути застосований при створенні датчиків, побудованих на інших фізичних принципах.

Список використаної літератури

- [1]. Ya.I. Lepikh, A.A. Evtukh, V.A. Romanov. Modern Microelectronic Sensors for Intelligent Systems. Visnyk of the NAS of Ukraine, 2013, No. 4. - P. 40–49. <https://doi.org/10.15407/visn2013.04.040> [in Ukrainian]
- [2]. Lepikh Ya.I., Gordiyenko Yu.O., Dzyadevych S.V. Intelligent measuring system based on microelectronic sensors of new generation. Monograph. Odesa: Astroprint.-2011. 352 p. [in Ukrainian]
- [3]. Lepikh Ya.I. Acoustoelectronic devices with controlled characteristics. "Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics" (UkrMiCo), Odesa, Ukraine, 2017, 11–15 Sept. 2017, International Conference.
- [4]. Lepikh Ya. I., Lenkov S. V., Melnyk V. G., Romanov V. O., Protsenko V. O. (2011) Intelktualni vymiriuvalni kanaly sensorykh system. *Science and Defense*, No. 2, p. 36–43. ISBN 978-966-190-449-0. [in Ukrainian]
- [5]. Lepikh Ya. I., Lenkov S. V., Melnyk V. G., Dziadevych S. V. (2010). Mikroelektronni datchyky dlia informatsiinykh (intelektualnykh) system spetsialnoho pryznachennia *Science and Defense*, No. 3, p. 54–55. [in Ukrainian]

Стаття надійшла до редакції: 29.05.2026

прийнята до друку: 11.06.2026

опублікована: 30.06.2026

PACS 43.38.Rh

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.365141>

INTELLECTUALIZATION OF ACOUSTOELECTRONIC SURFACE ACOUSTIC WAVE SENSORS

Ya. Lepikh, V. Yanko, A. Karpenko, A. Balaban

Research Institute of Physics of Odesa I. I. Mechnikov National University
2 Vsevoloda Zmiiienka St, Odesa, 65082, Ukraine
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Abstract. The paper addresses the problem of intellectualization of microelectronic sensors of physical quantities. The features and differences in the design of such sensors based on various physical principles are demonstrated.

An approach to solving the problem of intellectualization of acoustoelectronic surface acoustic wave (SAW) sensors is formulated. Using the example of a SAW linear displacement sensor, a specific structure, signal processing sequence, and its presentation for use in information systems are described.

Keywords: sensors of physical quantities, surface acoustic waves, intellectualization

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

PACS: 543.533, 577.15, 543.06, 616.1

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.365142>

РОЗРОБКА МУЛЬТИЕНЗИМНОЇ БІОСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОДНОЧАСНОГО ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ АЛАНІНАМІНОТРАНСФЕРАЗИ ТА АСПАРТАТАМІНОТРАНСФЕРАЗИ

Д. О. Мруза¹, <https://orcid.org/0000-0002-0689-598X>
Є. Р. Ваховський^{1,2}, <https://orcid.org/0009-0004-6360-5805>
С. В. Дзядевич^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-2915-716X>
О. О. Солдаткін^{1,3}, <https://orcid.org/0000-0003-2362-5487>

¹ Інститут молекулярної біології і генетики НАН України,
вул. Заболотного, 150, м. Київ, 03680, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, м. Київ, 01003, Україна

³ Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського,
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна

e-mail: darynamruza@gmail.com; genyurud93@gmail.com; dzyad@yahoo.com; alex_sold@yahoo.com

Анотація. У роботі представлено розробку амперометричної біосенсорної системи для одночасного визначення активності аланінамінотрансферази (АЛТ) та аспартатамінотрансферази (АСТ) у біологічних рідинах. Система складається з двох ензимних біосенсорів: сенсора на основі піруватоксидази для визначення АЛТ та сенсора на основі глутаматоксидази для визначення АСТ. Принцип роботи запропонованої системи базується на каскаді реакцій. Спершу, АЛТ та АСТ індуковане трансамінування з утворенням пірувату та глутамату, подальше їхнє окиснення піруватоксидазою та глутаматоксидазою відповідно до пероксиду водню з наступною амперометричною реєстрацією розкладу пероксиду водню на платиновому електроді при потенціалі +0,6 В відносно Ag/AgCl. Піруватоксидазу іммобілізували включенням до фотополімерної матриці PVA-SbQ, глутаматоксидазу — ковалентним зшиванням глутаровим альдегідом. Для підвищення селективності поверхню платинового електроду модифікували полі(мета-фенілендіаміновою) мембраною. Лінійний діапазон розробленої біосенсорної системи становить 1–500 Од.акт./л для визначення АЛТ та 1–110 Од.акт./л для АСТ, межа детекції — 1 Од.акт./л для обох ензимів. Чутливість системи — 0,05 нА/хв та 0,137 нА/хв на 1 Од.акт./л АЛТ та АСТ відповідно. Похибка відтворюваності відгуків під час роботи: RSD = 2,9% (АЛТ) та 14,1% (АСТ). В роботі доведено, що запропонована біосенсорна система дозволяє визначати активність обох аналітів в одному біологічному зразку, що робить її перспективною для портативної клінічної діагностики, а саме для швидкого, селективного визначення активності трансаміназ в біологічних рідинах.

Ключові слова: біосенсорна система, амперометрія, одночасне визначення трансаміназ, неінвазивна діагностика, кінетика, динамічні зміни, неінвазивна діагностика, ензими, зв'язування

Вступ

У сучасній клінічній практиці дедалі більшого значення набуває швидке та точне визначення біохімічних маркерів, які відображають стан функціонування внутрішніх органів. Серед таких маркерів особливе місце займають аланінамінотрансфераза (АЛТ, ЕС 2.6.1.2) та аспаратамінотрансфераза (АСТ, ЕС 2.6.1.1) — мультисубстратні ензими, що локалізуються переважно у цитоплазмі та мітохондріальному матриксі клітин [1]. Реакції, які вони каталізують, є центральними ланками метаболізму амінокислот: АСТ каталізує перетворення аспартату та α -кетоглутарату на глутамат та оксалоацетат (реакція 1), тоді як АЛТ забезпечує перетворення аланіну та α -кетоглутарату на глутамат та піруват (реакція 2) [2]. Завдяки участі субстратів та продуктів їх реакції у циклі трикарбонових кислот, малат-аспартатному човнику, циклі сечовини та глюкозо-аланіновому циклі, ці ензими відіграють ключову роль у енергетичному обміні та підтриманні азотистого балансу організму [3].

аланін + АЛТ + кетоглутарат $\leftrightarrow$ піруват + АТФ + глутамат (1)

аспартат + АСТ + кетоглутарат $\leftrightarrow$ глутамат + АСТ +
+ оксалоацетат (2)

Завдяки своєму локальному синтезу в певних органах ці ензими широко використовуються як надійні індикатори ушкодження клітин печінки та серця, а також ряду інших патологічних станів, що робить їх незамінними маркерами в сучасній діагностиці [4]. У здорових людей рівні АЛТ та АСТ у сироватці крові є відносно низькими: для АЛТ вони зазвичай не перевищують 30 Од.акт./л у чоловіків та 19–30 Од.акт./л у жінок, тоді як для АСТ норма становить до 32 Од.акт./л у чоловіків та до 26–30 Од.акт./л у жінок [5, 6]. Проте при пошкодженні органів-депо внутрішньоклітинний вміст ензимів вивільняється у кров, спричиняючи значне підвищення їхньої активності: зокрема, при вірусних гепатитах рівні трансаміназ можуть зростати у десятки–сотні разів відносно норми, при цирозі пе-

чінки — у 8–35 разів, при ішемічній хворобі серця — у 2–4 рази [7, 8, 9, 10]. АЛТ та АСТ використовуються не лише як монобіомаркери, а й у вигляді їхнього співвідношення, що має важливе діагностичне значення — коефіцієнта Де Рітиса (АСТ/АЛТ). У нормі цей коефіцієнт становить 0,61–1,41 [11]. Відхилення від цього діапазону дозволяє диференціювати певні захворювання: підвищення до $\geq 1,4$ вказує на ураження коронарних артерій, тоді як значення > 2 свідчить про алкогольне ураження печінки або гострий інфаркт міокарда. Аналіз динаміки змін обох показників у часі в сукупності з їхнім співвідношенням значно підвищує діагностичну цінність лабораторних досліджень.

Традиційні методи визначення активності трансаміназ у клінічній практиці переважно базуються на спектрофотометричних, колориметричних, флуориметричних, хемілюмінесцентних, імуноаналітичних та хроматографічних підходах [12, 13, 14, 15]. Найбільш поширеними є спектрофотометричні методи, що лежать в основі більшості комерційних наборів для визначення активності АСТ та АЛТ. Принцип їх роботи ґрунтується на реєстрації зміни оптичного поглинання допоміжних субстратів: у стандартизованому методі IFCC активність трансаміназ визначають шляхом сполученої ензиматичної реакції, в якій продукт реакції трансамінування (оксалоацетат для АСТ або піруват для АЛТ) відновлюється у присутності малатдегідрогенази або лактатдегідрогенази відповідно з одночасним окисненням НАДН до НАД⁺, що супроводжується зменшенням поглинання при довжині хвилі 340 нм [16]. Швидкість зниження оптичної густини розчину є прямо пропорційною активності трансамінази в зразку. Незважаючи на широке застосування та стандартизацію, ці методи мають спільні недоліки: потребують дорогого та громіздкого обладнання, складної пробопідготовки, кваліфікованого персоналу, характеризуються відносно тривалим часом аналізу та непридатні для використання в умовах point-of-care діагностики. Натомість широкого розповсюдження набувають біосенсорні методи аналізу, що позбавлені більшості наведених недоліків.

Електрохімічні біосенсиори останніми роками привертають значну увагу завдяки конструктивній простоті, низькій собівартості та можливості інтеграції в портативні аналітичні пристрої [17]. У більшості розробок використовують ензимні системи на основі глутаматоксидази (ГлОкс) для визначення активності АЛТ або АСТ [18, 19]. Проте, незважаючи на значний прогрес у розробці електрохімічних монобіосенсорів для визначення активності АСТ або АЛТ, наразі відсутні більш складні електрохімічні біосенсорні системи, здатні до одночасного визначення активності АЛТ, АСТ та їх співвідношення в одному вимірювальному циклі. Усунення цієї прогалини є актуальним завданням, оскільки саме діагностичне поєднання обох маркерів (АСТ та АЛТ) та розрахунок коефіцієнта Де Рітиса у форматі роботи єдиного портативного пристрою забезпечило б якісно новий рівень point-of-care діагностики серцево-судинних та печінкових захворювань. Відомо, що біосенсиори на основі ГлОкс не здатні розрізняти сигнали на зміну активності АЛТ та АСТ через залучення спільного продукту реакцій цих трансаміназ — глутамату. Відповідно, для одночасного визначення вмісту обох ензимів та співвідношення їх активностей в розчині, доцільним є створення нової мультиензимної біосенсорної системи на основі піруватоксидази (ПОкс) для аналізу активності АЛТ та глутаматоксидази для аналізу АСТ. У зв'язку з цим метою дослідження стала розробка та оптимізація амперометричної біосенсорної системи для одночасного визначення активності АЛТ та АСТ у біологічних рідинах.

Матеріали і методи

Матеріали

Для створення біоселективних елементів біосенсорної системи використовували ензими: піруватоксидазу (ПОкс), отриману з *Aerococcus viridans* (Sigma-Aldrich, Японія) та рекомбінантну глутаматоксидазу (ГлОкс, 7 Од/мг) зі *Streptomyces sp.* фірми Yamasa Corporation (Японія). Як зшиваючі агенти при іммобілізації було використано полівініловий спирт зі стирилпіридинієвими групами (PVA-

SBQ) (Toyo Gosei Kogyo Co. Ltd., Японія) та плутаровий альдегід (ГА) (Sigma-Aldrich, США). Як додаткові компоненти біомембран — бичачий сироватковий альбумін (БСА) (Sigma-Aldrich, Германия), HEPES (Sigma-Aldrich, США) та гліцерин (Sigma-Aldrich, Германия). Як субстрати застосовували піруват натрію (Sigma-Aldrich, Японія) та глутамат (Sigma-Aldrich, Франція). Розчин нітрату магнію (Sigma-Aldrich, Германия) використовували як кофактор ПОкс, тіамінпірофосфат (ТПФ) (Sigma-Aldrich, США) — як коензим ПОкс, а калій дигідрофосфат («ХІМЛАБОР-РЕАКТИВ», Україна) — як додатковий субстрат ензиматичної реакції. Формування додаткової напівпроникної мембрани здійснювали із застосуванням мета-фенілендіаміну (ПФД) (Sigma-Aldrich, Китай).

Для оцінки селективності роботи біосенсорної системи використовували різні електроактивні сполуки: аскорбінову кислоту (Sigma-Aldrich), гідрохлорид дофаміну (Sigma-Aldrich, Германия), лимонну кислоту (Sigma-Aldrich, Австрія), сечовину (Sigma-Aldrich, США), а також окремі амінокислоти: L-метіонін (Sigma-Aldrich, Японія), L-аргінін (Sigma-Aldrich, Японія), L-лізин (Sigma-Aldrich, Китай) і L-цистеїн (Sigma-Aldrich, Японія).

Для виготовлення модельних розчинів цільових ензимів системи, застосовували глутамат-піруват трансаміназу активністю 129,87 од.акт./мл, отриману із серця свині (Sigma-Aldrich, США) та глутамат-оксалоацетат трансаміназу першого типу з активністю 323 Од.акт./мг, отриману із серця свині (Sigma-Aldrich, США). Біосенсорне визначення активності АЛТ та АСТ також потребувало використання: L-аспартату (Sigma-Aldrich, Китай), піридоксальфосфату (ПЛФ) (Sigma-Aldrich, Італія), α -кетоглутарату (Sigma-Aldrich, Китай) та L-аланіну (Sigma-Aldrich, Китай), як субстратів та коензимів.

Інші неорганічні сполуки, що застосовувалися в ході експериментів (зокрема пероксид водню, етиловий спирт, тощо), були вітчизняного виробництва та мали ступінь чистоти «х.ч.» і «ч.д.а.».

Схема установки для амперометричних вимірювань

В роботі було використано стандартну триелектродну схему амперометричного аналізу (рис.1). Вона складалась із потенціостату PalmSens (Palm Instruments BV, Нідерланди), що фіксує зміну струму в системі та 8-канального PalmSens multiplexer, що дозволяє одночасно використовувати до 8 робочих електродів. Для роботи обов'язково необхідні 3 електроди: робочий електрод, додатковий платиновий електрод та електрод порівняння (Ag/AgCl). В якості робочого електроду було застосовано дисковий платиновий електрод з площею чутливої ділянки 0,1256 мм². Він був створений за наступним алгоритмом: платиновий дріт діаметром 0,4 мм припаювали до внутрішнього срібного провідника за допомогою сплаву Вуда, з іншої сторони внутрішній провідник припаювали до латунного контакту. Спаяні дроти поміщали в скляний капіляр та запаювали з обох сторін з допомогою газової горілки, а контактна ділянка додаткового герметизувалась епоксидним клеєм. Перед експлуатацією робочу платинову ділянку електроду піддавали механічній обробці: поліруванню з використанням шліфувального па-

перу та суспензії оксиду алюмінію з розмірами частинок 0,3 та 0,05 мкм. Робочий електрод в даній триелектродній системі виступає в якості аноду на якому окиснюється електроактивний пероксид водню утворений в результаті каскадів біохімічних реакцій. Перед безпосереднім нанесенням біоселективного елементу робочу поверхню цього електроду попередньо оброблялась спиртовим розчином. Крім робочого електроду, як вже було згадано, система включала додатковий платиновий електрод з більшою прощеною поверхні, він виступає в якості катода, замикаючи електричне коло. Електрод порівняння (Ag/AgCl) традиційної конструкції мав постійний заряд поверхні та слугував умовною точкою відліку при прикладанні потенціалу.

Методика нанесення додаткової напівпроникної мембрани

З метою покращення селективності біосенсорної системи відносно широкого спектра електроактивних сполук, присутніх у біологічних рідинах людини, поверхні платинових робочих електродів модифікували напівпроникною мембраною на основі полі(метафенілендіаміну) (ПФД). Пориста структура

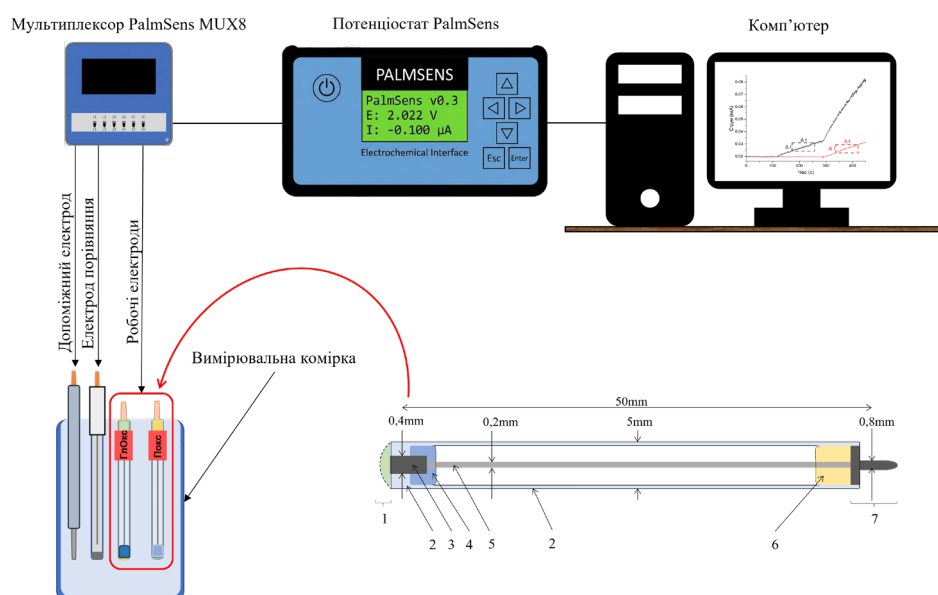


Рис. 1. Схематичне зображення установки для амперометричних вимірювань та амперометричного робочого електроду: 1 – біоселективний елемент; 2 – скляний корпус електроду; 3 – платиновий дріт; 4 – електричне з'єднання з використанням легкоплавкого сплаву; 5 – внутрішній провідник; 6 – епоксидна смола; 7 – контактний майданчик стандартного типу.

ПФД мембрани забезпечує вільну дифузію маленьких молекул типу H_2O_2 при цьому ефективно перешкоджаючи проникненню електроактивних компонентів із більшими молекулярними розмірами. Формування мембрани проводили шляхом електрохімічної полімеризації на попередньо відполірованих та знежирених етанолом електродах. Для цього електроди занурювали у розчин мета-фенілендіаміну концентрацією 8 мМ у 25 мМ буфері HEPES (pH 7,4) та проводили полімеризацію методом циклічної вольтамперометрії у діапазоні потенціалів 0–1 В із кроком 5 мВ, швидкістю сканування 50 мВ/с та початковим потенціалом 0 В. Критерієм завершення процедури слугувало суміщення (повне співпадіння за формою) послідовних циклічних вольтамперограм, що свідчить про стабілізацію процесу формування мембрани. Контроль цілісності сформованої мембрани здійснювали шляхом аналізу впливу електроактивних речовин — аскорбінової кислоти, цистеїну, дофаміну; відсутність аналітичного відгуку на зазначені сполуки підтверджує селективне пропускання мембраною виключно пероксиду водню.

Методика формування біоселективних елементів

Вибір методу іммобілізації здійснювався індивідуально для кожного ензиму з урахуванням його біохімічних особливостей та стабільності. При іммобілізації ГлОкс було застосовано метод ковалентного зшивання за допомогою глутарового альдегіду для формування механічно міцного та стабільного біоселективного шару. Ензимний гель (10% гліцерину, 4% БСА та 8% ГлОкс) змішували з 0,5% водним розчином ГА у співвідношенні 1:2 за об'ємом; на поверхню електрода наносили 0,05 мкл отриманої суміші з подальшим висушуванням на повітрі впродовж 35 хвилин.

Для ПОкс метод ковалентного зшивання з використанням глутарового альдегіду виявився непридатним: у ході попередніх експериментів спостерігалось суттєве зниження ензиматичної активності після іммобілізації, низька відтворюваність відгуків та стабільність, що, імо-

вірно, пов'язано з конформаційними змінами активного центру ензиму під дією хімічного зшиваючого агенту. З огляду на це, для ПОкс було обрано м'якший підхід — включення до фотополімерної матриці PVA-SbQ, який фізично обмежує рухливість молекул ензиму без ковалентної модифікації його структури. Ензимний гель, що містив 10% гліцерину, 5% БСА та 4,86 Од. акт./мкл ПОкс у 25 мМ буфері HEPES (pH 7,4), змішували з розчином PVA-SbQ (19,8% у тому ж буфері) у співвідношенні 1:2 за об'ємом. Отриману суміш об'ємом 0,15 мкл наносили на робочу поверхню електрода та піддавали фотополімеризації під дією УФ-випромінювання (365 нм) до досягнення сумарної випроміненої енергії 2,4 Дж/см².

Перед початком вимірювань створену біосенсорну систему промивали у робочому буфері 2–3 рази тривалістю по 3 хвилини з метою видалення незв'язаних компонентів у біоселективних елементах.

Методика біосенсорного вимірювання активності трансаміназ

Вимірювання проводили у відкритій електрохімічній комірці об'ємом 4 мл за кімнатної температури при постійному перемішуванні. Робочий потенціал +0,6 В відносно електрода порівняння Ag/AgCl, оптимальний для електрохімічного окиснення пероксиду водню на платиновій поверхні, прикладали до робочих електродів. Усі необхідні для протікання ензиматичних реакцій речовини вносили до комірки у вигляді аліквот концентрованих розчинів у визначеній послідовності. На першому етапі вводили субстрати та коензими, що забезпечують функціонування ПОкс-сенсора: калій фосфат, магній нітрат і тіамініпрофосфат (ТПФ). Далі вносили субстрати реакції АСТ/АЛТ — L-аспартат/L-аланін та α -кетоглутарат, після чого очікували стабілізації базової лінії. Після встановлення стабільного базового струму до комірки вносили певні концентрації АСТ/АЛТ, в результаті чого спостерігалось поступове зростання сили струму, що і реєструвалось як відгуки біосенсорної системи. Отримані амперометричні криві візуалізувалися та ана-

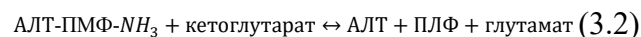
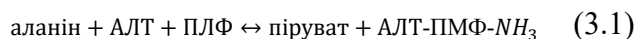
лізувалися за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення PStTrace 5.9. Розрахунків величини відгуку було виконано шляхом вибору лінійної частини сигналу біосенсора, обчислення зміни струму $\Delta I/\Delta t$ (де ΔI – різниця струмів, а Δt – інтервал часу вимірювання) та віднімання базової зміни струму, розрахованої за тією ж формулою. В якості інтервалу часу вимірювання Δt зазвичай брали 60 с. Для визначення невідомих концентрацій АЛТ в аналізованих розчинах використовували методику визначення концентрацій за калібрувальною кривою: лінійна частина раніше отриманої калібрувальної кривої була описана рівнянням лінії ($y = a + b \cdot x$), потім реакція біосенсора на зразок (y) була підставлена в це рівняння, і була розрахована концентрація АСТ та АЛТ (x) в аналізі. Фінальне розведення дослідних проб в робочій комірці складало 1:9 (1 аналіту та 9 буферу). Обробку даних та статистичний аналіз здійснювали за допомогою програми OriginPro 2024. Кожен експеримент відтворювали 3–4 рази; у роботі представлено середні значення отриманих результатів.

Результати і обговорення

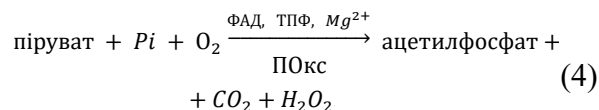
Принцип функціонування біосенсорної системи

Розроблена біосенсорна система призначена не для прямого визначення молекул АСТ та АЛТ, а для опосередкованої оцінки їх ферментативної активності. Принцип її роботи базується на реєстрації динаміки змін концентрацій продуктів реакцій трансамінування — пірувату та глутамату, що утворюються під дією відповідних амінотрансфераз. Надалі ці сполуки взаємодіють із біоселективними елементами біосенсорної системи, де за участю іммобілізованих ензимів послідовно перетворюються з утворенням пероксиду водню. Електрохімічна детекція пероксиду водню забезпечує формування сигналу, інтенсивність якого прямо пропорційна активності АСТ та АЛТ у досліджуваному зразку. Реакція, що каталізується АЛТ, відбувається у дві послідовні стадії за участі піридоксальфосфату (ПЛФ) як коензиму. На першій стадії (3.1) аміногрупа L-аланіну пере-

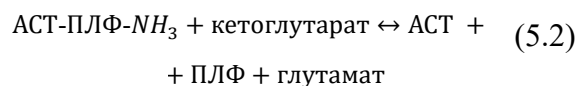
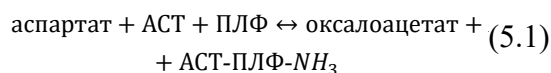
носиться на комплекс ПЛФ-АЛТ з утворенням пірувату та комплексу АЛТ з піридоксамінфосфатом (ПМФ). На другій стадії (3.2) ПМФ-АЛТ взаємодіє з α -кетоглутаратом, передаючи аміногрупу та регенеруючи ПЛФ з одночасним утворенням L-глутамату.



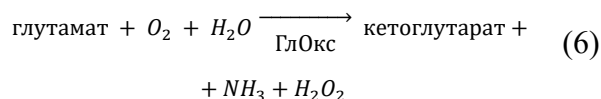
Утворений піруват дифундує до біоселективної мембрани на основі ПОкс, де під дією іммобілізованої піруватоксидази в присутності неорганічного фосфату, Mg^{2+} та кофактора тіамінпірофосфату (ТПФ) відбувається його окиснювальне перетворення. У результаті цієї реакції утворюються ацетилфосфат, CO_2 та пероксид водню (H_2O_2) (4).



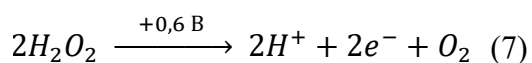
Аналогічний двостадійний механізм характерний і для реакції, що каталізується АСТ. На першій стадії (5.1) аміногрупа L-аспартату переноситься на комплекс ПЛФ-АСТ з утворенням оксалоацетату та комплексу ПМФ-АСТ. На другій стадії (5.2) ПМФ-АСТ реагує з α -кетоглутаратом, вивільняючи L-глутамат та регенеруючи ПЛФ.



Саме глутамат виступає субстратом для ензиму глутаматоксидази, іммобілізованого в мембрані ГлОкс біосенсора. Під час окиснення L-глутамату під дією ГлОкс у присутності молекулярного кисню утворюються α -кетоглутарат, аміак і пероксид водню (6).



Утворені молекули H_2O_2 (реакції 4 та 6) дифундують з біоселективних мембран біосенсорної системи до робочих поверхнь платинових електродів, де за постійного прикладеного потенціалу +0,6 В відносно $Ag/AgCl$ електрода порівняння відбувається їх електрохімічне окиснення (7). Вивільнені під час цієї електрохімічної реакції електрони надходять у електричне коло амперометричної системи, що призводить до зростання сили струму. І вже в залежності від динаміки зміни сили струму, можна визначати активність АСТ та АЛТ в аналізованому розчині та розраховувати коефіцієнт Рітса.



Оптимізація складу робочого буферу для роботи біосенсорної системи

Для досягнення найкращих умов роботи біосенсорної системи необхідним етапом є забезпечення наявності всіх необхідних молекул в розчині, які беруть участь у ензиматичних реакціях як у біоселективних елементах біосенсорної системи, так і в реакціях, що каталізуються трансаміазами у розчині. Зокрема, необхідно було підібрати оптимальні концентрації додаткового субстрату ПОкс (фосфат йонів), коензиму ПОкс (ТПФ), кофактора ПОкс (йони магнію), субстратів трансаміаз (аланін, кетоглутарат, аспартат) та коензиму трансаміаз (ПЛФ).

Обидва ензими, піруватоксидаза і глутаматоксидаза, є ФАД-залежними оксидазами, однак флавінаденіндинуклеотид міцно зв'язаний із білковою молекулою ензимів, тому додаткове внесення цього кофактора до реакційного середовища не є необхідним. Разом з тим, для ефективної роботи ПОкс необхідна присутність додаткових компонентів, зокрема неорганічних фосфатів як субстрату реакції фосфорилування пірувату (4), двовалентного катіону металів (Mg^{2+}) як кофактора, а також тіамініпірофосфату, який виконує роль коензиму. Слід зазначити, що іони магнію та ТПФ не функціонують незалежно: вони утворюють координаційний комплекс Mg^{2+} -ТПФ, який є функціонально активною формою коензиму та

безпосередньо залучений до каталітичного механізму декарбоксилювання пірувату у складі активного центру ПОкс [20]. У ході оптимізації було встановлено оптимальні концентрації цих компонентів у робочому середовищі, що становили 5 мМ для фосфат-іонів, 0,5 мМ для іонів магнію та 2 мМ для тіамініпірофосфату. ГЛОкс завдяки особливостям своєї будови (зазвичай знаходить у формі голоферменту) додаткових кофакторів та коензимів не потребує.

Обидві трансаміази (АЛТ та АСТ) мають подібні каталізовані реакції та третинну структуру. Зокрема, як АЛТ, так і АСТ мають один активний центр, до якого по чергову приєднується два субстрати. Через таку структуру у даних ензимів високою ймовірно конкуренція субстратів за активний центр та субстратне інгібування. Відповідно, для забезпечення максимальної ефективності роботи ензимів в розчині необхідно було підібрати оптимальні концентрації їх субстратів. Для цього окремо було отримано залежності величини відгуків біосенсорної системи від концентрації кожного субстрату. У ході досліджень було встановлено, що для АЛТ-чутливого біоселективного елементу на основі ПОкс оптимальними є концентрації 8 мМ аланіну та 1 мМ α -кетоглутарату, тоді як для АСТ-чутливого біоселективного елементу на основі ГЛОкс — 2,5 мМ аспартату та 1 мМ α -кетоглутарату (Рис. 2).

Далі необхідно було підібрати саме оптимальне співвідношення обох субстратів для кожного біоселективного елементу. У ході досліджень було встановлено, що для детекції АЛТ оптимальними є концентрації 16 мМ аланіну та 2 мМ α -кетоглутарату, тоді як для визначення активності АСТ — 5 мМ аспартату та 2 мМ α -кетоглутарату. Оптимальна концентрація α -кетоглутарату, що є спільним субстратом для обох трансаміаз, збіглась для обох сенсорів і становила 2 мМ, що спростило формування єдиного робочого середовища для одночасного визначення активності обох ензимів.

Також, окремо було досліджено вплив піридоксальфосфату (ПЛФ) — коензиму ре-

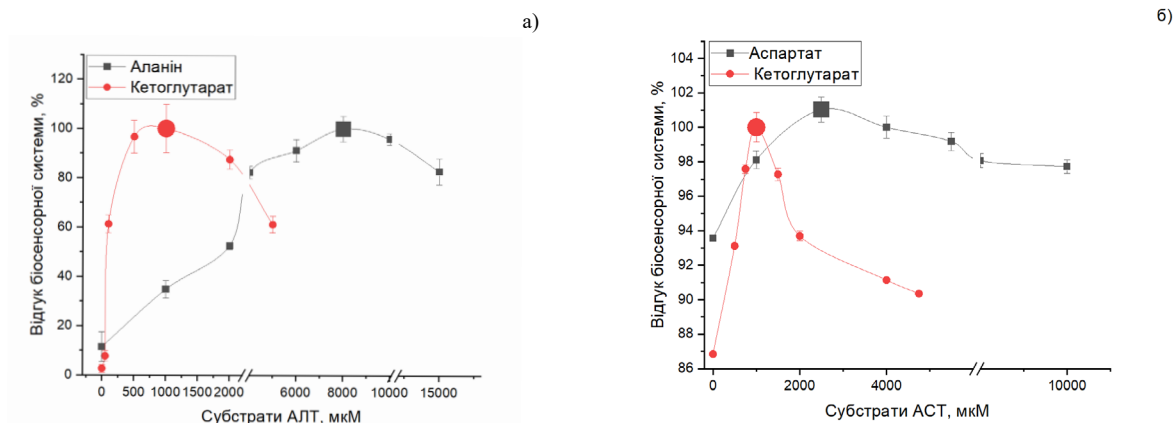


Рис. 2. Підбір оптимальних концентрацій субстратів АЛТ (а) та АСТ (б). Вимірювання проводили в $\text{HEPES } 25 \text{ mM}$ $\text{pH } 7,4$. Активність АЛТ та АСТ- 100 Од.акт./л. Концентрація кетоглутарату при підборі аланіну – 1 mM (а). Концентрація аланіну при підборі кетоглутарату – 8 mM (а).

Концентрація кетоглутарату при підборі аспартату – 1 mM (б). Концентрація аспартату при підборі кетоглутарату – $2,5 \text{ mM}$ (б). Концентрація субстратів ПОкс: калій фосфат – 5 mM , ТПФ – 2 mM , нітрат магнію – $0,5 \text{ mM}$.

акцій трансамінування — на аналітичний відгук кожного елементу біосенсорної системи (Рис. 3). Оптимальні концентрації ПЛФ суттєво відрізнялись для біосенсорного визначення АЛТ та АСТ. Наприклад, 10 мкМ ПЛФ підвищувало чутливість біосенсорної системи до АЛТ на $1,4 \%$, а 100 мкМ ПЛФ підвищувало чутливість ГлОкс-сенсора до АСТ на 11% . При цьому при збільшенні концентрації ПЛФ понад оптимальну спостерігалось зменшення величини відгуку на відповідну трансаміназу,

зокрема, при 100 мкМ ПЛФ спостерігалось падіння величини відгуку на АЛТ на $7,4 \%$. Інгібуючий вплив піридоксальфосфату на визначення активності АЛТ у присутності АСТ може бути зумовлений конкуренцією ензимів за спільні субстрати та коензим, а також зміщенням рівноваги суміжних реакцій трансамінації. Додатково надлишок ПЛФ здатний взаємодіяти з компонентами реакційної суміші, знижуючи доступність субстратів для АЛТ. Настільки значна розбіжність в оптиму-

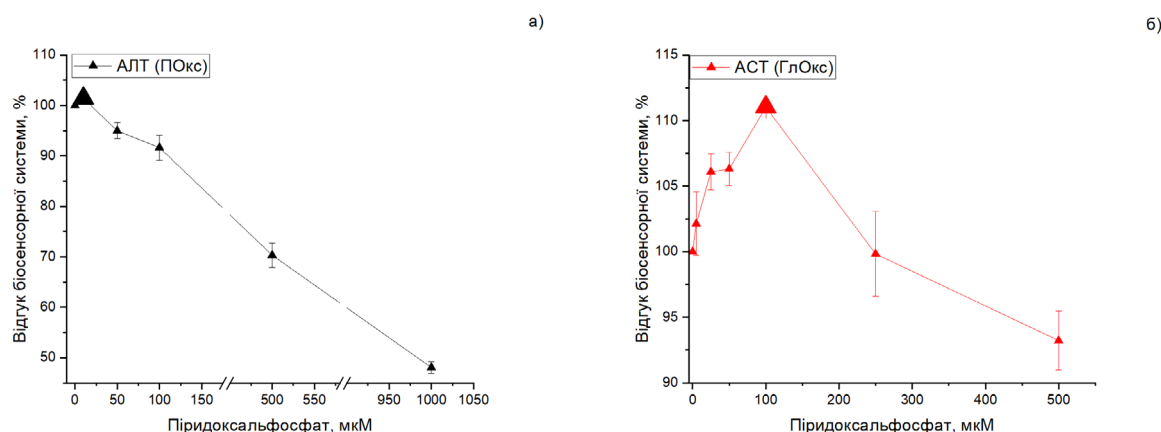


Рис. 3. Вплив піридоксальфосфату на чутливість біосенсорної системи до АЛТ (а) та АСТ (б). Вимірювання проводили в $\text{HEPES } 25 \text{ mM}$, $\text{pH } 7,4$, при концентраціях аланіну – 8 mM , аспартату – $2,5 \text{ mM}$ та кетоглутарату – 1 mM . Активність АЛТ та АСТ – 100 Од.акт./л.

мах унеможлиблювала вибір єдиної робочої концентрації ПЛФ без ризику перехресного пригнічення одного з ензимів. З огляду на це та достатньо незначний вплив ПЛФ на покращення чутливості біосенсорів, було прийнято рішення не використовувати піридоксальфосфат при подальших вимірюваннях.

Перехресний вплив компонентів біосенсорної системи

Оскільки розроблена біосенсорна система функціонує на основі каскаду ензиматичних реакцій із залученням двох ключових ензимів — піруватоксидази (ПОкс) та глутаматоксидази (ГлОкс) — як біоселективних елементів, виникла необхідність у детальній оцінці можливих перехресних взаємодій між окремими компонентами системи. Наявність таких взаємодій могла б суттєво вплинути на специфічність та точність детекції. Тому було проведено серію експериментів, спрямованих на виявлення впливу субстратів, кофакторів, коензимів ензиматичного каскаду та самого біоселективного елементу на роботу іншого біоселективного елементу в складі мультиензимної біосенсорної системи. Зокрема, досліджували, чи чинять біоселективні елементи на основі ПОкс, фосфат іони в концентрації 5 мМ, ТПФ (2 мМ) та йони магнію (0,5 мМ) будь-який вплив на функціонування біоселективного елементу на основі ГлОкс. Встановлено, що ні присутність самого біоселективного елементу на основі ПОкс, ні його субстрати не спричиняють неселективного відгуку та не змінюють характеристики аналізу АСТ. Визначено, що присутність біоселективного елементу на основі ГлОкс в свою чергу також не впливає на роботу біоселективного елементу на основі ПОкс. Крім того, встановлено, що жодний з субстратів трансаміназ (аланін, кетоглутарат, аспартат) у вибраних для подальшої роботи концентраціях не спричиняв неселективного відгуку на робочих електродах.

Однак при дослідженні впливу однієї трансамінази на вимірювання іншої трансамінази було виявлено збільшення відгуку біоселективного елементу на основі ПОкс-сенсора

на АЛТ на ~4% у присутності 100 од.акт./л. АСТ та аспартату. Це явище може бути пов'язане з дифузією кофактора піридоксаль-5-фосфату (ПЛФ) з активного центру АЛТ до активного центру АСТ, що змушує АЛТ циклічно ініціювати першу стадію реакції трансамінування (реакції 1 і 2). Одночасне споживання α -кетоглутарату ензимом АСТ для перетворення аспартату в оксалоацетат призводить до того, що АЛТ постійно перебуває у стані активного продукування пірувату. Така інтенсифікація першої стадії ензиматичного процесу зумовлює локальне підвищення концентрації пірувату біля поверхні перетворювачів, що і спричиняє зростання амперометричного відгуку. Інших впливів при одночасній роботі обох біоселективних елементів в складі єдиної біосенсорної системи не зафіксовано.

Розробка принципу одночасного вимірювання АЛТ та АСТ

Оскільки біоселективний елемент на основі ГлОкс вимірює активність АСТ через концентрацію її субстрату, глутамату, а глутамат продукується в ході обох реакцій як за участю АЛТ, так і АСТ, то при одночасному вимірюванні активностей АЛТ і АСТ виникає проблема з розділенням джерела сигналу. Для вирішення цієї проблеми та проведення одночасного вимірювання активності АЛТ та АСТ в розчині нами було розроблено дві методики біосенсорного аналізу.

Суть першої методики полягала у одночасному внесенні всіх субстратів та коензимів/кофакторів, необхідних для протікання реакції (включно із субстратами АЛТ та АСТ), до робочої комірки з біосенсорною системою та очікування стабілізації базових ліній. Після стабілізації, в аналізоване середовище вносили зразок з сумішшю АЛТ та АСТ. При такому методі ми отримуємо одночасне зростання сили струму на обох елементах системи (Рис. 4а). Як відомо із принципу роботи біоселективних елементів біосенсорної системи, в ході реакції АЛТ також виділяється глутамат, що неселективно залучається в роботу біоселективного елементу на основі ГлОкс і спричиняє

його хибнопозитивний відгук. Відповідно, на біоселективному елементі на основі ПОкс реєструється відгук на АЛТ, а на біоселективному елементі на основі ГлОкс реєструється відгук як на АСТ, так і на АЛТ одночасно. Щоб виділити відгук на саме на АСТ необхідно провести ряд маніпуляцій:

- Для початку необхідно створити **три калібрувальні криві**: калібрувальна крива №1 біоселективного елементу на основі ПОкс на АЛТ та дві калібрувальні криві №2 та №3 біоселективного елементу на основі ГлОкс на АЛТ та АСТ, відповідно.

- Далі необхідно по відгуку біоселективного елементу на основі ПОкс та калібрувальній кривій №1 та розрахувати **активність АЛТ** в розчині.

- Далі за визначеною активністю АЛТ в розчині розрахувати відгук біоселективного елементу на основі ГлОкс на АЛТ.

- Для **нівелювання внеску АЛТ** необхідно від сигналу біоселективного елементу на основі ГлОкс на обидва ензими відняти отриманий відгук АЛТ. Відповідно визначаємо величину відгуку біоселективного елементу на основі ГлОкс саме на АСТ.

- За допомогою калібрувальної кривої №3 розраховуємо активність АСТ в розчині.

Друга методика (Рис. 4б) полягає в послідовному вимірюванні активності АЛТ та АСТ за рахунок контролю присутніх в розчині суб-

стратів. В робочу комірку послідовно вносили субстрати на коензими/кофактори, що необхідні для роботи ПОкс, та субстрати для АСТ, очікували стабілізації базових ліній та вносили зразок з сумішшю АЛТ та АСТ. В результаті спостерігався сигнал тільки біоселективного елементу на основі ГлОкс на АСТ, за яким за допомогою калібрувальної кривої обраховували вміст АСТ. Після отримання відгуку ГлОкс в робочу комірку вносили аланін, необхідний для активації реакції АЛТ, і отримували сигнал біоселективного елементу на основі ПОкс на активність АЛТ. За допомогою отриманого відгуку та попередньо отриманої калібрувальної кривої розраховували вміст АЛТ. Неспецифічне зростання сигналу на біоселективному елементі на основі ГлОкс після внесення аланіну пояснюється зростанням концентрації глутамату при роботі АЛТ, але ці ефекти не впливають на аналіз і нас не цікавлять.

Порівняння даних методик показало, що перший метод (Рис. 4а) з одночасним внесенням всіх субстратів показує на 30% занижені обраховані концентрації трансаміназ. Це може бути пов'язано із великою похибкою внаслідок багатьох математичних маніпуляцій. Натомість другий метод (Рис. 4б) з послідовним внесенням субстратів трансаміназних реакцій показав гарну кореляцію між внесеними та виміряними концентраціями, а також потребував значно менше розрахунків, при цьому забезпечуючи

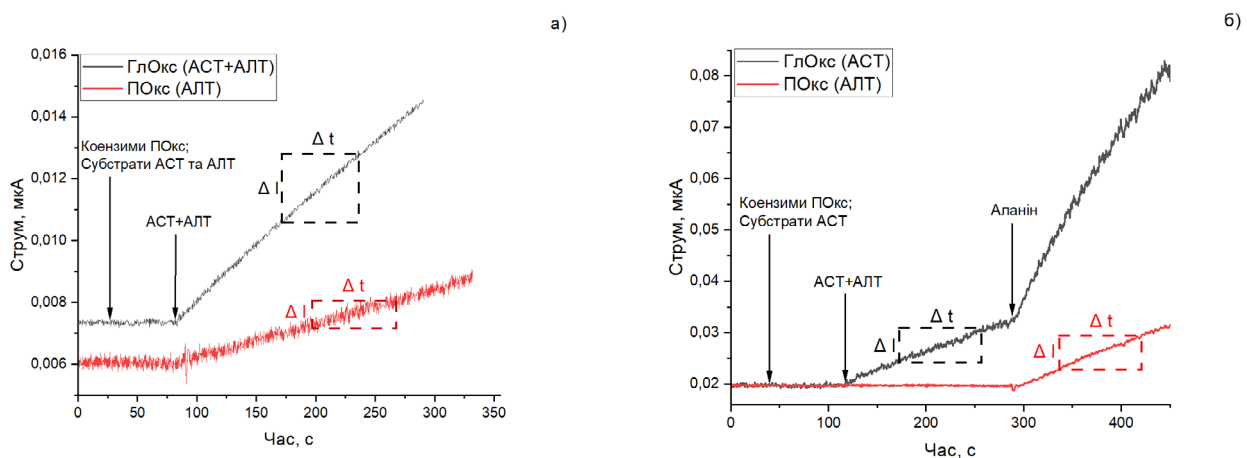


Рис. 4. Реальний вигляд сигналів біосенсорної системи при використанні двох запропонованих методик одночасного вимірювання АЛТ та АСТ в реальних зразках.

повністю селективне визначення як АСТ, так і АЛТ. Відповідно, саме другу методику використовували в подальших дослідженнях.

Вивчення відтворюваності роботи та виготовлення біосенсорної системи

Відтворюваність результатів аналізу є одним із ключових параметрів будь-якої аналітичної системи, оскільки вона визначає надійність та точність отриманих результатів вимірювання. Для оцінки відтворюваності відгуків було проведено серію вимірювань активності трансаміназ протягом одного робочого дня. Для визначення активності АЛТ коефіцієнт відносного стандартного відхилення (RSD) сигналів біосенсорної системи становив 2,9% (Рис. 5а), що свідчить про високу стабільність відгуку під час послідовних вимірювань. Для АСТ аналогічні дослідження показали дещо вищу варіабельність сигналів — RSD близько 8% (Рис. 5б), що все ж залишається в межах прийнятних значень для ензимних біосенсорів.

Додатково було оцінено відтворюваність процедури виготовлення біоселективних елементів на основі ПОкс та ГЛОкс: при тестуванні серії елементів, отриманих за однаковим протоколом, відносне стандартне відхилення їхніх відгуків на 100 Од.акт./л АСТ становило приблизно 14,2% (Рис. 5б), для АЛТ цей параметр сильно не відрізняється – 13,8% (Рис. 5а). Ймовірною причиною такої варіабельності є ручне нанесення біоселективних мембран на

поверхню амперометричних перетворювачів, що може призводити до відмінностей у товщині та однорідності ензимного шару. Отримані результати свідчать про достатньо високу відтворюваність роботи розробленої амперометричної біосенсорної системи для визначення активності АЛТ та АСТ.

Аналітичні характеристики біосенсорної системи

Основні аналітичні характеристики розробленої біосенсорної системи були детально досліджені для оцінки її придатності до визначення активності трансаміназ у біологічних зразках. Для аналізу аналітичних характеристик розробленої системи були отримані калібрувальні криві відгуків до АЛТ та АСТ (Рис. 6). Встановлено, що лінійний діапазон вимірювання для аспартатамінотрансферази (АСТ) становить 1–110 Од. акт./л, тоді як для аланінамінотрансферази (АЛТ) — 1–500 Од. акт./л. Такий діапазон є достатньо широким і охоплює як фізіологічні концентрації цих ензимів у крові (до 30 Од.акт./л для АЛТ та до 32 Од.акт./л для АСТ), так і значно підвищені значення (в літературі описані концентрації трансаміназ понад 300 Од.акт./л, характерні для різних патологічних станів).

Межа детекції біосенсорної системи становила 1 Од. акт./л як для АСТ, так і для АЛТ, що свідчить про високу чутливість розробленого аналітичного підходу та здатність системи

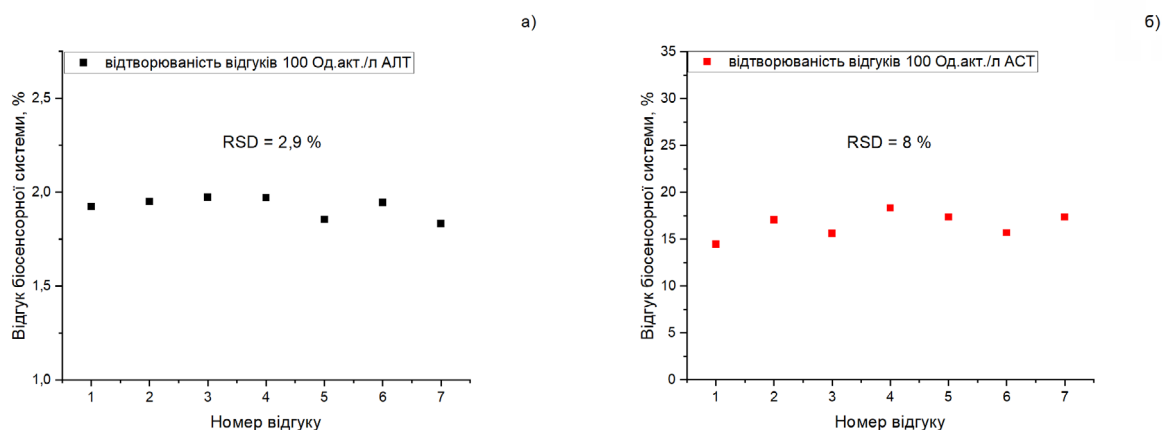


Рис. 5. Вивчення відтворюваності відгуків а) АЛТ-чутливої біосенсорної системи; б) АСТ-чутливої біосенсорної системи.

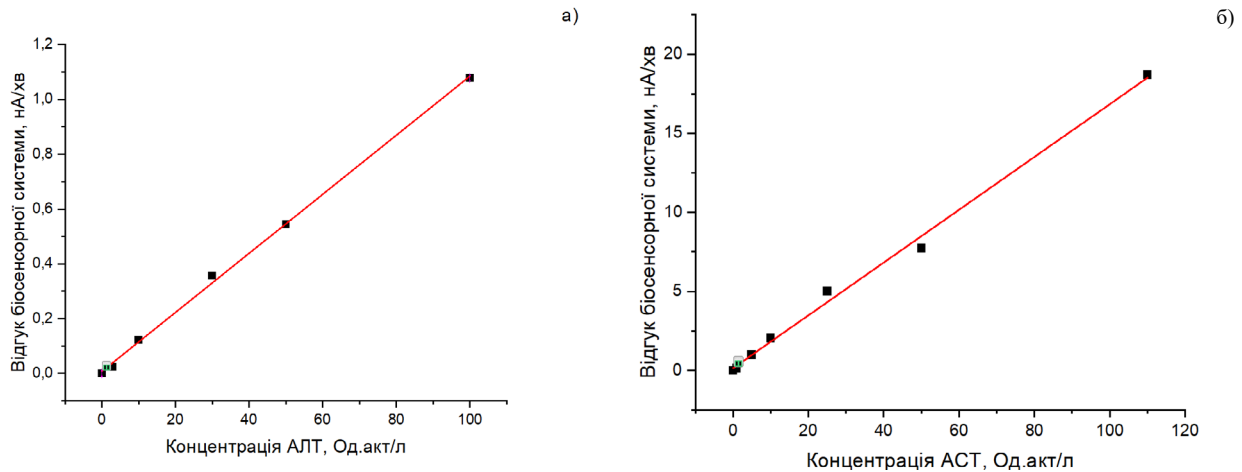


Рис. 6. Калібрувальні криві біосенсорної системи для визначення активності АСТ (а) та АЛТ (б).

реєструвати навіть незначні зміни активності ензимів у досліджуваних зразках. Чутливість розроблених біосенсорів також була визначена експериментально і становила 0,137 нА/хв на 1 Од. акт./л для АСТ та 0,05 нА/хв на 1 Од. акт./л для АЛТ. Отримані характеристики підтверджують принципову можливість біосенсорної системи проводити вимірювання в зразках біологічних рідин (Таблиця 1).

Таблиця 1

Аналітичні характеристики розробленої системи

Аналітичні параметри біосенсорної системи	аналіз активності АЛТ	аналіз активності АСТ
Чутливість, нА/хв на 1 Од. акт./л	0,05	0,137
Лінійний діапазон, Од. акт./л	1–500	1–110
Нижня межа детекції, Од. акт./л	1	1
Час аналізу, хв	7	

Варто зазначити, що на сьогодні електрохімічні системи для одночасного визначення активності АЛТ та АСТ практично відсутні. Водночас у науковій літературі описано значну кількість альтернативних біосенсорних платформ, зокрема оптичних [21, 22] та флуоресцентних [23], паперових (колориметричних) [24, 25], а також хемілюмінесцентних систем [26]. Однак їх практичне застосування часто обмежується низкою суттєвих недоліків, се-

ред яких необхідність використання зовнішніх джерел світла або високоточних спектрофотометрів [21, 22], залежність аналітичного сигналу від прозорості та природного забарвлення аналізованого розчину (що може спричиняти хибні результати за умов ліпемії чи гемолізу) [26, 27], а також складність інтеграції таких систем у компактні портативні пристрої через громіздкість оптичних модулів [24, 25]. На цьому тлі електрохімічні біосенсори відрізняються завдяки високій чутливості при роботі з мінімальними об'ємами проби, відсутності впливу мутності зразка на вихідний сигнал, а також можливості створення недорогих одноразових електродних платформ.

Розроблений нами біосенсор додатково перевершує більшість відомих аналогів, оскільки забезпечує межу виявлення на рівні 1 Од. акт./л (тоді як оптичні системи мають 2,5–3,2 Од. акт./л), характеризується коротким часом відгуку — лише 7 хв (в порівнянні із 15–20 хв для спектрофотометричних методів), та має ширший лінійний діапазон визначення — 1–500 Од. акт./л (для АЛТ) та 1–110 Од. акт./л (для АСТ), тоді як для інших біосенсорних платформ ці показники значно вужчі (наприклад паперові колориметричні тести втрачають лінійність після 100–120 Од. акт./л). Сукупність цих характеристик створює передумови для суттєвого спрощення процедури клінічного моніторингу стану пацієнта.

Висновки

У результаті проведених досліджень розроблено нову амперометричну біосенсорну систему на основі піруватоксидази та глутаматоксидази для одночасного визначення активності АЛТ та АСТ у біологічних рідинах. Формування біоселективних елементів на поверхні робочих електродів залучало різні підходи: піруватоксидазу іммобілізували включенням до фотополімерної матриці PVA-SbQ, тоді як глутаматоксидазу іммобілізували ковалентною поперечною зшивкою глутаровим альдегідом. Додаткова модифікація поверхні платинових робочих електродів напівпроникною полі(мета-фенілендіаміною) мембраною забезпечувала блокування впливу електроактивних інтерферентів та селективність аналізу.

Підбір складу буферного середовища у вигляді визначення оптимальних концентрацій субстратів (фосфат-іони 5 мМ, аланін 16 мМ, аспартат 5 мМ, кетоглутарат 2 мМ) і кофакторів (магній 0,5 мМ, ТПФ 2мМ) гарантував стабільне протікання ензиматичних реакцій та відтворюваність аналітичного сигналу. Спеціально розроблена процедура внесення реагентів та обрахунку відгуків біосенсорної системи дозволила розрізняти між собою відгуки від АЛТ та АСТ, що забезпечило селективне вимірювання вмісту кожної з трансаміназ незважаючи на чутливість біоселективного елементу на основі ГлОкс до обох трансаміназ.

Визначені аналітичні характеристики розробленої біосенсорної системи підтверджують її високу перспективність для діагностики активності АСТ та АЛТ: лінійний діапазон визначення становить 1–500 Од.акт./л для АЛТ та 1–110 Од.акт./л для АСТ, межа детекції — 1 Од.акт./л для обох аналітів, а чутливість — 0,05 та 0,137 нА/хв на 1 Од.акт./л відповідно. Відтворюваність сигналів при безперервній роботі залишається на високому рівні (RSD 2,9% для АЛТ та 8% для АСТ), а відтворюваність процедури виготовлення сенсорів (~14% для обох трансаміназ) підтверджує практичну придатність розробленої системи.

На відміну від всіх відомих на сьогодні біосенсорних систем для детекції АЛТ або АСТ принциповою перевагою запропонованої системи є можливість селективної детекції вмісту АСТ та АЛТ у рамках одного вимірювання, що суттєво підвищує ефективність аналізу та скорочує час визначення активності трансаміназ, що робить розроблену систему перспективною для застосування у клінічній діагностиці захворювань печінки та серця.

Подяки

Робота виконана в рамках бюджетної програми КПКВК 6541230 (договір № 9/2-26) «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок». Також робота частково виконана за фінансової підтримки фундації Саймонс (проект SFI-PD-Ukraine-00017453).

Список використаної літератури

- [1]. Moriles K, Zubair M, Azer S. Alanine aminotransferase (ALT) test. StatPearls. 2024 Feb 27.
- [2]. Toney MD. Aspartate aminotransferase: an old dog teaches new tricks. Archives of biochemistry and biophysics. 2014 Feb 15;544:119-27. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2013.10.002>
- [3]. Sookoian S, Pirola CJ. Alanine and aspartate aminotransferase and glutamine-cycling pathway: their roles in pathogenesis of metabolic syndrome. World journal of gastroenterology: WJG. 2012 Aug 7;18(29):3775. <http://dx.doi.org/10.3748/wjg.v18.i29.3775>
- [4]. Pratt DS. Liver chemistry and function tests. Sleisenger and Fordtran's Gastrointestinal and Liver Disease. 9th ed. Philadelphia, Pa: Saunders Elsevier. 2010 Jan 1. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4160-6189-2.00073-1>
- [5]. Valenti L, Pelusi S, Bianco C, Ceriotti F, Berzuini A, Prat LI, Trotti R, Malvestiti F, D'Ambrosio R, Lampertico P, Colli A. Definition of healthy ranges for alanine aminotransferase levels: a 2021 update. Hepatology

- communications. 2021 Nov 1;5(11):1824-32. <https://doi.org/10.1002/hep4.1794>
- [6]. Ceriotti F, Henny J, Queraltó J, Ziyu S, Özarda Y, Chen B, Boyd JC, Panteghini M. Common reference intervals for aspartate aminotransferase (AST), alanine aminotransferase (ALT) and γ -glutamyl transferase (GGT) in serum: results from an IFCC multicenter study. *Clinical chemistry and laboratory medicine*. 2010 Nov 1;48(11):1593-601. <https://doi.org/10.1515/CCLM.2010.315>
- [7]. Sheth SG, Flamm SL, Gordon FD, Chopra S. AST/ALT ratio predicts cirrhosis in patients with chronic hepatitis C virus infection. *Official journal of the American College of Gastroenterology | ACG*. 1998 Jan 1;93(1):44-8. https://doi.org/10.1111/j.1572-0241.1998.044_c.x
- [8]. Ndrepepa G. Aspartate aminotransferase and cardiovascular disease—a narrative review. *Journal of Laboratory and Precision Medicine*. 2021 Jan 30;6. <https://doi.org/10.21037/jlpm-20-93>
- [9]. Li J, Zhao Z, Jiang H, Jiang M, Yu G, Li X. Predictive value of elevated alanine aminotransferase for in-hospital mortality in patients with acute myocardial infarction. *BMC cardiovascular disorders*. 2021 Feb 9;21(1):82. <https://doi.org/10.1186/s12872-021-01903-z>
- [10]. Shen J, Zhang J, Wen J, Ming Q, Zhang J, Xu Y. Correlation of serum alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase with coronary heart disease. *International journal of clinical and experimental medicine*. 2015 Mar 15;8(3):4399. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26064360/>
- [11]. Ndrepepa G, Cassese S, Scalamogna M, Lahu S, Aytekin A, Xhepa E, Schunkert H, Kastrati A. Association of De Ritis ratio with prognosis in patients with coronary artery disease and aminotransferase activity within and outside the healthy values of reference range. *Journal of Clinical Medicine*. 2023 Apr 28;12(9):3174. <https://doi.org/10.3390/jcm12093174>
- [12]. Huang XJ, Choi YK, Im HS, Yarimaga O, Yoon E, Kim HS. Aspartate aminotransferase (AST/GOT) and alanine aminotransferase (ALT/GPT) detection techniques. *Sensors*. 2006 Jul 31;6(7):756-82. <https://doi.org/10.3390/s6070756>
- [13]. Hartmann P, Schnabl B. Inexpensive, accurate, and stable method to quantitate blood alanine aminotransferase (ALT) levels. *Methods and Protocols*. 2022 Oct 14;5(5):81. <https://doi.org/10.3390/mps5050081>
- [14]. Li T, Yuan J, Yin J, Zhang Z, Wang E. Capillary electrophoresis with electrochemiluminescence detection for measurement of aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase activities in biofluids. *Journal of Chromatography A*. 2006 Nov 17;1134(1-2):311-6. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.08.088>
- [15]. Bergmeyer HU, Scheibe P, Wahlefeld AW. Optimization of methods for aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase. *Clinical chemistry*. 1978 Jan 1;24(1):58-73. <https://doi.org/10.1093/clinchem/24.1.58>
- [16]. Schumann G, Canalias F, Joergensen PJ, Kang D, Lessinger JM, Klauke R. IFCC reference procedures for measurement of the catalytic concentrations of enzymes: corrigendum, notes and useful advice. *Clinical Chemistry & Laboratory Medicine*. 2010 May 1;48(5). <https://doi.org/10.1515/cclm.2010.137>
- [17]. Yadav S, Jangra R, Sharma BR, Sharma M. Current advancement in biosensing techniques for determination of alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase—a mini review. *Process Biochemistry*. 2022 Mar 1;114:71-6. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.01.010>
- [18]. Mruqa D, Berketa K, Sverstiuk A, Martsenyuk V, Klos-Witkowska A, Palianytsia Y, Dzyadevych S, Soldatkin O. Amperometric biosensor based on glutamate oxidase to determine ast activity. *Sensors*. 2024 Dec 10;24(24):7891. <https://doi.org/10.3390/s24247891>
- [19]. Thuy TN, Tseng TT. A micro-platinum wire biosensor for fast and selective detection of alanine aminotransferase. *Sensors*. 2016 May 26;16(6):767. <https://doi.org/10.3390/s16060767>
- [20]. Blake 2nd R, O'Brien TA, Gennis RB, Hager LP. Role of the divalent metal cation in the pyruvate oxidase reaction. *Journal of Biological*

Chemistry. 1982 Aug 25;257(16):9605-11. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)34115-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)34115-2)

[21]. Zhang P, Chen H, Li L, Liu H, Liu G, Zhang L, Zhang D, Jiang L. Bioinspired smart peristome surface for temperature-controlled unidirectional water spreading. *ACS applied materials & interfaces*. 2017 Feb 15;9(6):5645-52. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b15802>

[22]. Xu P, Chen B, Xue L, Zhang J, Zhu L. A prediction-based spatial-spectral adaptive hyperspectral compressive sensing algorithm. *Sensors*. 2018 Sep 30;18(10):3289. <https://doi.org/10.3390/s18103289>

[23]. Huang XJ, Choi YK, Im HS, Yarimaga O, Yoon E, Kim HS. Aspartate aminotransferase (AST/GOT) and alanine aminotransferase (ALT/GPT) detection techniques. *Sensors*. 2006 Jul 31;6(7):756-82. <https://doi.org/10.3390/s6070756>

[24]. Baek SH, Park C, Jeon J, Park S. Three-dimensional paper-based microfluidic analysis device for simultaneous detection of multiple

biomarkers with a smartphone. *Biosensors*. 2020 Nov 21;10(11):187. <https://doi.org/10.3390/bios10110187>

[25]. Ingole N, Palekar S, Kulkarni MB, Kalambe J, Khandelwal R. Smartphone-integrated portable microfluidic platform for liver biomarker quantification using deep learning. *Scientific Reports*. 2025 Nov 21. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29431-2>

[26]. Montes R, García-López M, Rodríguez I, Cela R. Mixed-mode solid-phase extraction followed by acetylation and gas chromatography mass spectrometry for the reliable determination of trans-resveratrol in wine samples. *Analytica chimica acta*. 2010 Jul 12;673(1):47-53. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.05.021>

[27]. Mears E. Outcomes of continuous process improvement of a nutritional care program incorporating TTR measurement. <https://doi.org/10.1515/CCLM.2002.234>

Стаття надійшла до редакції: 04.05.2026

прийнята до друку: 23.05.2026

опублікована: 30.06.2026

PACS: 543.533, 577.15, 543.06, 616.1

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.365142>

DEVELOPMENT OF A MULTIENZYME BIOSENSOR SYSTEM FOR SIMULTANEOUS DETERMINATION OF ALANINE AMINOTRANSFERASE AND ASPARTATE AMINOTRANSFERASE ACTIVITY

D. O. Mruga¹, Y. R. Vakhovskyi^{1,2}, S. V. Dzyadevych^{1,2}, O. O. Soldatkin^{1,3}

¹ Institute of Molecular Biology and Genetics, NAS of Ukraine,
150, Akademika Zabolotnoho St, Kyiv, 03680, Ukraine

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska St, Kyiv, 01601, Ukraine

³ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
37, Beresteyskyi Ave, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: darynamruga@gmail.com; genyru93@gmail.com; dzyad@yahoo.com;
alex_sold@yahoo.com

Abstract. This paper presents the development of an amperometric biosensor system for the simultaneous determination of alanine aminotransferase (ALT) and aspartate aminotransferase (AST) activity in biological fluids. The system consists of two enzymatic biosensors: a pyruvate oxidase-based sensor for determining ALT and a glutamate oxidase-based sensor for determining AST. The operating principle of the proposed system is based on a cascade of reactions. First, ALT and AST induce transamination to form pyruvate and glutamate. Next, they are oxidized by pyruvate oxidase

and glutamate oxidase, respectively, to hydrogen peroxide. Then, the decomposition of hydrogen peroxide is recorded amperometrically at a platinum electrode at a potential of +0.6 V relative to Ag/AgCl. Pyruvate oxidase was immobilized by incorporation into a PVA-SbQ photopolymer matrix, and glutamate oxidase by covalent cross-linking with glutaraldehyde. To increase selectivity, the surface of the platinum electrode was modified with a poly(meta-phenylenediamine) membrane. The linear range of the developed biosensor system is 1–500 U/L for ALT and 1–110 U/L for AST, with a detection limit of 1 U/L for both enzymes. The system's sensitivity is 0.05 nA/min and 0.137 nA/min per 1 U/L of ALT and AST, respectively. The repeatability error of responses during operation is RSD = 2.9% (ALT) and 14.1% (AST). The study demonstrates that the proposed biosensor system allows for the determination of the activity of both analytes in a single biological sample, making it promising for portable clinical diagnostics, specifically for the rapid, selective determination of transaminase activity in biological fluids.

Keywords: biosensor system, amperometry, simultaneous determination of transaminases, non-invasive diagnostics, kinetics, dynamic changes, non-invasive diagnostics, enzymes, binding

PACS: 07.05.Tp, 07.07.Df

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.365143>

МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ КОМПЛЕКСІВ МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

В. Босий, <https://orcid.org/0009-0000-6169-1800>

Національний університет «Одеська політехніка»
просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна
e-mail: valiko@dineva.net

Анотація. У статті розглянуто моделі прогнозування надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем на основі моніторингу технічного стану. Запропоновано математичну модель функції надійності з урахуванням інтенсивності відмов та деградації сенсорних модулів. Розроблено алгоритм прогнозування часу до відмови, представлений у вигляді блок-схеми, а також визначено ключові параметри для моніторингу технічного стану системи. Проведено експериментальне дослідження з оцінки ефективності різних моделей прогнозування та отримано графіки деградації системи. Результати показують високу точність запропонованих методів і їх практичну застосовність у системах Інтернету речей, безпілотних платформах, екологічному моніторингу та військових сенсорних мережах.

Ключові слова: надійність систем, мобільні сенсорні системи, прогнозування відмов, моніторинг технічного стану, алгоритми прогнозування, деградація компонентів, математична модель, блок-схема, експериментальне дослідження

1. Вступ

Стрімкий розвиток цифрових технологій, мережевих комунікацій та вбудованих обчислювальних систем зумовив широке впровадження мобільних сенсорних систем у різних сферах суспільної діяльності. Такі системи активно використовуються для екологічного моніторингу, у системах спостереження та безпеки, безпілотних платформах, мережах Інтернету речей, а також у інтелектуальних інфраструктурах концепції «розумного міста». Завдяки здатності здійснювати збір, оброблення та передачу даних у реальному часі мобільні сенсорні системи забезпечують ефективне функціонування розподілених інформаційно-аналітичних середовищ і підтримку прийняття управлінських рішень у складних динамічних умовах.

Водночас підвищення складності програмно-апаратних комплексів, зростання об-

сягів оброблюваних даних та необхідність роботи в автономному режимі суттєво підвищують вимоги до їхньої надійності. Мобільні сенсорні системи часто функціонують у середовищах із підвищеним рівнем невизначеності, де на роботу обладнання впливають зовнішні фактори, зокрема температурні коливання, вібраційні навантаження, нестабільність енергопостачання та обмеженість обчислювальних ресурсів. За таких умов навіть незначні зміни параметрів технічного стану компонентів можуть призводити до деградації характеристик системи або до повної відмови її окремих елементів. Це, у свою чергу, може спричиняти втрату даних, зниження точності вимірювань або порушення функціонування інформаційної інфраструктури.

У зв'язку з цим особливого значення набуває завдання раннього виявлення потенційних відмов та прогнозування подальшого техніч-

ного стану програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем. На відміну від традиційних підходів до оцінювання надійності, що ґрунтуються переважно на статистичних характеристиках відмов та експлуатаційних показниках, сучасні системи технічного моніторингу забезпечують можливість отримання великої кількості діагностичних параметрів у режимі реального часу. Аналіз таких даних створює передумови для розроблення більш точних моделей прогнозування, які враховують поточний технічний стан системи та динаміку зміни її параметрів.

Питання прогнозування надійності електронних та сенсорних систем розглядаються у численних наукових дослідженнях. У сучасній літературі представлено різні підходи до оцінювання та прогнозування відмов, зокрема статистичні моделі надійності, імовірнісні та стохастичні моделі деградації, а також методи, що базуються на використанні алгоритмів машинного навчання. Проте більшість існуючих рішень орієнтовані на аналіз історичних даних відмов і недостатньо враховують оперативні параметри технічного стану системи. Крім того, значна частина моделей не адаптована до умов функціонування мобільних сенсорних систем, де характерною є обмеженість ресурсів та необхідність оброблення інформації у реальному часі.

Таким чином, актуальним науковим завданням є розроблення моделей прогнозування надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем, що базуються на використанні даних моніторингу технічного стану та дозволяють оцінювати ймовірність відмови та залишковий ресурс системи на ранніх етапах деградації.

Метою статті є розроблення та дослідження моделей прогнозування надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем на основі аналізу параметрів їхнього технічного стану, отриманих у процесі моніторингу функціонування системи.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі основні завдання:

- проаналізувати сучасні методи оцінювання та прогнозування надійності сенсорних і програмно-апаратних систем;
- визначити сукупність параметрів, що характеризують технічний стан мобільних сенсорних систем;
- розробити математичні моделі прогнозування надійності на основі даних моніторингу;
- провести експериментальну перевірку запропонованих моделей та оцінити їхню ефективність у задачах прогнозування відмов.

Отримані результати можуть бути використані для підвищення надійності функціонування мобільних сенсорних систем, оптимізації процесів технічного обслуговування та забезпечення безперервності роботи інформаційно-аналітичних платформ, що базуються на мережах сенсорних пристроїв.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку підходів до прогнозування надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем шляхом використання даних моніторингу технічного стану та інтеграції діагностичних параметрів у математичні моделі оцінювання деградаційних процесів. Основні результати, що визначають новизну проведеного дослідження, можуть бути сформульовані таким чином.

По-перше, **удосконалено підхід до прогнозування надійності мобільних сенсорних систем**, який, на відміну від традиційних статистичних моделей оцінювання відмов, базується на використанні поточних параметрів технічного стану програмно-апаратного комплексу. У запропонованому підході інформація, отримана під час моніторингу функціонування системи, використовується для формування динамічної оцінки її працездатності. Це дозволяє враховувати зміни експлуатаційних характеристик у реальному часі, підвищувати точність прогнозування відмов та забезпечувати більш своєчасне виявлення ознак деградації компонентів системи.

По-друге, **запропоновано математичну модель оцінювання деградації програмно-**

апаратного комплексу мобільної сенсорної системи, що ґрунтується на формуванні інтегрального показника технічного стану. Такий показник визначається на основі сукупності діагностичних параметрів, які характеризують роботу основних елементів системи, зокрема параметрів енергоспоживання, температурного режиму, навантаження обчислювальних модулів, характеристик сенсорних сигналів та показників передачі даних. Запропонована модель дозволяє оцінювати ступінь деградації системи з урахуванням впливу декількох факторів одночасно та встановлювати критичні рівні зміни параметрів, що передують виникненню відмов.

Крім того, **розроблено модель прогнозування залишкового ресурсу мобільної сенсорної системи**, яка забезпечує можливість оцінювання часу до досягнення критичного стану системи. На основі аналізу динаміки зміни параметрів технічного стану та швидкості деградаційних процесів визначається прогнозований період безвідмовного функціонування програмно-апаратного комплексу. Використання такої моделі дозволяє не лише оцінити ймовірність виникнення відмови, а й завчасно планувати технічне обслуговування або модернізацію компонентів системи.

Також, **набув подальшого розвитку підхід до використання систем моніторингу технічного стану для підвищення надійності мобільних сенсорних систем**, що передбачає інтеграцію процесів діагностики, аналізу параметрів функціонування та прогнозування відмов у межах єдиної інформаційно-аналітичної моделі. Такий підхід забезпечує комплексне використання даних, отриманих від сенсорних та обчислювальних модулів системи, для формування адаптивних моделей оцінювання надійності. Це створює передумови для підвищення ефективності управління функціонуванням мобільних сенсорних систем у складних умовах експлуатації.

2. Аналіз сучасних досліджень і підходів

Проблема забезпечення надійності електронних та сенсорних систем привертає значну

увагу науковців у галузі інформаційних технологій, електроніки та системної інженерії. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється розробленню моделей оцінювання та прогнозування відмов складних технічних систем, що функціонують у динамічних умовах експлуатації. Особливого значення ця проблема набуває для мобільних сенсорних систем, які поєднують у собі апаратні та програмні компоненти, працюють у розподіленому середовищі та характеризуються обмеженими ресурсами енергоживлення і обчислювальної потужності.

У науковій літературі представлено значну кількість робіт, присвячених дослідженню моделей надійності електронних та сенсорних систем [1, 3, 15]. Такі моделі використовуються для оцінювання ймовірності безвідмовної роботи технічних систем, визначення інтенсивності відмов та аналізу впливу експлуатаційних факторів на зміну їхніх характеристик [1, 4]. Значна частина досліджень базується на класичних підходах до аналізу надійності, у межах яких система розглядається як сукупність взаємопов'язаних компонентів із певними статистичними характеристиками відмов [14]. При цьому аналіз надійності здійснюється на основі історичних даних експлуатації або результатів випробувань [1, 15].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із розробленням методів прогнозування відмов, що дозволяють оцінювати технічний стан системи та передбачати можливі відмови на ранніх етапах їхнього виникнення [6, 13]. Для розв'язання таких задач застосовуються статистичні та імовірнісні методи аналізу, а також моделі деградації технічних елементів [14]. У межах цих підходів досліджуються закономірності зміни параметрів системи з часом, що дозволяє оцінювати її залишковий ресурс та прогнозувати момент досягнення критичного стану [6].

Важливу роль у сучасних дослідженнях відіграють системи моніторингу технічного стану, які забезпечують безперервний збір та аналіз параметрів функціонування програмно-апаратних комплексів [9, 13]. Використання

таких систем дозволяє отримувати детальну інформацію про роботу окремих компонентів, зокрема параметри енергоспоживання, температурні режими, рівень навантаження, обчислювальних модулів та характеристики передавання даних [7]. Аналіз цих параметрів створює можливості для побудови більш точних моделей оцінювання надійності та прогнозування відмов [9].

Серед існуючих підходів до прогнозування надійності технічних систем можна виділити кілька основних груп моделей. Статистичні моделі надійності базуються на аналізі емпіричних даних про відмови системи та дозволяють оцінювати ймовірність безвідмовної роботи на основі статистичних закономірностей [1, 15]. Такі моделі широко використовуються у класичній теорії надійності, однак їх застосування обмежується необхідністю наявності значних обсягів експлуатаційних даних [4].

Іншу групу становлять імовірнісні моделі, які описують процеси виникнення відмов як випадкові події, що характеризуються певними законами розподілу [14]. У межах цього підходу широко застосовуються стохастичні процеси, моделі марковських систем та інші математичні методи аналізу випадкових процесів [14]. Такі моделі дозволяють враховувати вплив випадкових факторів на функціонування системи, проте їх практичне використання часто пов'язане зі значною складністю побудови та ідентифікації параметрів [4].

Окремий напрям становлять моделі деградації, які описують поступове погіршення технічного стану системи або її окремих компонентів у процесі експлуатації [6, 13]. У таких моделях ключову роль відіграє аналіз зміни параметрів, що характеризують працездатність елементів системи, та визначення критичних значень цих параметрів [6]. Моделі деградації дозволяють оцінювати залишковий ресурс системи, однак їх точність значною мірою залежить від коректності вибору параметрів, що описують технічний стан [13].

У сучасних дослідженнях також активно застосовуються методи машинного навчання, які використовуються для аналізу вели-

ких масивів даних моніторингу та побудови прогнозних моделей [2, 11, 12]. Такі підходи дозволяють виявляти складні залежності між параметрами функціонування системи та ймовірністю виникнення відмов [2]. Разом з тим використання алгоритмів машинного навчання потребує значних обчислювальних ресурсів і великих навчальних вибірок, що може ускладнювати їх застосування у мобільних сенсорних системах із обмеженими ресурсами [11].

Незважаючи на значну кількість проведених досліджень, існуючі підходи до прогнозування надійності мають певні обмеження. Зокрема, більшість моделей обмежено враховує динамічні параметри технічного стану, що змінюються у процесі експлуатації системи [8]. Крім того, значна частина моделей характеризується недостатньою адаптивністю до умов функціонування мобільних сенсорних систем, де параметри роботи можуть змінюватися під впливом зовнішніх факторів [5]. Ще однією проблемою є складність інтеграції окремих моделей у реальні програмно-апаратні комплекси, що пов'язано з обмеженнями обчислювальних ресурсів, енергоспоживання та необхідністю оброблення даних у реальному часі [7].

Таким чином, результати аналізу сучасних досліджень свідчать про доцільність розроблення нових моделей прогнозування надійності мобільних сенсорних систем, які б поєднували використання даних моніторингу технічного стану з математичними методами оцінювання деградаційних процесів та дозволяли підвищити точність прогнозування відмов у складних умовах експлуатації.

У сучасних дослідженнях великої уваги набувають проблеми надійності мобільних та безпроводних сенсорних систем, а також методи прогнозування технічного стану та залишкового ресурсу компонентів. Розглянемо ключові роботи, що стосуються цієї тематики. Silva, Guedes, Portugal та Vasques [1] проаналізували надійність та доступність безпроводних сенсорних мереж у промислових застосуваннях. Вони запропонували підхід до оцінки відмов компонентів та системних показників,

що дозволяє підвищити стійкість WSN до технічних збоїв.

Saeed, Jan, Lee та Koo [2] розробили алгоритм діагностики відмов на основі екстремально випадкових дерев для WSN. Цей підхід дозволяє виявляти відмови сенсорів і вузлів у режимі реального часу, що підвищує точність прогнозування технічного стану.

Yang, Chen, Huo та Liu [3] запропонували кластерну модель надійності WSN із використанням алгоритму очікування-максимізації. Модель дозволяє аналізувати ймовірність відмов вузлів у кластері та оцінювати надійність мережі в цілому.

Wang, Tian, He, Zhang та Yang [4] розглянули вплив випадковості пропускну здатності каналу та енергоспоживання на надійність передачі даних у WSN. Результати дослідження дають змогу враховувати не лише фізичні, але й енергетичні обмеження при прогнозуванні відмов.

Han, Yu, Wang, Yan, Huo та Li [5] застосували правила доказового мислення з динамічною надійністю для оцінки продуктивності WSN. Такий підхід дозволяє інтегрувати різні дані про стан вузлів та отримати більш точну оцінку загальної працездатності мережі.

Li, Feng, He, Qi та Guo [6] запропонували модель прогнозування стану WSN на основі belief rule base із врахуванням надійності атрибутів сенсорів. Модель показала високу точність прогнозування деградації вузлів, що важливо для планування обслуговування систем.

Diachenko [7] розглянув інтелектуальні методи енергозбереження у безпроводних сенсорних мережах. Використання алгоритмів оптимізації дозволяє подовжити ресурс роботи мережі і підвищити надійність функціонування.

Дівіцький [8] представив інтелектуальну підсистему прогнозування змін у мобільних радіомережах, що інтегрує алгоритми аналізу сигналів і технічного стану для прогнозування залишкового ресурсу вузлів.

Petrivskyi, Shevchenko, Bychkov та Sinitsyn [9] запропонували інформаційні технології забезпечення живучості сенсорних мереж, які

дозволяють підвищити надійність системи навіть у складних умовах зовнішніх впливів.

Nesterenko, Tishin, Shtilman, Martynyuk та Mileiko [10] розробили нечіткі моделі сенсорних компонентів WSN, що дозволяє враховувати невизначеність і варіативність параметрів сенсорів у прогнозуванні надійності систем.

Luo та Nagarajan [11] запропонували розподілену аномалійно-детекційну систему на основі автоенкодерних нейронних мереж для WSN в IoT. Метод дозволяє автоматично виявляти відхилення в роботі сенсорів та прогнозувати відмови.

Wang, Yang, Chen, Wang, Wang та Yang [12] використали глибоке навчання для сліпої калібровки дрейфу сенсорів у WSN. Пропонований метод підвищує точність сенсорних вимірювань і дозволяє ефективно прогнозувати деградацію вузлів без прямого доступу до еталонних даних.

Shang та Zhang [13] розглянули використання динамічних баєсових мереж та дерев відмов для прогнозування залишкового ресурсу WSN. Ця методика інтегрує інформацію з різних джерел і дає ймовірнісну оцінку стану мережі, що корисно для condition-based maintenance.

Kumar, Jadhav та Alsalamy [14] провели аналіз надійності та чутливості WSN із використанням марківського процесу безперервного часу, що дозволяє оцінювати ймовірність відмов при різних сценаріях навантажень і енергетичних умов.

Catelani, Ciani, Bartolini, Del Rio, Guidi та Patrizi [15] виконали аналіз надійності WSN для smart farming, підкреслюючи важливість точного прогнозування деградації вузлів для підтримки стабільного збору даних у реальних умовах.

Аналіз наукових робіт показує, що ключовими тенденціями розвитку прогнозування надійності сенсорних мереж є:

- Використання математичних і стохастичних моделей (Марковські процеси, динамічні баєсові мережі) для оцінки відмов.

- Інтеграція алгоритмів машинного навчання та глибоких нейронних мереж для детекції аномалій та калібровки дрейфу сенсорів.
- Використання інтелектуальних систем та нечітких моделей для підвищення точності прогнозування та врахування невизначеностей.
- Необхідність врахування енергетичних та фізичних обмежень компонентів при плануванні обслуговування та прогнозуванні залишкового ресурсу.

3. Архітектура програмно-апаратного комплексу мобільної сенсорної системи

Ефективність функціонування мобільних сенсорних систем значною мірою залежить від архітектури їх програмно-апаратного комплексу. Такі системи призначені для збору, передачі та обробки даних у режимі реального часу, тому їх структура повинна забезпечувати безперервність роботи, енергоефективність, масштабованість та високу надійність. Особливо важливим є забезпечення можливості моніторингу технічного стану компонентів системи, що дозволяє застосовувати моделі прогнозування надійності та своєчасно виявляти потенційні відмови.

Загальна архітектура програмно-апаратного комплексу мобільної сенсорної системи наведена на рисунку 1.

Програмно-апаратний комплекс мобільної сенсорної системи включає кілька ключових компонентів: сенсорні модулі, обчислювальний блок, модулі передачі даних та джерела живлення. Їх взаємодія формує єдину систему збору та обробки інформації.

Сенсорні модулі є основними елементами, що здійснюють вимірювання параметрів зовнішнього середовища або стану технічних

об'єктів. До таких параметрів можуть належати температура, вологість, тиск, прискорення, рівень освітленості, концентрація газів або інші фізичні величини. Сучасні сенсорні модулі часто поєднують декілька датчиків у одному пристрої, що дозволяє реалізувати багатоканальний збір даних. Важливими характеристиками сенсорних модулів є точність вимірювань, стабільність параметрів, енергоспоживання та стійкість до впливу зовнішніх факторів.

Обчислювальний блок виконує функції обробки та попереднього аналізу даних, отриманих від сенсорів. У більшості випадків він реалізується на основі мікроконтролерів або одноплатних комп'ютерів. До його основних задач належать фільтрація шумів, нормалізація сигналів, агрегування даних та підготовка інформації до передачі. Крім того, обчислювальний блок може виконувати функції локальної аналітики та реалізовувати алгоритми моніторингу технічного стану системи.

Модулі передачі даних забезпечують комунікацію між сенсорною системою та зовнішніми інформаційними системами або центрами обробки даних. Для цього можуть використовуватися різні технології бездротового зв'язку, зокрема Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa або мобільні мережі. Вибір технології залежить від вимог до швидкості передачі даних, енергоспоживання, дальності зв'язку та умов експлуатації системи.

Джерела живлення забезпечують автономність роботи мобільної сенсорної системи. У більшості випадків використовуються акумуляторні батареї або комбіновані системи живлення, що можуть включати елементи енергозбору (energy harvesting), наприклад сонячні панелі. Рациональне управління енергоспоживанням є одним із ключових факторів



Рис. 1. Архітектура програмно-апаратного комплексу мобільної сенсорної системи.

підвищення надійності та тривалості функціонування системи.

Програмне забезпечення мобільної сенсорної системи відіграє важливу роль у забезпеченні ефективної роботи програмно-апаратного комплексу. Воно реалізує алгоритми збору, обробки та передачі даних, а також забезпечує контроль технічного стану компонентів системи.

Алгоритми збору даних відповідають за організацію процесу опитування сенсорів, синхронізацію вимірювань та керування режимами роботи датчиків. Вони можуть включати періодичне або подієве зчитування даних, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання системи.

Обробка сигналів передбачає використання методів цифрової фільтрації, усунення шумів, нормалізації та перетворення сигналів. На цьому етапі можуть застосовуватися алгоритми статистичного аналізу або методи машинного навчання для виявлення аномалій у роботі сенсорів або змін у параметрах середовища.

Система моніторингу технічного стану є важливим елементом програмної архітектури, що забезпечує збір та аналіз параметрів функціонування системи. До таких параметрів можуть належати температура компонентів, рівень енергоспоживання, навантаження на процесор, стабільність сигналів сенсорів та інші експлуатаційні характеристики. Отримані дані використовуються для оцінювання поточного стану системи та прогнозування можливих відмов.

Надійність мобільної сенсорної системи визначається сукупністю апаратних, програмних та експлуатаційних факторів. Одним із ключових є температурний режим, оскільки значні коливання температури можуть призводити до деградації електронних компонентів та зниження точності вимірювань.

Важливим фактором є також навантаження на процесор, яке визначає стабільність виконання програмних алгоритмів та швидкість обробки даних. Надмірне навантаження може спричиняти затримки у передачі інформації або некоректну роботу програмних модулів.

Ще одним фактором є деградація сенсорів, що проявляється у поступовій зміні характеристик датчиків у процесі експлуатації. Це може призводити до зниження точності вимірювань або виникнення систематичних похибок.

Крім того, значний вплив на надійність системи мають енергетичні параметри, зокрема рівень заряду джерел живлення, стабільність напруги та ефективність енергоспоживання. Нестабільність енергопостачання може призводити до переривання роботи системи або втрати даних. Архітектура програмно-апаратного комплексу мобільної сенсорної системи повинна враховувати як апаратні, так і програмні аспекти функціонування. Інтеграція механізмів моніторингу технічного стану дозволяє отримувати необхідні дані для застосування моделей прогнозування надійності, що є важливим елементом забезпечення стабільної та довготривалої роботи мобільних сенсорних систем.

4. Система моніторингу технічного стану

Одним із ключових елементів забезпечення надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем є система моніторингу технічного стану. Її основним призначенням є безперервний збір, аналіз та збереження інформації про параметри функціонування апаратних і програмних компонентів системи. Наявність такої системи дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормальних режимів роботи, визначати тенденції деградації елементів та формувати дані для моделей прогнозування відмов.

Для ефективного оцінювання технічного стану мобільної сенсорної системи необхідно контролювати ряд експлуатаційних параметрів, які відображають роботу її основних компонентів.

Температура компонентів є одним із найважливіших показників. Перегрів мікроконтролерів, сенсорів або модулів зв'язку може призводити до зниження стабільності роботи, прискореної деградації електронних елементів

та виникнення відмов. Тому контроль температури дозволяє своєчасно виявляти перевищення допустимих температурних режимів та здійснювати коригування режимів роботи системи.

Напруга живлення є критичним параметром для стабільної роботи програмно-апаратного комплексу. Зниження або нестабільність напруги можуть призводити до некоректної роботи сенсорів, помилок обробки даних або перезавантаження обчислювального блоку. Моніторинг напруги дозволяє оцінювати стан джерел живлення та прогнозувати необхідність їх заміни або підзарядки.

Рівень сигналу сенсорів характеризує якість вимірювань та стабільність роботи датчиків. Зміна амплітуди сигналу або зростання шумів можуть свідчити про деградацію сенсора, механічні пошкодження або вплив зовнішніх факторів. Аналіз цих параметрів дозволяє своєчасно виявляти відхилення у роботі сенсорних модулів.

Швидкість обробки даних відображає продуктивність обчислювального блоку та ефективність програмних алгоритмів. Зниження швидкості обробки може бути наслідком перевантаження процесора, збоїв у програмному забезпеченні або недостатності обчислювальних ресурсів.

Помилки передачі характеризують надійність комунікаційних каналів. Виникнення помилок у процесі передачі даних може бути пов'язане з нестабільністю бездротово-

го зв'язку, завадами у каналі передачі або несправністю комунікаційних модулів.

Збір діагностичних даних здійснюється за допомогою вбудованих програмно-апаратних засобів моніторингу, які інтегруються у сенсорні модулі, обчислювальні блоки та комунікаційні підсистеми. Дані можуть збиратися у реальному часі або з певною періодичністю залежно від вимог до точності моніторингу та енергоспоживання системи.

Отримані параметри підлягають попередній обробці, що включає фільтрацію шумів, нормалізацію значень, перевірку коректності даних та виявлення аномалій. Для аналізу можуть застосовуватися статистичні методи, методи часових рядів або алгоритми машинного навчання, які дозволяють виявляти приховані закономірності та тенденції зміни параметрів.

Для комплексного оцінювання стану мобільної сенсорної системи використовується вектор технічного стану, який представляє собою набір параметрів, що характеризують поточні експлуатаційні показники системи. Кожен елемент такого вектора відповідає певному контролюваному параметру, наприклад температурі компонентів, рівню напруги живлення, характеристикам сигналу сенсорів або показникам продуктивності обчислювального блоку.

Формування вектора технічного стану дозволяє представити інформацію про функціонування системи у компактній та структурованій формі. Це створює можливість засто-

Таблиця 1

Основні параметри моніторингу технічного стану мобільної сенсорної системи

№	Параметр	Одиниці виміру	Частота контролю	Критичне значення	Метод вимірювання
1	Температура компонентів	°C	1 раз/хв	>75	Термодатчик/термопара
2	Напруга живлення	V	1 раз/хв	<3.3 або >5.5	Вольтметр/ADC
3	Рівень сигналу сенсорів	дБ/мВ	1 раз/хв	<-85	Аналізатор сигналу
4	Швидкість обробки даних	запис/с	постійно	<50% номіналу	Лічильник оброблених пакетів
5	Помилки передачі	кількість	постійно	>5 на хв	Лог системи передачі

сування математичних моделей прогнозування надійності, які використовують значення елементів вектора для оцінювання ймовірності відмови або визначення залишкового ресурсу системи.

Усі зібрані діагностичні параметри зберігаються у спеціалізованій базі даних моніторингу. Така база даних забезпечує накопичення історичних даних про функціонування системи, що є важливим для аналізу довгострокових тенденцій та побудови моделей прогнозування надійності.

База даних може включати інформацію про часові мітки вимірювань, значення контрольованих параметрів, події відмов або збоїв, а також результати попереднього аналізу даних. Наявність структурованої бази даних дозволяє виконувати статистичний аналіз, формувати навчальні вибірки для алгоритмів машинного навчання та підвищувати точність прогнозування технічного стану системи.

Таким чином, система моніторингу технічного стану є важливим компонентом програмно-апаратного комплексу мобільних сенсорних систем. Вона забезпечує отримання достовірних даних про роботу системи, що створює основу для реалізації моделей прогнозування надійності та підвищення ефективності експлуатації мобільних сенсорних систем.

5. Розробка моделей прогнозування надійності

Забезпечення високого рівня надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем потребує використання методів прогнозування технічного стану та можливих відмов. На основі даних, отриманих із системи моніторингу, можуть бути побудовані математичні моделі, що дозволяють оцінювати ймовірність відмови окремих компонентів або системи в цілому, а також прогнозувати залишковий ресурс її роботи.

Задача прогнозування надійності полягає у визначенні майбутнього стану системи на основі аналізу поточних та історичних даних моніторингу. Формально ця задача може бути представлена як процес оцінювання функціонального стану системи у момент часу $t + \Delta t$ на

основі вектора технічного стану, сформованого у попередні моменти часу.

Нехай технічний стан системи описується вектором параметрів: $\mathbf{X}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$, де $x_i(t)$ — значення i -го контрольованого параметра (температура, напруга живлення, рівень сигналу сенсорів, навантаження процесора тощо), n — загальна кількість контрольованих параметрів (розмірність вектора стану), що визначають технічний стан системи.

Метою прогнозування є оцінка функції: $T_f = F(\mathbf{X}(t))$, де T_f — прогнозований час до відмови системи або її компонента.

Таким чином, задача прогнозування надійності зводиться до побудови математичної моделі, що встановлює залежність між параметрами технічного стану та ймовірністю виникнення відмови. Основою прогнозування є математична модель надійності, що описує закономірності функціонування системи та зміну її параметрів у часі.

Функція надійності визначає ймовірність безвідмовної роботи системи протягом певного інтервалу часу. Вона може бути представлена як: $R(t) = P(T > t)$, де T — випадкова величина, що характеризує час до відмови системи.

Іншим важливим показником є інтенсивність відмов, яка характеризує швидкість виникнення відмов у системі та визначається як: $\lambda(t) = f(t) / R(t)$, де $f(t)$ — щільність розподілу часу до відмови.

Вибір математичної моделі для випадкової величини T залежить від фізичної природи відмов системи. Для складних технічних систем та сенсорних мереж найчастіше застосовують такі закони розподілу:

- **Експоненціальний закон:** використовується для опису періоду нормальної експлуатації, коли інтенсивність відмов є постійною ($\lambda(t) = \text{const}$). У цьому випадку функція надійності має вигляд: $R(t) = e^{(-\lambda t)}$

- **Розподіл Вейбулла:** є найбільш універсальним для врахування процесів старіння та деградації. Він дозволяє моделювати зміну інтенсивності відмов за допомогою параметра форми k та параметра масштабу α : $R(t) = e^{(-(t/\alpha)^k)}$

Використання розподілу Вейбулла є особливо актуальним для сенсорних систем, оскільки при $k > 1$ він математично описує механізми поступового зносу та погіршення характеристик компонентів, що корелює з аналізом показників деградації.

Для сенсорних систем важливим є також врахування показників деградації, які відображають поступове погіршення характеристик компонентів системи. До таких показників можуть належати зростання температури компонентів, зменшення рівня сигналу сенсорів, зниження стабільності напруги живлення або збільшення кількості помилок передачі даних. Аналіз змін цих параметрів у часі дозволяє виявляти тенденції деградації та використовувати їх для прогнозування майбутніх відмов.

Для сенсорних систем важливим є також врахування показників деградації, які відображають поступове погіршення характеристик компонентів системи. До таких показників можуть належати зростання температури компонентів, зменшення рівня сигналу сенсорів, зниження стабільності напруги живлення або збільшення кількості помилок передачі даних. Аналіз змін цих параметрів у часі дозволяє виявляти тенденції деградації та використовувати їх для прогнозування майбутніх відмов.

Для прогнозування надійності мобільних сенсорних систем можуть використовуватися різні типи моделей, які відрізняються підходами до аналізу даних та рівнем складності.

Статистичні моделі базуються на аналізі статистичних закономірностей виникнення відмов. До таких моделей належать експоненційний, нормальний або розподіл Вейбулла, які дозволяють оцінювати параметри надійності на основі історичних даних експлуатації системи.

Регресійні моделі використовуються для встановлення залежностей між параметрами технічного стану системи та показниками її надійності. Наприклад, за допомогою лінійної або нелінійної регресії можна визначити вплив температури компонентів, напруги живлення або навантаження процесора на ймовірність виникнення відмов.

Імовірнісні моделі дозволяють враховувати випадковий характер процесів деградації та виникнення відмов. До них належать марковські моделі, байєсівські мережі або моделі стохастичних процесів, які дозволяють оцінювати ймовірність переходу системи між різними станами.

Моделі на основі машинного навчання використовують сучасні алгоритми аналізу даних для виявлення складних нелінійних залежностей між параметрами системи та її надійністю. До таких методів належать дерева рішень, випадкові ліси, нейронні мережі або методи градієнтного бустингу. Використання таких підходів дозволяє підвищити точність прогнозування, особливо у випадках, коли система характеризується великою кількістю параметрів моніторингу.

На основі запропонованих моделей може бути реалізований алгоритм прогнозування часу до відмови мобільної сенсорної системи. Загальна структура такого алгоритму включає кілька етапів.

На першому етапі здійснюється збір даних із системи моніторингу технічного стану та формування вектора параметрів системи у поточний момент часу. Далі виконується попередня обробка даних, що включає фільтрацію шумів, нормалізацію значень та виявлення аномалій.

На наступному етапі отримані параметри подаються на вхід математичної моделі прогнозування, яка оцінює ймовірність виникнення відмови або визначає прогнозований час до відмови системи. У разі перевищення встановлених порогових значень система може генерувати попередження або ініціювати процедури технічного обслуговування.

Таким чином, використання моделей прогнозування надійності на основі даних моніторингу технічного стану дозволяє своєчасно виявляти потенційні відмови та підвищувати ефективність експлуатації мобільних сенсорних систем. Це сприяє зменшенню простоїв обладнання, підвищенню стабільності функціонування систем та оптимізації процесів технічного обслуговування.

6. Алгоритм прогнозування на основі моніторингу

Ефективне прогнозування надійності мобільних сенсорних систем можливе лише за умови безперервного моніторингу технічного стану їх компонентів. На основі даних, що надходять із сенсорних модулів, обчислювальних блоків та комунікаційних підсистем, реалізується алгоритм прогнозування, який дозволяє оцінювати тенденції деградації та визначати залишковий ресурс роботи системи.

Запропонований алгоритм базується на послідовному аналізі параметрів функціонування та включає такі основні етапи (рис. 2):



Рис. 2. Алгоритмічна схема прогнозування надійності.

1. **Збір даних моніторингу.** Здійснюється накопичення значень температури, напруги живлення, рівня сигналу сенсорів та навантаження процесора за допомогою вбудованих діагностичних модулів.

2. **Фільтрація та нормалізація.** Виконується попередня обробка даних: усунення аномальних значень (викидів), фільтрація шумів та приведення параметрів до єдиної шкали для коректного математичного аналізу.

3. **Оцінка поточного технічного стану.** Формується вектор технічного стану, на основі якого визначається режим функціонування системи (нормальний, граничний або аварійний).

4. **Прогнозування деградації.** Застосовуються моделі часових рядів або регресійний аналіз для виявлення тенденцій зміни параметрів та ідентифікації ознак майбутніх відмов.

5. **Оцінка залишкового ресурсу (RUL).** Визначається очікуваний час до моменту досягнення параметрами критичних значень, що є основою для блоку прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Реалізація такої послідовності у вигляді єдиної алгоритмічної схеми дозволяє створити ефективну систему підтримки рішень. Це забезпечує своєчасне виявлення потенційних дефектів і підвищує стабільність функціонування мобільних сенсорних систем у реальному часі.

7. **Експериментальне дослідження та його результати**

Для перевірки ефективності запропонованих моделей було проведено дослідження на базі програмно-апаратного комплексу мобільної сенсорної системи протягом 180 діб безперервної експлуатації.

Параметри вихідних даних:

- **Загальний обсяг вибірки:** 259 200 записів (дискретизація даних моніторингу — 1 раз на хвилину).
- **Склад даних:** часові ряди 5 ключових параметрів (температура CPU, напруга живлення, рівень RSSI сенсорів, % завантаження пам'яті, частота помилок пакетів).

- **Контрольні події:** за весь період було зафіксовано **14 подій критичної деградації** та **4 апаратні відмови**.

Експеримент проводився у контрольованому середовищі, де кожні 30 діб змінювалися умови навантаження (від 20% до 95% потужності процесора) та температурний режим (від +20°C до +55°C) для симуляції зносу компонентів. Отриманий масив даних було розділено у пропорції 70/30 для навчання та тестування моделей відповідно.

Аналіз отриманих результатів підтвердив, що врахування поточного технічного стану дозволяє значно точніше прогнозувати відмови порівняно зі статистичними методами.

Під час тестування було встановлено, що найбільш критичними індикаторами деградації є температура обчислювального блоку (коефіцієнт кореляції з відмовами $r = 0,84$) та стабільність напруги живлення. Зокрема, за 12 годин до виникнення відмови спостерігало-

ся нелінійне зростання середньоквадратичного відхилення напруги на **15–20%**.

Для оцінювання точності моделей використовувалися показники **MAE** (середня абсолютна похибка), **RMSE** (середньоквадратична похибка) та коефіцієнт детермінації **R²**. Порівняльні результати наведено у таблиці:

Ключові висновки:

1. Використання моделей машинного навчання (нейронних мереж) дозволило знизити похибку прогнозування часу до відмови (T_f) до 4,2 години, що на **77%** краще за класичні регресійні підходи.

2. Модель стабільно ідентифікує ознаки деградації за **24–36 годин** до настання критичного стану, що достатньо для проведення превентивного обслуговування.

3. Запропонований підхід дозволив зменшити ризик раптових відмов на **35%** завдяки вчасному переходу в енергозберігаючі режими при виявленні аномалій.

Таблиця 2

Порівняльна ефективність моделей прогнозування

Тип моделі	MAE (год)	RMSE (год)	R ²
Статистична (експоненціальна)	42.5	58.2	0.64
Регресійна (лінійна)	18.4	24.1	0.78
Машинне навчання (LSTM/RNN)	4.2	6.7	0.93

8. Обговорення

Отримані результати дослідження дозволяють оцінити практичну значущість запропонованих моделей прогнозування надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем, а також визначити можливі напрями їх застосування у сучасних технологічних системах. Крім того, важливим аспектом є аналіз обмежень проведеного дослідження та визначення напрямів подальших досліджень.

Практичне значення проведеного дослідження полягає у можливості використання розроблених моделей прогнозування для підвищення надійності функціонування мобільних сенсорних систем. Використання даних моніторингу технічного стану дозволяє своє-

часно виявляти ознаки деградації компонентів системи та прогнозувати можливі відмови ще до їх фактичного виникнення.

Застосування запропонованого підходу сприяє підвищенню ефективності технічного обслуговування систем, оскільки дозволяє переходити від реактивного до превентивного обслуговування. Це, у свою чергу, забезпечує зменшення простоїв обладнання, оптимізацію використання ресурсів та підвищення стабільності роботи програмно-апаратних комплексів.

Крім того, використання алгоритмів прогнозування може бути інтегроване безпосередньо у програмне забезпечення мобільних сенсорних систем, що дозволяє реалізувати автоматизований контроль технічного стану та оперативне реагування на потенційні відмови.

Запропоновані моделі прогнозування надійності можуть бути використані у різних сферах, де застосовуються мобільні сенсорні системи.

У системах Інтернету речей (IoT) прогнозування надійності дозволяє забезпечити стабільну роботу великої кількості взаємопов'язаних пристроїв. Використання моделей прогнозування дає можливість контролювати стан сенсорних вузлів, своєчасно виявляти несправності та підвищувати ефективність управління інфраструктурою IoT.

У безпілотних системах, зокрема безпілотних літальних апаратах або автономних роботизованих платформах, сенсорні системи відіграють ключову роль у навігації та зборі інформації про навколишнє середовище. Прогнозування надійності таких систем дозволяє зменшити ризик відмов під час виконання завдань та підвищити безпеку їх експлуатації.

У системах екологічного моніторингу мобільні сенсорні мережі використовуються для збору інформації про стан атмосфери, водних ресурсів та інших природних об'єктів. Використання моделей прогнозування надійності дозволяє забезпечити безперервність збору екологічних даних та підвищити достовірність результатів моніторингу.

У військових сенсорних мережах надійність сенсорних систем є критично важливим фактором. Прогнозування технічного стану сенсорних вузлів дозволяє забезпечити стабільність роботи мереж у складних умовах експлуатації, зменшити ризик втрати інформації та підвищити ефективність виконання завдань.

Попри отримані позитивні результати, проведене дослідження має певні обмеження. Одним із основних обмежень є обсяг експериментальних даних, який може бути недостатнім для повноцінного навчання складних моделей машинного навчання. Для підвищення точності прогнозування необхідно використовувати більші набори даних, що охоплюють різні режими роботи системи.

Іншим обмеженням є спрощення експериментального середовища, яке не повністю відображає всі можливі умови експлуатації

мобільних сенсорних систем у реальних середовищах. У реальних умовах на роботу системи можуть впливати додаткові фактори, зокрема електромагнітні завади, механічні навантаження або нестабільність каналів зв'язку.

Крім того, використання складних моделей прогнозування може вимагати значних обчислювальних ресурсів, що може обмежувати їх застосування у системах із обмеженою продуктивністю або енергоспоживанням.

Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямі можуть бути спрямовані на розширення наборів експериментальних даних, удосконалення алгоритмів прогнозування та адаптацію моделей для роботи у реальних умовах експлуатації мобільних сенсорних систем.

9. Висновки

У роботі досліджено питання підвищення надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем на основі використання методів моніторингу технічного стану та моделей прогнозування відмов. Проведене дослідження дозволило сформулювати комплексний підхід до аналізу параметрів функціонування сенсорних систем та прогнозування їх подальшої працездатності.

У результаті виконаного дослідження було проаналізовано архітектуру програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем та визначено основні параметри, що впливають на їх надійність. Розроблено систему моніторингу технічного стану, яка забезпечує збір, обробку та збереження діагностичних параметрів функціонування системи.

На основі даних моніторингу запропоновано математичні моделі прогнозування надійності, що дозволяють оцінювати процеси деградації компонентів системи та визначати ймовірність виникнення відмов. Також розроблено алгоритм прогнозування технічного стану системи, який включає етапи збору даних, їх попередньої обробки, оцінювання поточного стану, прогнозування деградації та визначення залишкового ресурсу роботи системи.

Проведене експериментальне дослідження підтвердило ефективність використання даних

моніторингу технічного стану для підвищення точності прогнозування відмов у мобільних сенсорних системах.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні підходу до прогнозування надійності програмно-апаратних комплексів мобільних сенсорних систем, який базується на використанні інтегрованої системи моніторингу технічного стану та аналізі параметрів функціонування системи у реальному часі.

Запропоновано модель формування вектора технічного стану системи на основі параметрів моніторингу, що дозволяє використовувати його як вхідні дані для побудови математичних моделей прогнозування надійності. Крім того, удосконалено алгоритм прогнозування часу до відмови, який враховує динаміку зміни параметрів технічного стану системи.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості застосування розроблених моделей та алгоритмів у реальних мобільних сенсорних системах для підвищення надійності їх функціонування. Використання систем моніторингу технічного стану та методів прогнозування відмов дозволяє своєчасно виявляти ознаки деградації компонентів та здійснювати превентивне технічне обслуговування.

Запропонований підхід може бути використаний у системах Інтернету речей, автономних роботизованих системах, системах екологічного моніторингу, а також у розподілених сенсорних мережах різного призначення.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на удосконалення моделей прогнозування надійності шляхом використання більш складних методів аналізу даних, зокрема алгоритмів машинного навчання та глибокого навчання. Перспективним напрямом є також розширення наборів експериментальних даних для підвищення точності прогнозування та адаптація моделей до різних типів сенсорних систем.

Крім того, доцільним є дослідження можливостей інтеграції розроблених алгоритмів прогнозування у програмне забезпечення мобільних сенсорних систем з метою реаліза-

ції автоматизованого моніторингу технічного стану та підтримки прийняття рішень щодо технічного обслуговування систем.

Список використаної літератури

- [1]. Silva I., Guedes L. A., Portugal P., Vasques F. Reliability and availability evaluation of wireless sensor networks for industrial applications. *Sensors*. 2012. Vol. 12, no. 1. P. 806–838. <https://doi.org/10.3390/s120100806>
- [2]. Saeed U., Jan S. U., Lee Y. D., Koo I. Fault diagnosis based on extremely randomized trees in wireless sensor networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 205. Article 107284. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107284>
- [3]. Yang J., Chen J., Huo Y., Liu Y. A novel cluster-based wireless sensor network reliability model using the expectation maximization algorithm. *Journal of Sensors*. 2021. Article 8869544. <https://doi.org/10.1155/2021/8869544>
- [4]. Wang N., Tian T. Z., He J. T., Zhang C. Z., Yang J. Transmission reliability evaluation of wireless sensor networks considering channel capacity randomness and energy consumption failure. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 242. Article 109769. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109769>
- [5]. Han Y., Yu R. F., Wang J., Yan S., Huo S. W., Li F. Q. Evidential reasoning rule with dynamic reliability for performance assessment of wireless sensor network. *ICT Express*. 2025. Vol. 11, no. 1. P. 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2024.08.009>
- [6]. Li S., Feng J., He W., Qi R., Guo H. A new health prediction model for a sensor network based on belief rule base with attribute reliability. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 2806. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82594-6>
- [7]. Diachenko V. Intellectual approaches to energy saving in wireless sensor computer networks. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2020. Vol. 4(62). P. 114–122. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.4.114>
- [8]. Divitskyi A. S. Intelektualna pidsystema prohnozuvannia zmin u mobilnykh

radiomerezhakh. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2025. Vol. 4(84). P. 75–81. <https://doi.org/10.30748/soivt.2025.84.08>

[9]. Petrivskyi V. Y., Shevchenko V. L., Bychkov O. S., Sinitsyn I. P. Information technology to ensure the survivability of sensor networks. Problems in Programming. 2021. Vol. 4(62). P. 62–70. <https://doi.org/10.15407/pp2021.04.062>

[10]. Nesterenko S. A., Tishin P. M., Shtilman P. R., Martynyuk O. N., Mileiko I. G. Fuzzy models of wireless components sensor networks. Herald of Advanced Information Technology. 2025. Vol. 8, no. 2. P. 209–220. <https://doi.org/10.15276/hait.08.2025.13>

[11]. Luo T., Nagarajan S. G. Distributed anomaly detection using autoencoder neural networks in WSN for IoT. arXiv. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.04872>

[12]. Wang Y., Yang A., Chen X., Wang P., Wang Y., Yang H. A deep learning approach for

blind drift calibration of sensor networks. arXiv. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.03682>

[13]. Shang R. Z., Zhang N. A wireless sensor network for prognostics and health management. DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences. 2016. <https://doi.org/10.12783/dteees/peem2016/5031>

[14]. Kumar A., Jadhav S., Alsalami O. M. Reliability and sensitivity analysis of wireless sensor network using a continuous-time Markov process. Mathematics. 2024. Vol. 12, no. 19. Article 3057. <https://doi.org/10.3390/math12193057>

[15]. Catelani M., Ciani L., Bartolini A., Del Rio C., Guidi G., Patrizi G. Reliability analysis of wireless sensor network for smart farming applications. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 22. Article 7683. <https://doi.org/10.3390/s21227683>

Стаття надійшла до редакції: 22.03.2026

прийнята до друку: 16.04.2026

опублікована: 30.06.2026

PACS: 07.05.Tp, 07.07.Df

<https://doi.org/10.18524/1815-7459.2026.2.365143>

RELIABILITY PREDICTION MODELS FOR SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEXES OF MOBILE SENSOR SYSTEMS BASED ON TECHNICAL CONDITION MONITORING

V. Bosyi, <https://orcid.org/0009-0000-6169-1800>

Odesa Polytechnic National University
1 Shevchenko Ave, Odesa, 65044, Ukraine
e-mail: valiko@dineva.net

Abstract. This paper investigates reliability prediction models for hardware-software complexes of mobile sensor systems based on condition monitoring. A mathematical reliability model is proposed, considering failure rates and sensor module degradation. A forecasting algorithm for remaining useful life is developed and represented as a flowchart, and key monitoring parameters of the system are identified. An experimental study is conducted to evaluate the effectiveness of various prediction models, and system degradation graphs are presented. The results demonstrate high accuracy of the proposed methods and their practical applicability in Internet of Things systems, unmanned platforms, environmental monitoring, and military sensor networks.

Keywords: system reliability, mobile sensor systems, failure prediction, condition monitoring, prediction algorithms, component degradation, mathematical model, flowchart, experimental study

ПЕРСОНАЛІЇ

ДО 65-РІЧЧЯ ПРОФЕСОРА СТРІХИ МАКСИМА ВІТАЛІЙОВИЧА



СТРІХА Максим Віталійович – відомий учений у галузі фізики напівпровідників, доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, професор Київського національного університету ім. Т. Шевченка, член Координаційного бюро українського фізичного товариства, перший віцепрезидент Академії наук вищої школи України, письменник, перекладач і перекладознавець, громадський і політичний діяч.

Народився Максим Віталійович 24.06.1961 р. в Києві в родині науковців (батько проф. В.І. Стріха, був одним із фундаторів сучасної фізики напівпровідників в Україні, засновником і першим президентом АН вищої школи України). Закінчив радіофізичний факультет КНУ ім. Т. Шевченка.

У 1987 році закінчив аспірантуру Фізико-технічного інституту ім. А. Ф. Йоффе АН СРСР (м. Ленінград,

Росія) та захистив кандидатську дисертацію за темою «Оже-рекомбінація та ударна іонізація через домішкові центри у напівпровідниках». У 1997 році закінчив докторантуру ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України та захистив докторську дисертацію за темою «Оптичні та рекомбінаційні переходи в напівпровідниках з дефектами, деформаціями та неоднорідностями складу».

З 1983 р. працює в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

З 2008 р. – професор кафедри фізичної електроніки Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка, читає курс «Фізика конденсованого середовища» та підготував навчальний посібник, веде науковий семінар для магістрів. З 2010 р. – по 2012 р. – завідувач, з 2012 р. по 2014 р. – професор кафедри перекладу Київського університету Б. Грінченка (за сумісництвом).

Плідною і корисною для науки і освіти України була діяльність М. В. Стріхи на посаді заступника міністра освіти і науки України з 2008 р. по 2010 р. і з 2014 по 2019 рр.

Наукові інтереси в галузі фізики напівпровідників – сторення послідовної теорії оптичних та рекомбінаційних переходів у реальних напівпровідниках із дефектами, деформаціями та неоднорідностями складу. Діяльність останнього часу – фізика графену – моноатомного шару вуглецю з унікальними фізичними властивостями. Теоретично передбачив низку нових ефектів у одновісних стиснутих безщілинних та вузькощілинних напівпровідниках, показав, що одновісний стиск у цих матеріалах може призвести до суттєвого (на порядки) зростання квантового виходу випромінювання. Автор першого огляду з фізики графену українською мовою, надрукованого у нашому журналі в 2010р.

Професор Стріха М. В. є автором понад 200 наукових праць з фізики напівпровідників, у т.ч. 4 огляди, 3^x навчальних посібників з грифом МОН та патент на винахід.

Вражаючою є різносторонність інтересів, енциклопедичність знань і високий рівень плідної праці на інших, окрім фізики, галузях знань і напрямках діяльності – письменницька, зокрема як перекладача класиків світової літератури, культурологічна, просвітницька, громадська і політична. Максим Віталійович є автором понад 100 статей, присвячених питанням державотворення, історії, культури, літературознавства, мови, постатям і явищам українського перекладу та 2 монографій з перекладознавства: «Данте

й українська література» (2003), «Український художній переклад: між літературою і націєтворенням» (2006). Недарма Максим Віталійович був (2005–2007 рр.) головним науковим працівником Інституту енциклопедичних досліджень НАН України (за сумісництвом).

У галузі українського перекладознавства запропонував і обґрунтував концепцію націєтворчої функції українського художнього перекладу. Перекладав українською мовою поетичні та прозові твори Данте, В. Вордсворта, А. Ч. Свінберна, Р. Л. Стівенсона, Ж. М. Ередіа, В. Вітмена, Е. Дікінсон, Р. Кіплінга, Д. Г. Лоуренса, Т. С. Еліота, Ш. Мараї, інших класичних та сучасних авторів. Автор книги віршів «Сонети та октави» (1991), «Вірші 1982–2022 років». Видав авторські перекладні антології англійської, американської, російської поезій. За переклад «Божественної комедії» Данте отримав премію Кабінета Міністрів України імені Максима Рильського, а також Італійську відзнаку «Дантівський лавр» для українського перекладача, а також орденом «За заслуги перед Італійською республікою» включно за переклади лібрето класичних і італійських опер.

Серед численних перекладів Максима Віталійовича недавнього часу особливо хочеться відзначити переклад з угорської шедеврального роману Мараї Шандора «Свічки догоріли» – Львів: видавництво «Апріорі», 2023. – такого ж рівня і самий переклад вишуканою українською мовою зі своєї угорської з тонкощами найглибших психологічних станів і переживань героїв найвидатнішого роману 20-го століття.

Масштабною є громадська діяльність Максима Віталійовича.

Перший віцепрезидент Академії наук вищої школи України з 2010 р.

Член Українського фізичного товариства (з 1992; з 2004 – член Бюра Координаційної ради, а з 2013 по 2026 р. – президент). Член Асоціації українських письменників (1997, віцепрезидент з 2009) та Національної спілки письменників України (1994). У 1990–1994 – депутат Київської міської ради, в 1993–1995 – радник міністра культури України.

Член редколегій журналів: нашого – «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології», «Українського фізичного журналу», «Українознавство», «Всесвіт».

Лауреат нагород Ярослава Мудрого і Святого Володимира АН ВШ України. Нагороджений Почесною Грамотою МОН України (2007). Відзнака «За наукові досягнення» Президії НАН України (2008). Лауреат премії журналу «Сучас-

ність» (2005) та премії ім. Миколи Лукаша журналу «Всесвіт» (2008).

Нам приємно відзначити і нашу багатолітню співпрацю з Максимом Віталійовичем на ниві науки і освіти, зокрема, у роботі в редколегії нашого журналу та проведенні чисельних наукових форумів на базі нашого університету як члена Програмних комітетів, а також як автора низки актуальних наукових статей і серії методично-оглядових статей, зокрема, з докладним розглядом явищ розсіювання електронів у каналі провідності нанотранзисторів, у яких використано дещо інший підхід до теорії MOSFET, більш адекватний до фізики нанотранзисторів.

Тож в день Вашого Ювілею, шановний Максиме Віталійовичу, прийміть найщиріші побажання добра, здоров'я, щастя, такої ж кипучої енергії, натхнення і творчих успіхів на всіх напрямках Вашої багатогранної діяльності!

Редколегія

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛ

Журнал «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології» публікує статті, короткі повідомлення, листи до Редакції, а також коментарі, що містять результати фундаментальних і прикладних досліджень, за наступними напрямками:

1. Фізичні, хімічні та інші явища, на основі яких можуть бути створені сенсори
2. Проектування і математичне моделювання сенсорів
3. Сенсори фізичних величин
4. Оптичні, оптоелектронні і радіаційні сенсори
5. Акустoeлектронні сенсори
6. Хімічні сенсори
7. Біосенсори
8. Наносенсори (фізика, матеріали, технологія)
9. Матеріали для сенсорів
10. Технологія виробництва сенсорів
11. Сенсори та інформаційні системи
12. Мікросистемні та нанотехнології (MST, LIGA-технологія та ін.)
13. Деградація, метрологія і сертифікація сенсорів

Журнал публікує також замовлені огляди з актуальних питань, що відповідають його тематиці, поточну інформацію – хроніку, персоналії, платні рекламні повідомлення, оголошення щодо конференцій.

Основний текст статті повинен відповідати вимогам Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003 р. № 7–05/1 (Бюлетень ВАК України 1, 2003 р.) і бути структурованим. Матеріали, що надсилаються до Редакції, повинні бути написані з максимальною ясністю і чіткістю викладу тексту. У поданому рукописі повинна бути обґрунтована актуальність розв'язуваної задачі, сформульована мета дослідження, міститися оригінальна частина і висновки, що забезпечують розуміння суті отриманих результатів і їх новизну. Автори повинні уникати необґрунтованого введення нових термінів і вузькопрофільних жаргонних висловів.

Редакція журналу просить авторів при направленні статей до друку керуватися наступними правилами:

1. Рукописи повинні надсилатися українською або англійською мовою і супроводжуватися файлами тексту і малюнків. Рукописи, які пропонуються авторами з України до видання англійською мовою обов'язково доповнюються україномовною. Електронна копія може бути надіслана електронною поштою.
2. Прийнятні формати тексту: MS Word (rtf, doc, docx).
3. Прийнятні графічні формати для рисунків: EPS, TIFF, BMP, PCX, WMF, MS Word і MS Graf, JPEG. Рисунки, які створені за допомогою програмного забезпечення для математичних і статистичних обчислень, повинні бути перетворені до одного з цих форматів.
4. На статті авторів з України мають бути експертні висновки про можливість відкритого друку.

Рукописи надсилати на адресу:

Лепіх Ярослав Ілліч,
Головний редактор,
Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова, МННФТЦ,
вул. Змієнка Всеволода, 2,
Одеса, 65082, Україна.

Телефон / факс +38(048) 723–34–61,
e-mail: semst-journal@onu.edu.ua,
<https://semst.onu.edu.ua>

*Здійснюється подвійне анонімне
рецензування рукописів статей.*

Правила підготовки рукопису:

Рукописи повинні супроводжуватися офіційним листом, підписаним керівником установи, де була виконана робота. Це правило не стосується робіт представлених авторами із закордону чи міжнародними групами авторів.

Титульний аркуш:

1. PACS – у верхньому лівому куті. Допускається декілька відділених комами кодів. Якщо ніякі коди класифікації не позначені, код(и) буде(-уть) визначено Редакційною Колегією.

2. Назва роботи (по центру, прописними літерами, шрифт 14pt, жирно).

3. Прізвище (-а) автора(-ів) (по центру, шрифт 12pt), ORCID ідентифікатор автора(-ів).

4. Назва установи, повна адреса, телефони і факси, e-mail для кожного автора, нижче, через один інтервал, окремим рядком (по центру, шрифт 12pt).

5. Анотація: до 2000 символів.

6. Ключові слова: їхня кількість не повинна перевищувати восьми слів. В особливих випадках можна використовувати терміни з двома – чи трьома словами. Ці слова повинні бути розміщені під анотацією і написані тією самою мовою.

П.п. 2,3,4,5,6 послідовно викласти українською та англійською мовами.

Для авторів з закордону, які не володіють українською мовою, пп. 2–5 викладаються англійською мовою.

7. Текст статті повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, на білому папері формату A4. Поля: зліва – 3см, справа – 1,5см, вверху і знизу – 2,5см. Шрифт 12pt. Підзаголовки, якщо вони є, повинні бути надруковані прописними літерами, жирно.

Рівняння повинні бути введені, використовуючи MS Equation Editor або MathType. Роботи з рукописними вставками не приймаються. Таблиці повинні бути представлені на окремих аркушах у форматі відповідних текстових форматів (див. вище), чи у форматі тексту (з колонками, відділеними інтервалами, комами, крапкам з комою, чи знаками табулювання).

8. У кінці тексту статті указати прізвища, імена та по батькові усіх авторів, поштову адресу, телефон, факс, e-mail (для кореспонденції).

9. Список літератури повинен бути надрукований через 1,5 інтервали, з літературою, пронуме-

рованою в порядку її появи в тексті. Бібліографія друкується лише латиницею (кирилиця подається в транслітерації). Порядок оформлення літератури повинен відповідати вимогам Акредитаційної комісії України, наприклад:

[1]. I. M. Cidilkovskii. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikah*. Nauka, M. 450 s. (1972).

[2]. J. A. Hall. *Imaging tubes*. Chap. 14 in *The Infrared Handbook*, Eds. W. W. Wolfe, G. J. Zissis, pp. 132–176, ERIM, Ann Arbor, MI (1978).

[3]. N. Blutzer, A. S. Jensen. *Current readout of infrared detectors* // *Opt. Eng.*, 26(3), pp. 241–248 (1987).

10. Виносок, якщо можливо, бажано уникати.

Приймаються тільки високоякісні рисунки. Написи і символи повинні бути надруковані усередині рисунку. Негативи, слайди, і діапозитиви не приймаються.

Кожен рисунок повинен бути розташований у тексті статті після посилання на нього та мати розмір, що не перевищує 160x200 мм. Для тексту на рисунках використовуйте шрифт 10pt. Одиниці виміру повинні бути позначені після коми (не в круглих дужках). Усі рисунки повинні бути пронумеровані в порядку їх появи в тексті, з частинами позначеними як (а), (б), і т. д. Розміщення номерів рисунків і напису усередині малюнків не дозволяються.

11. Стаття має бути підписана автором (усіма авторами) з зазначенням дати на останній сторінці.

Автори несуть повну відповідальність за бездоганне мовне оформлення тексту, особливо за правильну наукову термінологію (її слід звіряти за фаховими термінологічними словниками).

12. Датою надходження статті вважається день, коли до редколегії надійшов остаточний варіант статті після рецензування.

Після одержання коректури статті автор повинен виправити лише помилки (чітко, синьою або чорною ручкою неправильно закреслити, а поряд з цим на полі написати правильний варіант) і терміново відіслати статтю на адресу редколегії електронною поштою.

Підпис автора наприкінці статті означає, що автор передає редакції право на першу публікацію своєї статті.

Автор гарантує, що стаття оригінальна, ні стаття, ні рисунки до неї не були опубліковані в інших виданнях.

Відхилені рукописи не повертаються.

ДО УВАГИ АВТОРІВ

*Міжнародна агенція ISSN встановила скорочену назву нашого журналу
«**Sens. elektron. mikrosist. tehnol.**»*

*Просимо Вас у своїх посиланнях і бібліографічних даних статей використовувати
саме таку назву, оскільки по ній буде здійснюватися посилання на Вашу статтю.*

INFORMATION FOR AUTHORS. PAPER PREPARATION REQUIREMENTS

Journal «Sensor Electronics and Microsystems Technologies» publishes articles, brief messages, letters to Editors, and comments containing results of fundamental and applied researches, on the following directions:

1. Physical, chemical and other phenomena, as the bases of sensors
2. Sensors design and mathematical modeling
3. Physical sensors
4. Optical, optoelectronic and radiation sensors
5. Acoustoelectronic sensors
6. Chemical sensors
7. Biosensors
8. Nanosensors (physics, materials, technology)
9. Sensor materials
10. Sensors production technologies
11. Sensors and information systems
12. Microsystems and nano- technologies (MST, LIGA-technologies et al.)
13. Sensor's degradation, metrology and certification

The journal publishes the custom-made reviews on actual questions appropriate to the mentioned subjects, current information – chronicle, special papers devoted to known scientists, paid advertising messages, conferences announcements.

The basic article text should meet the SAC Ukraine Presidium Decree requirements from 15.01.2003 № 7-05/1 (SAC Bulletin № 1, 2003) and be structured. The materials sent to Editors, should be written with the maximal text presentation clearness and accuracy. In the submitted manuscript the actuality of problem should be reflected, the purpose of the work should be formulated. It must contain an original part and conclusions providing the received results

essence and their novelty understanding. The authors should avoid the new terms and narrow profile jargon phrase unreasonable introduction.

Journal Edition asks authors at a direction of articles in a print to be guided by the following rules:

1. Manuscripts should be submitted in Ukrainian or English, a hard copy and supplemented with a text file and figures. Manuscripts which are offered by authors from Ukraine to the edition in English are necessarily supplemented by Ukrainian version. An electronic copy may be submitted by e-mail.
2. Acceptable text formats: MS Word (rtf, doc, docx).
3. Acceptable graphic formats for figures: EPS, TIFF, BMP, PCX, CDR, WMF, MS Word and MS Graf, JPEG. Figures created using software for mathematical and statistical calculations should be converted to one of these formats.
4. For articles of authors from Ukraine there should be expert conclusions about an opportunity of an open print.

Manuscripts should be sent to:

Lepikh Yaroslav Illich,
Editor-in-Chief, Odesa National
I. I. Mechnikov University, ISEPTC,
2 Zmiiienka Vsevoloda St, Odesa,
65082, Ukraine.

Phone/fax +38(048) 723-34-61,
e-mail: semst-journal@onu.edu.ua,
<https://semst.onu.edu.ua>

*All manuscripts are subject
to double-anonymized peer reviewing*

The manuscript preparation rules:

The manuscripts should be supplemented with the Official letter signed by a chief manager of the institution where the work was performed. This rule does not apply to papers submitted by authors from abroad or international groups of authors.

Title Page:

1. PACS in the top left corner. Several comma-separated codes are allowed. If no classification codes are indicated, the code(s) will be assigned by the Editorial Board.

2. Title of the paper (central, capital, bold, 14pt).

3. Name (–s) of the author(–s) below, in one space (central, normal face, 12pt), ORCID iD of the author(s).

4. Name of affiliated institution, full address, phone and fax numbers, e-mail addresses (if available) for each author below, in one space (central, normal face, 12pt).

5. Abstract: up to 2000 characters.

6. Keywords: its amount must not exceed eight words. In the specific cases it is acceptable to use two- or three-word terms. These words must be placed under the abstract and written in the same language.

Items 2,3,4,5,6 must be presented in series in Ukrainian and English languages.

For authors from abroad which do not know Ukrainian languages, items 2–5 may be presented only in English.

7. Article text should be printed 1,5-spaced on white paper A4 format with a 12pt, margins: left – 3sm, right – 1,5, upper and lower – 2,5sm. Titles of the sections if it is present should be typed bold, capitals.

Equations should be entered using MS Equation Editor or MathType. Papers with handwritten equations are not accepted. Notations should be defined when the first appearing in the text.

Tables should be submitted on separate pages in the format of appropriate text formats (see above), or in the text format (with columns separated by interval, commas, or tabulation characters).

8. At the article text end one must indicate surnames, names and patronymics of all authors, the mail address, the phone, a fax, e-mail (for the correspondence).

9. List of references should be 1,5-spaced, with references numbered in order of their appearance in the text. The bibliography is printed only by the roman type (cyrillics represents in transliteration).

The literature registration order should conform to Accreditation Commission of Ukraine requirements, for example:

[1]. I. M. Cidilkovskii. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikah*. Nauka, M. 450 s. (1972).

[2]. J. A. Hall. Imaging tubes. Chap. 14 in *The Infrared Handbook*, Eds. W. W. Wolfe, G. J. Zissis, pp. 132–176, ERIM, Ann Arbor, MI (1978).

[3]. N. Blutzer, A. S. Jensen. Current readout of infrared detectors // *Opt. Eng.*, 26(3), pp. 241–248 (1987).

10. Footnotes should be avoided if possible.

Only high-quality pictures can be accepted. Inscriptions and symbols should be printed inside picture. Negatives, and slides are not accepted.

Each figure should be printed on a separate page and have a size not exceeding 160x200 mm. For text inside figures, use 10pt. Measurement units should be indicated after a comma (not in blankets). All figures are to be numbered in order of its appearance in the text, with sections denoted as (a), (b), etc. Placing the figure numbers and captions inside figures is not allowed.

11. The article must be signed by author (all authors) with the date indication on the last page.

Authors bear full responsibility for irreproachable language make out of the text, especially for a correct scientific terminology (it should be verified under terminological dictionaries of the appropriate speciality).

12. The date of article acceptance is that one when the final variant comes to the publisher after a prepublication review.

After obtaining the proof sheet the author should correct mistakes (clearly cancel incorrect variant with blue or black ink and put the correct variant on border) and send urgently the revised variant to the editor by e-mail.

The author's signature at the end of the article certifies that author grants the publisher of the journal first publication rights. The author guarantees that the work has not been published elsewhere, either completely or in part, or has been submitted to another journal.

Rejected manuscripts will not be returned.

TO AUTHORS' ATTENTION

The ISSN abbreviation of the journal's title is

«Sens. elektron. mikrosist. tehnol.»

*Please, use the specified abbreviated title in your references
and bibliography to have your article properly referred to and cited.*

Комп'ютерна верстка – В. Г. Вітвицька

Підп. до друку 29.06.2026 р. Формат 60×84/8.
Ум.-друк. арк. 9,27. Наклад 50 пр.
Зам. № 3175.

Видавець:

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, буд. 2, м. Одеса, 65001, Україна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 8592 від 23.03.2026 р.
Тел.: (048) 723 28 39, e-mail: druk@onu.edu.ua

Надруковано з готового оригінал-макета

Виготовлювач:

Видавничий дім «Гельветика»
вул. Інглезі, 6/1, м. Одеса, 65101, Україна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.
Тел.: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
e-mail: mailbox@helvetica.ua