

В. Г. Крижановський<sup>1</sup>  
В. Ф. Комаров<sup>1</sup>  
С. П. Сергієнко<sup>1</sup>  
Л. В. Загоруйко<sup>1</sup>

## ВИКОРИСТАННЯ ДИСПЕРСІЇ АЛЛАНА ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НОРМАЛЬНОЇ РОБОТИ СЕНСОРНИХ ВУЗЛІВ

<sup>1</sup>Донецький національний університет імені Василя Стуса

*Під час передачі даних вимірювань у кіберфізичних системах та інтернеті речей існує загроза як виходу з ладу сенсорних вузлів, так і несанкціонованого втручання у роботу системи. Враховуючи велику кількість таких вузлів та обмеження з боку енергоспоживання, що обмежує трафік та обчислювальні ресурси систем, а також потребу повної автоматизації їхньої роботи з огляду на економічну недоцільність обслуговування, виникає потреба в розробці та удосконаленні методів контролю роботи сенсорних вузлів. Пропонується використовувати один зі статистичних методів дослідження стохастичних процесів у часових послідовностях, що представляють реалізації випадкових результатів вимірювання — дисперсію Аллана або загальніше поняття структурних функцій. Перевагою цього методу є придатність обчислювати статистичні характеристики нестационарних процесів та визначали спектральні залежності різних видів шуму, при цьому обчислювальні витрати є доволі помірними.*

*В роботі проведено застосування дисперсії Аллана для обробки модельних даних температури та вологості з давача системи інтернету речей на базі Arduino, обчислені залежності відхилення Аллана та схожих модифікацій в залежності від інтервалу усереднення. Для типових режимів роботи вимірювачів в системі Інтернету речей залежності відхилення Аллана відповідають типу шуму «випадкові блукання», що підтверджується розрахунками на різних інтервалах вимірювання. Досліджено вплив різних видів шуму на хід цих залежностей та вибрано мінімальний набір параметрів, які можуть за обмеженого масиву даних характеризувати нормальний процес вимірювання або можливі природні та штучні порушення нормальної роботи. Вказано на можливість розділення процесу статистичної обробки між сенсорним вузлом і контролером мережі Інтернету речей, що дозволить зменшити трафік і, відповідно, витрати енергії сенсорним вузлом.*

**Ключові слова:** інтернет речей, кіберфізичні системи, дисперсія Аллана, безпека, розлад процесу.

### Вступ

Задача статистичного контролю систем вимірювання, яка пов'язана з дослідженням випадкових процесів вимірювання фізичних величин, має довгу історію та багато напрямів розвитку. Практично важливим є розгляд часових рядів (послідовностей), коли ставиться задача оцінки ризику появи деякої нештатної ситуації, яка пов'язана зі сталою зміною деяких властивостей часової спостережуваної послідовності. При цьому задачу можна розв'язати за наявності апріорної інформації про випадковий процес і його відомих окремих закономірностях [1], [2]. Зараз такі задачі широко постають в галузях Інтернету речей та кіберфізичних системах [3], [4]. Але частіше таких даних може не бути, або як раз і відбувається процес збору таких даних, а для багатьох систем саме і ставиться задача визначення таких параметрів процесу, які можуть бути використані в системах прийняття рішень. Такі задачі виявлення моменту зміни статистичних характеристик називаються задачами виявлення розладу часового ряду (процесу) та розв'язуються у широкому колі різних галузей [5]—[7].

Такого виду задачі виникають і в галузях Інтернету речей, індустрії 4.0 та безпеці інформаційних систем, де потрібно знати чи нормально працює система, і чи немає стороннього втручання в дані від сенсорної мережі. Знання статистичних характеристик також використовується для ідентифікації пристроїв в мережі [8]. У системах інтернету речей, до яких висуваються вимоги енергоефективності, важливим є мінімізація трафіку та обчислюваних ресурсів для забезпечення функціонування системи. Тому задача визначення статистичних характеристик пристроїв та процесів в

галузях Інтернету речей та кіберфізичних системах і отримання компактних числових показників, що характеризують ці процеси та пристрої, є актуальною.

Метою роботи є перевірка гіпотези про застосування методу дисперсії Аллана (в ширшому сенсі — структурних функцій) для обробки даних часових послідовностей, що генеруються в системах Інтернету речей (IoT), для визначення змін статистичних параметрів, які свідчать про порушення штатного режиму роботи внаслідок аварії або зовнішнього втручання.

### Дисперсія Аллана

Дисперсія Аллана або двовибіркова дисперсія пов'язана зі структурними функціями Колмогорова та разом з модифікаціями може бути застосована до вивчення процесів з різними видами шуму, наприклад фліккер-шуму, де звичайна дисперсія розходиться. Структурні функції  $N$ -го порядку  $D_x^{(N)}(\tau)$  визначаються як автокореляційні функції диференціалів  $N$ -го порядку послідовності  $x$  від безрозмірного часу  $t$

$$D_x^{(N)}(\tau) = R\left\{\left(\Delta^N x(t, \tau)\right)^2\right\} = R\left\{\left(\Delta^N x(t)\right)^2\right\}. \quad (1)$$

Тобто: структурна функція  $N$ -го порядку — це дисперсія диференціала  $N$ -го порядку від  $x(t)$ . Відповідно дисперсія Аллана відноситься до структурної функції другого порядку

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2} D_x^{(2)}(\tau). \quad (2)$$

У формулах (1) і (2):  $R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t-\tau)dt$  — автокореляційна функція,  $\Delta^N x(t, \tau) = \Delta^{N-1}(\Delta x(t, \tau))$ ,  $\Delta^1 x(t, \tau) = x(t+\tau) - x(t)$  — диференціал,  $y(t) = dx(t)/dt$  для дискретної послідовності  $y_{i,\tau} = (x(t+\tau) - x(t))/\tau = \Delta^1 x(t)/\tau$  [9]—[13]. Інший вид дисперсії Аллана

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \sum_{i=1}^2 \left( \bar{y}_i - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \bar{y}_j \right)^2 \right\rangle, \quad (3)$$

де  $\langle \rangle$  позначає математичне очікування (середнє значення) на нескінченній кількості відліків, що співвідноситься зі звичайною дисперсією, в реальних застосуваннях кількість відліків скінченна.

Існують різні види дисперсій, які відрізняються відповідністю з різними структурними функціями, наприклад дисперсія Адамара (далі позначається HVAR) асоціюється з структурною функцією 3-го порядку, також часто використовується дисперсія Аллана з усередненням відліків, які попадають в інтервал між моментами обчислення диференціалів. На рис. 1 показані відліки безперервного процесу які використовуються для розрахунку різних видів дисперсії випадкового процесу. Відстань між відліками  $\tau_0$ . Дисперсія AVAR це дисперсія Аллана, що перекривається, тобто проводиться усереднення з коефіцієнтом  $m=3$ , якщо розраховується дисперсія без перекриття, то береться як відлік  $y_i$  середнє значення за час  $\tau = m\tau_0$ , якщо розрахунок проводиться з перекриттям, то розраховується дисперсія з шагом  $\tau_0$ , а значення  $y_i$  також обчислюються як середні значення за інтервали, що перекриваються, як показано знизу рис. 1.

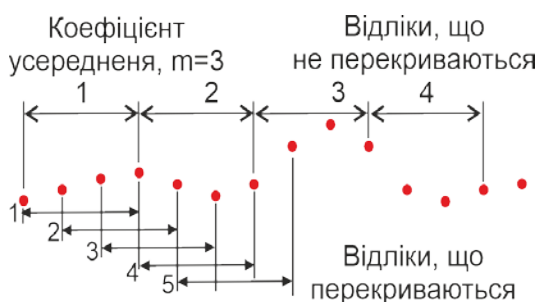


Рис. 1. Відліки реалізації процесу

як показано знизу рис. 1.

Інші види дисперсії, що розраховувались за програмою [14], MVAR — це модифікована дисперсія Аллана, де вводиться вікно, в якому розраховується дисперсія, T-VAR — дисперсія у часі, що обчислюється на основі MVAR та збігається з класичною дисперсією для білого фазового шуму, її застосування для нестационарних процесів дає результат, що розходиться зі збільшенням часу спостереження (розміру вибірки).

## Результати дослідження

Експериментальні дослідження проводилися на моделі сенсорного вузла Інтернету речей у складі Arduino Uno і давача температури та вологості DHT22, який з'єднаний з комп'ютером з ОС Windows 10 по USB. Програми, написані для Arduino та комп'ютера (у середовищі Делфі 10.3) забезпечують запис даних про температуру та вологість у текстовий файл за вимогами програми обробки з інтервалом 5...60 секунд. Сенсор DHT22 надає результати з точністю до першого знаку після коми, відповідно це обмежує високочастотні коливання вихідних даних та зумовлює зміни у характері статистичних параметрів вихідного сигналу. Це можна підтвердити за результатами обробки даних.

На рис. 2 показано одну реалізацію вимірної температури, де використано близько 9000 вимірювань з інтервалом 5 с. Одним з експериментів був розрахунок дисперсії як повної послідовності, так і окремих частин довжиною 1024 відліків. За допомогою програми AlaVar 5.3 [14] розраховано показники відхилення Аллана (ADEV, корінь квадратний з дисперсії —  $(\sigma_y^2(\tau))^{1/2}$ ) та інші параметри процесу з рис. 2 (рис. 3). Залежність TDEV від часу аналізу  $\tau$  розходиться, що пояснюється властивостями процесу, притаманними шуму типу частотний флікер-шум та шуму типу випадкових блукань. Для відхилення Аллана (ADEV та MDEV) і відхилення Адамара (HDEV) також спостерігається збільшення показників з часом спостережень, що саме за похідною цієї залежності свідчить про переважний тип шуму на цьому інтервалі. Це є шум типу випадкових блукань з похідною 0,5418.

Досліджуючи окремо часткові інтервали з рис. 2, отримано схожі залежності, за винятком останнього інтервалу (відліки 7169—8192), де похідна нахилу залежності  $\sigma_y(\tau)$  дорівнює 0,2474 і відповідає процесу типу частотний флікер-шум. Разом з тим, середні значення похідних по восьми інтервалах близьке значенню на всьому інтервалі, що вказує на наявність і інших законів випадкових процесів в реалізації, що вивчається. Тобто, аналіз на менших інтервалах і порівняння з об'єднаним інтервалом може дати числові характеристики процесу, які можуть свідчити про зміни в роботі сенсорного вузла

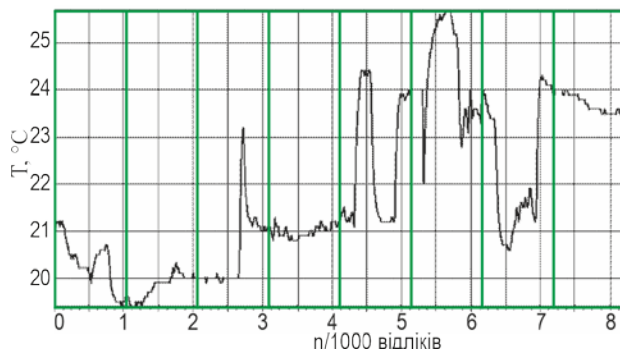


Рис. 2. Реалізація процесу вимірювання температури, що використовувався для обчислення дисперсії Аллана

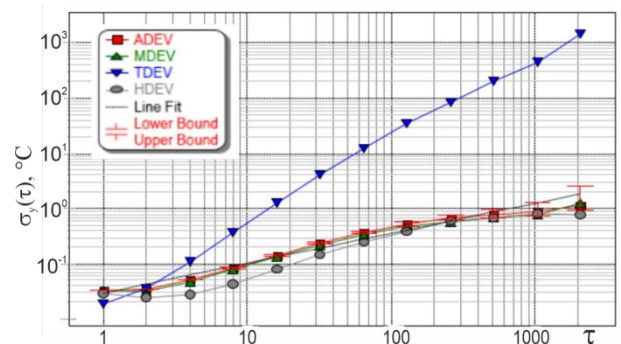


Рис. 3. Залежності відхилень для процесу з рис. 2

Інше питання — вимірювання впливу шуму на показники дисперсії Аллана для досліджуваного процесу. Для часової послідовності з рис. 2 і до її окремих частин додавались шумові сигнали з різними спектральними залежностями: білий частотний шум, де відсутня частотна залежність, частотний флікер-шум (або шум  $1/f$ ), та частотний шум випадкових блукань із залежністю  $f^{-2}$ . Вибір цих видів шумів пояснюється їх поширеністю в фізичних процесах.

Для першого інтервалу на рис. 4 показані залежності температури від номеру відліку та їх залежності відхилення для різних методів визначення дисперсії. Видно, що додавання білого шуму набагато меншої амплітуди (максимальне відхилення 0,06 °C) ніж зміни температури на цьому інтервалі, значно змінює статистичні характеристики процесу. В умовах відомих характеристик обладнання це може свідчити про появу несправності, або зовнішнього втручання в систему.

При додаванні шуму до повної вибірки (рис. 2) залежності зберігаються, вплив шуму проявляється як на зміні похідної так і на значеннях відхилення  $\sigma_y(\tau)$  за малих значень  $\tau$ . При додаванні інших типів шуму, залежності відхилення Аллана також змінюються, навіть коли візуально ці змі-

ни не дуже проявляються. Зміни при додаванні флікер-шуму схожі за рівнем на зміни від білого шуму, що зумовлено наявністю в ньому високочастотних складових, вплив яких відчувається на малих інтервалах усереднення. Додавання малого шуму типу випадкових блукань проявляється краще на більших інтервалах, де він проявляється загальним зсувом залежностей вгору, та зміною нахилу похідної. На малих інтервалах його вплив також більше зумовлений високочастотними складовими, які присутні у складі всіх шумів. Тестові зразки шуму генерувалися програмою AlaNoise 3.0 [14]. Розрахунки для різних реалізацій вимірювання температури та вологості підтвердили високу чутливість методу дисперсії Аллана (структурних функцій) до доданих шумів малої інтенсивності. З іншого боку, наявність у структурі отриманих даних різких стрибків призводить до підвищення значення AVAR на значеннях  $\tau=128$  та більших, що може за наявності досвіду про часові залежності даних свідчити або про збій або про зовнішнє втручання в процес вимірювання.

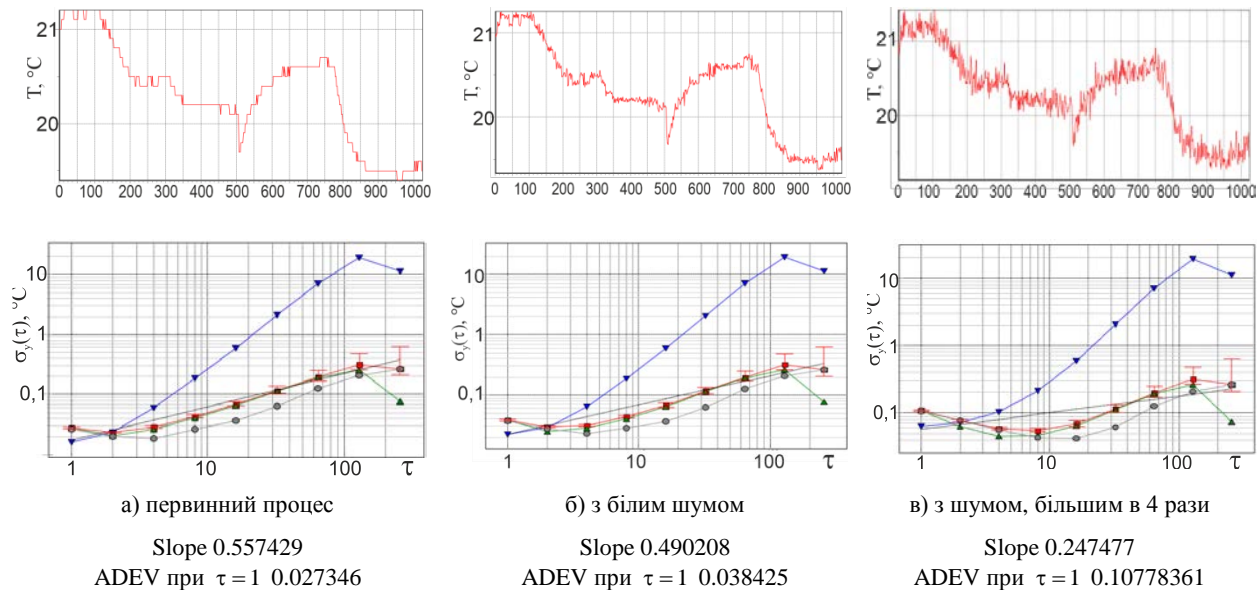


Рис. 4. Перший інтервал реалізації вимірювання температури з додаванням білого шуму і його характеристики дисперсії

Якщо використовувати детальне відстеження дисперсії Аллана та структурних функцій, то можна визначити момент зміни кореляційної функції процесу, тобто прояву структурної неоднорідності випадкового процесу. Також виявляється зміна середнього, дисперсії та прояви нестационарності. З погляду користувача це може бути моментом розладу процесу [5]—[7], [15]. Метод структурних функцій відноситься до непараметричних методів, тому що він потребує мінімальної кількості апріорних даних про процес та не вимагає навчання. Фактично з дослідження часток процесу з рис. 1 і зміни похідної лінії апроксимації автори визначали характер процесу на відповідній ділянці часової залежності і мали змогу визначити зміну характеру процесу. В подальшому буде визначення моменту розладу процесу з мінімальним часом реагування.

Важливим є питання мінімального набору даних, які потрібно передавати із сенсорного вузла для обробки даних про дисперсію Аллана. На підставі вивчення графіків для різних процесів та різних інтервалів  $\tau_0$ , автори дійшли висновку, що можна передавати дані про дисперсію AVAR у двох точках по осі часу, при  $\tau=1$  та  $\tau=128$ . Знання відхилення Аллана у цих точках для процесів вимірювання з достатньою густиною точок по осі часу дає змогу знайти кут нахилу апроксимаційної лінії, на підставі чого можна зробити висновок про тип шуму (випадкового процесу вимірювання) та мати числові значення для порівняння характеристик процесу в різних умовах. За використання в бездротових сенсорних мережах технологій передачі даних з низьким енергоспоживанням (LPWA) це може задовольнити вимоги щодо обсягу повідомлень.

## Висновки

Встановлено, що використання розрахунку параметрів нестационарного випадкового процесу вимірювання за методом дисперсії Аллана дозволяє отримати корисну інформацію про узагальнені характеристики часових залежностей показників сенсорів, зокрема хід відхилення Аллана

від кількості відліків, на основі яких можна визначити стан системи, та можливі технічні несправності сенсорних вузлів або зовнішнє втручання в потік отримуваних даних. При цьому можна скоротити кількість даних для прийняття рішень, зменшити вимоги до трафіку в мережі та обчислювальних ресурсів системи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. Ф. Романенко, и Г. А. Сергеев, *Вопросы прикладного анализа случайных процессов*. М.: Советское радио, 1968.
- [2] А. Н. Ширяев, *Статистический последовательный анализ*. Москва: Наука, 1976.
- [3] M. T. Khan, D. Serpanos and H. Shrobe, "ARMET: Behavior-Based Secure and Resilient Industrial Control Systems," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 1, pp. 129-143, Jan. 2018, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2725642>.
- [4] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th Edition. Wiley, June 2015, 712 p.
- [5] Б. Яворський, і Ю. Лецишин, «Достовірність методу визначення розладки ритмокардіосигналу,» *Вісник ТНТУ*, т. 73, № 1, с. 252-258, 2014.
- [6] Т. Л. Щербак, «Моделі і задачі досліджень циклічного процесу електроспоживання,» *Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України*. Київ, Україна, 2009, с. 49-56.
- [7] В. Д. Бровко, О. С. Архипов, і О. М. Скубак, «Визначення моменту розладки інформаційного потоку» на *XI Всеукраїнська науково-практична конф. Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави*. Київ, 15 травня 2020 р., с. 73-76.
- [8] И. Е. Антипов, и Т. А. Василенко, «Идентификация мобильных устройств по особенностям спектров их сигналов,» *Радиотехника*, міжвід. наук-техн. зб, вип. 201, с. 91-97, 2020.
- [9] K. Draganová, V. Moucha, T. Volcko, and K. Semrád, "Non-Stationary Noise Analysis of Magnetic Sensors using Allan Variance," *Acta Physica Polonica*, 131(4), pp. 1126-1128, 2017.
- [10] S. L. J. Gierkink, "Control Linearity and Jitter of Relaxation Oscillators." PhD Thesis, 1999. Accessed: <https://research.utwente.nl/en/publications/control-linearity-and-jitter-of-relaxation-oscillators> .
- [11] S. Bregni, "Twenty-Five Years of Applications of the Modified Allan Variance in Telecommunications," in *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 63, no. 4, pp. 520-530, 2016, <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2015.2495009>.
- [12] В. Г. Крижановський, В. Ф. Комаров, С. П. Сергієнко, і В. В. Крижановський, «Безпека сенсорів в кіберфізичних системах,» на *Міжн. науково-техн. конф. "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (ВОТТІ-2021)*, Одеса, 2021, 3 с.
- [13] T. Marusenkova, "Analysis of the influence of sample rates on the allan variance ," *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Інформаційні системи та мережі, вип. 5, с. 53-61. 2019.
- [14] ALAVAR Software, "ALANOISE : NOISE GENERATION FREEWARE." [Electronic resource]. Available: <http://www.alavar.org> .
- [15] В. Я. Карташов, и М. А. Новосельцева, «Способ идентификации линейного объекта,» *Патент РФ №2189622*. 2002. Бюл. № 26.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 7.06.2021

**Крижановський Володимир Григорович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій, e-mail: v.krizhanovski@donnu.edu.ua ;

**Комаров Василь Федорович** — провідний інженер навчально-практичної лабораторії технології інтернету речей кафедри інформаційних технологій, e-mail: v.komarov@donnu.edu.ua ;

**Сергієнко Сергій Петрович** — канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, e-mail: s.serhiienko@donnu.edu.ua ;

**Загоруйко Любов Василівна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, e-mail: l.zahoruiko@donnu.edu.ua .

Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця

**V. G. Kryzhanovskiy<sup>1</sup>**

**V. F. Komarov<sup>1</sup>**

**S. P. Serhiienko<sup>1</sup>**

**L. V. Zahoruiko<sup>1</sup>**

## Identification Sensor Nodes Normal Operation Using Allan Variation

<sup>1</sup>VasyI` Stus Donetsk National University

*In cyberphysical systems and the Internet of Things (IoT) the threat of failure of sensor nodes as well the threat of unauthorized interference during the transmission of measurement data exists. Thus, the need to develop and improve methods of monitoring sensor nodes is relevant given the large number of such nodes, energy constraints that limit traffic and computing resources of systems, as well as the need for full automation of work due to the economic inexpediency of their maintenance. It is proposed to use one of the statistical methods, namely the Allan variance or a more general concept of structural functions, to study stochastic processes in time sequences representing the implementation of random measurement results*



in such systems. The ability to calculate the statistical characteristics of nonstationary processes and to determine the spectral dependences of various kinds of noise at moderate computational costs is the advantage of that method.

The use of Allan dispersion to process model temperature and humidity data from Arduino-based sensors in the Internet of Things system is considered. The dependences of Allan deviation and its modifications as functions of various averaging interval are calculated. For the typical modes of operation of the considered sensors in the Internet of Things applications the dependences of the Allan deviation correspond to the type of noise "Random Walk FM". It is confirmed by calculations at different measurement intervals. The influence of different types of noise on these dependences is investigated. The minimum set of parameters that can with a limited data set characterize the normal measurement process, possible malfunctioning or natural and artificial interference to normal operation was chosen. The possibility of splitting the process of statistical processing between the sensor node and the controller of the Internet of Things is indicated, which will reduce the traffic and the appropriate energy consumption of the sensor node.

**Keywords:** propane, Internet of Things, cyberphysical systems, Allan's variation, security, process disorders.

**Kryzhanovskiy Volodymyr G.** — Dr. Sc. (Eng), Professor, Professor of the Chair of Information Technology, e-mail: v.krizhanovski@donnu.edu.ua;

**Komarov Vasyl F.** — Engineer of Internet of Things laboratory the Chair of Information Technology, e-mail: v.komarov@donnu.edu.ua ;

**Serhiienko Serhii P.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, Associate Professor the Chair of Information Technology, e-mail: s.serhiienko@donnu.edu.ua ;

**Zahoruiko Liubov V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor the Chair of Information Technology, e-mail: l.zahoruiko@donnu.edu.ua

**В. Г. Крыжановский<sup>1</sup>**  
**В. Ф. Комаров<sup>1</sup>**  
**С. П. Сергиенко<sup>1</sup>**  
**Л. В. Загоруйко<sup>1</sup>**

## Использование дисперсии Аллана для идентификации нормальной работы сенсорных узлов

<sup>1</sup>Донецкий национальный университет имени Василя Стуса

При передаче данных измерений в киберфизических системах и интернете вещей существует угроза выхода из строя сенсорных узлов и несанкционированного вмешательства в работу системы. Учитывая большое количество узлов и ограничения на расход энергии и вычислительные ресурсы системы, а также необходимость полной автоматизации их работы ввиду экономической нецелесообразности обслуживания, необходимо разрабатывать и совершенствовать методы контроля сенсорных узлов. Предлагается использовать один из статистических методов исследования стохастических процессов во временных последовательностях, которые представляют реализации случайных процессов измерения — дисперсию Аллана или в общем случае структурные функции. Преимуществом этого метода является способность рассчитывать статистические характеристики нестационарных процессов и определять спектральные зависимости различных видов шума, при этом вычислительные затраты будут умеренные.

В работе используются варианты дисперсии Аллана для обработки модельных данных температуры и влажности с датчика интернета вещей на базе Ардуино, рассчитаны зависимости отклонения Аллана и похожих модификаций в зависимости от интервала усреднения. Для типовых режимов работы измерителя в системе интернета вещей девиация Аллана отвечает типу шума «случайные блуждания», что подтверждается расчетами на разных интервалах измерения. Исследовано влияние разных видов шума на ход этих зависимостей и выбран минимальный набор параметров, которые могут при ограниченном массиве данных охарактеризовать нормальный процесс измерения или возможные естественные или искусственные нарушения нормальной работы. Указано на возможность разделить процесс статистической обработки между сенсорным узлом и контроллером сети интернета вещей для уменьшения трафика и соответственно затрат энергии сенсорным узлом.

**Ключевые слова:** интернет вещей, киберфизические системы, дисперсия Аллана, безопасность, разладка процесса.

**Крыжановский Владимир Григорьевич** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий, e-mail: v.krizhanovski@donnu.edu.ua ;

**Комаров Василий Федорович** — ведущий инженер учебно-практической лаборатории технологий интернета вещей кафедры информационных технологий, e-mail: v.komarov@donnu.edu.ua ;

**Сергиенко Сергей Петрович** — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий, e-mail: s.serhiienko@donnu.edu.ua

**Загоруйко Любовь Васильевна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий, e-mail: l.zahoruiko@donnu.edu.ua