

І. Ю. Черепанська<sup>1</sup>  
 О. М. Безвесільна<sup>2</sup>  
 А. Ю. Сазонов<sup>1</sup>

## ПРЕЦИЗІЙНА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ГОНІОМЕТРИЧНА СИСТЕМА

<sup>1</sup>Житомирський державний технологічний університет;

<sup>2</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Розглянуто актуальну проблему — забезпечення високоточних та високопродуктивних гоніометричних вимірювань, які необхідні в багатьох сучасних науково-господарських задачах у різних галузях господарства. На основі аналізу фізичних явищ та принципів роботи лазерної спектроскопії, напівпровідникових фоточутливих елементів та нейромережових технологій запропоновано нову прецизійну інтелектуальну гоніометричну систему на основі лазерного гіроскопа (кільцевого лазера), CMOS-матриці та штучної нейронної мережі. Прецизійна інтелектуальна гоніометрична система дозволяє проводити високоточні кутові вимірювання при попередній виставці навігаційних чутливих елементів, плоских кутів та пірамідальності призми, а також інших об'єктів виробництва, показника заломлення оптичного скла з обробкою вимірювальної інформації в режимі реального часу. Вона поєднує такі переваги, як висока точність та швидкість вимірювання, можливість роботи в автоматизованому режимі та автоматизованої обробки вимірювальної інформації, простота використання, універсальність. Висока швидкість системи досягається за рахунок використання можливості штучної нейронної мережі здійснювати одночасну обробку множини цифрових даних методами паралельної обробки. Таким чином час вимірювання суттєво скорочується. Висока точність прецизійної інтелектуальної гоніометричної системи досягається за рахунок використання в якості чутливих елементів безінерційного кільцевого лазера та CMOS-матриці з великою роздільною здатністю та чутливістю, що дозволяє проводити безконтактне перетворення кутів з обробкою інформації в реальному масштабі часу та працювати в автоматизованому режимі.*

**Ключові слова:** гоніометр, штучна нейронна мережа, CMOS-матриця, кільцевий лазер, систематична складова похибки вимірювання, випадкова складова похибки вимірювання, струм насичення, довжина світлової хвилі.

### Вступ

#### Постановка проблеми у загальному вигляді

Більшість сучасних науково-господарських задач передбачає проведення різноманітних вимірювань величин плоских кутів. Високоточні (прецизійні) кутові вимірювання є необхідними у багатьох галузях господарства, наприклад, таких, як високоточні машино- та приладобудівні виробництва і робототехніка, навігація та орієнтація, будівництво астрономія та геодезія, радіо- та лазерна локація та ін. [1]—[4]. При цьому галузі використання кутовимірювальних засобів постійно розширюються. Водночас стрімко покращується якість цих засобів, що зумовлюється високими вимогами сучасного виробництва до якості продукції та виконуваних робіт. Вказане, відповідно, стимулює розробку нових та вдосконалення відомих гоніометричних (кутовимірювальних) приладів та систем. Якість відповідно до міжнародних стандартів серії ISO 9000 та Державного стандарту України — це комплексне поняття, одним з основних показників якої є точність та швидкодія, яким приділяється особлива увага під час розробки нових та вдосконалення відомих гоніометричних приладів та систем.

Аналіз відомих досліджень і публікацій показав, що на сьогодні перелік сучасних кутовимірювальних засобів та систем є досить значним. Аналізуючи їх принципи побудови та роботи очевидно, що всі вони мають різні діапазони вимірювання, точність, та швидкодію, а також базуються на застосуванні різних складних математичних моделей, методів, та алгоритмів обробки інформації. Так, наприклад, широко застосовуваними гоніометричними засобами, що серійно випускаються світовою промисловістю та складають сучасну гоніометричну базу є гоніометр-спектрометр ГС-2 [5] (Україна КП СПС «Арсенал», м. Київ), гоніометр ГС-5 (Україна, КП СПС «Арсенал», м. Київ), гоніометр Г5М (Україна, КП СПС «Арсенал», м. Київ; Білорусь; Росія), дослідницький гоніометр ВІ-200SM [6] (США, Brookhaven Instruments Corporation), автоматичний (динамічний) лазерний гоніометр ДГ-03Л та динамічний гоніометр ДГ-03 [7] (Росія, Науково-виробничий комплекс «Діагностика»), гоніометри PrismMaster®150 та PrismMaster®300 [8] (Німеччина, Trioptics), комбінований гоніометр (DCAT 11/DCAT 11HR) [9] (DataPhysics Instruments GmbH, Німеччина), гоніометр-спектрометр Gonio II-VIS [10] (Moeller-Wedel, Німеччина), напівавтоматичний гоніометр з електронною оцінкою зображення GONIOMAT M5 та GONIOMAT M10 [10] (Moeller-Wedel, Німеччина), кутовимірювальна система ГС1Л [5] (Україна, КП СПС «Арсенал», м. Київ).

Аналізуючи технічні характеристики приведених гоніометричних систем та засобів можна стверджувати, що гоніометри ГС-2, ГС-5 [5] (Україна КП СПС «Арсенал», м. Київ), Г5М (Україна, КП СПС «Арсенал», м. Київ; Білорусь; Росія), ВІ-200SM [6] (США, Brookhaven Instruments Corporation) поряд із такими незаперечними перевагами, як простота конструкції та відносно невисока вартість, мають такі суттєві недоліки: порівняно невисоку точність (гранична похибка одноразового вимірювання становить близько 10"), відсутність автоматичного налаштування, відсутність цифрової обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу, неможливість використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів.

Для лазерних гоніометрів ДГ-03Л, ДГ-1Л, ДГ-03, ДГ-1Ф [7] (Росія, Науково-виробничий комплекс «Діагностика») характерною є висока точність (гранична похибка одноразового вимірювання становить близько 0,3"), можливість автоматизованого вимірювання. Проте вони мають високу вартість, складність конструкції, відсутність цифрової обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу, а отже і невисоку швидкість вимірювання, вимагають доопрацювання для використання у складі автоматизованих кутовимірювальних технологічних комплексів.

Гоніометри PrismMaster®150 та PrismMaster®300 [8] (Німеччина, Trioptics) разом з простотою конструкції, можливістю автоматизованого вимірювання, автоматичного налаштування кутів, цифрової обробки інформації мають порівняно невисоку точність (гранична похибка одноразового вимірювання становить близько 1,0") та високу вартість.

Комбінований гоніометр (DCAT 11/DCAT 11HR) [9] (DataPhysics Instruments GmbH, Німеччина) та гоніометр-спектрометр Gonio II-VIS , а також автоматичні гоніометри GONIOMAT A/A-HR, GONIOMAT A-HR [10] (Moeller-Wedel, Німеччина) мають високу точність (похибка вимірювання становить близько 0,01"), можливість автоматизованого вимірювання, можливість використання у складі автоматизованих технологічних комплексів, можливість цифрової обробки інформації. Проте, висока вартість та складність конструкції є їх основними недоліками.

Кутовимірювальна система ГС1Л [5] (Україна, КП СПС «Арсенал», м. Київ) має високу точність (похибка вимірювання становить близько 0,5"), можливість автоматичного вимірювання з цифровою обробкою інформації, можливість використання у складі автоматизованих вимірювальних технологічних комплексів. Проте відсутність можливості інтеграції з сучасними обчислювальними системами та порівняно низьку швидкість вимірювання є її суттєвими недоліками. Тому дана система вимагає доопрацювання та модернізації для використання у сучасних вимірювальних технологічних комплексах та інформаційних системах.

### **Виділення невирішених частини поставленої проблеми**

Таким чином, можна стверджувати, що проблема високоточного та швидкого вимірювання величин плоских кутів з автоматизованою обробкою інформації в масштабі реального часу ще й досі повністю не вирішена. Це пояснюється тим, що відповідно до міжнародних стандартів якості, сучасне виробництво постійно висуває щораз жорсткіші вимоги до ефективності функціонування вимірювальних приладів. З урахуванням того, що показниками ефективності функціонування вимірювальних систем є точність, висока швидкість, універсальність, робота в автоматизованому режимі та режимі реального часу, забезпечити вказане, при розробці нових та вдосконаленні від-

мих приладів, можна за рахунок використання високоякісних оптичних систем, прецизійних сенсорів, а також новітніх алгоритмів, методів і процедур обробки інформації, зокрема застосування технологій штучного інтелекту — штучних нейронних мереж (ШНМ).

*Мета статті* — запропонувати прецизійну інтелектуальну гоніометричну систему порівняно вищої точності та швидкості зі штучною нейронною мережею, CMOS-матрицею та кільцевим лазером робота якої базується на фізичних явищах лазерної спектроскопії, напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологій.

### Опис запропонованої прецизійної інтелектуальної гоніометричної системи

Пропонована прецизійна інтелектуальна гоніометрична система (ПІГС) розроблена з використанням останніх досягнень науки та техніки в галузях оптики, механіки, електроніки, автоматизації, штучного інтелекту, та поєднує такі переваги, як точність та швидкість вимірювання, простота використання, універсальність, можливість автоматизованої обробки вимірювальної інформації в режимі реального часу. ПІГС може застосовуватись для безконтактних високоточних вимірювань у разі попереднього виставлення навігаційних чутливих елементів (НЧЕ), плоских кутів, пірамідальності призми, та інших об'єктів виробництва, показника заломлення оптичного скла.

Структурна схема ПІГС показана на рис. 1. ПІГС організована деяка багаторівнева сукупність різних технічних засобів з неоднорідними властивостями.

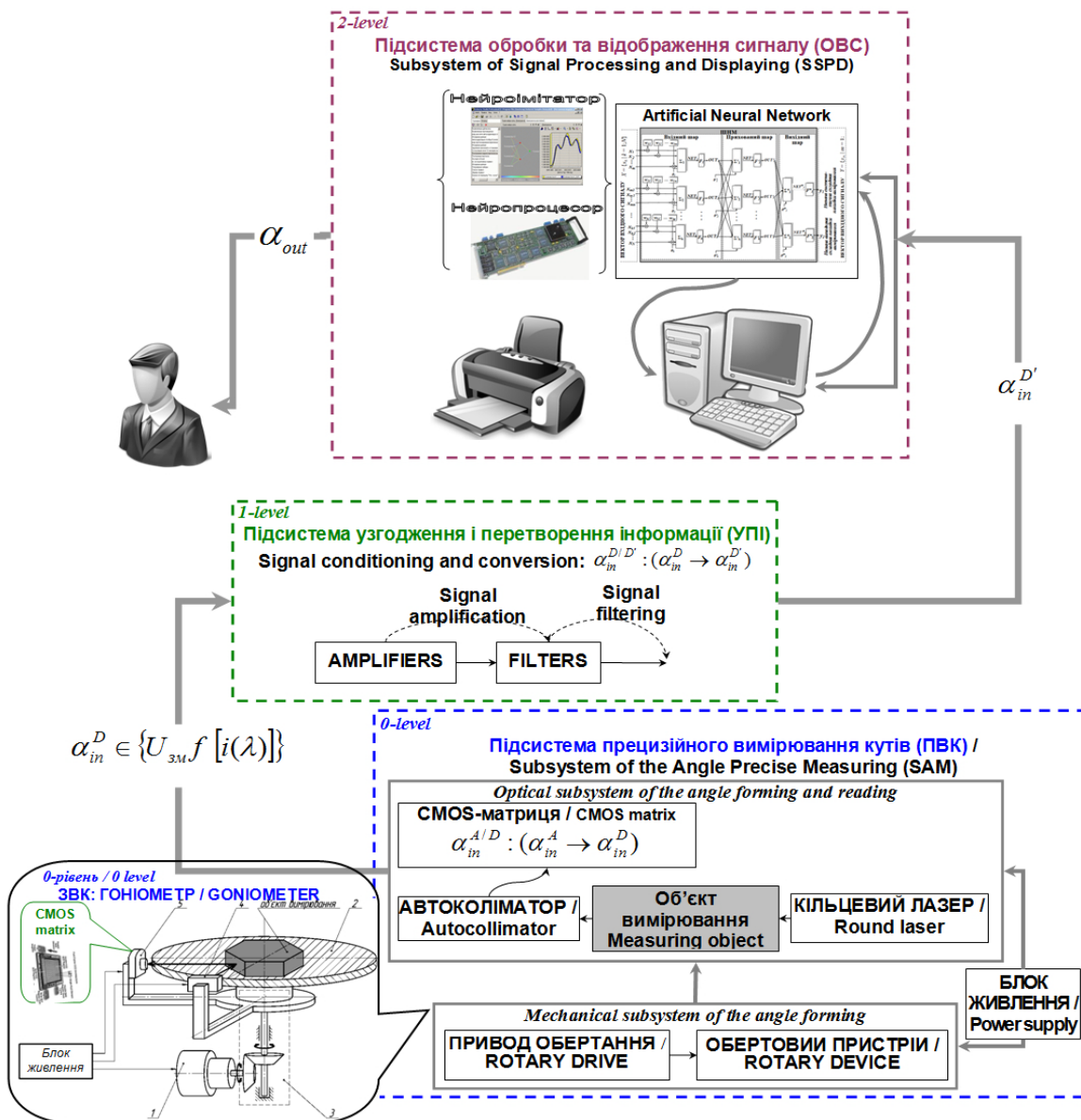


Рис. 1. Структурна схема ПІГС

Нижній рівень ППГС (*0-level*) являє собою рівень формування вхідного вимірювального сигналу  $\alpha_{in}^A$ . Цей рівень організований у вигляді *підсистеми прецизійного вимірювання кута (ПВК)/subsystem of the angle high-precision measuring (SAM)*, базовим елементом якої є високоточний лазерний гоніометр (рис. 2), що містить привод 1 обертання, предметний стіл 2, обертовий пристрій 3, кільцевий лазер 4, автоколіматор 5, CMOS-матрицю 6, блок 7 живлення. Привод 1 обертання, механічно з'єднаний з предметним столом 2, що встановлений на обертовому пристрої 3. На ньому жорстко закріплені кільцевий лазер 4 і автоколіматор 5 з CMOS-матрицею 6, які підключені до блока 7 живлення. Як прецизійний датчик кута застосовується кільцевий лазер, розроблений в ЦКБ «Арсенал», за участю кафедри приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Похибка вимірювання кутів цього кільцевого лазера, спричиняється лінійним дрейфом масштабного коефіцієнта, якщо  $W = 90$  град/с та не перевищує  $0,01''$ . Загалом ефективність застосування кільцевих лазерів як прецизійних датчиків кутів, доведена багатьма сучасними дослідниками.

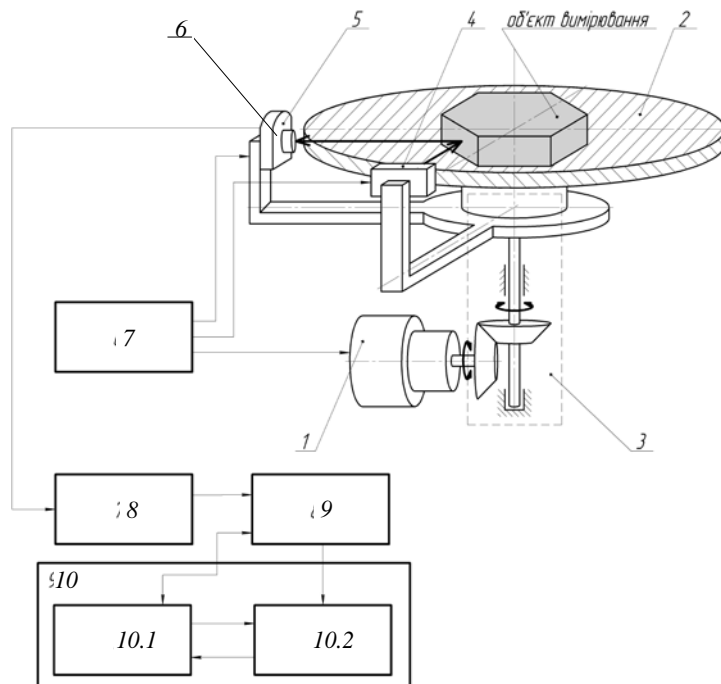


Рис. 2. Блок-схема ППГС [11]

Автоколіматор використовується для генерації пучків світла та реєстрації випромінювання від кільцевого лазера. Як аналізатор зображення використовується CMOS-матриця, що являє собою двомірну решітку фоточутливих елементів (пікселів), розміри яких не перевищують декількох мікрметрів, з похибкою, що не перевищує соті частки мікрметрів. Завдяки високій точності цих структур та їх ортогональній структурі CMOS-матриці з успіхом використовують для вирішення різноманітних прецизійних вимірювальних задач [19]. З урахуванням того, що основна похибка автоколіматора залежить від розміру пікселів CMOS-матриці, запропоновано використання матриці з розмірністю пікселів  $1,0 \times 1,0$ , наприклад, OV16880 або OV20880 виробництва OmniVision (США). Вказане дозволяє досягти похибки вимірювання автоколіматора  $0,01''$ .

При вимірюванні кутів, на виході автоколіматора 5 отримують потік фотонів, які сприймає CMOS-матриця 6 і перетворює їх на множину цифрових сигналів. Таким чином на виході ПВК формується сигнал  $\alpha_{in}^D \in \{U_{zm} f[i(\lambda)]\}$ .

Наступний рівень ППГС *1-рівень / 1-level узгодження і перетворення сигналу*. Цей рівень представлений підсистемою узгодження і перетворення інформації (УПІ) / Signal conditioning and conversion (SCC). На цьому рівні здійснюється попередня обробка сигналів  $\alpha_{in}^D$  від ПВК, тобто підсилення та фільтрація сигналів для їх коректної обробки штучною нейронною мережею (ШНМ). Базовим елементом 1-level ППГС є блок 8 узгодження і перетворення інформації (information matching and transformation unit) (рис. 1, рис. 2), який реалізує функцію  $\alpha_{in}^{D/D} : (\alpha_{in}^D \rightarrow \alpha_{in}^{D'})$ .

З 1-level множина вимірювальних даних у цифровій формі  $\alpha_{in}^{D'}$  передається на 2-level – *обробки та відображення сигналу/signal processing and display*. Цей рівень представлений підсистемою обробки та відображення сигналу (ОБС)/subsystem of signal processing and displaying (SSPD). Базовим елементом 2-level ППГС є ШНМ (блок 9 на рис. 2), що може бути реалізована нейропроцесором та спряжена з ЕОМ, або нейроімітатором та інтегрована в операційну систему ЕОМ, як спеціалізований програмний додаток. ШНМ здійснює розпізнавання випадкових та систематичних складових похибок вимірювання. Крім того, підсистема ПВС містить ЕОМ 10, за допомогою якої в режимі реального часу у відповідному програмному модулі (блок 10.1 на рис. 2) здійснюється

аналіз і обробка результатів від ШНМ та прийняття рішень, а також автоматизована обробка вимірювальної інформації, зокрема, нормування складових похибок вимірювання за відомими методами, з представленням результатів у зручній для користувача формі (табличній та/або графічній) через інтерфейс 10.2 користувача (див. рис. 2).

Під час функціонування ППГС, зокрема при обертанні обертового пристрою з об'єктом вимірювання на виході автоколіматора, отримують потік фотонів, що потрапляє на світлочутливі елементи CMOS-матриці, яка формує відповідну множину цифрових сигналів  $a_{in}^D \in \{U_{3M} f[i(\lambda)]\}$ .

В залежності від величини вимірюваного плоского кута  $\varphi$  та оптичних показників матеріалу ОБ світловий промінь лазера через оптичну систему автоколіматора 5 проектується з різною інтенсивністю на відповідні позиції (фотоелементи) CMOS-матриці 6, яка перетворює його на відповідний електричний сигнал. Електричний сигнал від CMOS-матриці 6 через блок 8 узгодження передається на ШНМ 9 а з неї — до ЕОМ 10, в якій здійснюється автоматизована обробка вимірювальної інформації. Коли опромінюються світлом фотоелектронні напівпровідникові елементи CMOS-матриці, в них відбувається зміна внутрішнього стану. Зокрема спостерігається збільшення електропровідності пропорційно інтенсивності світлового потоку. Таким чином CMOS-матриця 6 формує електричні сигнали відповідно до спектрального складу випромінювання ОБ.

CMOS-матриця 6 побудована таким чином, що струм  $i(\lambda)$  насичення фотоелементів перетворюється в напругу  $U_{3M}$  безпосередньо на пікселі матриці, тобто відбувається реалізація функції  $\alpha_{in}^{A/D} : (\alpha_{in}^A \rightarrow \alpha_{in}^{D'})$  перетворення аналогових сигналів  $\alpha_{in}^A \in \{i(\lambda)\}$  в цифровий код  $\alpha_{in}^{D'} \in \{U_{3M} f[i(\lambda)]\}$ . Вихідний вимірювальний сигнал  $\alpha_{in}^{D'} \in \{U_{3M} f[i(\lambda)]\}$  є цифровим кодом, реалізованим у вигляді множини електричних імпульсів — напруг  $U_{3M}$  змінного значення в залежності від величини струму  $i(\lambda)$  насичення фотоелементів, подається до блоку 8 узгодження і перетворення інформації. В блоці 8 узгодження і перетворення інформації сигнали фільтруються  $\alpha_{in}^{D'/D''} : (\alpha_{in}^{D'} \rightarrow \alpha_{in}^{D''})$  і передаються у підсистему ОВС, зокрема на ЕОМ та ШНМ у вигляді множини чисел  $\alpha_{in}^{D''} \subset N = \{N_i | i = \overline{1, n}\}$ , яка отримується за один повний оберт обертового пристрою 3:

$$N = \{N_i | i = \overline{1, n}\}; \quad N_i = N_{i-2} + \int_{t_i}^{t_{i+1}} f_{Gout}(t) dt, \quad (1)$$

де  $i$  — порядковий номер числа, що відповідає порядковому номеру грані призми;  $n$  — кількість граней призми;  $t_i$  — час надходження імпульсів до автоколіматора від  $i$ -ї грані призми,  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n+1}$  — час надходження імпульсів до автоколіматора від 1, 2, 3,  $n+1$  грані призми, відповідно;  $f_{Gout}$  — частота сигналів  $\alpha_{in}^D$  від гоніометра.

Таким чином, цифровий сигнал  $\alpha_{in}^{D''}$ , що передається до ЕОМ та ШНМ, описується множиною

$$\alpha_{in}^{D''} \subset \left\{ N_1 = \int_{t_1}^{t_2} f_{out}(t) dt; \quad N_2 = \int_{t_2}^{t_3} f_{out}(t) dt; \quad N_3 = N_1 + \int_{t_3}^{t_4} f_{out}(t) dt; \right. \\ \left. N_4 = N_2 + \int_{t_4}^{t_5} f_{out}(t) dt; \quad N_{n-1} = N_{n-3} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{out}(t) dt; \quad N_n = N_{n-2} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f_{out}(t) dt \right\}. \quad (2)$$

Величина вимірюваного  $i$ -го кута  $\phi_i$  автоматично обчислюється в ЕОМ за виразом

$$\phi_i = 2\pi \frac{N_{i-1} + N_i}{N_{n-1} + N_n} = 2\pi \frac{N_\phi}{N_{2\pi}}, \quad N_{i-1} = 0, \quad \text{якщо } i = 1, \quad (3)$$

де  $\phi_i$  — вимірне значення кута;  $i$  — порядковий номер вимірюваного кута.  $N_i$  — множина чисел, що отримується від гоніометра за один повний оберт обертового пристрою 3.

Дійсне значення  $\phi_0$  вимірюваного кута в ЕОМ розраховується за теоремою про суму кутів правильного багатокутника

$$\phi_0 = \frac{180(n-2)}{n}, \quad (4)$$

де  $\phi_0$  — дійсне значення вимірюваного кута;  $n$  — кількість кутів об'єкта вимірювання.

Також в ЕОМ здійснюється автоматизоване обчислення похибки за відповідними методиками. Для цього в ШНМ здійснюється попередня обробка вимірювальної інформації з метою визначення випадкової та систематичної складових похибок вимірювання [11], [12], [17], [18]. Так в ШНМ здійснюється перетворення вхідної інформації, представленій у вигляді так званих вхідних векторів,  $X = \{x_1, \dots, x_k\}$  у вихідний сигнал *OUT*, що представляється так званим вихідним вектором  $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ . При чому вхідний вектор  $X$  автоматично формується з множини цифрових сигналів  $\alpha_{in}^{D'}$

$$X = \{x_1, \dots, x_k\} \Leftrightarrow X = \{x_1, \dots, x_k\} \Leftrightarrow \alpha_{in}^{D'} \subset N = \{N_i \mid i = \overline{1; n}\}.$$

Конкретний вид перетворення даних, що виконується ШНМ визначається характеристиками штучних нейронів та особливостями її архітектури, тобто визначеними підмножинами вхідних, вихідних та прихованих нейронів, кількість яких залежить від структури векторів вхідного  $X = \{x_1, \dots, x_k\}$  та вихідного  $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$  сигналів. Тому під час проведення кутових вимірювань інформація повинна подаватися на вхід ШНМ тільки у цифровій формі. Причому розмірність вхідного вектора ШНМ  $X = \{x_1, \dots, x_k\}$  буде визначатись необхідною кількістю вимірювань.

Результати роботи запропонованої ППГС показали, що система забезпечує порівняно з відомими вищу точність (похибку зменшено до 0,01") та швидкість (тривалість зменшено приблизно у 1,3 рази) вимірювання [17], [18].

Вища швидкість досягається шляхом використання ШНМ на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації. Це дозволило досягти тривалості визначення складових похибки вимірювання 2 с, за рахунок паралельної та одночасної обробки вимірювальної інформації та автоматизації процесу її аналізу.

Вища точність (похибка 0,01") досягається за рахунок використання високочутливих та високопродуктивних напівпровідникових сенсорів, зокрема CMOS-матриці та кільцевого лазера, а також ШНМ. Використання останніх забезпечує виключення суб'єктивного впливу оператора, що в свою чергу, зумовлює правильний вибір, застосування відповідних відомих і принципово різних методів нормування та компенсації складових похибок вимірювання. Таким чином досягається вища точність обробки результатів та процесу вимірювання в цілому.

## Висновки

Таким чином, можна вважати, що запропонована ППГС є сучасною та перспективною розробкою, яка має низку переваг:

- високу швидкість вимірювання, за рахунок застосування ШНМ, яка здійснює одночасну обробку множини цифрових даних методами паралельної обробки інформації (2 с);
- високу точність (з похибкою 0,01"), за рахунок застосування високочутливих та високопродуктивних напівпровідникових сенсорів, зокрема CMOS-матриці та кільцевого лазера, а також за рахунок ШНМ, яка дозволяє виключити суб'єктивний вплив оператора під час вимірювань, що в свою чергу, зумовлює правильний вибір, застосування відповідних відомих і принципово різних методів нормування та компенсації складових похибок вимірювання. Як результат, забезпечується вища точність обробки результатів. Таким чином досягається висока точність процесу вимірювання в цілому;
- автоматизовану обробку вимірювальної інформації в масштабі реального часу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. И. Этингоф, «Измерения углов и конусов,» *Приборы для линейных измерений*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://dopusk.net/?page\\_id=2016](http://dopusk.net/?page_id=2016). Дата обращения: Янв. 19, 2019.
- [2] *Лазерный интерферометр XL-80. Система Ballbar QC10. Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин*. ООО Renishaw. Renishaw plc, 2007.
- [3] Г. А. Шароглазова, *Основные геодезические работы*. Новополюк: УО «ПГУ», 2007. 161 с.
- [4] *Optiko-emissionnyj spektrometr ARL 4460*. [Electronic resource]. Accessed: <https://thermotechno.ru/catalog/143/396/>. Дата звернення: Листоп. 10, 2018.
- [5] «Гониометр», *КП СПС Арсенал*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zavodarsenal.kiev.ua/goniometr-spektrometr-gs2/>. Дата обращения: Ноябрь. 10, 2018.
- [6] «BI-200SM,» *Исследовательский гониометр для определения характеристик светорассеяния на любых углах*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.soctrade.com/laboratornoe\\_oborudovanie/bi-200sm-issledovatel'skij-goniometr-dlya-opredeleniya-harakteristik-svetorasseyaniya-na-lyubyh-uglah.phtml](http://www.soctrade.com/laboratornoe_oborudovanie/bi-200sm-issledovatel'skij-goniometr-dlya-opredeleniya-harakteristik-svetorasseyaniya-na-lyubyh-uglah.phtml) Дата обращения: Ноябрь. 10, 2018.

- [7] «Производство средств угловых измерений,» *Научно-производственный комплекс Диагностика*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.diagnostics-spb.ru/index.html>. Дата обращения: Ноябрь. 10, 2018.
- [8] «Гониометры. Новейшие измерительные технологии,» *ЗАО НПФ Уран*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.urau-spb.ru/catalog/216/>. Дата обращения: Ноябрь. 10.2018.
- [9] DataPhysics Instruments GmbH Raiffeisenstraße 34 D-70794 Filderstadt Germany [Electronic resource]. Accessed: [http://www.nglabtec.com/dataphysics2/cat\\_da/DCAT11\\_E\\_Brochure.pdf](http://www.nglabtec.com/dataphysics2/cat_da/DCAT11_E_Brochure.pdf). Date of appeal: Nov. 10, 2018.
- [10] Moller-Wedel GmbH [Electronic resource]. Accessed: <http://www.moeller-wedel-optical.com/produkte/goniometer/goniometer-spektrometer.ht>. Date of appeal: Octob. 18, 2018.
- [11] І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, та А. Ю. Сазонов, «Інтелектуальна система вимірювання кутів,» *Патент України на корисну модель 127373, МПК: G 01 B 21/22 (2006.01)*, 25.07.2018.
- [12] І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, та А. Ю. Сазонов, «Спосіб вимірювання кутів,» *Патент України на корисну модель 124155, МПК: G 01 B 21/22 (2006.01)*, 26.03.2018.
- [13] Н. М. Померанцев, и Г. В. Скромный, «Физические основы квантовой гироскопии,» *Успехи физических наук*, 1970, т. 100, в. 3, с. 361.
- [14] В. П. Шевчук, В. И. Капля, А. П. Желтоногов, и Д. Н. Лясин, *Метрология интеллектуальных измерительных систем*. Волгоград, 2005, 210 с.
- [15] I. Farrance, and R. Frenkel, "Uncertainty of Measurement," *A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships*, Clin. Biochem, Rev, vol. 33, Issue 2, pp. 49-75, 2012.
- [16] I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, and A. Lavrishev, "Automated technological complex to precise angles measurement based on goniometer," *Technological Complexes*, № 1/2 (12), pp. 38-45, 2015.
- [17] I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, S. Nechai, and O. Pidtychenko, "Development of artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software-hardware complex," *Eastern-European journal of enterprise technologies*, № 9 (95), pp. 43-51, 2018.
- [18] I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, S. Nechai, and T. Khylychenko, "The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence," *Eastern-European journal of enterprise technologies*, № 5/9 (89), pp. 58-67, 2017.
- [19] А. И. Шлома, *Применение цифровых камер с ПЗС-матрицей при измерении малых углов* [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://metrology.kharkov.ua/fileadmin/user\\_upload/data\\_gc/conference/M2012/pages/471.pdf](http://metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/conference/M2012/pages/471.pdf). Дата обращения 02.03.2019.

Рекомендована кафедрою автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.02.2019

**Черепанська Ірина Юрївна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б. Б. Самотока, e-mail: [cherepanskairina@gmail.com](mailto:cherepanskairina@gmail.com) ;

**Сазонов Артем Юрїевич** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б. Б. Самотока.

Житомирський державний технологічний університет, Житомир;

**Безвесільна Олена Миколаївна** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри приладобудування.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**I. Yu. Cherepanska<sup>1</sup>**  
**O. M. Bezvesilna<sup>2</sup>**  
**A. Yu. Sazonov<sup>1</sup>**

## Precise Intelligent Goniometric System

<sup>1</sup>Zhytomyr State Technological University;

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

*The paper is dedicated to the nowadays problem - the provision of precise and high-performance goniometric measurements, which are necessary for various modern scientific and economic tasks. Based on the analysis of physical phenomenon and the principles of laser spectroscopy, semiconductor photosensitive elements and neural network technologies, a new precise intelligent goniometric system has been proposed. This system allows precise angular measurements with the measurement information processing in real time during the preliminary installation of navigation sensing elements, flat angles and pyramidal prisms, as well as other production objects, and refractive index of optical glass. Precise intelligent goniometric system combines such advantages as high accuracy and speed of measurement, the ability to work in an automated mode and automated processing of measurement information, ease of use, versatility. The high speed of the proposed precise intelligent goniometric system is achieved due to the ability of the artificial neural network to simultaneously process a variety of digital data using parallel processing methods, thus the measurement time is significantly reduced. The accuracy of the precise intelligent goniometric system is achieved by using a non-inertial ring laser and CMOS sensor with high resolution and sensitivity as a sensing elements, which allows non-contact conversion of measured angle values and*

*real-time information processing, as well as work in automated mode. The precise intelligent goniometric system proposed in the article is a modern and perspective development.*

**Keywords:** goniometer, artificial neural network, CMOS sensor, ring laser, systematic component of measurement error, random component of measurement error, saturation current, wavelength of light.

**Cherepanska Iryna Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automation and Computer-Integrated Technologies named after Prof. B. B. Samotokin, e-mail: cherepanskairina@gmail.com ;

**Bezvesilna Olena M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Instrumentation;

**Sazonov Artem Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automation and Computer-Integrated Technologies named after Prof. B. B. Samotokin

**И. Ю. Черепанская<sup>1</sup>**  
**Е. Н. Безвесильная<sup>2</sup>**  
**А. Ю. Сазонов<sup>1</sup>**

## Прецизионная интеллектуальная гониометрическая система

<sup>1</sup>Житомирский государственный технологический университет;

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Рассмотрена актуальная проблема — обеспечение высокоточных и высокопроизводительных гониометрических измерений, необходимых во многих современных научно-хозяйственных задачах разных отраслей хозяйства. На основе анализа физических явлений и принципов работы лазерной спектроскопии, полупроводниковых фоточувствительных элементов и нейросетевых технологий предложена новая прецизионная интеллектуальная гониометрическая система, в основе которой лежит использование лазерного гироскопа (кольцевого лазера), CMOS-матрицы и искусственной нейронной сети. Прецизионная интеллектуальная гониометрическая система позволяет проводить высокоточные угловые измерения с обработкой измерительной информации в режиме реального времени с предварительным выставлением навигационных чувствительных элементов, плоских углов и пирамидальности призм, а также других объектов производства, показателя преломления оптического стекла. Прецизионная интеллектуальная гониометрическая система объединяет такие преимущества, как высокая точность и скорость измерения, возможность работы в автоматизированном режиме и автоматизированной обработки измерительной информации, простота использования, универсальность. Высокая скорость работы предложенной прецизионной интеллектуальной гониометрической системы достигается за счет возможности искусственной нейронной сети осуществлять одновременную обработку множества цифровых данных методами параллельной обработки. Таким образом, время измерения существенно сокращается. Высокая точность прецизионной интеллектуальной гониометрической системы достигается за счет использования в качестве чувствительных элементов безинерционного кольцевого лазера и CMOS-матрицы с большим разрешением и чувствительностью, что позволяет проводить бесконтактное преобразование значений измеряемых углов и проводить обработку информации в реальном масштабе времени, а также работать в автоматизированном режиме.*

**Ключевые слова:** гониометр, искусственная нейронная сеть, CMOS-матрица, кольцевой лазер, систематическая составляющая погрешности измерения, случайная составляющая погрешности измерения, ток насыщения, длина световой волны.

**Черепанская Ирина Юрьевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий им. проф. Б. Б. Самотокина, e-mail: cherepanskairina@gmail.com ;

**Безвесильная Елена Николаевна** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры приборостроения;

**Сазонов Артем Юрьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий им. проф. Б. Б. Самотокина