

КОЧАН ОРЕСТ

Національний Університет «Львівська Політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-3164-3821>e-mail: orestvk@gmail.com**БИКОВИЙ ПАВЛО**

Західноукраїнський Національний Університет

<https://orcid.org/0000-0002-5705-5702>e-mail: pb@wunu.edu.ua**ЗАСТАВНИЙ ОЛЕГ**

Західноукраїнський Національний Університет

<https://orcid.org/0000-0001-8630-8791>e-mail: olegz80@gmail.com**САЧЕНКО АНАТОЛІЙ**

Західноукраїнський Національний Університет

<https://orcid.org/0000-0002-0907-3682>e-mail: as@wunu.edu.ua**КОЧАН ВОЛОДИМИР**

Західноукраїнський Національний Університет

<https://orcid.org/0000-0001-8376-4660>e-mail: volodymyr.kochan@gmail.com

КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ВИМІРЮВАЛЬНО-КЕРУЮЧИХ МОДУЛІВ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У даній статті розглянута концепція побудови інтелектуальних вимірювально-керуючих модулів, які призначені для експлуатації у складі систем моніторингу та керування об'єктів критичної інфраструктури. Пропонована концепція дає змогу забезпечити високу інформативність і живучість вимірювально-керуючих модулів, а також високу достовірність отримуваних результатів вимірювання та формування керуючої дії не лише у нормальних та робочих умовах експлуатації, а і в умовах аварій та пост-аварійних ситуацій. Такі переваги досягаються за рахунок вбудованої системи метрологічного забезпечення. Її апаратна частина базується на методах визначення похибки, які інваріантні до похибок елементів.

Ключові слова: вимірювально-керуючі модулі, об'єкт критичної інфраструктури, достовірність вимірювань, АЦП, електронний паспорт.

KOCHAN OREST

Lviv Polytechnic National University

BYKOVYY PAVLO, ZASTAVNYI OLEG, SACHENKO ANATOLIY, KOCHAN VOLODYMYR

West Ukrainian National University

CONCEPT OF CONSTRUCTION OF MEASURING AND CONTROL MODULES FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

This article discusses the concept of building intelligent measuring and control modules, which are intended for operation as part of monitoring and control systems of critical infrastructure objects. The difficulty of increasing the reliability of the signals of sensors of physical quantities is that for their traditional metrological verification it is necessary to place their sensitive element in this physical quantity, and the value of this physical quantity must be known with an error smaller than the permissible error of the sensor.

The concept of construction of VKM developed in this article assumes that they have a number of properties that are required during operation as part of OKI. The presence of wireless communication and backup power ensures a high level of survivability of the developed VKM, which is an absolutely necessary condition for their sufficient informativeness in the conditions of accidents of various origins and post-accident situations. High informativeness both during normal operation and in such specific conditions is also ensured by the possibility of remote reprogramming. This enables the developed VKM to use various methods of processing the results of current measurements during normal operation, as well as specialized methods of data processing adequate to the emergency situation that has arisen (even urgently developed specifically for the study of some unexpected aspect of the behavior of the OKI in current conditions). At the same time, it is remote reprogramming that allows for arbitrary reconfiguration of the software of the offered VKM without restrictions imposed by various types of operating systems. And the presence of a dedicated reprogramming microcontroller allows you to examine the received software for damage caused by the data exchange process or unauthorized intrusion.

Keywords: measuring and control modules, object of critical infrastructure, reliability of measurements, ADC, Transducer Electronic Data Sheet.

Вступ

Як відомо [1], на сьогодні технологія Інтернету речей (IoT) забезпечує суттєві переваги, особливо при створенні великих систем моніторингу та керування розподіленими об'єктами. Ці переваги зумовили поступовий перехід на неї систем моніторингу та керування об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) [2]. Однак до таких систем ставляться дуже жорсткі вимоги щодо працездатності не лише у нормальних та робочих умовах, але також в умовах аварійних і пост-аварійних [3, 4]. При цьому вимоги до таких систем при роботі в аварійних і пост-аварійних умовах часто суттєво зростають. Адже тоді для прийняття оптимальних рішень необхідно врахувати не лише актуальний стан ОКІ, а і динаміку розвитку аварійної ситуації, а також

значну нелінійність аварійних процесів. Тому однією з важливих характеристик систем моніторингу та керування ОКІ є їх інформативність, під якою слід розуміти здатність забезпечити необхідний потік даних про стан ОКІ як у нормальних та робочих, так і аварійних та пост-аварійних умовах [2 - 4]. Інформативність також визначається можливістю адаптації системи до умов експлуатації та потреб системи прийняття рішень, яку часто називають гнучкістю системи [5]. Другою важливою характеристикою таких систем є живучість під якою у даному випадку можна розуміти збереження достатнього рівня інформативності в усіх умовах експлуатації [6]. Третьою важливою характеристикою таких систем є достовірність, під якою у даному випадку можна розуміти збереження заданих рівнів точності [7], а також єдності вимірювань [8], тобто відтворюваності та прослідковуваності результатів вимірювань. Тому системи моніторингу та керування для ОКІ, а також їх вимірювально-керуючі модулі (ВКМ) повинні спеціально проектуватися для роботи в умовах аварійних і пост-аварійних, а не лише нормальних і робочих.

Аналіз вимоги до ВКМ, призначених для ОКІ

По-перше, до ВКМ, призначених для експлуатації у складі ОКІ, ставляться вимог отримання даних про стан ОКІ в нормальних і робочих умовах експлуатації. Це означає, що на першому етапі проектування до ВКМ ставляться вимоги, аналогічні до звичайних ВКМ, без врахування специфічних вимог до експлуатації у складі ОКІ. Тому перша група вимог стосується номенклатури фізичних величин, які необхідно вимірювати та керувати. Ці фізичні величини, зазвичай, визначають види і типи сенсорів, що будуть використані на даному ОКІ [7]. Але більшість фізичних величин можуть вимірювати різні види і типи сенсорів. Також часто необхідне використання сукупних та сумісних вимірювань. Це зумовлює доцільність проектування універсальних, багатофункціональних і багатоканальних ВКМ, а також забезпечення гнучкості ВКМ при використанні [5, 7]. Тобто можливість підключення до ВКМ різних сенсорів та відповідне налаштування режиму роботи ВКМ без необхідності їх демонтажу або заміни (зупинки їх експлуатації). Така властивість проєктованих ВКМ корисна також у аварійних та пост-аварійних умовах. При обмеженому доступі до ВКМ гнучкість означає можливість віддаленої (дистанційної) зміни режимів роботи ВКМ та опрацювання результатів поточних вимірювань.

По-друге, до ВКМ, призначених саме для ОКІ, ставляться вимоги надійного обміну даними у аварійних та пост-аварійних умовах [1, 2]. При цьому вибір провідного або безпроводного зв'язку зумовлений технічними, економічними і законодавчими вимогами. Зокрема, для ОКІ різко обмежено або заборонено використання безпроводного зв'язку через небезпеку несанкціонованого доступу [9]. Але як у момент аварії так і під час пост-аварійної ситуації безпроводний зв'язок має ряд суттєвих переваг [1, 3, 4]. Адже мережі провідного зв'язку мають велику протяжність. Тому вони є дуже вразливими під час аварії. Наприклад, умовно приймемо розмір елемента, який під час вибуху пошкоджує лінію провідного зв'язку, 20x10 см. Тоді імовірність ураження самого ВКМ розміром, наприклад, 40x20 см, буде приблизно у 13 разів менша, ніж пошкодження провідної лінії зв'язку протяжністю 1 км. А безпроводна мережа не може бути пошкоджена під час вибуху.

Мережі живлення ВКМ теж мають велику протяжність. Вони аналогічно вразливі під час аварії. Тому ВКМ, що використовуються на ОКІ, повинні мати резервне автономне живлення, яке забезпечить їх роботу на протязі імовірного часу відновлення електропостачання (наприклад, на атомних електростанціях 72 години).

Розглянуті вимоги до ВКМ забезпечать його живучість при аварії та під час пост-аварійної ситуації [3].

Також важлива вимога забезпечення високого рівня достовірності даних, які поступають від ВКМ. Пошкодження ВКМ при аварії не завжди повністю виводять його з ладу. Дуже імовірні пошкодження, що викликають метрологічну відмову ВКМ [10]. Тобто від ВКМ поступають дані та він формує керуючі дії. Але ці результати вимірювань та керуючі дії не відповідають дійсним набагато більше допустимого. Тоді прийняті вищим ієрархічним рівнем системи на основі цих результатів вимірювань рішення можуть не відповідати потрібним (оптимальним). А їх реалізація буде спотвореною. Таку ситуацію слід обов'язково ідентифікувати.

Вимога забезпечення достовірності результатів вимірювання включає вимогу підвищення точності сенсорів. На сьогодні склалася ситуація, коли похибки сенсорів, зазвичай, домінують у вимірювальному каналі (ВК) [11, 12]. Слід відзначити, що методи корекції адитивної та мультиплікативної похибки електричного тракту ВК широко використовуються [13]. А методи корекції похибок сенсорів мало розповсюджені [7], не дивлячись на відомі роботи у цьому напрямі [14 - 17]. Однак суттєве підвищення достовірності результатів вимірювання без метрологічної перевірки або хоча би діагностування сенсорів при їх експлуатації неможливе. Одним з перспективних напрямів є використання методів штучного інтелекту, зокрема, нейронних мереж [15 - 17] для визначення та прогнозування похибки сенсорів у різних умовах експлуатації. Особливо перспективною є визначення похибки сенсора у процесі експлуатації, без зупинки функціонування ОКІ. Але для цього слід передбачити можливість реконфігурації ВКМ у процесі його експлуатації.

Метою статті є розроблення концепції побудови ВКМ, які забезпечать вищий рівень інформативності, живучості та достовірності систем моніторингу та керування ОКІ в умовах аварій та пост-аварійному періоді.

Структура ВКМ, призначених для об'єктів критичної інфраструктури

Для суттєвого підвищення інформативності, гнучкості, живучості та достовірності ВКМ необхідне поєднання як конструктивно-технологічних, так і структурно-алгоритмічних методів.

Узагальнена структура пропонованого ВКМ подана на рис. 1. Структура його вимірювальної частини мало відрізняється від традиційних [7, 18]. Сигнали сенсорів поступають через безконтактний або контактний комутатори на аналого-цифровий перетворювач. Безконтактні комутатори простіші та дешевші. Але допустимі напруги завади загального виду та міжканальні напруги для них не більші 20 - 50 В [19]. А експериментальні дослідження показали що вони мають великі паразитні термо-е.р.с. – до 30 – 50 мкВ [20]. Контактні комутатори на базі герконів, допускають напругу завади загального виду до 200 - 500 В [21]. Вони складніші та дорожчі за рахунок того, що магнітні контакти герконів виготовляють з пермалою, який генерує велику (до 40 мкВ/°С) паразитну термо-е.р.с. у парі з міддю [20]. Це вимагає їх оснащення додатковими термовирівнювачами. Термовирівнювачі, запропоновані у [22, 23], є найменш складними і забезпечують паразитні термо-е.р.с. менше 1 мкВ. Контактний і безконтактний комутатори повинні бути уніфіковані щодо конструкції плати, виводів і програмного забезпечення. Це забезпечує їх взаємозамінність і підвищує гнучкість використання ВКМ.

Сигнали сенсорів з комутаторів поступають на аналого-цифровий перетворювач АЦП. Як АЦП використано заводський 24-х розрядний сигма-дельта АЦП, що входить у склад мікроконверторів серії ADUC фірми National Instruments [24]. Як буде показано далі, висока розрядність потрібна для реалізації методів вбудованої метрологічної перевірки АЦП і діагностування сенсорів у процесі експлуатації системи, а також корекції їх похибок. Такі АЦП мають малу швидкодію, але більшість сенсорів ще більш інерційні. За необхідності можна використати швидкодійний АЦП, але такі сенсори у складі ОКІ мало використовуються.

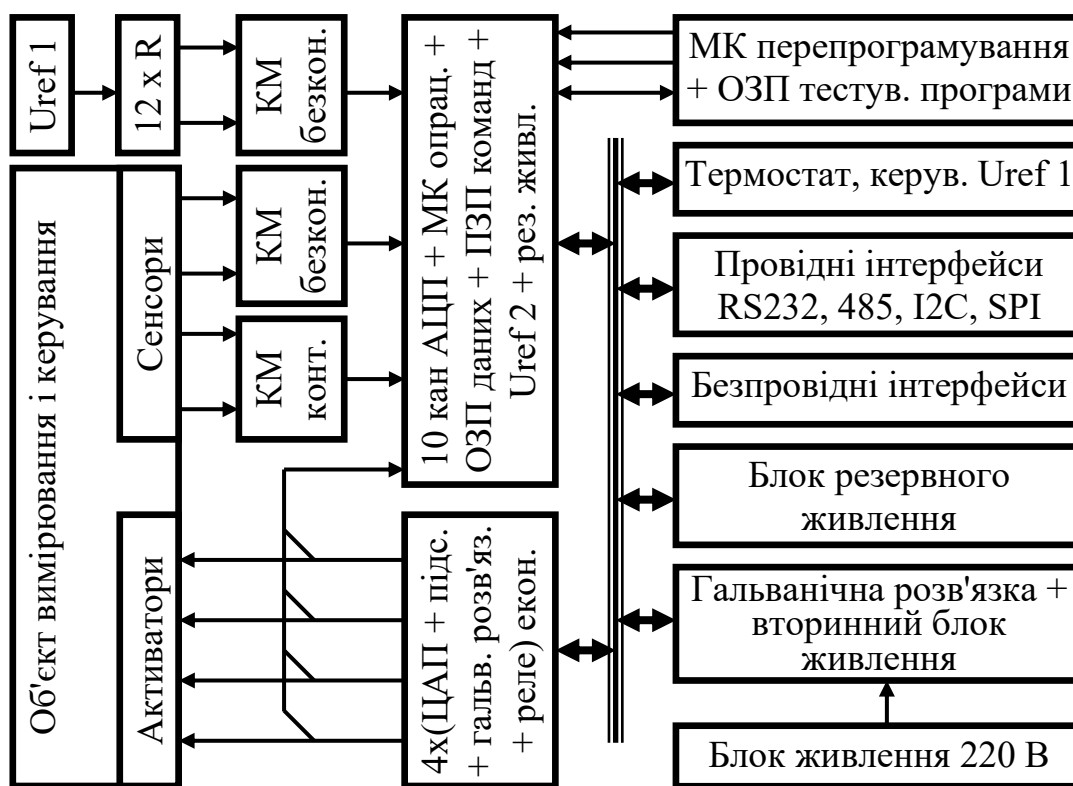


Рис. 1. Узагальнена структура пропонованого ВКМ

У керуючу частину ВКМ входять два типи цифро-аналогових перетворювачів ЦАП. При тривалій роботі ВКМ без мережевого живлення слід використати економні ЦАП [25, 26]. Але живлення за допомогою "комутаного конденсатора" [7] обмежує їх напругу гальванічної розв'язки до 30 В. При потребі напруги до 300 В слід використати ЦАП з живленням від трансформатора. Пропоновані ЦАПи мають уніфіковані плати, виводи і програмне забезпечення. Це забезпечує їх взаємозамінність і підвищує гнучкість використання ВКМ. Для забезпечення достовірності ЦАП їх вихідну напругу контролює АЦП, що пройшов метрологічну перевірку.

Для опрацювання результатів вимірювання та формування керуючої дії у ВКМ входять мікроконтролер (МК) з разом з оперативною пам'яттю ОЗП та пам'яттю програми ПЗП, а також плати провідних та безпроводного інтерфейсів. Для забезпечення гнучкості використання ВКМ у нього введено МК перепрограмування [27, 28], який, при поступленні від одного з інтерфейсів відповідної команди замінює увесь код програми роботи, що міститься у ПЗП, на новий, що поступає через цей інтерфейс. Таким чином, МК опрацювання даних може у процесі експлуатації змінювати алгоритм роботи. Це підвищує зможу гнучкого використання ВКМ. Зокрема, при аварійних та пост-аварійних умовах можливе перепрофілювання кожного ВКМ до режимів роботи, які вимагають поточні обставини.

У нормальних умовах експлуатації ВКМ живиться від мережі змінного струму. Первинний блок

живлення, для зменшення впливу завад нормального виду [21], відділений від решти ВКМ металевим екраном. На вторинний блок живлення поступає попередньо стабілізована напруга 9 В, яка розподіляється між вузлами ВКМ. Гальванічна розв'язка при розподілі відбувається за методом [29], який полягає у тому, що високовольтні безконтактні ключі [19] тимчасово підключають кожен вузол до вторинного блока живлення. При цьому конденсатори у колах живлення вузлів заряджаються. Порядок ввімкнення вузлів задає МК у складі вторинного блока живлення. Відповідно до налаштувань, отриманих від МК опрацювання даних, МК вторинного блока живлення враховує потребу використання кожного вузла у поточному часі, необхідну періодичність заряду конденсатора його живлення і можливу дію завад загального виду на результат вимірювання (ключі, що заряджають конденсатор у колі живлення АЦП, під час вимірювання не вмикаються). Таке виконання вторинного блока живлення забезпечує як високий коефіцієнт пригнічення завад загального виду, так і дає змогу суттєвої економії енергії блоку резервного живлення.

Методи забезпечення достовірності результатів вимірювання та керуючих дій

Як було вказано, важливою характеристикою систем моніторингу та керування ОКІ є достовірність, що характеризує точність та єдність вимірювань. Для ВКМ, призначених для ОКІ її необхідно забезпечити як при звичайній експлуатації, так і при аварійних та пост-аварійних умовах. Слід відзначити, що у цих умовах може різко зростати деградація елементів ВКМ. Тому висока достовірність результатів вимірювання та керування забезпечується у пропонованому ВКМ наступними заходами:

1. Встановленням нуля та калібруванням АЦП [13], за результатами яких проводять корекцію адитивної та мультиплікативної похибок АЦП. При цьому аналіз систематичної та випадкової складових адитивної та мультиплікативної похибок АЦП (порівняння поточних відхилень від номінальних значень з допустимими та отриманими раніше) дає змогу оцінити інтенсивність впливу деградації АЦП на результати вимірювань.

2. Оцінкою нелінійності АЦП. Запропоновані та досліджені у [30, 31] методи дають змогу формувати тестові напруги у від трьох до одинадцяти точках діапазону перетворення АЦП і оцінити нелінійну складову похибки АЦП з високою точністю (похибка менша 0,0005%). Необхідні деталі дешеві (резистори подільника напруги з допустимим відхиленням від середнього значення 1% та КМОН ключі). Точність оцінки нелінійної похибки АЦП інваріантні до температурного та часового дрейфу резисторів подільника [30, 31]. Основний вплив на похибку оцінки нелінійності АЦП мають струми витоку ключів [30, 31]. Але коли ці струми не перевищують допустимі, викликана ними похибка оцінки, звичайно, не перевищує 0,00015%. Зменшити їх вплив можна за рахунок відповідного вибору опору резисторів подільника.

3. Корекцією похибки нелінійності АЦП за отриманими числовими значеннями його похибки нелінійності [30, 31]. Функція перетворення використаного 24-х розрядного сигма-дельта АЦП є гладкою (без розривів та стрибків). Методи, досліджені у [31], дають змогу оцінити до 11 рівномірно розміщених на діапазоні перетворення точок нелінійної складової похибки АЦП. Тому зменшення нелінійної похибки АЦП у 10 - 15 разів має достатню метрологічну надійність [32].

4. Використанням прецизійного стабілізатора як джерела напруги калібрування, оснащеного електронним паспортом (Transducer Electronic Data Sheet за стандартом IEEE1451.2 [34]), де вказані дійсне значення отриманої за результатами метрологічної перевірки вихідної напруги, допустима похибка метрологічної перевірки, її дата та термін наступної перевірки, тренд дрейфу вихідної напруги за результатами періодичних метрологічних перевірок та експериментально визначений при випуску температурний коефіцієнт. Останній дає змогу коригувати похибку джерела напруги калібрування при вимкненні термостата у режимі економії резервного живлення. Похибка корекції при цьому зростає незначно.

5. Можливістю заміни джерела напруги калібрування без зупинки ВКМ. Тоді інтервал між метрологічними перевірками можна скоротити, що еквівалентно зменшить допустиму похибку джерела напруги калібрування. Така заміна дає змогу скоротити інтервал між періодичними метрологічними перевірками та, згідно діючих стандартів [34], підвищити єдність вимірювань (прослідковуваність процесу передачі значень еталона Вольта та його відтворюваність).

Перелічені заходи дають змогу проводити у процесі експлуатації ВКМ його метрологічну перевірку та корекцію його похибки (при заміні джерела напруги калібрування із заданою періодичністю). Отримана висока достовірність результатів вимірювання також дає змогу забезпечити високу достовірність формування ЦАП-ами керуючих дій. Для цього кожен ЦАП оснащується реле, аналогічним до реле контактного комутатора. Виходи цих реле підключаються до входу АЦП. Для забезпечення високої достовірності при кожній зміні напруги, яку формує ЦАП, проводяться наступні процедури:

1. Вмикається реле, яке подає вихідну напругу даного ЦАП на АЦП.
2. АЦП вимірює з високою точністю поточну вихідну напругу ЦАП.
3. Результат вимірювання порівнюється із значенням необхідної (заданої програмно) вихідної напруги.
4. Обчислюється поправка, яка повинна враховувати результат порівняння та одиниці останнього розряду АЦП і ЦАП.
5. Код обчисленої поправки передається на ЦАП – додається або віднімається від коду, який задає поточну вихідну напругу ЦАП.

Таким чином, АЦП, який забезпечує високу достовірність результатів вимірювання, забезпечить також високу достовірність формування керуючих дій ЦАП-ами.

Методи підвищення достовірності сигналів сенсорів

Складність підвищення достовірності сигналів сенсорів фізичних величин полягає у тому, що для їх традиційної метрологічної перевірки необхідно розмістити їх чутливий елемент у цій фізичній величині, причому значення цієї фізичної величини повинно бути відоме з похибкою меншою за допустиму похибку сенсора. А сенсори вимірюють різні фізичні величини, мають різні принципи дії та різне виконання. Тому для підвищення достовірності практично для кожного виду сенсорів необхідно розробляти свій метод тестування, діагностування або метрологічної перевірки. Розглянемо основні похибки сенсорів на прикладі найбільш розповсюдженого сенсора – термопар – найчастіше вимірюваної неелектричної величини – температури:

1. Індивідуальні відхилення від номінальної функції перетворення. Основним методом підвищення точності у цьому випадку є перехід до індивідуальної функції перетворення. Відомі реалізації цього методу щодо термопар достатньо трудомісткі та реалізуються лише у лабораторних умовах (див. наприклад [35]). Крім того, метод малоефективний через деградацію електродів термопар при тривалій дії високої температури, тобто вимірюваної величини.

2. Деградація сенсорів під дією вимірюваної або впливаючих величин (для термопар – температури) протидії дрейфу функції перетворення: а) корекція за результатами метрологічної перевірки у лабораторних умовах (наприклад, [35]) або на місці експлуатації (наприклад, [36]); б) корекція за математичною моделлю (наприклад, [37]), яка враховує або лише час експлуатації сенсора або також інтенсивність дії високої температури, тобто причини деградації (наприклад, [14]); в) корекція за математичною моделлю, яка уточнюється за рахунок періодичної метрологічної перевірки у лабораторних умовах (наприклад, [14]) або на місці експлуатації (наприклад, [17]).

3. Виникнення додаткової похибки, спричиненої деградацією сенсорів, яка не може бути класифікована як дрейф функції перетворення. Наприклад, виникнення похибки від набутої через тривалу експлуатацію при високій температурі термоелектричної неоднорідності електродів термопар [38]. Тобто залежності функції перетворення від профілю температурного поля вздовж електродів неоднорідної термопари. Методи корекції таких похибок складніші (для термопар, наприклад, стабілізація профілю температурного поля вздовж їх електродів [12]). Однак часом такі методи приносять додатковий ефект, який дає змогу додатково підвищити достовірність результатів вимірювання фізичної величини. Наприклад, у [17] запропоновано бездемонтажний метод визначення поточної похибки термопар (по суті їх метрологічної перевірки) під час експлуатації, що використовує однозначний взаємозв'язок між похибкою від дрейфу функції перетворення термопари з її похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності. У цьому випадку можлива корекція похибки вимірювання температури, викликана відхиленнями функції перетворення термопари від номінальної [39] без переривання процесу вимірювання температури.

4. Значна дія впливаючої величини на функцію перетворення сенсора. Наприклад, нагрів фотодіода вимірюваним випромінюванням спричиняє значні зміни його функції перетворення [16]. Причому вимірюваним світловим потоком нагрівається сам кристал фотодіода. Тому стабілізація температури корпусу фотодіода або корекція похибки фотодіода за результатами вимірювання температури оточуючого середовища або корпусу фотодіода слабо зменшує похибку від нагріву саме кристала фотодіода. Тобто слабо підвищує достовірність результатів вимірювання інтенсивності світлового потоку. Запропонований у [16] метод передбачає вимірювання температури кристалу фотодіода після прогріву вимірюваним світловим потоком за допомогою цього самого кристалу після переривання вимірюваного світлового потоку шторкою. Ефективність методу [16] значно вища.

Пропонована концепція побудови ВКМ дає змогу реалізувати різні методи підвищення достовірності результатів вимірювання за рахунок змоги реконфігурації. Тобто його апаратної гнучкості та можливості дистанційної заміни програмного забезпечення. При цьому наявність багатьох вимірювальних та керуючих каналів дає змогу реалізувати різні методи тестування, діагностування та метрологічної перевірки сенсорів.

Висновки

Розроблена у цій статті концепція побудови ВКМ передбачає наявність у них цілого ряду властивостей, потрібних при експлуатації саме у складі ОКІ. Наявність безпроводного зв'язку та резервного живлення забезпечує високий рівень живучості розроблених ВКМ, яка є абсолютно необхідною умовою їх достатньої інформативності в умовах аварій різного походження та пост-аварійної ситуації. Висока інформативність як при нормальній роботі, так і у таких специфічних умовах забезпечується також можливістю дистанційного перепрограмування. Це дає змогу розробленому ВКМ використовувати різні методи опрацювання результатів поточних вимірювань як при нормальній експлуатації, так і спеціалізовані методи опрацювання даних, адекватні аварійній ситуації, яка виникла (навіть терміново розроблені спеціально для дослідження якогось неочікуваного аспекту поведінки ОКІ у поточних умовах). При цьому саме дистанційне перепрограмування дає змогу довільної реконфігурації програмного забезпечення запропонованого ВКМ без обмежень, які накладають різного виду операційні системи. А наявність виділеного мікроконтролера перепрограмування дає змогу дослідити отримане програмне забезпечення щодо пошкоджень, які викликані процесом обміну даними або несанкціонованим вторгненням.

Переваги дистанційного перепрограмування у розробленому ВКМ підкріплені високою якістю та універсальністю апаратного забезпечення. У розробленому ВКМ можливості змін не настільки великі як при дистанційному перепрограмуванні. Але висока точність вимірювальних і керуючих каналів розробленого ВКМ та їх гальванічна розв'язка дають змогу використати як різні сенсори, так і прямі та непрямі методи

вимірювань. За рахунок цього забезпечуються такі важливі властивості розробленого ВКМ, як універсальність і гнучкість.

Наявність у розробленому ВКМ вбудованої системи метрологічного забезпечення електричного тракту ВК забезпечує високу достовірність результатів вимірювання сигналів сенсорів, отриманих із ВКМ, а також формованих ним керуючих впливів. При цьому, як показано у [31], використані методи метрологічної перевірки у значній мірі інваріантні до індивідуальних параметрів елементів ВКМ. Єдиним метрологічно значимим елементом цієї системи метрологічного забезпечення є джерело напруги калібрування, що передає значення еталону Вольта до ВКМ. Передбачена можливість заміни цього джерела дає змогу скоротити інтервал між метрологічними перевірками ВКМ (це знижує вимоги до часової стабільності як ВКМ, так і джерела напруги калібрування). А використання електронного паспорту (TEDS [33]) зводить процес метрологічного обслуговування ВКМ до періодичної заміни джерела напруги калібрування у процесі експлуатації ВКМ.

Перелічені властивості розроблених ВКМ дають змогу без суттєвих обмежень застосовувати методи штучного інтелекту. У [39] було показано як базові методи штучного інтелекту, зокрема, нейронні мережі та нечітка логіка, використані у вимірювально-керуючих системах, дозволяють покращити їх властивості та розширити можливості. Саме здатність широкого застосування методів штучного інтелекту дає змогу віднести розроблений ВКМ до класу інтелектуальних.

Література

1. Vermesan, O., Friess, P. *Digitising the Industry - Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds*. River Publisher, 2016. - 364 с.
2. Дрейс, Ю. О. "Аналіз базової термінології і негативних наслідків кібератак на інформаційно-телекомунікаційні системи об'єктів критичної інфраструктури держави." *Захист інформації*. — НАУ, 2017. — Т. 19. — С. 214-222. — ISSN 2410-7840. — DOI:10.18372/2410-7840.19.11900.
3. Kharchenko, V., Sachenko, A., Kochan, V., Fesenko, H. "Reliability and Survivability Models of Integrated Drone-Based Systems for Post Emergency Monitoring of NPPs." *Proceeding of The International Conference on Information and Digital Technologies 2016, IDT 2016, July 5-7, 2016, Rzeszov, Poland*, pp. 127—132. (IEEE Catalog Number CFP16CDT-USB).
4. Hiromoto, R. E., Sachenko, A., Kochan, V., Koval, V., Turchenko, V., Roshchupkin, O., Yatskiv, O., Kovalok, K. "Mobile Ad Hoc Wireless Network for Pre- and Post-Emergency Situations in Nuclear Power Plant." *The 2nd IEEE International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, Offenbug, Germany, 2014*, pp. 92—96.
5. Сиромаха, В. "АСУТП: минимум затрат, максимум эффективности." *Компьютерное обозрение* N19(92), 1997, с.36-37.
6. ДСТУ 2226-93 "Автоматизовані системи. Терміни та визначення." – [Чинний від 1994–07–01]. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://dnaop.com/html/62602/doc-ДСТУ_2226-93.
7. Webster, J.G. "The Measurement, Instrumentation, and Sensors: Handbook Electrical engineering handbook series." Springer Science & Business Media, 1999. – 2506 p.
8. ДСТУ 2681-94 "Метрологія. Терміни та визначення." – [Чинний від 1995–01–01]. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://dnaop.com/html/61558/doc-ДСТУ_2681-94.
9. Haddad, A., Lamb, C., de Castro, J., Manjunatha, K.A., Rodriguez, E.M., Kim, A., Lee, E. "Study of Wireless Technology Implementation in Isolated, High Consequence Networks." DC 20555–0001 Idaho National Laboratory U.S. Nuclear Regulatory Commission. July 2022.
10. Цюцюра, В.Д., Цюцюра, С.В. "Метрологія та основи вимірювань." Навч. посіб. — К.: Знання-Прес, 2003. - 180 с. — (Вища освіта XXI століття). ISBN 966-7767-39-6.
11. Кочан, Р.В. "Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем." [Кандидатська дисертація, ФМІ імені Карпенка]. Львів, 2005.
12. Кочан, О.В. "Аналіз похибки вимірювання температури термоелектричним перетворювачем з керованим профілем температурного поля." *Науковий Вісник ЧНУ. Фізика. Електроніка*. - 2008. - №423. - С. 124-129.
13. Земельман, М.А. "Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах." "Измерительная техника".- 1964.- №9.
14. Sachenko, A. "Introduction to the concept of intelligent measurement systems for the nonelectrical quantities." *Conference Proceedings. 10th Anniversary. IMTC/94. Advanced Technologies in I & M. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.94CH3424-9)*. – Hamamatsu. – Japan.- 1994.- pp. 228-229 vol.1, doi: 10.1109/IMTC.1994.352085.
15. Турченко В.О. "Нейромережеві методи і засоби підвищення ефективності дистрибутивних мереж збору та обробки сенсорних даних." Автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.13.13. / Державний університет "Львівська політехніка". – Львів, 2001. – 16 с.
16. Roshchupkin, O., Smid, R., Sachenko, A., Kochan, V. "Development of Precision Information Measuring System for Ultraviolet Radiation." *Journal "Advances in Electrical and Computer Engineering"*, 2014. - Vol.14. - No. 3. - Pp.101-106.

17. Кочан, О.В. "Методи і засоби підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами з неоднорідними термопарами." [Текст]: дис. ... докт. тех. наук: 05.11.04. Львів: НУ "Львівська політехніка", 2020.
18. Цапенко, М.П. "Измерительные информационные системы." М.: Энергоатомиздат, 1985. - 440с.
19. Analog Devices. "ADG5421. High Voltage Latch-Up Proof, Dual SPST Switches." [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.analog.com/en/products/adg5421.html>.
20. Белоусов, И. "Повышение точности многоканальных измерительных устройств с термоэлектрическими преобразователями." (Кандидатська дисертація). Львов, 1991.
21. Kochan, R.V., Kochan, O.V. "Development of the integrating analog-to-digital converter for distributive data acquisition systems with improved noise immunity." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 51, no. 1, pp. 96-101, Feb. 2002, doi: 10.1109/19.989910.
22. Пат. 82313. Україна, 7Н01Н51/00. "Комутатор сигналів низького рівня" / Р.В. Кочан, О.В. Кочан (Україна). - № а200610833; заявл. 13.10.2006, опубл. 10.06.2009, бюл №11.
23. Пат. 86967. Україна, МПК Н01. "Комутатор сигналів низького рівня." Р.В. Кочан, О.В. Кочан, В.В. Кочан, Г.І. Барило (Україна) - № а200610833; заявл. 13.10.2006, опубл. 10.06.2009, бюл №11.
24. NI is now part of Emerson's new Test & Measurement business group. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.ni.com/en.html/>
25. DAC081C08x 8-Bit Micro Power Digital-to-Analog Converter with an I2C-Compatible Interface. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac081c085.pdf?ts=1706713739346&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
26. Пат. 123971, Україна, G06F 3/00, H03K 19/0175, H03K 19/00. Послідовний синхронний інтерфейс з гальванічною розв'язкою / Кочан Орест Володимирович, Кочан Роман Володимирович, Кочан Володимир Володимирович; власники заявки. № а201907650; заявл. 08.07.2019, опубл. 30.06.2021, бюл. №26/2021.
27. Патент 25609А України, МКІ G06F 15/00. Двопровідна локальна обчислювальна мережа, повторювач сигналу та інвертор для використання в ній / В.В.Кочан, В.О.Тимчишин (Україна); Заявл. 30.10.97 № 97105295; Видано 30.10.98.
28. Пат. 91244, Україна, G06F 7/00, G06F 9/06, G06F 15/76, H04L 12/24. Мережевий модуль обробки даних з дистанційною реконфігурацією / Майків Ігор Мирославович, Кочан Роман Володимирович, Турчинко Ірина Василівна, Кочан Володимир Володимирович; власники заявки. – № 200806336; заявл. 13.05.2008, опубл. 12.07.2010, бюл. № 13/2010.
29. Пат. 104099, Україна, МПК G01K 7/01. Пристрій для вимірювання температури в електродіях опору / О.В. Кочан, Р.В. Кочан, В.В. Кочан; власники заявки. № а201214323; заявл. 14.12.2012, опубл. 10.06.13, бюл. № 16.
30. Пат. 97485, Україна, H03M1/10. Пристрій визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів / Кочан Роман Володимирович, Кочан Орест Володимирович; Науково-дослідний інститут Інтелектуальних комп'ютерних систем. № а200703921; заявл. 10.04.2007, опубл. 27.02.2012, бюл. № 4/2012.
31. Кочан, Р. В. Прецизійні аналого-цифрові перетворювачі з бездемонтажною метрологічною самоперевіркою. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 252 с.
32. Поліщук, Є. С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів. - Бескід Біт. – 2003. – 544с.
33. IEEE Standard 1451.2-1997 for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/720565>.
34. ЗАКОН УКРАЇНИ Про метрологію та метрологічну діяльність. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>.
35. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры.- Киев. – Техніка. - 1983.- 104 с.
36. Mil'chenko, V.Y., Kochan, V.A., Sachenko, A.A. et al. Digital temperature-measuring instrument with automatic error compensation of the thermoelectric thermometer. Meas Tech 21, 664–665 (1978). DOI: 10.1007/BF00821052.
37. Sachenko, A. Development ways of intelligent measurement control system. Eighteenth Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Tel Aviv, Israel, 1995, pp. 3.3.5/1-3.3.5/5, doi: 10.1109/EEIS.1995.513828.
38. Кочан О. Корекція похибок дрейфу та набутої неоднорідності у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля / О. Кочан // Вимірювальна техніка та метрологія. - 2016. - Вип. 77. - С. 99-109. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2016_77_16.
39. С. Alippi, A. Ferrero, V. Piuri, "Artificial Intelligence for Instruments & Applications," IEEE I&M Magazine, June 1998, pp.9-17.

References

1. Vermesan, O., Friess, P. Digitising the Industry - Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds. River Publisher, 2016. - 364 c.
2. Dreis, Yu. O. "Analiz bazovoyi terminolohiyi i nehatyvnnykh naslidkiv kiberatak na informatsiyno-telekomunikatsiyni systemy ob'iektiv krytychnoyi infrastruktury derzhavy." *Zakhyst informatsiyi*. — NAU, 2017. — T. 19. — S. 214-222. — ISSN 2410-7840. — DOI:10.18372/2410-7840.19.11900.
3. Kharchenko, V., Sachenko, A., Kochan, V., Fesenko, H. "Reliability and Survivability Models of Integrated Drone-Based Systems for Post Emergency Monitoring of NPPs." *Proceeding of The International Conference on Information and Digital Technologies 2016, IDT 2016, July 5-7, 2016, Rzeszow, Poland*, pp. 127—132. (IEEE Catalog Number CFP16CDT-USB).
4. Hiromoto, R. E., Sachenko, A., Kochan, V., Koval, V., Turchenko, V., Roshchupkin, O., Yatskiv, O., Kovalok, K. "Mobile Ad Hoc Wireless Network for Pre- and Post-Emergency Situations in Nuclear Power Plant." *The 2nd IEEE International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, Offenburg, Germany, 2014*, pp. 92—96.
5. Syromakha, V. "ASUTP: minimum zatrat, maksimum effektivnosti." *Kompyuterno obozrenie N19(92)*, 1997, s.36-37.
6. DSTU 2226-93 "Avtomatyzovani systemy. Terminy ta vyznachennya." — [Chynnyj vid 1994-07-01]. - [Elektronnyj resurs]. - Rezhym dostupu: https://dnaop.com/html/62602/doc-DSTU_2226-93.
7. Webster, J.G. "The Measurement, Instrumentation, and Sensors: Handbook Electrical engineering handbook series." Springer Science & Business Media, 1999. - 2506 p.
8. ДСТУ 2681-94 "Metrologiya. Temy ta vyznachennya." — [Chynnyj vid 1995-01-01]. - [Elektronnyj resurs]. - Rezhym dostupu: https://dnaop.com/html/61558/doc-DSTU_2681-94.
9. Haddad, A., Lamb, C., de Castro, J., Manjunatha, K.A., Rodriguez, E.M., Kim, A., Lee, E. "Study of Wireless Technology Implementation in Isolated, High Consequence Networks." DC 20555-0001 Idaho National Laboratory U.S. Nuclear Regulatory Commission. July 2022.
10. Tsiutsiura, V.D., Tsiutsiura, S.V. "Metrologiia ta osnovy vymiruvan." *Navch. posib.* — K.: Znannia-Press, 2003. - 180 s. — (Vyshcha osvita XXI stolittia). ISBN 966-7767-39-6.
11. Kochan, R.V. "Vdoskonalennia komponentiv pretzyziynykh rozpodilennykh informatsiino-vymiriuvannykh system." [Kandydatska dysertatsiia, FMI imeni Karpenka]. Lviv, 2005.
12. Kochan, O.V. "Analiz pokhybky vymiriuvannia temperatury termoelektrychnym peretvoriuvachem z kerovanyim profilem temperaturnoho polia." *Naukovyi Visnyk ChNU. Fizyka. Elektronika.* - 2008. - №423. - S. 124-129.
13. Zemel'man, M.A. "Tochnyi analoh-tsyfrovyi preobrazovatel na hrubykh elementakh." "Izmeritelnaia tekhnika". - 1964. - №9.
14. Sachenko, A. "Introduction to the concept of intelligent measurement systems for the nonelectrical quantities." *Conference Proceedings. 10th Anniversary. IMTC/94. Advanced Technologies in I & M. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.94CH3424-9)*. — Hamamatsu. — Japan. - 1994. - pp. 228-229 vol.1, doi: 10.1109/IMTC.1994.352085.
15. Turchenko, V.O. "Neyromerezhevi metody i zasoby pidvyshchennia efektyvnosti dystrybutyvnnykh merezh zboru ta obrobky sensorynykh danykh." *Avtoref. dys. ... k-ta tekhn. nauk: 05.13.13. / Derzhavnyi universytet "Lvivska politekhnika"*. — Lviv, 2001. — 16 s.
16. Roshchupkin, O., Smid, R., Sachenko, A., Kochan, V. "Development of Precision Information Measuring System for Ultraviolet Radiation." *Journal "Advances in Electrical and Computer Engineering"*, 2014. - Vol.14. - No. 3. - Pp.101-106.
17. Kochan, O.V. "Metody i zasoby pidvyshchennia tochnosti vymiriuvannia temperatury termoelektrychnymy peretvoriuvachamy z neodnorodnyimi termparamy." [Tekst]: dys. ... dokt. tekhn. nauk: 05.11.04. Lviv: NU "Lvivska politekhnika", 2020.
18. Tsypenko, M.P. "Izmeritelnye informatsionnye systemy." M.: Energoatomizdat, 1985. - 440s.
19. Analog Devices. "ADG5421. High Voltage Latch-Up Proof, Dual SPST Switches." [Elektronnyj resurs]. - Rezhym dostupu: <https://www.analog.com/en/products/adg5421.html>.
20. Belousov, I. "Povyshenie tochnosti mnogokanalnykh izmeritelnykh ustroystv s termoelektricheskimi preobrazovateliami." (Kandydatska dysertatsiia). Lviv, 1991.
21. Kochan, R.V., Kochan, O.V. "Development of the integrating analog-to-digital converter for distributive data acquisition systems with improved noise immunity." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 1, pp. 96-101, Feb. 2002, doi: 10.1109/19.989910.
22. Pat. 82313. Ukrayina, 7N01N51/00. "Komutator signaliv nyzkoho rivnia" / R.V. Kochan, O.V. Kochan (Ukrayina). - No. a200610833; zaiavl. 13.10.2006, opubl. 10.06.2009, biul No.11.
23. Pat. 86967. Ukrayina, MPK N01. "Komutator signaliv nyzkoho rivnia." R.V. Kochan, O.V. Kochan, V.V. Kochan, H.I. Barylo (Ukrayina) - No. a200610833; zaiavl. 13.10.2006, opublik. 10.06.2009, biul No.11.
24. NI is now part of Emerson's new Test & Measurement business group. [Elektronnyj resurs]. - Rezhym dostupu: <https://www.ni.com/en.html/>
25. DAC081C08x 8-Bit Micro Power Digital-to-Analog Converter with an I2C-Compatible Interface. [Elektronnyj resurs]. - Rezhym dostupu: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac081c085.pdf?ts=1706713739346&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
26. Pat. 123971, Ukrayina, G06F 3/00, N03K 19/0175, N03K 19/00. Poslidovnyi synkronnyi interfejs z halvanichnoiu rozviazkoiu / Kochan Orest Volodymyrovych, Kochan Roman Volodymyrovych, Kochan Volodymyr Volodymyrovych; vlasnyky zaiavky. No. a201907650; zaiavl. 08.07.2019, opubl. 30.06.2021, biul. No.26/2021.
27. Patent 25609A Ukrayiny, MKI G06F 15/00. Dvoprovidna lokalna obchysluvalna mrezhka, povtoryuvach syhnalu ta inverter dlia vykorystannia v nii / V.V.Kochan, V.O.Tymchyshyn (Ukrayina); Zaiavl. 30.10.97 No. 97105295; Vydano 30.10.98.
28. Pat. 91244, Ukrayina, G06F 7/00, G06F 9/06, G06F 15/76, H04L 12/24. Mrezhevyi modul obrobky danykh z dystantsiynoiu rekonfihratsiieiu / Maikiv Ihor Myroslavovych, Kochan Roman Volodymyrovych, Turchynko Iryna Vasyliivna, Kochan Volodymyr Volodymyrovych; vlasnyky zaiavky. — No. 200806336; zaiavl. 13.05.2008, opubl. 12.07.2010, biul. No. 13/2010.
29. Pat. 104099, Ukrayina, MPK G01K 7/01. Prystroi dlia vymiriuvannia temperatury v elek-tropechakh oporu / O.V. Kochan, R.V. Kochan, V.V. Kochan; vlasnyky zaiavnyky. No. a201214323; zaiavl. 14.12.2012, opubl. 10.06.13, biul. No. 16.
30. Pat. 97485, Ukrayina, N03M1/10. Prystroi vyznachennia integralnoi nelineynosti kharakterystyky peretvorennya analoh-tsyfrovykh peretvoriuvachiv / Kochan Roman Volodymyrovych, Kochan Orest Volodymyrovych; Naukovo-doslidnyi institut Intelektualnykh komp'yuternykh sistem. No. a200703921; zaiavl. 10.04.2007, opubl. 27.02.2012, biul. No. 4/2012.
31. Kochan, R. V. Pretsiziyni analoh-tsyfrovi peretvoriuvachi z bezdemontazhnoiu metrolohichnoiu samoperevirkoiu. Lviv: Vydavnytstvo Lvivs'koi politekhniki, 2012. 252 s.
32. Polishchuk, Ye. S., Dorozhovets M.M., Yatsuk V.O. ta in. Metrologiia ta vymiriuvanna tekhnika: Pidruchnik / Ye.S. Polishchuk, M.M. Dorozhovets, V.O. Yatsuk, V.M. Vanko, T.G. Boiko; Za red. prof. Ye.S. Polishchuka. — Lviv. - Beskid Bit. — 2003. — 544s.
33. IEEE Standard 1451.2-1997 for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats. [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: <https://ieeexplore.ieee.org/document/720565>.
34. ZAKON UKRAYINY Pro metrologiiu ta metrologichnu diialnist. [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>.
35. Sachenko A.A., Tverdyi E.Ya. Sovershennstvovanie metodov izmereniya temperatury.- Kyiv. — Tekhnika. - 1983.- 104 s.
36. Mil'chenko, V.Y., Kochan, V.A., Sachenko, A.A. et al. Digital temperature-measuring instrument with automatic error compensation

of the thermoelectric thermometer. Meas Tech 21, 664–665 (1978). DOI: 10.1007/BF00821052.

37. Sachenko, A. Development ways of intelligent measurement control system. Eighteenth Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Tel Aviv, Israel, 1995, pp. 3.3.5/1-3.3.5/5, doi: 10.1109/EEIS.1995.513828.

38. Kochan O. Korektsiia pokhibok dreifu ta nabutoi neodnorodnosti u termoelektrychnomu peretvoriuvachi z kerovanyim profillem temperaturnoho polia / O. Kochan // Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. - 2016. - Vyp. 77. - S. 99-109. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2016_77_16.

39. C. Alippi, A. Ferrero, V. Piuri, "Artificial Intelligence for Instruments & Applications," IEEE I&M Magazine, June 1998, pp.9-17.