1. Номер державної реєстрації роботи: 0123U101602
2. Номер договору, за яким надається фінансування (за наявності): _____
3. Науковий напрям, до якого відноситься робота, відповідно до додатку до Порядку проведення державної атестації наукових установ та закладів вищої освіти в частині провадження такими закладами наукової (науково-технічної) діяльності, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19 липня 2017 року № 540 Інженерно-технологічний (інформаційні технології, електроніка, автоматизація та електронні комунікації
4. Найменування організації-виконавця роботи: Західноукраїнський національний університет
5. Власне ім'я та прізвище наукового керівника наукової (науково-технічної) роботи: Кочан Володимир
6. Місце основної роботи наукового керівника: Західноукраїнський національний університет
7. Терміни та тривалість виконання роботи:

   Тривалість роботи 24 місяці
   Початок 01.01.2023
   Закінчення 31.12.2024

   Тривалість звітного етапу 1- 12 місяців
   Початок 01.01.2023
   Закінчення 31.12.2023

   Тривалість звітного етапу 2 - 12 місяців
   Початок 01.01.2024
   Закінчення 31.12.2024

8. Обсяги фінансування роботи:

   Загальний обсяг фінансування:
   за запитом (заявкою) 3000,0 тис. грн
   фактичний _1173 +1500 = 2673 тис. грн

   Обсяг фінансування звітного етапу 1:
   за запитом (заявкою) 1500,0 тис.грн
   фактичний 1173,0 тис.грн

   Обсяг фінансування звітного етапу 2:
   за запитом (заявкою) _1500 тис. грн
   фактичний 1500 тис. грн

9. Перелік виконавців з оплатою праці (прізвище, ім'я та по батькові (за наявності), посада за основним місцем роботи, або посада за цивільно-правовим договором), окремо зазначаються молоді вчені, студенти, аспіранти (за наявності) ***(Додаток А)***.

10. Стислий зміст роботи в цілому (актуальність, мета, основні завдання, ідеї, гіпотези тощо) (до 40 рядків):

Як показує досвід аварій складних технічних об’єктів критичної інфраструктури (ОКІ) (Чорнобильська АЕС, Фукусіма тощо), а також хід війни РФ проти України, прийняття оптимальних рішень щодо ліквідації наслідків аварій вимагає достатньо повної інформації про поточний стан і динаміку розвитку ситуації. Тому системи моніторингу і керування (СМК) ОКІ мають забезпечити високу інформативність, живучість та достовірність даних про стан ОКІ. Досягнути цього можна шляхом використання в складі СМК спеціально розроблених вимірювально-керуючих модулів (ВКМ) на базі нових методів їх покращення.

Метою проекту є розроблення наукових засад і методів створення інтелектуальних ВКМ, які за рахунок методів самодіагностики, самокалібрування, штучного інтелекту (самоадаптації та самонавчання), а також вбудованого метрологічного забезпечення, матимуть вищі, порівняно з існуючими, точність вимірювального каналу у цілому (включаючи сенсори), метрологічну надійність та автономність, стійкість до деградації елементів і до завад різного виду. Це забезпечило високий рівень достовірності даних, отримуваних від ВКМ у всіх умовах роботи. За рахунок дистанційного перепрограмування ВКМ забезпечена гнучкість їх адаптації до виконуваних задач та економія необхідних ресурсів. Провідні та безпровідний інтерфейси, а також дистанційне перепрограмування, забезпечили високу інформативність у всіх режимах роботи, а разом із автономним живленням – високий рівень живучості.

Основними **завданнями** проекту є:
- розроблення наукових засад і методів визначення поточної похибки всіх компонентів вимірювального каналу (ВК) – сенсорів, ліній зв'язку, аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) у процесі їх експлуатації, без доступу до них, з мінімальним використанням еталонів або без них, а також корекції та компенсації цих похибок та самооцінки їх невиключеної похибки на базі методів штучного інтелекту. При виконанні завдання використано 6 отриманих авторських свідоцтв СРСР та 25 патентів України, а також 6 патентів України та 9 заявок, розроблених під час виконання проекту;
- розроблення наукових засад і методів завадостійкого та захищеного обміну даними між стаціонарними і мобільними засобами моніторингу ОКІ (особливо під час дистанційного перепрограмування ВКМ) з можливістю адаптації завадостійкості та енергоспоживання до рівня завад у каналі зв'язку. Планувалося використати патент України 117430, але відомі модулі безпровідного зв'язку не мають окремого живлення виходу передавача;
- розроблення наукових засад і методів завадостійкої та захищеної реконфігурації структури ВКМ з метою збільшення часу автономної роботи шляхом адаптації до виконуваної задачі. Використано 6 патентів України та 9 заявок, розроблених під час виконання проекту.
- розроблення наукових засад і методів метрологічного обслуговування інтелектуальних функцій системи. Вбудовані у ВКМ засоби дають змогу метрологічної самоперевірки всіх його вузлів, включаючи сенсори, та індивідуальної адаптації періоду цих перевірок до їх результатів у даних умовах експлуатації. При цьому метрологічне обслуговування ВКМ зводиться до заміни джерела напруги калібрування (забезпечення єдності вимірювань шляхом передачі значення еталону Вольта) під час експлуатації. Використано 6 патентів України та 9 заявок, розроблених під час виконання проекту.

11. Основні результати виконання попереднього (за наявності) етапу (до 20 рядків):

Спочатку було проведено патентний пошук технічних рішень, потрібних для виконання проєкту у патентній базі США та України, а також у Інтернет джерелах серед наукових публікацій і виробів відомих фірм (National Instruments, Texas Instruments, Fluke). Виділено рішення, які давали змогу підвищити інформативність, живучість і достовірність ВКМ.

Далі було розробленню структурні схеми СМК та її базового вузла – інтелектуального ВКМ, а також принципові схеми вузлів ВКМ – контактного і безконтактного комутаторів (ККМ і БКМ), АЦП і ЦАП, провідних і безпровідних інтерфейсів (ПІ та БПІ), а також вузла опрацювання даних на базі мікроконтролера (МК), первинного і вторинного блоків живлення

(ПБЖ і ВБЖ) і джерела еталонної напруги (ДЕН). Головними вимогами були метрологічна надійність (проектовані вузли повинні мати або гарантовані конструкцією метрологічні параметри, або можливість метрологічної перевірки у процесі експлуатації без зупинки технологічного процесу) та апаратна і програмна гнучкість (структура розроблюваного ВКМ повинна мати можливість зміни апаратної конфігурації, тобто використання різного набору згаданих вузлів, а також зміни програмного забезпечення) шляхом дистанційного перепрограмування. Розроблені схеми вузлів та їх елементна база забезпечили мінімальне енергоспоживання вузлів і два рівні пригнічення завад загального виду – для максимальної напруги завади 20 В та 300 В. Через те, що завади загального рівня до 300 В зустрічаються рідше (зазвичай, лише при вимірюванні високих температур термопарами), блоки БКМ, АЦП і ЦАП виконано у першому варіанті, лише ККМ – у другому. Проведено також моделювання роботи розроблених вузлів у середовищах Excel, Electronic Workbench, Proteus.

12. Номер та назва звітного етапу (за наявності):

Етап № 1 “Розроблення методів досягнення мети проекту”. Розроблення структури ВКМ та його програмного забезпечення. Розроблення принципових схем вузлів ВКМ та їх моделювання. Розроблення алгоритмів модулів базового та вбудованого метрологічного програмного забезпечення.

Етап № 2 “Виготовлення експериментального дослідного взірця ВКМ”. Розроблення апаратного і програмного забезпечення ВКМ. Тестування вузлів та ВКМ у цілому з базовим програмним забезпеченням. Розроблення програмного забезпечення вбудованого метрологічного обслуговування.

13. Опис процесу реалізації (хід виконання, які дослідження проводились, які методики використовувались тощо) роботи за звітним етапом (до 50 рядків тексту)

За результатами розроблення структурних і принципових схем вузлів ВКМ, а також моделювання їх роботи була проведена корекція цих схем та макетування ключових вузлів, що забезпечують мінімальне енергоспоживання при гальванічній розв’язці (вузол БКМ та живлення ЦАП з невисокими, до 20 В допустимими напругами завади загального виду). Результати дослідження макетованих вузлів дозволили провести корекцію розроблених раніше принципових схем блоків БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН. Далі знову було проведено моделювання роботи розроблених вузлів у середовищах Electronic Workbench (апаратне забезпечення вимірювального та керуючого каналу), Excel (методи корекції похибок вимірювального та керуючого каналу) і Proteus (тестування базового програмного забезпечення – призначеного для забезпечення роботи апаратних вузлів).

Далі, за результатами корекції принципових схем блоків БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН були розроблені у середовищі PCAD2006 друковані плати цих вузлів. Паралельно були замовлені комплектуючі деталі для цих вузлів. Після розпайки деталей, за допомогою розробленого нестандартного обладнання, було проведено функціональне тестування блоків БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН та виправлені помилки, які виникли у процесі розпайки цих вузлів.

Паралельно була проведена підготовка до метрологічного тестування блоків БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН. Через те, що блоки БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН повинні забезпечити високу достовірність результатів вимірювання та керування, а також в зв'язку з незручністю використання прецизійного еталонного обладнання на робочому місці налаштування та тестування блоків БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН, було розроблено нестандартне обладнання, яке дозволяло забезпечити високу точність тестування за рахунок відносних вимірювань. Одночасно було розроблено програмне забезпечення, яке давало можливість метрологічного тестування блоків БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН. При цьому було окремо реалізовано функції керування блоками БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН та отримання результатів аналого-цифрового перетворення, а також функцію опрацювання результатів тестування.

Після проведення окремого метрологічного тестування блоків БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН було проведено їх об’єднання у макет ВКМ і проведене функціональне тестування цього

макету. Одночасно була проведена перевірка програмного забезпечення керування блоками БКМ, АЦП, ЦАП і ДЕН та отримання результатів аналого-цифрового перетворення.

Після виправлення помилок у програмному забезпеченні була проведена метрологічна перевірка макету ВКМ. Спочатку була визначена випадкова складова похибки ВК макету ВКМ на всіх діапазонах вимірювання. Ця випадкова складова збільшувалася від 0,25 мкВ на діапазоні 20 мВ (0,0013%) до 2 мкВ на діапазоні 2,5 В (0,00008%). Далі були визначені адитивна похибка (36 мкВ тобто 0,0015% на діапазоні 2,5 В) і мультиплікативна похибка (3,27 мВ тобто 0,13% на діапазоні 2,5 В). Потім була проведена корекція адитивної та мультиплікативної похибки на діапазоні 2,5 В. Після корекції адитивної та мультиплікативної похибки на діапазоні 2,5 В ці похибки зменшилися до 6,3 мкВ тобто 0,00025% (адитивна) та 28 мкВ, тобто 0,0011% (мультиплікативна). Перевірка відхилення функції перетворення АЦП у восьми точках діапазону перетворення від лінійної, відповідно до патенту України 127840, показала, що максимальна похибка нелінійності не перевищує 14 мкВ, тобто 0,0022% (у точці 0,64 В на діапазоні 2,5 В). Це означає, що запропонований метод корекції похибок функції перетворення АЦП дуже ефективний.

Далі було досліджено ефективність корекції похибок ЦАП, згідно із патентом України 127840. Максимальна похибка використаних ЦАП відповідає їх технічній документації, тобто не перевищує 0,9 мВ тобто 0,036%. Через велику похибку квантування ЦАП ефективність корекції його похибки не може бути висока. Але при каскадуванні ЦАП для зменшення похибки квантування, ефективність корекції похибки ЦАП також буде високою.

Слід відзначити, що підвищенню достовірності даних від ВКМ сприяє можливість визначення похибок та їх корекції у процесі експлуатації без її переривання. Також змога заміни ДЕН у процесі роботи підвищує достовірності даних від ВКМ.

14. Результати виконання звітного етапу відповідно до технічного завдання / календарного плану:

14.1 Заплановані завдання роботи (звітного етапу) (перерахуйте завдання звітного етапу, окреслені у запиті (технічному завданні/календарному плані) роботи, до 40 рядків):

Заплановані завдання звітного етапу №1 проекту*:*

- розроблення методів досягнення мети проекту, структури ВКМ та його програмного забезпечення – виконано;
- розроблення схем ВКМ та їх вузлів, їх моделювання – виконано;
- розроблення алгоритмів модулів базового програмного забезпечення – виконано;
- пояснююча записка, де описані конкретні методи, які будуть використані для досягнення мети проекту, алгоритми, структура варіантів ВКМ та його програмного забезпечення, результати моделювання – виконано;
- комплект схем вузлів ВКМ – виконано;
- алгоритми базового програмного забезпечення ВКМ – виконано;
- звітна документація Проміжний звіт про виконання НТР – виконано;
- захист одної магістерської дисертації – виконано.

Публікації (Додаток Б):

- 1 стаття в журналі що входить до науково-метричних баз даних WoS та/або Scopus – виконано;
- 1 стаття що входить до переліку фахових видань України – виконано;
- 2 англомовні тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються науково-метричними базами даних WoS або Scopus – виконано.

Заплановані завдання звітного етапу №2 проекту:

- виготовлення експериментального дослідного взірця ВКМ – виконано;
- розроблення апаратного і програмного забезпечення ВКМ – виконано;
- тестування вузлів та ВКМ у цілому з базовим програмним забезпеченням – виконано;

- розроблення програмного забезпечення вбудованого метрологічного обслуговування – виконано;
- результати тестування експериментального дослідного взірця ВКМ та його програмного забезпечення – виконано;
- заключний та анотований звіт про виконання НТР – виконано;

Публікації (Додаток Б):

- 4 статті в журналах що входить до науково-метричних баз даних WoS та/або Scopus – виконано;
- 2 статті що входить до переліку фахових видань України – виконано;
- 3 англомовні тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються науково-метричними базами даних WoS або Scopus – виконано;
- Захист двох магістерських і одної кандидатської дисертації – виконано;

Патенти:

- 1 патент на винахід, два патенти на корисну модель – виконано;
- 3 свідоцтва на авторський твір– виконано

Представлення результатів

- на трьох міжнародних і Українських комунікативних форумах – виконано
- двох конкурсах, інноваційних фестивалів – виконано

Укладено договорів (міжнародних проектів) 640 тис - виконано

14.2 Отримані результати роботи (звітного етапу) (, до 120 рядків):

Відповідно до розробленої структурної схеми ВКМ, у нього входять наступні функціональні блоки:

1. Блок (друкована плата) контактного комутатора ККМ, головним компонентом якого є дев'ять герконових реле, що витримують напругу завади загального виду до 200 В. За рахунок термовирівнювачів спеціальної конструкції (патенти України 82313 і 86967) ці реле забезпечують паразитні термо-е.р.с. менше 1 мкВ у робочих умовах експлуатації. Таким чином, блок контактного комутатора ККМ дозволяє підключати термопари довільного типу, що працюють у довільних умовах експлуатації. Інші сенсори дуже рідко мають завади загального виду такої амплітуди, їх доцільно підключати до безконтактного комутатора. Блок ККМ також містить: а) транзисторні ключі ввімкнення герконових реле; б) RC-ланку форсованого ввімкнення герконових реле; в) керований стабілізатор струму, яке дає змогу живити параметричні сенсори (термометри опору, термістори, термодіоди тощо) струмами від 20 мкА до 1,2 мА. Як показали результати проведених досліджень, використане вхідне розняття типу DF25, забезпечує паразитні термо-е.р.с. менше 1 мкВ у робочих умовах експлуатації, а вихідне розняття типу Ш10 дає змогу отримати паразитні термо-е.р.с. менше 1 мкВ за рахунок просторового усереднення паразитних термо-е.р.с. його контактів.

2. Блок безконтактного комутатора БКМ головним компонентом якого є чотири мікросхеми комутаторів на КМОН ключах (кожна мікросхема типу ADG5421 має вісім каналів, тобто БКМ має структуру 16х2) з підвищеною допустимою напругою. Для уніфікації входів і виходів ККМ і БКМ як два вхідні розняття використано розняття типу DF25, а як вихідне – розняття типу Ш10. також у склад БКМ входить керований стабілізатор струму, яке дає змогу живити параметричні сенсори (термометри опору, термістори, термодіоди тощо) струмами від 20 мкА до 1,2 мА (наприклад, за авторським свідоцтвом 1377609).

3. Джерело еталонної напруги ДЕН, головним компонентом якого є прецизійний стабілізатор напруги AD780. Розроблені методи метрологічного забезпечення вимагають від ДЕН високої короткочасної стабільності вихідної напруги і малого рівня шумів. Тому у склад ДЕН входять: а) вхідний фільтр низької частоти; б) попередній стабілізатор 7805; в) прецизійний стабілізатор напруги AD780; г) вихідний фільтр низької частоти. Крім того, у склад ДЕН входять мікросхема DS2430A (флеш-ПЗП на 256 байт з інтерфейсом 1-Wire), яка використовується як електронний паспорт відповідно до стандарту IEEE1451.2 (Transducer

Electronic Data Sheet, TEDS). У цей паспорт, крім значення вихідної напруги, отриманого при останній метрологічній перевірці, записується також її зміна за час між передостанньою та останньою метрологічними перевірками, визначений при випуску індивідуальний температурний коефіцієнт і його допустиму похибку, а також дату наступної метрологічної перевірки. Ці дані дають змогу достатньо коректно оцінити поточну похибку ВКМ при експлуатації у робочих умовах або навіть поза її межами. Звичайно, поза межами робочих умов, поточна похибка вимірювання та керування ВКМ зросте. Але, завдяки вбудованому метрологічному обслуговуванню, поточна похибка вимірювання та керування ВКМ залишиться відомою з достатньо високою довірчою імовірністю, яку, за результатами проведеної метрологічної перевірки, можна коректно оцінити.

4. Багатофункціональна вимірювальна та керуюча плата, яка містить також вузли інтерфейсів. Тому розглянемо кожен вузол окремо.

4.1 Вузол аналого-цифрового перетворювача, на вхід якого поступають виходи комутаторів ККМ і БКМ. Як основу використано 24-х розрядний сигма-дельта аналого-цифровий перетворювач типу AD7714 фірми Analog Devices. Цей АЦП має велику розрядність, високий коефіцієнт пригнічення завад та малий рівень шумів. Тобто він добре підходить для реалізації методів вбудованого метрологічного забезпечення (описані нижче).

4.2 Вузол опрацювання даних, отриманих від аналого-цифрового перетворювача типу AD7714. Він створений на базі 32-х розрядного мікроконтролера типу STM32F407VGT6, який, крім опрацювання даних, також керує всіма вузлами ВКМ, зокрема і не розміщеними на багатофункціональній вимірювальній та керуючій платі комутаторами ККМ і БКМ. Високу гнучкість вузла визначає можливість дистанційного перепрограмування.

4.3 Чотири цифро-аналогові перетворювачі ЦАП, живлення яких має індивідуальну гальванічну розв'язку. Для зменшення енергоспоживання розв'язку забезпечують дві послідовно ввімкнені ланки, які складаються із високовольтних ключів та запам'ятовуючого конденсатора. Перша з ланок підключена до стабілізатора живлення ЦАП, а остання –до виводів мікросхеми ЦАП типу LTC1456 з малим енергоспоживанням. Використані мікросхеми ЦАП мають вбудоване джерело опорної напруги, а також їх вихідна напруга всіх чотирьох ЦАП, за допомогою вихідного комутатора на високовольтних ключах ADG5421, поступає (патент України 116949) на вхід АЦП, який попередньо пройшов метрологічне обслуговування згідно із патентом України 127840. Тому метрологічна надійність ЦАП є висока. Керування ЦАП здійснює вузол опрацювання даних через свій інтерфейс SPI1. Для зменшення енергоспоживання гальванічної розв'язки інтерфейсу SPI1 до входів мікросхем ЦАП підключається через високовольтні ключі ADG5421. Для індивідуального керування на вивід CS кожної мікросхем ЦАП відповідна команда подається через оптрон LTV-217.

4.4 Восьми канальний безконтактний комутатор на базі мікросхем ADG508A (структура комутатора 8x2), який служить для метрологічного обслуговування АЦП, зокрема, його метрологічної перевірки за патентом України 127840. Для цього до входів комутатора підключають подільник із послідовно з'єднаних резисторів R1…R7 (див. рис.1). За рахунок окремого керування мікросхемами комутатор може вмикати канали як для вимірювання спадів напруги на кожному резисторі окремо (для R1 – ввімкнені ключі S1.1 і S2.2, для R2 – ввімкнені ключі S1.2 і S2.3, і т.д.), так і для вимірювання наростаючих спадів напруги на резисторах (для R1 – ввімкнені ключі S1.1 і S2.2, для R1+ R2 – ввімкнені ключі S1.1 і S2.3, і т.д.). При метрологічній перевірці спочатку вимірюють спади напруги на кожному резисторі окремо U_{R1}, U_{R2}, і т. д. і знаходять суму цих спадів напруги ΣU_i. Далі вимірюють сумарний спад напруги $U\Sigma R_i$ на резисторах R1…R7 (ввімкнені ключі S1.1 і S2.8). Тоді знаходять коефіцієнт невідповідності Кіс напруг $U\Sigma R_i$ та ΣU_i, рівний їх відношенню. Після цього множать спади напруги на резисторах U_{R1}, U_{R2}, і т. д. на коефіцієнт невідповідності Кіс і знаходять скориговані їх значення U_{R1c}, U_{R2c}, і т. д. Далі обчислюють суми скоригованих спадів напруги на резисторах R1…R7 (U_{R1c}, $U_{R1c}+U_{R2c}$, $U_{R1c}+U_{R2c}+U_{R3c}$ і т. д. Ці суми вимірюють за допомогою АЦП і знаходять різниці між результатами вимірювання та обчисленими сумами скоригованих спадів напруги. Знайдена різниця є поточною похибкою АЦП. Шляхом апроксимації цих різниць (доцільно використати метод регресійного аналізу) знаходять

поточну функцію поправок на результати вимірювання АЦП. Шляхом аналізу отриманої функції та її змін можна зробити висновки про характер похибки АЦП.

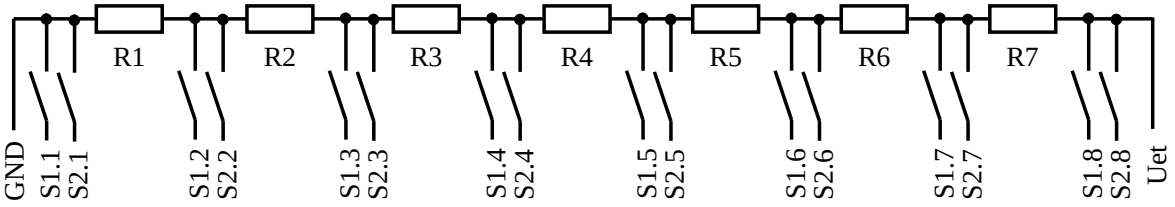


Рис. 1. Схема подільника, який служить для метрологічної перевірки АЦП, що входить у ВКМ

4.5 Двоканальний провідний інтерфейс типу RS485 з гальванічною розв'язкою (мікросхема ADM24833), що широко використовується при побудові локальних вимірювально-керуючих мереж. Один з них підключають до мережі верхнього рівня, другий – нижнього рівня.

4.6 Двоканальний провідний інтерфейс типу RS232 з гальванічною розв'язкою (на базі оптронів LTV-217), розповсюджений у комп'ютерних пристроях. Традиційно використовується для зв'язку точка-точка, але використано патент України 25609А, який дає змогу створювати локальні вимірювально-керуючі мережі.

4.7 Безпровідний інтерфейс типу LORA, на базі модуля E22-400M30S. Забезпечує зв'язок на відстані 1 – 3 км залежно від умов у системах за патентами 117430, 134592.

4.8 Три стабілізатори напруги типу 7805, які живлять аналого-цифровий перетворювач типу AD7714, кола гальванічної розв'язки ЦАП і модуль безпровідного інтерфейсу.

5. Блок живлення блоків ВКМ. Гальванічну розв'язку забезпечує почерговий періодичний заряд двох акумуляторів через реле згідно із патентом України 104099. Таке рішення значно зменшує енергоспоживання через вищий коефіцієнт корисної дії, покращує пригнічення завад загального виду (мала прохідна ємність контактів реле) і спрощує схему. Керування блоком живлення здійснює мікроконтролер, який, за графіком, заданим вузлом опрацювання даних, вмикає живлення лише тих блоків та вузлів, які мають працювати у даний момент.

14.3 Відхилення від календарного плану (за наявності) (до 40 рядків): ____-___

15. Наукова цінність і актуальність отриманих результатів (науково-технічної продукції), їх порівняння з українськими та/або кращими закордонними аналогами (до 40 рядків тексту): (за необхідності, можуть наводитись дані у вигляді таблиць, рисунків, формул, графіків, діаграм, креслень тощо).

Проведений аналіз патентів США, а також технічних рішень, які покладені в основу відомих ВКМ як українського, так і зарубіжного виробництва, показав, що можливе значне покращення основних властивостей ВКМ. Розроблений ВКМ, за рахунок запатентованих технічних рішень, забезпечує:

1. Високу достовірність отримуваних від ВКМ даних за рахунок вбудованого метрологічного забезпечення, зокрема, змоги метрологічної перевірки (патенти України 116949, 127840) і заміни джерела еталонної напруги у довільний момент під час експлуатації, як у робочих, так і у аварійних і пост-аварійних умовах. При цьому метрологічна перевірка охоплює як канал аналого-цифрового, так і цифро-аналогового перетворення (патент України 116949). Також суттєво зростає єдність вимірювань, їх прослідковуваність та відтворюваність.

2. Високу ефективність корекції систематичних похибок аналого-цифрового та цифро-аналогових перетворювачів за результатами метрологічної перевірки за п. 1. Як показано у п. 13 даного звіту систематична складова похибки АЦП зменшується від 6 (адитивна складова) до 850 (мультиплікативна складова) разів. Ефективність корекції систематичних похибок ЦАП, через їх малу розрядність, значно менша. Але, при каскадуванні ЦАП з метою збільшення розрядності, ця ефективність стає аналогічною до АЦП.

3. Досягнуті за рахунок вбудованого метрологічного обслуговування високі метрологічні параметри та гнучкість апаратного і програмного забезпечення за рахунок дистанційного

перепрограмування дають змогу реалізувати різні методи метрологічного забезпечення багатьох сенсорів. Зокрема, можуть бути реалізовані методи корекції та компенсації дії похибок термопар від термоелектричної неоднорідності їх електродів, викликаної їх тривалою експлуатацією при високих температурах (патенти України 92192, 97464), бездемонтажні методи визначення похибки термопари, її корекції та самодіагностики, а також керування відповідним обладнанням (патенти України 102981, 105700, 104952), електродів термопар. Також розроблений ВКМ може використовувати методи штучного інтелекту при корекції, зокрема, нейронні мережі (патенти України 50830, 105541). При цьому за рахунок дистанційного перепрограмування, спочатку ВКМ виконує програму збору даних для навчання нейронної мережі, ці дані передаються у хмару для навчання нейронної мережі, формується підпрограма корекції похибок, яка завантажується у пам'ять ВКМ.

4. Параметри та властивості розробленого ВКМ дають змогу компенсувати найбільш небезпечну при прецизійних вимірюваннях температури похибку термометрів опору (ТО) – від самонагріву своїм робочим струмом. Виникає суперечність – збільшення робочого струму збільшує чутливість, тобто зменшує вплив шумів і завад на результат вимірювання, але одночасно зростає нагрів ТО, тобто похибка вимірювання зростає. Оптимальний струм ТО визначив Р. Кочан у докторській дисертації, але тут же провів дослідження, які показали можливість дуже суттєвого зменшення цієї похибки за рахунок її дослідження та корекції.

5. Дистанційне перепрограмування дозволяє реалізувати захист від вірусів на базі нейронних мереж і нечіткої логіки (патенти України 109640, 127724 і 105676).

6. Патент України 103802 скорочує кількість необхідних точок калібрування із 49 до 9 при переході до індивідуальної функції перетворення багатопараметричного сенсора.

16. Практична цінність результатів для потреб оборони, безпеки, економіки та/або суспільства України (у разі наявності) (до 60 рядків тексту): (обґрунтуйте практичну цінність результатів, зазначивши їх основні функціональні, тактико-технічні характеристики, перспективи впровадження. За необхідності, можуть наводитись дані у вигляді таблиць, рисунків, формул, графіків, діаграм, креслень тощо).

Слід відзначити, що сучасна елементна база гарантує високу функціональну надійність елементів ВКМ і самих ВКМ, однак вона не гарантує високу метрологічну надійність, особливо, при різних комбінаціях відхилень від нормальних умов експлуатації. Фірми, що випускають мікроелектронні елементи неохоче нормують їх похибки у цілому, стараються нормувати лише окремі складові похибки. Зокрема, часову та температурну стабільність майже ніхто не нормує. Тому, при високій функціональній надійності та живучості, сучасні ВКМ мають відносно низьку метрологічну надійність. Це підтверджується тим, що відомі ВКМ повинні проходити метрологічну перевірку, зазвичай, щороку, а для ОКІ – частішу. На відміну від існуючих ВКМ як українського, так і зарубіжного виробництва, пропоновані ВКМ, за рахунок запатентованих прогресивних технічних рішень, можуть забезпечити:

1. Високу інформативність і гнучкість як апаратного (можливість реконфігурації), так і програмного (дистанційне перепрограмування) забезпечення ВКМ (патенти України 25609А, 90766, 91244, 117430), поєднану з провідними і безпровідним інтерфейсами, що дає змогу працювати у Ad-hoc створених вимірювально-керуючих мережах, наприклад, систем прийняття рішень у пост-аварійних умовах атомних електростанцій (патент України 134592).

2. Високу живучість розробленого ВКМ, яка забезпечена тривалою роботою при резервному живленні, мінімізованим енергоспоживанням шляхом апаратної реконфігурації та мінімізації енергоспоживання програм (патенти України 114219, 145729) і безпровідним інтерфейсом.

3. Можливість забезпечення високої достовірності отримуваних результатів вимірювання тривалий час у дуже складних умовах експлуатації (які можуть виходити за межі встановлених у документації) за рахунок описаної вище вбудованої системи метрологічного обслуговування. При цьому результати метрологічної перевірки ВКМ дають змогу самому

ВКМ та вищому ієрархічному рівню системи зробити обґрунтований висновок про достовірність або недостовірність поточних результатів вимірювання та керування.

4. Необхідне метрологічне обслуговування розробленого ВКМ зводиться до періодичної заміни джерела еталонної напруги, причому ВКМ сам діагностує підключення нового джерела і виявляє такі помилки: неправильне підключення (відсутність контакту, переплутування), невідповідність інтервалу між метрологічними перевірками, недопустиме відхилення індивідуального значення опорної напруги між старим і новим джерелами опорної напруги (можлива несправність).

5. Можливість використання як звичайного ВКМ високої точності та метрологічної надійності, гнучкості та можливості реконфігурації апаратного і програмного забезпечення у складі довільних систем і мереж.

6. Можливість автономної роботи у складі вимірювально-керуючих і моніторингових систем та мереж об'єктів критичної інфраструктури (наприклад, у складі мережі моніторингу стану об'єктів атомної енергетики) як у нормальних, так і, зокрема, в аварійних і пост-аварійних умовах. Безпосередньо під час аварії (наприклад, вибуху) навряд, чи всі ВКМ будуть пошкоджені та виведені з ладу. Як було показано у заявці, найбільше постраждають лінії зв'язку і живлення ВКМ. Така мережа (патент України 134592), при використанні дронів ретрансляторів, може бути за лічені хвилини розгорнута безпосередньо після аварії та мати високу надійність через те, що безпосередньо сама аварія на неї не діяла. Уцілілі ВКМ будуть працювати від акумуляторів, а дрони ретранслятори відновлять безпровідний зв'язок з цими ВКМ незважаючи на їх недоступність. При цьому передавачі ВКМ, з метою економії енергії акумуляторів, перейдуть у режим обмеженого радіусу дії. А дрони ретранслятори зможуть відновляти заряд своїх акумуляторів періодично повертаючись на базу. Таким чином така мережа, незважаючи на наслідки аварії, збереже інформативність і живучість системи, а властивості розроблених ВКМ забезпечать достовірність результатів вимірювань.

7. Високу завадостійкість сенсорних даних через значні коефіцієнти пригнічення завад як нормального виду (80 дБ, визначається використаним сигма-дельта АЦП) так і загального виду (180 дБ, визначається прохідними ємностями оптронів у складі діючого у даній конфігурації інтерфейсу та реле заряду акумуляторів).

8. Можливість, за рахунок дистанційного перепрограмування та гнучкості апаратного забезпечення, використання сенсорів, методів опрацювання сенсорних даних, метрологічного обслуговування та алгоритмів керування, які не були передбачені при випуску ВКМ. Зокрема, використання нових алгоритмів підвищення точності та переходу до індивідуальних функцій перетворення сенсорів. Також, завдяки відповідному опрацюванню сенсорних даних і результатів періодичних метрологічних перевірок можна буде виявити невідомі раніше кореляційні зв'язки та використати методи штучного інтелекту для покращення якості виконання задачі.

17. Основні висновки/рекомендації за результатами виконання наукової (науково-технічної) роботи (до 50 рядків)

У результаті виконання проекту розроблено наукові засади, методи та засоби побудови інтелектуального вимірювально-керуючого модуля (ВКМ) для використання у складі систем моніторингу та керування об’єктами критичної інфраструктури в штатних, аварійних і постававарійних умовах. Запропоновано архітектурні рішення, що забезпечують високу інформативність, живучість та достовірність роботи ВКМ, включно з вбудованим метрологічним обслуговуванням, алгоритмами самодіагностики і адаптації до умов експлуатації.

На першому етапі сформовано структуру ВКМ, виконано моделювання основних функціональних вузлів, розроблено базові алгоритми обробки сигналів та системи самотестування. Удосконалено принципи метрологічного забезпечення шляхом створення

вбудованої системи самоперевірки точності та достовірності перетворень у режимі реального часу без переривання роботи.

На другому етапі виготовлено та протестовано експериментальний зразок ВКМ, що включає 24-розрядний сигма-дельта АЦП, джерело еталонної напруги, системи автономного живлення та провідні й безпровідні канали зв’язку. Проведено стендові випробування та моделювання аварійних сценаріїв. Результати підтвердили високу точність, завадостійкість (до 180 дБ) і здатність до автономної роботи протягом 72 годин за підтримки дронів-ретрансляторів.

Розроблене базове програмне забезпечення передбачає підтримку алгоритмів штучного інтелекту, включаючи адаптацію функціонування ВКМ до задач користувача. Створено окреме програмне забезпечення для періодичного метрологічного тестування із виявленням недостовірних вимірювань.

Наукові результати апробовано в ході експериментальних досліджень, підготовлено заявки на патенти та здійснено публікації у фахових виданнях.

Рекомендації: отримані результати доцільно використовувати для впровадження в системах енергетичної, техногенної, екологічної безпеки, зокрема для критичних об'єктів, які повинні працювати в умовах надзвичайних ситуацій або бойових дій. Розроблена технологія є перспективною для подальшого розвитку в напрямах автономних сенсорних мереж, оборонних систем та систем раннього попередження.

18. Основні кількісні показники/індикатори виконання роботи (звітного етапу) за темою роботи.

№ з/п	Показники / індикатори	План (відповідно до заявки / ТЗ / КП тощо), кількість	Факт (за результатами етапу), кількість
1.	**Публікація результатів:**		
1.1.	Статті у журналах, що індексуються наукометричними базами даних:		
	- Scopus та/або Web of Science Core Collection, всього, од.	**5**	**14**
	з них із квартилем Q1 і Q2 на момент опублікування, од.	**4**	**12**
	з них із квартилем Q3 і Q4 на момент опублікування, од.	**1**	**2**
1.2.	Статті у виданнях, які містять інформацію з обмеженим доступом *(для НТР / НТП оборонного та/або подвійного призначення)*, од.	**-**	**-**
1.3.	Статті у наукових журналах (без квартилю), збірниках наукових праць, матеріалах конференцій тощо, що індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection (крім тих, що увійшли до п.1.1) , од.	**5**	**20**
1.4.	Статті у фахових виданнях України категорії «Б» , од.	**3**	**5**
1.5.	Статті у періодичних виданнях інших країн, що мають ISSN, од.	**-**	**-**
1.6.	Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України та не індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection, од.	**-**	**-**
1.7.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) у закордонних видавництвах іноземними мовами, од.	**-**	**2**
1.8.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) в українських видавництвах, од.	**-**	**1**
1.9.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) з обмеженим доступом *(для НТР / НТП оборонного та/або подвійного призначення)* , од.	**-**	**-**
1.10	Підручники, навчальні посібники, од.	**-**	**-**
1.11	Словники, довідники, енциклопедії, видані українськими та/або закордонними видавництвами , од.	**-**	**-**

№ з/п	Показники / індикатори	План (відповідно до заявки / ТЗ / КП тощо), кількість	Факт (за результатами етапу), кількість
1.12	Інші публікації, які не описані у пп. 1.1-1.11, од.	**-**	**-**
2.	**Презентація та дисемінація результатів:**		
2.1.	Міжнародні науково-комунікативні заходи, конференції, од.	**3**	**4**
2.2.	Всеукраїнські та регіональні науково-технічні/промислові виставкові заходи, од.	**-**	**2**
2.3.	Представлення розробки/бізнес-плану/результатів *НТР / НТП* на:		
	- інноваційних фестивалях, од.	**-**	**-**
	- конкурсах стартапів, од.	**2**	**4**
	- акселераційних програмах, од.	**-**	**-**
	- хакатонах, од.	**-**	**-**
2.4.	Науково-популярні публікації з метою поширення інформації про результати *НТР / НТП* для загальної (широкої) аудиторії, од.	**-**	**-**
2.5.	Представлення інформації про результати *НТР / НТП* на науково-популяризаційних заходах (Дні науки, Наукові пікніки тощо) , од.	**-**	**1**
2.6.	Інші заходи, які не описані у пп. 2.1-2.5, од.	**-**	**-**
3.	**Підготовка наукових кадрів:**		
3.1.	Захищено дисертацій доктора наук авторами *НТР / НТП* або під консультуванням авторів у рамках тематики *НТР / НТП*, од.	**-**	**-**
3.2.	Захищено дисертацій доктора філософії авторами *НТР / НТП* або під керівництвом авторів у рамках тематики *НТР / НТП*, од.	**1**	**1**
3.3	Захищено магістерських кваліфікаційних робіт	**3**	**6**
4.	**Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності (**ОПІВ**)**		
4.1.	Отримано патентів України на винахід, од.	**1**	**3**
4.2.	Отримано патентів України на промисловий зразок , од.	**-**	**-**
4.3.	Отримано патентів України на корисну модель, од.	**2**	**3**
4.4.	Отримано охоронний документ на ОПІВ інших країн, од.	**-**	**-**
4.5.	Інші ОПІВ, які не описані у пп. 4.1-4.4, од.	**3**	**3**
4.6.	Подано заявок на отримання охоронного документу на ОПІВ України та /або інших країн, од.	**-**	**9**
5.	**Впровадження та використання наукових або науково-технічних (прикладних) результатів:**		
5.1.	Підписання (укладення) договорів (угод) *ЗВО / НУ* – виконавцем *НТР / НТП* на впровадження (використання) результатів *НТР / НТП* (окрім індивідуальних), серед них:	**640 тис.**	**2 / 3655 тис.**
5.1.1	Господарських договорів/контрактів, од./тис.грн	**-**	**-**
5.1.2	Ліцензійних договорів/договорів на ноу-хау, од./тис.грн	**-**	**-**
5.1.3	Грантових угод (держаного рівня), од./тис.грн	**1/640**	**1 / 1925 тис.**
5.1.4	Грантових угод (міжнародного рівня), од./тис.грн		**1 / 1730 тис.**
5.1.5	Інших договорів (угод), які не описані у пп. 5.1.1-5.1.3, од./тис.грн	**-**	**-**
5.2.	Документально підтверджено використання результатів у практиці органів державної/місцевої влади, суспільних практиках тощо, од.	**-**	**-**
5.3.	Проведено маркетингові дослідження, перемовини з потенційними замовниками із підписанням протоколу (меморандуму, угоди) про наміри комерційного впровадження результатів, од.	**-**	**-**
5.4.	Подано заявок на державні, міжнародні наукові гранти (окрім індивідуальних) , од.	**-**	**-**
5.5.	Впроваджено у освітній процес *ЗВО / НУ* з відповідним підтвердженням, од.	**-**	**-**
5.6.	Інші варіанти впровадження, які не описані у пп. 5.1-5.5, од.	**-**	**-**
6.	**Створено чи істотно удосконалено/покращено існуючі:**		
6.1.	Пристрої (макет, експериментальний/дослідний зразок) , од.	**1**	**1**

№ з/п	Показники / індикатори	План (відповідно до заявки / ТЗ / КП тощо), кількість	Факт (за результатами етапу), кількість
6.2.	Матеріали, процеси, технології, технологічні регламенти, цифрові продукти та електронні сервіси, од.	-	-
6.3.	ТУ, ДСТУ, будівельні норми, зареєстровані проєкти законодавчих актів, од.	-	-
6.4.	Наукові (науково-технічні) послуги, од.	-	-
6.5.	Іншу продукцію, яка не описана у пп. 6.1-6.4, од.	-	-
7.	**Участь з оплатою у виконанні *НТР / НТП* (штатних одиниць/осіб) згідно з Додатком 1:**		
7.1.	Студентів (здобувачів вищої освіти І-ІІ рівнів), шт.од./ осіб	-	-
7.2	Аспірантів (здобувачів вищої освіти ІІІ рівня) , шт.од./ осіб	-	-
7.3.	Молодих вчених, шт.од./ осіб	**1**	**1**

*****зі сторони співвиконавця

19. Відхилення від запланованих показників/індикаторів, зазначених у п. 18 (до 20 рядків)*:* _

20. Вихідні дані щодо показників виконання відповідно до пунктів п. 18 з додаванням WEB-посилання (за наявності) на ресурси, де вони розміщені:

1.1 Статті у журналах, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, з них із квартилем Q1 і Q2 на момент опублікування:

1.1.1 Fang X., Zhang Y., Przystupa K., **Kochan O.** A Knowledge Graph Embedding Based Service Recommendation Method for Service-Based System Development. *Electronics. 2023; 12 (13): 2935.* https://doi.org/10.3390/electronics12132935

1.1.2 Fesenko H., Illiashenko O., Kharchenko V., Kliushnikov I., Morozova O., **Sachenko A.**, Skorobohatko S. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones 7*. 2023. no.7:409. DOI: https://doi.org/10.3390/drones7070409

1.1.3 Yatsyshyn S., Hotra O., Skoropad P., **Kochan O.**, Boyko O. Investigating Thermoelectric Batteries Based on Nanostructured Materials. *Energies.* 2023; Vol. 16. Issue 9, :3940. DOI: https://doi.org/10.3390/en16093940

1.1.4 Jiang K., Zhang C., Wei B., Li Z., **Kochan O.** Fault diagnosis of RV reducer based on denoising time–frequency attention neural network. *Expert Systems with Applications.* 2024, volume 238, part B. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121762

1.1.5 Vladov S.; **Sachenko A.;** Sokurenko, V.; Muzychuk, O.; Vysotska, V. Helicopters Turboshaft Engines Neural Network Modeling under Sensor Failure. J. Sens. Actuator Netw. 2024, 13, 66. https://doi.org/10.3390/jsan13050066

1.1.6 Vladov S.; Scislo L.; Sokurenko V.; Muzychuk, O.; Vysotska V.; Osadchy, S.; **Sachenko A.** Neural Network Signal Integration from Thermogas-Dynamic Parameter Sensors for Helicopters Turboshaft Engines at Flight Operation Conditions. Sensors 2024, 24, 4246. https://doi.org/10.3390/s24134246

1.1.7 Izonin I., Tkachenko R., Yendyk P., Pliss I., **Bodyanskiy Y.,** Gregus M. "Enhanced Input-Doubling Method Leveraging Response Surface Linearization to Improve Classification Accuracy in Small Medical Data Processing," Computation 2024, 12, 203. https://doi.org/10.3390/computation12100203

1.1.8 Fesenko H., Illiashenko O., Kharchenko V., Leichenko K., **Sachenko A.,** Scislo L. Methods and Software Tools for Reliable Operation of Flying LiFi Networks in Destruction Conditions. Sensors. 2024. Vol. 24. Article 5707. DOI: https://doi.org/10.3390/s24175707

1.1.9 Zhong Y., Li T., Przystupa K., Lin C., Yang G., Yang S., **Kochan O.,** Sikora J. Spatiotemporal Correlation Analysis for Predicting Current Transformer Errors in Smart Grids. Energies 2024, 17, 1608. https://doi.org/10.3390/en17071608

1.1.10 Dubchak L., Sachenko A., **Bodyanskiy Y.,** Wolff C., Vasylkiv N., Brukhanskyi R., **Kochan V.** Adaptive Neuro-Fuzzy System for Detection of Wind Turbine Blade Defects. Energies. 2024. Vol. 17. Article 6456. DOI: https://doi.org/10.3390/en17246456

1.1.11 Xin X., Chen R., Lin C., Liu Q., He Z., Li T., Yang G., Kochan O., Karpa M. Research of Online Error Prediction and Parallel Algorithm for Voltage Transformer in Smart Grid. Measurement Science Review. 2024; 24(6): 244–254. DOI: https://doi.org/10.2478/msr-2024-0033

1.1.12 Li J., Pei H., Kochan O., Wang C., Kochan R., Ivanyshyn A. Method for Correcting Error Due to Self-Heating of Resistance Temperature Detectors Suitable for Metrology in Industry 4.0. Sensors. 2024. Vol. 24. Article 7991. DOI: https://doi.org/10.3390/s24247991

з них із квартилем Q3 і Q4 на момент опублікування:

1.1.13 Vladov S., **Sachenko A.**, Vysotska V., Volkanin Y., Kukharenko D., & Severynenko, D. (2024). The reliably stable neural network controllers' synthesis with the transient process parameters optimization. Radioelectronic and Computer Systems, 2024(4), 178-191. doi: https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.15

1.1.14 Zhou C., Boyko T., Ruda M., Shybanova A., Dzhumelia E., **Kochan O.,** Levkiv M. Stability indicator for defining environmental and protective requirements for landscape ecosystems // Journal of Environmental Engineering & Landscape Management. 2024. Vol. 32 (1), pp. 57–71. https://doi.org/10.3846/jeelm.2024.20608

1.3 Статті у наукових журналах (без квартилю), збірниках наукових праць, матеріалах конференцій тощо, що індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection:

1.3.1 Aibo X., **Kochan O.,** Przystupa K., **Kochan V.** Concept of in Situ Metrological Service of Analog-to-Digital Converters for Devices Compatible with the Internet of Things. *Proceedings of the 14th International Conference on Measurement, MEASUREMENT 2023, Smolenice, Slovakia*. 2023. P. 292-295. DOI: https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164324 [7]

1.3.2 Aibo X., Haitao L., MingMing Z., Jiwei H., **Kochan O.**, Przystupa K. Ad-hoc Correction of Error due to Input Resistance of DAQ Units. *Proceedings of the 14th International Conference on Measurement, MEASUREMENT 2023, Smolenice, Slovakia*. 2023. P. 217-220. DOI: https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164529 [9]

1.3.3 **Kochan O.**, Beshley M., Beshley H., Levkiv M. The Technique of Modelling and Statistical Analysis of Energy Consumption in 5G Multi-Tier Radio Access Networks. *17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland*. 2023. P. 1-4. DOI: https://doi.org/10.1109/CADSM58174.2023.10076531 [12]

1.3.4 Beshley M., **Kochan V.,** Beshley H., Medvetskyi M., Kahalo I., Shkoropad Y. QoS-Coordinated Adaptive Spectrum Management Method for Coexistence 5G-U and Wi-Fi Networks with Short-Term Channel Failures. *Proceedings of he 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland.* 2023. P. 22-26. DOI: https://doi.org/10.1109/CADSM58174.2023.10076520 [15]

1.3.5 **Bodyanskiy Y.,** Kuzmenko O., Zaichenko H., Zaychenko Y. Application of Hybrid Neural Networks based on bagging and Group Method of Data Handling for forecasting.

Proceedings of IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine. 2023. P. 1-6, DOI: https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324161 [17]

1.3.6 **Bodyanskiy Y.,** Chala O. Stacking Neuro-Neo-Fuzzy System for Pattern Recognition and Its Online Learning. *Proceedings of 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland*. 2023. P. 521-524, DOI: https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275355 [18]

1.3.7 **Kochan O.,** Tian H., Su J., Przystupa K., **Kochan R.,** Dzhumelia E., Kochan N., Likhnovskyi I. Correcting Measurement Error due to Heating by Operating Current of Resistance Temperature Detectors. *Proceedings of 14th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia.* 2023. P. 296-299. DOI: https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164351 [33]

1.3.8 Ping X., Li A, Jiwe H., **Kochan O.,** Przystupa K., Majewski J. Simulating Error Due to Inhomogeneity of Type K Thermocouples. *Proceedings of 14th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia.* 2023. P. 213-216, DOI: https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164310 [34]

1.3.9 **Kochan O.,** Wang Z., Ouyang Y., Eromenko V., Aliluiko A., Przystupa K. Criteria of Goodness of Fit and Confidence Intervals for Polynomial Regression Models Through the Origin (i.e. Without the Intercept). *Proceedings of 14th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia*. 2023. P. 43-46, DOI: https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164504 [36]

1.3.10 Chala O., **Bodyanskiy Y., Sachenko A.,** Dobrowolski M. Matrix Hyper-Basis Function Neural Network and Its Online Learning. *Proceedings of IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany*. 2023. P. 1-4, DOI: https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348695 [19]

1.3.11 Osolinskyi O., **Kochan V., Sachenko A.,** Zahorodnia D., "Designing a Pulse Shaper of Arbitrary Duration," 2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany, 2023, pp. 414-420, doi: https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348721

1.3.12 **Kochan V.,** Mokhun S., Fedchyshyn O., Boitsaniuk S., **Bykovyy P.,** Parakuda V., Jiwei H., Anrang X. The Concept of Built-in Metrological Support of Voltage Measuring Channels for Internet of Things. *Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany*. 2023. P. 992-998, DOI: https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348816 [10]

1.3.13 Huang F., Drohobytskiy Y., Homeniuk H., **Kochan V., Kochan R.**, Levkiv M., Kochan N., **Bykovyy P**. Ad-Hoc Signal Conditioning Transducer with Self-Testing for Data Acquisition Devices. *Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany*. 2023. P. 999-1004, DOI: https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348753 [8]

1.3.14 **Kochan O.,** Osolinskyi O., **Sachenko A., Kochan V.,** Romanets I. "Simulator of Microcontroller's Power Consumption," 2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications

(IDAACS), Dortmund, Germany, 2023, pp. 787-792, doi: https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348884 .

1.3.15 Havrysh V., **Kochan V.** Mathematical Models to Determine Temperature Fields in Heterogeneous Elements of Digital Devices with Thermal Sensitivity Taken into Account. *Proceedings of IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany*. 2023. P. 983-991, DOI: https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348875 [37]

1.3.16 Shevchuk B., Ivakhiv O., **Zastavnyy O.,** Geraimchuk M. Telemonitoring of Human Biomedical and Biomechanical Signals. Journal of Mobile Multimedia, 2023, 19(03), 877–896. https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.19310

1.3.17 **Zastavnyy O., Kochan O., Bykovyy P., Sachenko A., Kochan R., Kochan V.,** "Methods of Reducing the Energy Consumption of Digital-Analog Converters and Increasing Their Metrological Reliability," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 72-75, doi: https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755864.

1.3.18 **Bodyanskiy Y.,** Kuzmenko O., Zaichenko H., Zaychenko Y. Hybrid system of computational intelligence based on bagging and group method of data handling. System Research & Information Technologies, (2024), (1), 75–85. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2024.1.06

1.3.19 Chala O., **Sachenko A., Bodyanskiy Y.,** Bytsyura L., Molga A. Probabilistic Neuro-Fuzzy System Based on Greedy Partitioning of the Input Space and Its Fast Combined Learning. Proceedings of IEEE 12th International Conference on Intelligent Systems (IS), Varna, Bulgaria. 2024. P. 1-5, DOI: https://doi.org/10.1109/IS61756.2024.10705222

1.3.20 **Sachenko A.,** Vysotska V., Vladov S., Vasylenko V., Dobrowolski M. Hybrid method for restoring missing sensor data with adaptive control based on neuro-fuzzy networks. Proceedings of the 1st International Workshop on Advanced Applied Information Technologies (AdvAIT-2024), CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3899, Khmelnytskyi (Ukraine) & Žilina (Slovakia). 2025 (published: March 2025), pp. 186–200. https://ceur-ws.org/Vol-3899/paper17.pdf

1.4 Статті у фахових виданнях України

- Категорія «Б»:

1.4.1 **Бодянський Є.В.,** Костюк С.О. Нейрон на основі адаптивного нечіткого перетворення для сучасних моделей штучних нейронних мереж. *Міжнародний науково-технічний журнал "Проблеми керування та інформатики"*. 2023. т. 68, № 6. С. 94–105. DOI: https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-6-7 [20]

1.4.2 **Beshley** M., **Kochan O.,** Beshley H., Shpur O. Methodology for measuring and enhancing the quality of VoWi-Fi and VoLTE voice communication on critical infrastructure objects. *Inormation and communication technologies, electronic engineering.* 2023. Vol. 3, No. 2. P. 74–87. DOI: https://doi.org/10.23939/ictee2023.02.074 [14]

1.4.3 Шафроненко А. Ю., **Бодянський Є. В.** Нечітка достовірна кластеризація великих масивів даних з гіпереліпсоїдальними класами з довільною орієнтацією осей. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2023. № 1, Вип. 50. С. 93-99. URL: https://doi.org/10.30748/nitps.2023.50.11 [23]

1.4.4 **Бодянський Є.,** Чала О. Інтелектуальна інформаційна технологія швидкої класифікації за умов перетинних класів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології, 2024. (2 (12), 108–112. https://doi.org/10.20998/2079-0023.2024.02.17

1.4.5 **Кочан О., Биковий П., Заставний О., Саченко А., Кочан В.** Концепція побудови вимірювально-керуючих модулів для об'єктів критичної інфраструктури. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки 2024, 337 (3(2), 437-445. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-66

1.7 Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) у закордонних видавництвах іноземними мовами:

1.7.1 Vasylkivskyi I., Ishchenko V., **Kochan O.,** Ivakh R. Environmental Pollution from Nuclear Power Plants: Modelling for the Khmelnytskyi Nuclear Power Plant (Ukraine) / In: Hu, Z., Dychka, I., He, M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education VI. ICCSEEA 2023. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2023. vol 181, Springer, Cham. P 815–826. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36118-0_71 [2]

1.7.2 **Bodyanskiy Ye. V.,** Chala O. Evolving Stacking Neuro-Fuzzy Probabilistic Networks and Their Combined Learning in Online Pattern Recognition Tasks. In: Artificial Intelligence in Control and Decision-making Systems. Studies in Computational Intelligence, vol. (2023) 95–123. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25759-9_6

1.8 Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) в українських видавництвах:

1.8.1 **Bodyanskiy Y.** Expert opinions on the strategy for artificial intelligence development in Ukraine (2023 – 2030). Chapter of monograph: Strategy for Artificial Intelligence Development in Ukraine. Publishing House «Nauka i Osvita», Kyiv, Ukraine. 2023. P. 246-247. DOI: https://doi.org/10.15407/development_strategy_2023 [16]

2 Презентація та дисемінація результатів.

2.1 Міжнародні науково-комунікативні заходи, конференції:

2.1.1 - 09.09.2023 – у рамках спеціальної секції «Special Stream on Advanced Information Technologies» міжнародної конференції IDAACS (12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition an Advanced Computing Systems: Technology and Applications) **Саченко А.О.** представив результати проекту. (https://www.idaacs.net/2023/programme)

2.1.2 - 23.09.2023 - у рамках спеціальної секції "Artificial Intelligence and Cognitive Systems" міжнародної конференції ACIT (13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies), Вроцлав, Польща –Бодянський Є.В. представив результати проекту (https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/10275066/proceeding)

2.1.3 - 22-24.02.2024 - в рамках наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп'ютерно- інтегровані технології» (АКІТ – 2024) представлені роботи «Автоматизована система пакування сипучих продуктів», «Аналіз систем розфасовки рідких продуктів», «Автоматизована система керування модулем автомийки» під керівництвом **Заставного О.М.** (http://scs.wunu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/Zm-ACIT-2024.pdf)

2.1.4 - 9.10.2024 року у рамках спеціальної секції «Signal Processing» 17-тої IEEE Міжнародної конференції «Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and

Computer Engineering (TCSET–2024), м. Львів Славське. Кочан О.В. представив результати проекту (https://tcset.ieee.org.ua/wp-content/uploads/2024/10/Pre-Final-TCSET-2024-%D0%A1onference-Program_09.10.24.pdf)

2.2 Всеукраїнські та регіональні науково-технічні/промислові виставкові заходи, од.

2.2.1 - 18.11.2023 - VI Західноукраїнський форум «IT-Перспектива». Представлено результати в рамках IT-школи автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, доповідач **Заставний О.М.** (https://fcit.wunu.edu.ua/2024/11/18/2023/)

2.2.2 - 30.11.2024 - VII Західноукраїнський форум «IT-Перспектива». Представлено результати в рамках IT-школи автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, доповідач **Заставний О.М.** (https://fcit.wunu.edu.ua/2024/11/18/2024/)

2.3 Представлення розробки/бізнес-плану/результатів НТР / НТП на конкурсах стартапів

2.3.1 - 04.07.2023 – конкурс IT-шкіл ЗУНУ. Робота "Безпровідна система моніторингу параметрів мікроклімату теплиці", Давлетов Рустам і Питель Роман, керівник **Заставний О.М.** (https://surl.li/fiunho)

2.3.2 - 25.06.2024 – конкурс IT-шкіл ЗУНУ. Робота "Система керування водопостачанням" (III місце), Залеський Роман, керівник **Заставний О.М.** (https://surl.li/gmpfux)

2.3.3 - 30.06.2024 - I етап Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузі знань 12 "Інформаційні технології". Робота: "Інтелектуальна система керування модулем автомийки", Віталій Говенко, керівник **Биковий П.Є**. (https://surl.li/ezxhll)

2.3.4 - 04.07.2025 – конкурс IT-шкіл ЗУНУ. Робота "Розумна рукавичка для людей із вадами зору" (II місце), Чичота Яна, керівник **Заставний О.М.** (https://surl.li/hqnloc)

2.5 Представлення інформації про результати НТР / НТП на науково-популяризаційних заходах (Дні науки, Наукові пікніки тощо) , од

2.5.1 - 21.04.2024 в рамках дня відкритих дверей факультету комп'ютерних інформаційних технологій, де були представлені розробки в рамках проекту. Доповідачі: **Биковий П.Є., Заставний О.М.** (https://surli.cc/mtbspl)

3 Підготовка наукових кадрів

3.2 Захищено дисертацій доктора філософії авторами НТР / НТП або під керівництвом авторів у рамках тематики НТР / НТП, од.

3.2.1 Мельниченко О. В. Методи збору, розпізнавання та обробки зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення заданих об'єктів: дис. д-ра філософії: 122 – Комп'ютерні науки / Олександр Вікторович Мельниченко ; наук. кер. **О.С. Савенко**; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2023. – 204 с. – URL: https://nauka.khmnu.edu.ua/df-70-052-027-speczialnist-122-kompyuterni-nauky-avtor-dysertacziyi-melnychenko-oleksandr-viktorovych/

3.3 Захищено магістерських кваліфікаційних робіт:

3.3.1 Кривень Б.Г. "Застосування поліноміальних регресійних моделей для дослідження схем, що базуються на операційних підсилювачах", керівник **Кочан О.В.** (2023)

3.3.2 Осідак Р.М. "Монте-Карло моделювання споживання багаторівневих гетерогенних 5G радіомереж", керівник **Кочан В.В.** (2023)

3.3.3 Бецил В.А. "Програмно-апаратний комплекс для дослідження фільтрів на базі операційних підсилювачів", керівник **Кочан О.В.** (2024)

3.3.4 Демчишин В.В. "Модель обчислень IoT-Edge на основі потоку даних і розподіленої глибокої нейронної мережі з низькою затримкою для середовища великих даних" , керівник **Кочан В.В.** (2024)

3.3.5 Пилип'як Н. Б. " Метод підвищення надійності вузлів мережі Інтернету речей на основі ансамблевого глибокого навчання", керівник **Кочан В.В.** (2024)

3.3.6 Косенко А.О. "Безпровідна сенсорна мережа на базі технології Lora", керівник **Кочан Р.В.** (2024).

4 Охоронні документи на об’єкти права інтелектуальної власності (ОПІВ)
4.1 Отримано патентів України на винахід

4.1.1 **Кочан О.В.,** Левків М.О., **Кочан Р.В., Кочан В.В.** Спосіб регулювання потужності електричних нагрівачів і пристрій для його реалізації : пат. на винахід № 127561 Україна, заявка № a201907678; заявл. 08.07.2019; опубл. 11.10.2023, Бюл. № 41.

4.1.2 **Кочан О.В.,** Кочан Н.Р., **Кочан Р.В.** Спосіб точного визначення коефіцієнта поділу резисторного подільника напруги : пат. на винахід № 127840 Україна, заявка № a202104329; заявл. 26.07.2021; опубл. 17.01.2024, Бюл. № 3.

4.1.3 **Кочан О. В.,** Кочан Н. Р., **Кочан Р. В.** Спосіб дослідження диференціальної нелінійності аналого-цифрового перетворювача послідовного наближення : пат. на винахід № 128097 Україна, заявка № a202104333; заявл. 26.07.2021; опубл. 03.04.2024, Бюл. № 14.

4.3 Отримано патентів України на корисну модель

4.3.1 **Кочан О.В., Кочан Р.В., Биковий П.Є., Саченко А.О., Кочан В.В.** Корисна модель «Реле на герконах». Патент України № 155346, заявка № u202304747 від 09.10.2023. Дата державної реєстрації прав – 15.02.2024. Опубліковано 14.02.2024, бюл. № 7/2024.

4.3.2 **Кочан О.В., Биковий П.Є.,** Кочан Н.Р., **Кочан Р.В., Саченко А.О., Кочан В.В.,** Левків М.О. Корисна модель «Реле на герконах». Патент України № 158343, заявка № u202403089 від 12.06.2024. Дата державної реєстрації прав – 23.01.2025. Опубліковано 22.01.2025, бюл. № 4/2025.

4.3.3 **Кочан О.В., Заставний О.М.,** Кочан Н.Р., **Кочан Р.В., Саченко А.О., Кочан В.В.** Корисна модель «Спосіб корекції похибок вимірювального каналу». Патент України № 158222, заявка № u202403096 від 12.06.2024. Дата державної реєстрації прав – 09.01.2025. Опубліковано 08.01.2025, бюл. № 2/2025..

4.5 Інші ОПІВ, які не описані у пп. 4.1-4.4.
Свідоцтва на авторський твір:

4.5.1 Каштальян А.С., Авсієвич В.Р., Нічепорук А.О., **Савенко О.С.** Комп’ютерна програма «Проміжне програмне забезпечення мультикомп'ютерних систем спеціалізованого призначення» («AMJS»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 124518 від 11.03.2024 р.

4.5.2 Регіда П.Г., **Савенко О.С.,** Нічепорук А.О., Дрозд А.І. Комп’ютерна програма «Програмне забезпечення організації розподіленої системи виконання програмного коду в ізольованих середовищах» («РСВКІС»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 134190 від 10.03.2025 р. Опубліковано 30.04.2025, бюл. № 88.

4.5.3 Свистун С.О., **Савенко О.С.,** Мельниченко О.В., Радюк П.М. Комп’ютерна програма «Кіберфізична система з БПЛА для виявлення дефектів вітрових енергетичних установок». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 134889 від 02.04.2025 р. Опубліковано 30.05.2025, бюл. № 89.

4.6 Подано заявок на отримання охоронного документу на ОПІВ України та /або інших країн, од.
Заявки на патенти на винахід:

4.6.1 **Кочан О.В., Кочан Р.В., Биковий П.Є., Саченко А.О., Кочан В.В.** Заявка на винахід «Реле на герконах». Заявка № a202304748 від 09.10.2023. Опубліковано 09.04.2025, бюл. № 15/2025.

4.6.2 **Кочан О.В., Заставний О.М., Кочан Р.В., Кочан Н.Р., Саченко А.О., Кочан В.В.** Заявка на винахід «Спосіб визначення точного коефіцієнта підсилення підсилювача та пристрій для його реалізації». Заявка № a202402578 від 14.05.2024. Опубліковано 29.01.2025, бюл. № 5/2025.

4.6.3 **Кочан О.В., Биковий П.Є., Кочан Р.В., Саченко А.О., Кочан В.В., Заставний О.М.,** Кочан Н.Р. Заявка на винахід «Масштабний перетворювач». Заявка № a202402215, подано 26.04.2024. (04.02.2025 Повідомлення про проведення кваліфікаційної експертизи заявки на винахід).

4.6.4 **Кочан О.В., Заставний О.М., Кочан Р.В.,** Кочан Н.Р., **Саченко А.О., Кочан В.В.** Заявка на винахід «Спосіб корекції похибок вимірювального каналу і спеціалізований пристрій для його реалізації». Заявка № a202403097 від 12.06.2024. Опубліковано 29.01.2025, бюл. № 5/2025.

Заявки на патенти на корисну модель:

4.6.5 **Бодянський Є.В.,** Дубчак Л.О., **Саченко А.О., Кочан В.В.,** Васильків Н. М., Романець І.Є. Заявка на корисну модель «Адаптивна нечітка нейронна мережа для онлайн діагностування об’єктів контролю». Заявка № u202405118. Дата реєстрації 29.10.2024. (13.06.2025 Попередній висновок (запит) формальної експертизи)

4.6.6 **Кочан О.В., Заставний О.М., Кочан Р.В.,** Кочан Н.Р., **Саченко А.О., Кочан В.В.** Заявка на корисну модель «Спосіб визначення точного коефіцієнта підсилення підсилювача». Заявка № u202405703 від 03.12.2024. (25.06.2025 Попередній висновок (запит) формальної експертизи)

4.6.7 **Кочан О.В.,** Бубела Т.З., **Кочан Р.В, Биковий П.Є.,** Куць В.Р., **Кочан В.В., Саченко А.О.,** Бешлей М. І., Кочан Н.Р., Бешлей Г.В., Рудик Ю.І. Заявка на корисну модель «Масштабний перетворювач». Заявка № u202405704. Дата реєстрації 03.12.2024. (25.07.2025 Висновок (позитивний) формальної експертизи)

4.6.8 Дубчак Л.О., **Кочан В.В., Саченко А.О.,** Загородня Д.І., Васильків Н.М. Заявка на корисну модель «Спосіб корекції похибок вимірювального каналу». Заявка № u202404425. Дата реєстрації 12.09.2024. (04.04.2025 Попередній висновок (запит) формальної експертизи).

4.6.9 Дубчак Л.О., **Кочан В.В., Саченко А.О.,** Загородня Д.І., Васильків Н.М. Заявка на винахід «Спосіб зменшення часу опрацювання нечіткої інформації у комп'ютерній мережі». Заявка № a202404424. Дата реєстрації 12.09.2024. (04.04.2025 Попередній висновок (запит) формальної експертизи).

5 Впровадження та використання наукових або науково-технічних (прикладних) результатів
5.1.3 Грантових угод (держаного рівня):

– Договір №РН/57-2024 від 30.09.2024 про надання фінансування на виконання наукової, науково-технічної роботи з МОН України (Рамкова програма Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020») на тему «Інтелектуальна система розпізнавання дефектів об’єктів зеленої енергетики із використанням БПЛА». Державний реєстраційний номер 0124U004665. Науковий керівник: Саченко А.О. Терміни виконання 05.09.2024-31.08.2026. Обсяг фінансування 1 925 000 грн.

5.1.4 Грантових угод (міжнародного рівня):

– Міжнародний договір Еразмус+, напрям: КА2: Проекти співпраці у сфері вищої освіти. Тема «Цифровізація процесів сталого управління катастрофами та надзвичайними ситуаціями». Строк реалізації: 01.11.2023 – 30.04.2026. Реєстраційний номер проекту № 2023-1-BG01-KA220-HED-000159479. Кошторисна вартість 36 000 євро (1 730 000 грн). Кооринатор проекту від ЗУНУ: Саченко А.О. Менеджер проекту: Биковий П.Є.

До звіту додаються електронні копії наукових публікацій, охоронних документів, інша наукова продукція (окрім матеріалів, які містять інформацію з обмеженим доступом) **(Додаток Б).**

21. Рішення вченої (наукової, науково-технічної, технічної) ради або іншого керівного (дорадчого) органу (за відсутності зазначеної ради) організації-виконавця проєкту щодо результатів розгляду проміжного звіту:

Відповідно до засідання науково-технічної ради з головних напрямків наукових досліджень Західноукраїнського національного університету, протокол засідання № 7 від 23.12.2024 року, було ухвалено наступні рішення:

- Враховуючи результати голосування (кількість осіб, які брали участь у голосуванні -21; кількість голосів «За» -21; кількість голосів «Проти» - немає), затвердити звіт про виконання у 2024 році Західноукраїнським національним університетом науково-технічної (експериментальної) розробки "Інтелектуальні вимірювально-керуючі модулі для забезпечення високої інформативності, живучості та достовірності систем моніторингу критичної інфраструктури"

Копія витягу з протоколу засідання в електронному (друкованому) вигляді **(Додаток В).**

22. Анотація основних результатів роботи українською та англійською мовами **(Додаток Г).**

Додаток А
до остаточного звіту

Перелік виконавців проєкту з оплатою праці

№	Прізвище, ім'я, науковий ступінь, вчене звання	Основне місце роботи або здобуття освіти	Зазначити вік та наявність статусу молодого вченого	Посада за проєктом (або договір ЦПХ) та роль у проєкті	Основні завдання у проєкті
1	Кочан Володимир Володимирович, канд. техн. наук, проф.	Західноукраїнський національний університет	73 роки	Старший науковий співробітник, керівник НДР	Розроблення методів досягнення мети проєкту, формування наукових засад визначення поточних похибок компонентів вимірювального каналу, структури ВКМ та його вузлів, координацію розроблення програмного забезпечення, підготовку пояснювальної записки, звітної документації, підготовка публікацій, патентів, представлення результатів проєкту на міжнародних наукових заходах, керівництво магістерськими дисертаціями.
2	Биковий Павло Євгенович, канд. техн. наук, доц.	Західноукраїнський національний університет	41 рік	Старший науковий співробітник, відповідальний виконавець	Розроблення наукових засад і методів завадостійкого та захищеного обміну даними між стаціонарними і мобільними засобами, схем вузлів ВКМ, методів дистанційного перепрограмування ВКМ, методів оптимізації енергоспоживання ВКМ залежно від рівня завад. Виготовлення експериментального зразка ВКМ, його тестування, підготовку результатів досліджень, моделювання режимів роботи ВКМ, підготовка публікацій, патентів, представлення результатів.
3	Кочан Орест Володимирович, д-р техн. наук, проф.	Національний університет "Львівська політехніка"	40 років, молодий вчений	Провідний науковий співробітник, виконавець	Розроблення наукових засад і методів завадостійкої та захищеної реконфігурації структури ВКМ, схем вузлів ВКМ, а також методів корекції і компенсації похибок компонентів вимірювального каналу. Розроблення методів забезпечення єдності вимірювань,

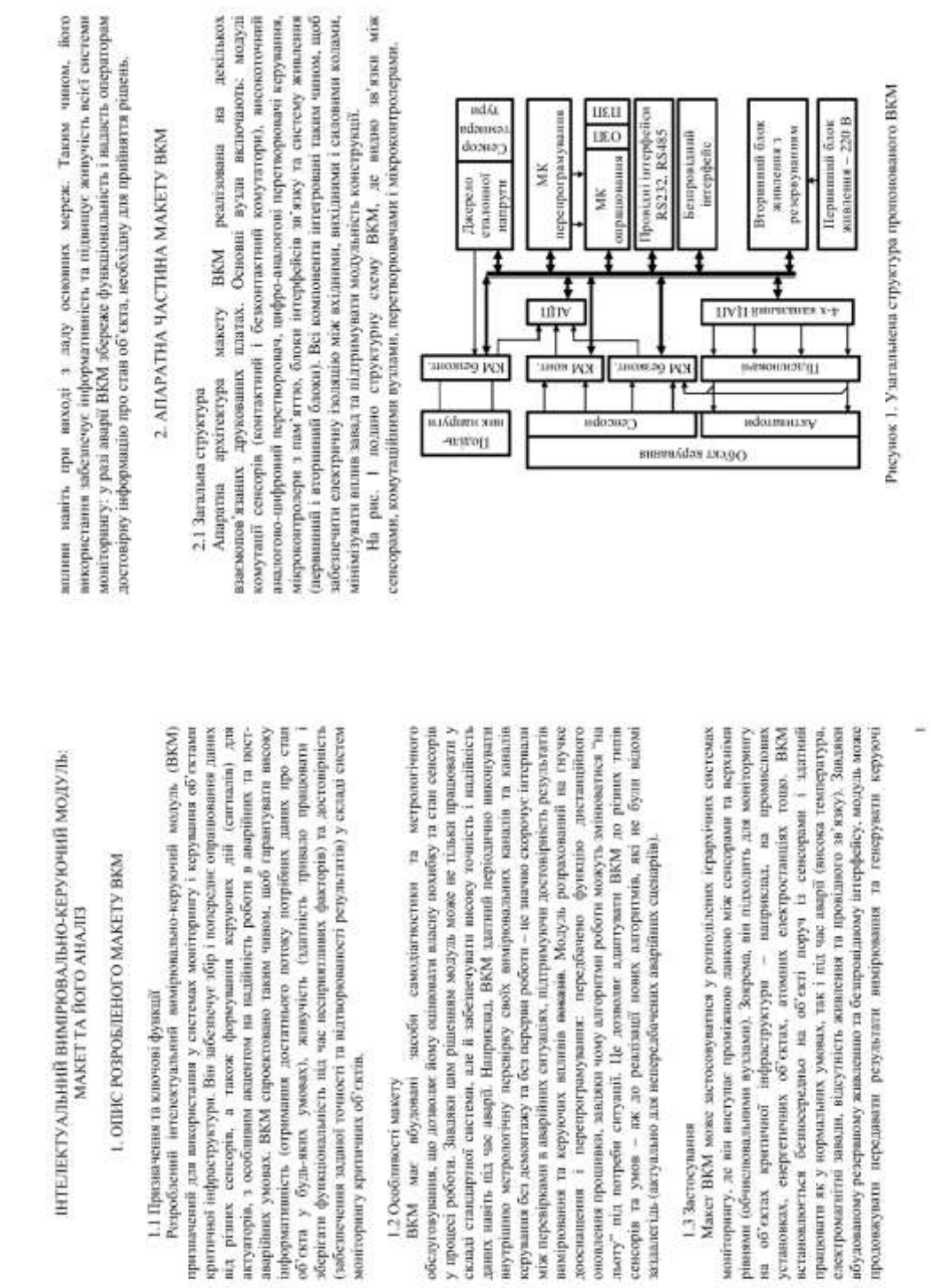
№	Прізвище, ім'я, науковий ступінь, вчене звання	Основне місце роботи або здобуття освіти	Зазначити вік та наявність статусу молодого вченого	Посада за проєктом (або договір ЦПХ) та роль у проєкті	Основні завдання у проєкті
					комплектуванні схем вузлів ВКМ, підготовці публікацій, патентів, презентація результатів.
4	Кочан Роман Володимирович, д-р техн. наук, проф.	Національний університет "Львівська політехніка"	48 років	Провідний науковий співробітник, виконавець	Розроблення наукових засад і методів метрологічного обслуговування інтелектуальних функцій ВКМ, структури та програмного забезпечення, схем вузлів ВКМ, а також засобів метрологічного обслуговування штучного інтелекту у ВКМ. Участь у підготовці публікацій.
5	Бодянський Євген Володимирович, д-р техн. наук, проф.	Харківський національний університет радіоелектроніки	75 років	Провідний науковий співробітник, виконавець	Розроблення наукових засад і методів самоадаптації та самонавчання ВКМ, структури програмного забезпечення ВКМ, застосування методів штучного інтелекту у вимірювально-керуючих модулях, участь у підготовці публікацій.
6	Савенко Олег Станіславович, д-р техн. наук, проф.	Хмельницький національний університет	53 роки	Провідний науковий співробітник, виконавець	Розроблення наукових засад і методів самоадаптації та самонавчання ВКМ, схем вузлів ВКМ. Участь у розробленні програмного забезпечення вбудованого метрологічного обслуговування, підготовці публікацій та презентації результатів.
7	Саченко Анатолій Олексійович, д-р техн. наук, проф.	Західноукраїнський національний університет	79 років	Провідний науковий співробітник, виконавець	Розроблення методів досягнення мети проєкту, наукових засад і методів програмного забезпечення ВКМ, підготовку пояснювальної записки, розроблення методів і засобів автоматизованої самооцінки залишкової похибки ВКМ. Участь у підготовці публікацій і представлення результатів.
8	Заставний Олег Михайлович, канд. техн. наук, ст. викл.	Західноукраїнський національний університет	44 роки	Старший науковий співробітник, виконавець	Розроблення алгоритмів модулів базового програмного забезпечення ВКМ, розроблення і моделювання вузлів ВКМ, виготовлення експериментального дослідного зразка ВКМ,

№	Прізвище, ім’я, науковий ступінь, вчене звання	Основне місце роботи або здобуття освіти	Зазначити вік та наявність статусу молодого вченого	Посада за проєктом (або договір ЦПХ) та роль у проєкті	Основні завдання у проєкті
					тестуванням вузлів і ВКМ у цілому, дослідження методів автоматизованої самооцінки залишкової похибки ВКМ, підготовкою публікацій, тез конференцій, авторських свідоцтв, участь у представленні результатів проєкту на конференціях та форумах.

Додаток Б
до остаточного звіту

Копії наукових публікацій, охоронних документів, іншої наукової продукції

6.1 Експериментальний зразок вимірювально-керуючого модуля (ВКМ) для критичної інфраструктури



ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНО-КЕРУЮЧИЙ МОДУЛЬ: МАКЕТ ТА ЙОГО АНАЛІЗ

1. ОПИС РОЗРОБЛЕНОГО МАКЕТУ ВКМ

1.1 Призначення та ключові функції

Розроблений інтелектуальний вимірювально-керуючий модуль (ВКМ) призначений для використання у системах моніторингу і керування об'єктами критичної інфраструктури. Він забезпечує збір і попереднє опрацювання даних від різних сенсорів, а також формування керуючих дій (сигналів) для актуаторів, з особливим акцентом на надійність роботи в аварійних та поставарійних умовах. ВКМ спроектовано таким чином, щоб гарантувати високу інформативність (отримання достатнього потоку потрібних даних про стан об'єкта у будь-яких умовах), живучість (здатність тривало працювати і зберігати функціональність під час несприятливих факторів) та достовірність (забезпечення задової точності та відтворюваності результатів) у складі систем моніторингу критичних об'єктів.

1.2 Особливості макету

ВКМ має вбудовані засоби самодіагностики та метрологічного обслуговування, що дозволяє йому оцінювати власну похибку та стан сенсорів у процесі роботи. Завдяки цим рішенням модуль може не тільки працювати у складі стаціонарної системи, але й забезпечувати високу точність і надійність даних навіть під час аварій. Наприклад, ВКМ здатний періодично виконувати внутрішню метрологічну перевірку своїх вимірювальних каналів та канали керування без демонтажу та без перерви роботи – це значно скорочує інтервали між перевірками в аварійних ситуаціях, підтримуючи достовірність результатів вимірювання та керуючих впливів. Модуль розрахований на гнучке доосащення і перепрограмування: передбачено функцію дистанційного оновлення прошивки, завдяки чому алгоритми роботи можуть змінюватися "на льоту" під потреби ситуації. Це дозволяє адаптувати ВКМ до різних типів сенсорів та умов – як до реалізації нових алгоритмів, які не були відомі заздалегідь (актуально для непередбачених аварійних сценаріїв).

1.3 Застосування

Макет ВКМ може застосовуватися у розподілених ієрархічних системах моніторингу, де він виступає проміжною ланкою між сенсорами та верхніми рівнями (обчислювальними вузлами). Зокрема, він підходить для моніторингу на об'єктах критичної інфраструктури – наприклад, на промислових установках, енергетичних об'єктах, атомних електростанціях тощо. ВКМ встановлюється безпосередньо на об'єкті поруч із сенсорами і здатний працювати як у нормальних умовах, так і під час аварій (висока температура, електромагнітні завади, відсутність живлення та проводового зв'язку). Завдяки вбудованому резервованому живленню та безпроводовому інтерфейсу, модуль може продовжувати передавати результати вимірювання та генерувати керуючі впливи навіть при виході з ладу основних мереж. Таким чином, його використання забезпечує інформативність та підвищує живучість всієї системи моніторингу: у разі аварії ВКМ зберже функціональність і надасть операторам достовірну інформацію про стан об'єкта, необхідну для прийняття рішень.

2. АПАРАТНА ЧАСТИНА МАКЕТУ ВКМ

2.1 Загальна структура

Апаратна архітектура макету ВКМ реалізована на декількох взаємопов'язаних друкованих платах. Основні вузли включають: модулі комутації сенсорів (контактний і безконтактний комутатори), високоточний аналогово-цифровий перетворювач, цифро-аналогові перетворювачі керування, мікроконтролери з пам'яттю, блоки інтерфейсів зв'язку та систему живлення (первинний і вторинний блоки). Всі компоненти інтегровані таким чином, щоб забезпечити електричну ізоляцію між вхідними, вихідними і силовими колами, мінімізувати вплив завад та підтримувати модульність конструкції.

На рис. 1 подано структурну схему ВКМ, де видно зв'язки між сенсорами, комутаційними вузлами, перетворювачами і мікроконтролерами.

Рисунок 1. Узагальнена структура проектованого ВКМ

Для підключення широкого спектру сенсорів фізичних величин макет оснащено двома типами мультиплексорів (комутаторів) сигналів: контактним та безконтактним.

Контактний комутатор (рисунок 2) виконаний на базі прецизійних герконових реле, що допускають значні завади і високі міжканальні напруги (до 200–500 В). Геркони забезпечують дуже малу паразитну термо-ЕРС (менше 1 мкВ завдяки спеціальним термокомпенсаторам).

Рисунок 2. Фото плати контактного комутатора сигналів сенсорів

Безконтактний комутатор (рисунок 3) побудований на аналогових напівпровідникових ключах (в макеті застосовані інтегральні комутатори ADG508A) і має простішу конструкцію. Він дешевший, але розрахований на нижчі напруги завад (до ~20–50 В) і генерує більші паразитні термо-ЕРС у порівнянні з герконами. Обидва типи комутаторів конструктивно уніфіковані та встановлені як змінні плати, що підключаються до базової плати ВКМ через роз'єм. Це підвищує гнучкість: за потреби можна замінити весь вузол комутації на інший тип (контактний або безконтактний) без зміни решти системи.

Рисунок 3. Фото безконтактного комутатора БКМ

Безконтактні комутатори забезпечують багатоканальний ввід – до 32 сенсорних входів (два незалежні 16-канальні мультиплексори) з можливістю дво- або чотирипровідного підключення датчиків різних типів.

2.2 Аналогово-цифровий перетворювач

Сигнал з виходу комутатора надходить на багаторозрядний Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), що є основою вимірювального каналу. У макеті використано 24-розрядний сигма-дельта АЦП Analog Devices AD7714. Цей АЦП має високі роздільну здатність і коефіцієнт придушення завад, що важливо для прецизійних вимірювань у складних умовах. Хоча сигма-дельта АЦП порівняно повільний, його швидкодії достатньо, оскільки більшість сенсорів (температурні, тиску тощо) є інерційними і не потребують високої частоти дискретизації. АЦП підключений до мікроконтролера по SPI-інтерфейсу; передбачено режими встановлення нуля і калібрування для усунення зсувів і масштабної похибки. Вбудована метрологічна самоперевірка АЦП дозволяє оцінювати його нелінійність та випадкову похибку – модуль може періодично вимірювати еталонні сигнали (через внутрішній подільник напруги) і компенсувати похибки перетворення. Такий підхід підтримує високу точність і достовірність вимірювань у реальному часі.

2.3 Цифро-аналогові перетворювачі

ВКМ має чотири канали аналогових виходів для формування керуючих впливів (наприклад, для керування актуаторами). Кожен канал побудований на 12-розрядному цифро-аналоговому перетворювачі (ЦАП) і гальванічно ізольований від інших та від решти системи. Це попереджає вплив перешкод і різниці потенціалів між каналами. Канали ЦАП уніфіковані – мають однакові схеми та навіть прошивки, що робить їх взаємозамінними. Щоб зменшити енергоспоживання, застосовано метод живлення ЦАП через "комутований конденсатор" (Charge Pump). Недоліком цього рішення є обмеження напруги ізоляції (~30 В), тому для більш високих напруг за потреби можна використати альтернативні ЦАП з трансформаторним живленням та оптоізоляцією. Вихідні аналогові сигнали ЦАП охоплюють діапазон 0–5 В при точності порядку 0,2–0,3%. Щоб підвищити їх точність і метрологічну надійність, макет реалізує періодичну перевірку і корекцію ЦАП: спеціальний алгоритм порівнює вихід ЦАП з опорним джерелом напруги через АЦП і обчислює поправку. Це дозволяє зменшити похибку ЦАП до рівня молодшого розряду навіть після тривалої експлуатації та у аварійних умовах.

2.4 Мікроконтролери та пам'ять

Центральним елементом є основний мікроконтролер опрацювання (STM32), який керує усіма функціями ВКМ – опитує АЦП, обробляє виміряні дані, виконує алгоритми самодіагностики та формує сигнали керування на ЦАП. Цей МК розміщений на базовій платі (рисунок 4) і має достатньо пам'яті програм (Flash) і оперативної пам'яті (RAM) для реалізації складних алгоритмів, включно з методами штучного інтелекту.

Також на базовій платі встановлено другий мікроконтролер перепрограмування. Його завдання – приймати через інтерфейси новий код програми і перепрошивати основний МК опрацювання у разі отримання відповідної команди. Таким чином, можливе віддалене оновлення прошивки: наприклад, при зміні типу підключених сенсорів або впровадженні покращених алгоритмів користувач може залити в ВКМ нову програму без фізичного доступу до пристрою. Це різко підвищує гнучкість застосування модуля – фактично апаратно він універсальний, а специфічна логіка визначається програмно і може замінюватися у польових умовах. Обидва МК сполучені між собою та з іншими вузлами через системну шину; передбачено резервне живлення для їх годинників реального часу (літієва батарея).

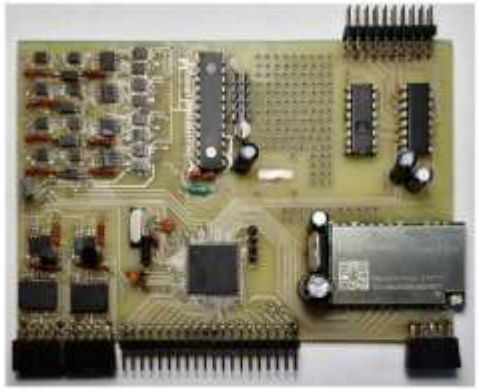


Рисунок 4. Фото базової плати ВКМ

2.5 Інтерфейси зв'язку

Макет оснащено як дротовими, так і бездротовими інтерфейсами для обміну даними з верхнім рівнем системи або операторським ПК (рисунок 5). З дротових реалізовані стандартні послідовні інтерфейси RS-232 та RS-485. Вони забезпечують сумісність з більшістю промислових пристроїв збору даних та мереж. RS-232 використовується для локального підключення на короткі відстані (налагодження, конфігурація), а RS-485 – для довгих ліній та мережевої топології (має диференційний сигнал і стійкість до завад). Також у ВКМ включено бездротовий модуль (тип може варіюватися – наприклад, Wi-Fi або суб-ГГц радіомодем). У нормальних умовах бездротовий зв'язок зазвичай вимкнений (через вимоги кібербезпеки на критичній інфраструктурі бездротові канали обмежуються). Однак у аварійній ситуації, коли провідний зв'язок може бути пошкоджений, ВКМ може автоматично перейти на бездротовий канал,

щоб передавати дані оператору і приймати його команди. Це підвищує шанси отримати інформацію про стан об'єкта відразу після аварії, коли вона найнеобхідніша. Протоколи обміну можуть бути гнучко реалізовані програмно – від простих ASCII-команд до Modbus RTU/TCP тощо, залежно від застосування ВКМ та віддаленого оновлення прошивки.

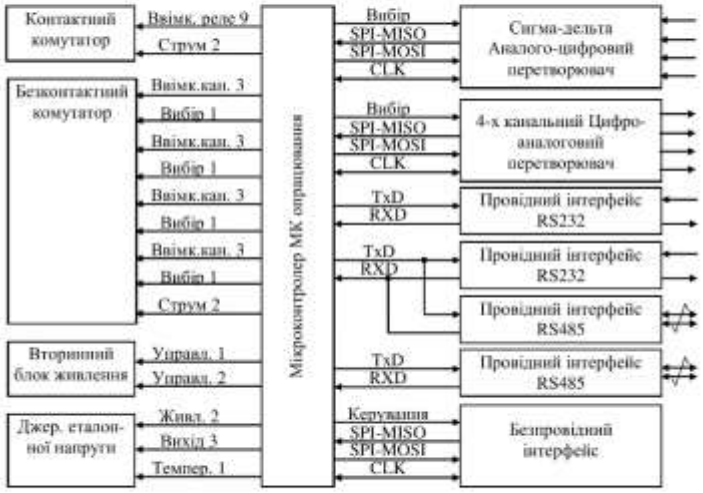


Рисунок 5. Структурна схема базової плати і розміщення на ній вузлів ВКМ

2.6 Система живлення

Для автономності ВКМ має дворівневу систему живлення. Первинний блок живлення – це модуль, що під'єднується до мережі ~220 В і видає стабілізовану напругу постійного струму (15 В). З метою електромагнітної сумісності цей блок винесено окремо і гальванічно ізольовано: мережна частина не пов'язана напряму з електронікою ВКМ, заряд батарей здійснюється через реле (так зменшено наведе. Він же відповідає за ні завади).

Вторинний блок живлення (рисунок 6) розташований у блоці ВКМ і розподіляє отримані 15 В на потрібні напруги для вузлів (5 В, 3.3 В тощо) через резервне живлення від акумуляторів: у макеті встановлено два літієві батареї акумуляторів, здатні підтримувати роботу ВКМ протягом десятків годин. Ці батареї заряджаються від первинного блока живлення почергово, тобто одна з них постійно є зарядженою. У разі зникнення живлення від мережі модуль автоматично перемикається на батареї акумуляторів, що критично для аварійних умов (на АЕС вимагається до 72 год автономної роботи). Заряд

акумуляторів контролюється вбудованим АЦП допоміжного мікроконтролера живлення, який також може відключати неважливі вузли для економії енергії. Наприклад, за нормальної роботи живляться всі компоненти, а у аварійному режимі можуть бути знеструмлені вторинні підсистеми, що не потрібні для мінімально потрібного функціонування. Режим може бути індивідуальним для даного виду аварії за рахунок віддаленого оновлення прошивки.

Рисунок 6. Фото вторинного блока живлення ВКМ

Конструктивно первинний блок розміщено в окремому екранованому корпусі (для безпеки і зниження впливу завад на електроніку. Вторинний блок живлення розміщений у корпусі ВКМ. Така організація гарантує стабільне та безперебійне живлення ВКМ у будь-яких ситуаціях і низький рівень завад.

2.7 Зібраний макет

Макет інтелектуального ВКМ, який забезпечує високу інформативність, живучість і достовірність систем моніторингу об'єктів критичної інфраструктури представлений на рисунку 7.

За рахунок використаних технічних рішень розроблений ВКМ не лише може працювати у складі систем моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, а і забезпечити високу інформативність, живучість і достовірність як у нормальних та робочих умовах, так і у аварійних та пост-аварійних умовах. Висока інформативність досягнута за рахунок можливості віддаленого оновлення прошивки у процесі роботи, що забезпечує, разом із використаними оригінальними технічними рішеннями, високу гнучкість та адаптивність ВКМ. Висока живучість досягнута за рахунок можливості використання як провідних, так і безпровідного інтерфейсів, а також використання акумуляторного резервного живлення, що забезпечує тривалу роботу без відновлення живлення в умовах відсутності централізованого

енергопостачання. Висока достовірність досягнута за рахунок вбудованої системи метрологічного забезпечення, яка працює автономно, без необхідності доступу до ВКМ.

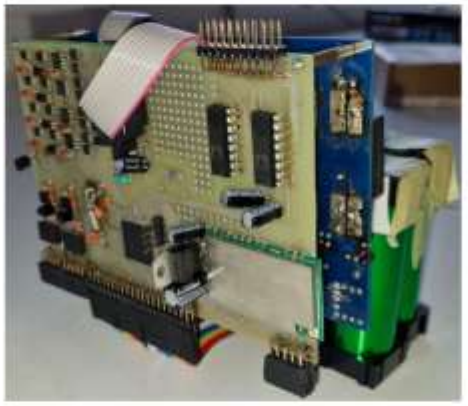


Рисунок 7. Фото розробленого макету ВКМ

3. ПРОГРАМНА ЧАСТИНА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ

3.1Логіка роботи прошивки

Програмне забезпечення ВКМ організоване як цикл опитування та опрацювання множини вимірювальних та керуючих каналів з паралельним виконанням задач самоконтролю. Основний мікроконтролер виконує безперервний цикл: перемикає мультиплексори на черговий сенсор, збирає оцифровані дані з АЦП, застосовує калібрувальні поправки і фільтрацію, опрацьовує дані відповідно до заданого поточною прошивкою алгоритму, зберігає результати у буфер та, за запитом, передає потрібні значення через інтерфейси назовні. Одночасно, згідно налаштувань або команд, він може виконувати діагностичні процедури. Наприклад, раз на певний інтервал прошивка ініціює вимір опорної напруги і нульового входу для кожного каналу – на основі цього оцінюється дрейф нуля та чутливості АЦП і за потреби результати вимірювань коригуються програмно. Дещо рідше доцільно проводити передбачений контроль нелінійності вимірювального каналу та, при потребі, корекцію нелінійності. Також передбачено метрологічне обслуговування ЦАП та корекцію їх похибки. Також реалізовані алгоритми контролю сенсорів: ВКМ може послідовно перевіряти підключені датчики (наприклад, термопари) – шляхом внутрішньої перекалібровки або порівняння

показів дубльованих сенсорів – і у разі виявлення несправного або значно деградованого датчика повідомляти про це. Для кожного вимірювального каналу модуль обчислює ще й оцінку достовірності (невизначеності) результату, враховуючи поточні шумові та температурні умови.

3.2 Обмін даними і керування

Програмна частина підтримує гнучкі команди управління через інтерфейси. Користувач або центральний комп'ютер може по запиту отримати як поточні покази сенсорів, так і діагностичну інформацію – наприклад, рівень заряду батарей, оцінку похибки каналів, температуру вузлів тощо. Команди через RS-232/485 дозволяють перемикати режими роботи: нормальний режим (періодичний збір даних) або аварійний режим, в якому пріоритет віддається найважливішим датчикам і мінімізується енергоспоживання. У аварійному стані прошивка може відключити другорядні сенсори, знизити частоту опитування тощо, аби продовжити час автономної роботи. Дані передаються в стандартних протоколах – модуль може бути налаштований як віддалений вузол Modbus RTU або використовувати власний протокол з контрольними сумами. Для бездротового каналу можливе автоматичне дублювання критичних повідомлень, щоб збільшити ймовірність їх доставки в умовах завад або пошкодження дротової мережі при аварії.

3.3 Дистанційне перепрограмування.

Однією з унікальних функцій є підтримка віддаленої зміни прошивки основного МК. Спеціальний завантажувач у другому МК очікує команду на оновлення; отримавши її (по RS-485 або бездротово) приймає новий образ програми та перевіряє його цілісність і неушкодженість. Якщо прийнята програма коректна, то вона записується у пам'ять основного контролера. Якщо програма містить збої, то МК перепрограмування посилає запит на повторне завантаження програми.

Після перезавантаження ВКМ починає працювати за новим алгоритмом. Це відкриває широкі можливості: адаптивність та штучний інтелект можуть бути реалізовані шляхом завантаження відповідних нейромережевих моделей або правил нечіткої логіки для аналізу даних сенсорів. Наприклад, якщо в процесі експлуатації виявлено специфічну систематичну похибку якогось сенсора, користувач може віддалено завантажити модуль корекції цієї похибки – і ВКМ почне її враховувати у реальному часі. Більше того, за допомогою перепрограмування можна реалізувати кіберзахист на основі ШІ: зокрема, у звіті зазначено, що можливе впровадження алгоритмів виявлення вірусів та несанкціонованого втручання, побудованих на нейронних мережах і нечіткій логіці. Це актуально, оскільки модуль може працювати автономно та довгий час без зовнішнього нагляду – тому він сам може контролювати цілісність свого коду і реагувати на підозрілі аномалії.

3.4 Методи самокалібрування

У прошивці реалізовано ряд математичних методів для підтримки точності вимірювань. Серед них: автоматична компенсація нуля АЦП (регулярно вимірюється "нульовий" сигнал і віднімається з результатів) та калібрування масштабу за внутрішнім прецизійним джерелом напруги. У ВКМ передбачений контроль нелінійності вимірювального каналу та, при потребі, корекція нелінійності. Також передбачено метрологічне обслуговування ЦАП та корекцію їх похибки.

Також враховано особливості різних типів датчиків – наприклад, для термометрів опору модуль може застосовувати поправку на самонагрів від вимірювального струму. Якщо підключено термопари, програмно компенсується температура холодного спаю (модуль має сенсор температури холодних спаїв і обчислює корекцію). У випадку суттєвого дрейфу сенсора (наприклад, старіння термопари) ВКМ може зафіксувати невідповідність під час метрологічної перевірки і сигналізувати про необхідність заміни сенсора.

3.5 Застосування штучного інтелекту

Хоча безпосередньо у макеті традиційні алгоритми переважають, сам підхід є "інтелектуальним" у сенсі адаптивності. У перспективі, як зазначено у звіті, модуль може бути оснащений нейромережею, що навчається розпізнавати початок аварійного стану за комплексом сенсорних параметрів і завчасно попереджати про нього. Так само, нечітка логіка може використовуватися для плавного керування актуаторами за нечітко визначених умов довкілля. Вже зараз можливість віддаленої зміни прошивки основного МК дозволяє впровадити подібні функції без необхідності заміни апаратури. За рахунок таких можливостей ВКМ є по-справжньому інтелектуальним модулем нового покоління.

3.6 Висновок до програмної частини

Завдяки продуманому програмному забезпеченню, макет ВКМ поєднує точність вимірювань, гнучкість налаштувань та стійкість до відмов. Він не лише збирає дані, а й "розумно" їх опрацьовує – оцінює достовірність, компенсує похибки, діагностує себе. У аварійний момент така автономна інтелектуальна обробка особливо цінна, адже система прийняття рішень отримає від ВКМ уже перевірену та скориговану інформацію про стан об'єкта, тобто достовірну інформацію. В цілому, реалізований макет продемонстрував, що застосування сучасних мікроконтролерів, вбудованої метрології та елементів штучного інтелекту дозволяє створити вимірювально-керуючі модулі з безпрецедентним рівнем надійності та живучості для найвідповідальніших застосувань.

ВИСНОВКИ

Висока достовірність результатів вимірювання, отриманих від ВКМ, а також сформованих ВКМ керуючих дій, досягнута за рахунок можливості проведення вбудованою системою метрологічного обслуговування як вимірювальних, так і керуючих каналів. Це дає змогу коректно працювати як у нормальних і робочих умовах, так і у аварійних і пост-аварійних умовах. При цьому метрологічне обслуговування може бути проведене у довільний момент часу, без демонтажу ВКМ та зупинки його роботи. За результатами метрологічної перевірки може бути проведена корекція похибок як вимірювальних, так і керуючих каналів, виявлені несправні канали або канали, які значно деградували (поточна похибка яких значно зросла і перевищує допустиму). Вбудована система метрологічного обслуговування дає змогу значно, до хвилин, скоротити інтервал між метрологічними перевірками, що важно для роботи під час аварії, коли величини, які впливають на похибку елементів ВКМ і швидкість їх деградації, стали значно інтенсивнішими.

Незважаючи на вбудовану систему метрологічного обслуговування, ВКМ все таки не є абсолютно автономним – він мусить бути інтегрований у існуючу систему передачі значення національного еталону Вольта. Для цього джерело еталонної напруги можна легко зняти, провести його метрологічну перевірку і підключити заново. Якщо тривалість метрологічної перевірки джерела еталонної напруги менша за інтервал між метрологічними перевірками ВКМ (наприклад, при нормальних умовах експлуатації або близьких до них), то не треба вживати ніяких додаткових заходів. Якщо тривалість метрологічної перевірки джерела еталонної напруги більша за допустимий інтервал між метрологічними перевірками ВКМ (наприклад, при аварійних або пост-аварійних умовах експлуатації), то одне джерело еталонної напруги можна замінити іншим. Адже, за рахунок використання електронного паспорта (TEDS згідно до стандарту IEEE1451.2) ВКМ буде зчитувати дійсне значення вихідної напруги джерела еталонної напруги при проведенні кожної метрологічної перевірки.

Таким чином, розроблений ВКМ не лише забезпечує високу інформативність, живучість і достовірність як у нормальних та робочих умовах, так і у аварійних та пост-аварійних умовах, а і суттєво спрощує та зменшує трудомісткість свого метрологічного обслуговування.

Додаток В

до остаточного звіту

Копія витягу з протоколу засідання відповідної ради (органу) щодо результатів розгляду остаточного звіту

Витяг з протоколу № 7
засідання Науково-технічної ради
Західноукраїнського національного університету

від 23 грудня 2024 р.

Усього членів Науково-технічної ради – 25 осіб.

ПРИСУТНІ: голова Науково-технічної ради ЗУНУ проф. Микола ДИВАК, 20 членів Науково-технічної ради, запрошені працівники ЗУНУ.

Звіти наукових керівників (відповідальних виконавців) про завершені науково-дослідні роботи (етапи), які виконані за рахунок коштів загального фонду державного бюджету у 2024 році

СЛУХАЛИ: БИКОВОГО Павла Євгеновича, к.т.н., доц., відповідального виконавця науково-технічної (експериментальної) розробки "Інтелектуальні вимірювально-керуючі модулі для забезпечення високої інформативності, живучості та достовірності систем моніторингу критичної інфраструктури", який повідомив, що результатом дослідження стало виготовлення експериментального дослідного взірця ВКМ, результати його тестування з базовим програмним забезпеченням, розроблення програмного забезпечення вбудованого метрологічного обслуговування. Всі заплановані завдання виконані.

УХВАЛИЛИ: Враховуючи результати голосування (кількість осіб, які брали участь у голосуванні – 21; кількість голосів «За» – 21; кількість голосів «Проти» – немає), затвердити звіт про виконання у 2024 році Західноукраїнським національним університетом науково-технічної (експериментальної) розробки "Інтелектуальні вимірювально-керуючі модулі для забезпечення високої інформативності, живучості та достовірності систем моніторингу критичної інфраструктури" (звіт додається).

Голова Науково-технічної ради,
проректор з наукової роботи ЗУНУ,
професор Микола ДИВАК

Секретар Науково-технічної ради,
заступник начальника
науково-дослідної частини Юрій МОСКАЛЬ

Додаток Г
до остаточного звіту

Анотація основних результатів роботи українською та англійською мовами

У межах виконання проекту було розроблено інтелектуальний вимірювально-керуючий модуль (ВКМ) для використання у складі систем моніторингу і керування (СМК) об’єктами критичної інфраструктури (ОКІ) у штатних, аварійних і поставарійних умовах. У ході роботи розроблено методи реалізації мети проекту, сформовано структуру ВКМ, його апаратні схеми та вузли, а також алгоритми базового програмного забезпечення, що забезпечують інформативність, живучість і достовірність роботи модуля.

На першому етапі створено структурну архітектуру ВКМ, розроблено схеми функціональних вузлів, проведено моделювання їх роботи, визначено технічні вимоги та параметри. Особливу увагу приділено підвищенню точності вимірювань, реалізації вбудованої системи метрологічного самотестування (для АЦП, ЦАП та сенсорів) без зупинки модуля. Архітектура ВКМ забезпечує інтеграцію алгоритмів обробки сигналів і керування, у тому числі з використанням методів штучного інтелекту.

На другому етапі було виготовлено експериментальний дослідний зразок ВКМ, змонтовано вузли (системи живлення, комутації, перетворення сигналів, джерело еталонної напруги) та реалізовано базове програмне забезпечення. Проведено стендові випробування дослідного зразка ВКМ з базовим ПЗ, а також моделювання аварійних режимів роботи. Результати підтвердили високу точність (24-розрядний сигма-дельта АЦП), завадостійкість (до 180 дБ) та автономність (до 72 годин із використанням дронів-ретрансляторів). Окремо розроблено програмне забезпечення вбудованого метрологічного обслуговування, яке забезпечує періодичну перевірку каналів вимірювання та автоматичне виявлення недостовірних даних.

Отримані результати апробовано під час експериментальних досліджень, підготовлено патентні матеріали, здійснено публікації. Розроблений ВКМ рекомендовано до впровадження в системах енергетичної, техногенної, екологічної безпеки, а також в оборонній сфері.

During the implementation of the project, an intelligent measurement and control module (MCM) was developed for use in monitoring and control systems (MCS) for critical infrastructure facilities (CIFs) under normal, emergency, and post-emergency conditions. Within the scope of the work, methods for achieving the project objectives were developed, along with the MCM structural architecture, its hardware schematics and functional units, and basic software algorithms, ensuring the module’s informativeness, resilience, and data reliability.

At the first stage, the structural architecture of the MCM was developed; circuit diagrams of functional units were designed and simulated; technical requirements and performance parameters were defined. Special attention was paid to enhancing measurement accuracy and implementing an embedded metrological self-test system (for ADCs, DACs, and sensors) that operates without interrupting the module. The MCM architecture supports the integration of signal processing and control algorithms, including artificial intelligence (AI)-based methods.

At the second stage, an experimental prototype of the MCM was manufactured, including the assembly of hardware units (power supply, switching circuits, signal conversion, reference voltage source), and the implementation of basic software. Bench testing of the prototype with the basic software was performed, along with simulation of emergency operating scenarios. The results confirmed high measurement accuracy (24-bit sigma-delta ADC), noise immunity up to 180 dB, and autonomous operation for up to 72 hours using drone-based communication relays. In addition, dedicated software for embedded metrological support was developed, enabling periodic verification of measurement channels and automatic detection of unreliable data.

The obtained results were validated through experimental studies; patent applications were prepared and scientific publications issued. The developed MCM is recommended for

implementation in energy, industrial, environmental safety systems, as well as in defense applications.