

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Салітра Станіслав Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.311.243:621.317

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення метрологічного забезпечення вимірювання електричних
параметрів установок збереження енергії у складі сонячних електростанцій

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня С.А.Салітра

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Вацишак Ірина Романівна, к.т.н., доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

В. С. Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Салітра Станіслав Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Розроблення метрологічного забезпечення вимірювання електричних параметрів установок збереження енергії у складі сонячних електростанцій**

керівник роботи доцент Ващишак Ірина Романівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ІФНТУНГ від "05" травня 2026 року №204/7

2. Строк подання студентом роботи "08" червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Проаналізувати технічні особливості функціонування УЗЕ у складі СЕС та визначити вимоги до точності вимірювання їхніх електричних параметрів.

2. Дослідити відомі методи та засоби вимірювальної техніки для контролю напруги, струму та потужності в системах накопичення енергії.

3. Здійснити вибір та обґрунтувати метрологічні характеристики датчиків і перетворювачів для формування вимірювальних каналів системи моніторингу.

4. Виконати розрахунок інструментальних похибок та оцінити невизначеність вимірювань електричних параметрів для обраної конфігурації обладнання.

5. Розробити практичні рекомендації щодо регламенту метрологічного обслуговування вимірювальних систем УЗЕ.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А. В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В. Д.</i>		

7. Дата видачі завдання “5” квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	29.04.2026 р.	Виконано
2	Розроблення 1 розділу: «Аналіз сучасних технологій збереження енергії та вимог до вимірювання їх параметрів».	30.04.2026 – 08.05.2026 р.	Виконано
3	Розроблення 2 розділу: «Обґрунтування методів та засобів вимірювання параметрів УЗЕ».	09.05.2026 – 20.05.2026 р.	Виконано
4	Розроблення 3 розділу: «Оцінювання точності та метрологічна атестація системи вимірювання».	21.05.2026 – 29.05.2026 р.	Виконано
5	Оформлення роботи.	30.05.2026 – 06.06.2026 р.	Виконано

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

«Розроблення метрологічного забезпечення вимірювання електричних параметрів установок збереження енергії у складі сонячних електростанцій»

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена темі розроблення метрологічного забезпечення для вимірювання електричних параметрів установок збереження енергії, що працюють у складі сонячних електростанцій. Структурно робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 56 сторінок.

Перший розділ роботи містить огляд сучасного стану сонячної енергетики України та ролі УЗЕ у балансуванні генерації потужності. Особливу увагу приділено аналізу технічних вимог до моніторингу параметрів акумуляторних батарей та аналізу чинної нормативно-правової бази щодо метрологічного контролю. У другому розділі розглянуто вибір та обґрунтування методів і засобів вимірювальної техніки для контролю напруги, струму та потужності. Висвітлено технічні характеристики датчиків та питання інтеграції вимірювальних даних у системи керування акумуляторами (BMS) для забезпечення безпеки експлуатації. Третій розділ присвячено оцінюванню точності вимірювань, включаючи розрахунок інструментальних похибок та оцінку невизначеності вимірювань згідно з міжнародними настановами. Також надано рекомендації щодо метрологічного обслуговування та калібрування систем моніторингу.

Практична цінність роботи полягає у розробленні комплексного підходу до забезпечення достовірності роботи систем моніторингу накопичувачів енергії. Запропоновані рішення дозволяють підвищити точність визначення стану заряду (SoC) та стану «здоров'я» (SoH), оптимізувати цикли заряду/розряду та покращити загальну енергоефективність СЕС. Результати можуть бути застосовані в інженерній практиці при проєктуванні та експлуатації об'єктів збереження енергії у складі мікромереж.

Ключові слова: МЕТРОЛОГІЯ, УСТАНОВКА ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ, ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ, МОНІТОРИНГ.

ABSTRACT

Development of Metrological Support for Measuring Electrical Parameters of Energy Storage Systems as Part of Solar Power Plants”.

The bachelor's qualification work is devoted to the development of metrological support for measuring the electrical parameters of energy storage systems (ESS) operating within solar power plants (SPP). Structurally, the work consists of an introduction, three main chapters, conclusions, and a list of references. The total length of the work is approximately 46 pages. The first chapter provides an overview of the current state of solar energy in Ukraine and the role of ESS in balancing power generation. Particular attention is paid to the analysis of technical requirements for monitoring battery parameters and the analysis of the existing regulatory framework for metrological control. The second chapter examines the selection and justification of measurement methods and equipment for monitoring voltage, current, and power. It highlights the technical characteristics of sensors and the integration of measurement data into Battery Management Systems (BMS) to ensure operational safety. The third chapter is dedicated to the evaluation of measurement accuracy, including the calculation of instrumental errors and the estimation of measurement uncertainty according to international guidelines. It also provides recommendations for the metrological maintenance and calibration of monitoring systems.

The practical value of the work lies in the development of a comprehensive approach to ensuring the reliability of monitoring systems for energy storage units. The proposed solutions make it possible to increase the accuracy of determining the state of charge (SoC) and state of health (SoH), optimize charge/discharge cycles, and improve the overall energy efficiency of SPP. The results can be applied in engineering practice in the design and operation of energy storage facilities within microgrids.

Key words: METROLOGY, ENERGY STORAGE SYSTEM, SOLAR POWER PLANT, ELECTRICAL PARAMETERS, MEASUREMENT ACCURACY, UNCERTAINTY, MONITORING.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ.....	9
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. Аналіз сучасних технологій збереження енергії та вимог до вимірювання їх параметрів.....	12
1.1 Роль УЗЕ у складі сучасних СЕС України.....	12
1.2 Класифікація та технічні характеристики УЗЕ.....	13
1.3 Огляд національних та міжнародних стандартів щодо випробувань акумуляторних систем.....	17
1.4 Аналіз існуючих систем моніторингу електричних параметрів УЗЕ та їхні метрологічні недоліки.....	19
1.5 Постановка завдання дослідження.....	21
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УЗЕ.....	23
2.1. Вибір та обґрунтування вимірюваних параметрів.....	23
2.2. Вибір засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).....	25
2.3. Розроблення структурної схеми метрологічного забезпечення.....	29
2.4. Методика збору та опрацювання вимірювальної інформації.....	31
Висновок до розділу.....	34
РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ТА МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ.....	36
3.1. Розрахунок інструментальних похибок каналів вимірювання.....	36
3.2 Оцінювання невизначеності вимірювань електричних параметрів.....	39
3.3 Дослідження впливу зовнішніх факторів на точність засобів вимірювальної техніки.....	44
3.4 Розроблення рекомендацій щодо калібрування та перевірки системи. ...	47
Висновок до розділу.....	52
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ

АБ – Акумуляторна батарея

АСКОЕ – Автоматизована система комерційного обліку електроенергії

ВЕ – Відновлювана енергетика

ВДЕ – Відновлювані джерела енергії

ЗВТ – Засіб вимірювальної техніки

ККД – Коефіцієнт корисної дії

МЗ – Метрологічне забезпечення

СЕС – Сонячна електростанція

УЗЕ – Установка збереження енергії

BMS – Battery Management System (Система керування акумуляторами)

DC – Direct Current (Постійний струм)

EMS – Energy Management System (Система менеджменту енергії)

GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Настанова з вираження невизначеності у вимірюванні)

IEC – International Electrotechnical Commission (Міжнародна електротехнічна комісія)

MPPT – Maximum Power Point Tracking (Відстеження точки максимальної потужності)

PV – Photovoltaic (Фотоелектричний)

SoC – State of Charge (Стан заряду акумулятора)

SoH – State of Health (Стан «здоров'я» / зносу акумулятора)

ВСТУП

Актуальність роботи Сонячна енергетика є одним із найбільш динамічних секторів відновлюваної енергетики в Україні, що відіграє ключову роль у децентралізації енергосистеми та підвищенні її стійкості. Однак специфіка генерації СЕС, пов'язана з нестабільністю сонячного випромінювання, створює значні виклики для балансування потужності. УЗЕ стають невід'ємною частиною сучасних СЕС, дозволяючи накопичувати надлишки енергії та видавати її в періоди низької генерації або пікового споживання.

Ефективність, довговічність та безпека експлуатації УЗЕ безпосередньо залежать від точності моніторингу їхніх основних електричних параметрів: напруги, струму, SoC. Відсутність належного метрологічного забезпечення — обґрунтованого вибору ЗВТ, оцінки їхніх похибок та впливу зовнішніх факторів — може призвести до некоректної роботи BMS та передчасного виходу обладнання з ладу. Тому модернізація підходів до метрологічного контролю та оцінювання точності вимірювань параметрів УЗЕ є актуальним завданням, що має важливе значення для сталого функціонування об'єктів відновлюваної енергетики.

Метою роботи є розроблення та метрологічне обґрунтування комплексу засобів і методик для вимірювання електричних параметрів УЗЕ у складі СЕС для забезпечення високої достовірності моніторингу їхнього стану та енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати технічні особливості функціонування УЗЕ у складі СЕС та визначити вимоги до точності вимірювання їхніх електричних параметрів;
- дослідити відомі методи та засоби вимірювальної техніки для контролю напруги, струму та потужності в системах накопичення енергії;
- здійснити вибір та обґрунтувати метрологічні характеристики датчиків і перетворювачів для формування вимірювальних каналів системи моніторингу;

– виконати розрахунок інструментальних похибок та оцінити невизначеність вимірювань електричних параметрів для обраної конфігурації обладнання;

– розробити практичні рекомендації щодо метрологічного обслуговування (калібрування та повірки) вимірювальних систем УЗЕ.

Об’єктом дослідження є процеси вимірювання та контролю електричних параметрів (напруги, струму, потужності) установок збереження енергії, що функціонують у складі сонячних електростанцій.

Предметом дослідження є метрологічне забезпечення (методики вимірювань, вибір ЗВТ та оцінювання показників точності) моніторингу параметрів УЗЕ.

Методи дослідження У процесі виконання роботи застосовувалися як теоретичні, так і практичні методи дослідження, що включали математичне моделювання вимірювальних каналів, розрахункові методи оцінювання похибок та невизначеності вимірювань за міжнародними настановами GUM, а також порівняльний аналіз характеристик сучасних сенсорів струму та напруги.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні структурованого підходу до вибору та впровадження засобів метрологічного контролю для УЗЕ. Отримані результати дозволяють підвищити достовірність даних про стан акумуляторних систем, оптимізувати режими їхнього заряду/розряду та забезпечити точність обліку енергії у складі мікромереж (microgrids). Запропоновані методики оцінювання точності можуть бути використані енергетичними компаніями при проєктуванні та експлуатації систем моніторингу об’єктів відновлюваної енергетики.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ ТА ВИМОГ ДО ВИМІРЮВАННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ

1.1 Роль УЗЕ у складі сучасних СЕС України

Сучасний етап розвитку енергетики в Україні характеризується швидким зростанням кількості, серед яких найбільш помітними є СЕС. Однак специфіка фотогальванічної генерації (тобто це дуже випадкова і залежна від погоди галузь) створює найбільші технічні виклики для ОЕС. У цьому контексті УЗЕ стають важливим інструментом для мережі, щоб забезпечити гнучкість і стійкість. Основна проблема інтеграції великої кількості СЕС у національну мережу полягає в тому, що графік генерації електроенергії не синхронізований з графіком споживання в Україні. Найвища генерація СЕС відбувається в денний час, тоді як пік споживання енергії припадає на ранок і вечір [4]. Це явище, яке називається "кровою качки", призводить до великих надлишків потужності вдень і дефіциту в вечірні пікові години. Без систем зберігання оператор системи змушений зупиняти генерацію СЕС, що може знижувати економічну ефективність проєктів відновлюваної енергетики. Використання систем зберігання енергії (особливо систем зберігання енергії на основі батарей (BESS)) дозволяє вирішити багато фундаментальних завдань, необхідних для стабільності енергосистеми:

- зрізання піків: зберігання енергії при максимальному сонячному випромінюванні та передача її в мережу під час пікових періодів нічного споживання. Це знижує навантаження на основні мережі та зменшує потребу у використанні теплової генерації, яка повинна працювати гнучко.

- контроль частоти та напруги: УЗЕ здатні миттєво реагувати на зміни параметрів мережі (рис.1.1). Швидкість сучасних інверторних систем дозволяє використовувати батарейні установки для первинного та вторинного регулювання частоти, що є важливою передумовою для стабільної роботи ОЕС України в синхронному режимі з європейською енергосистемою ENTSO-E.

- забезпечення якості електроенергії: інтеграція УЗЕ зменшує короткочасні

провали напруги та гармонічні спотворення, створені інверторами потужності СЕС [1].

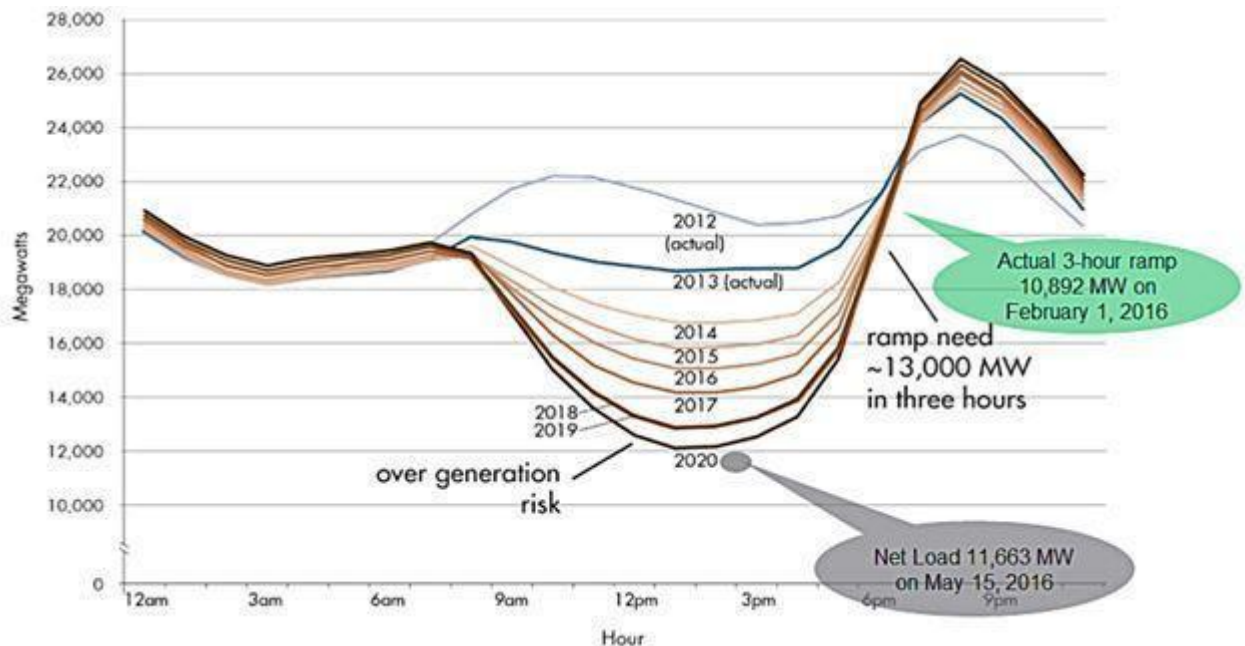


Рисунок 1.1 – Добовий графік генерації СЕС та споживання електроенергії (ефект «кривої качки») з балансуванням за допомогою УЗЕ [20].

У контексті воєнного стану та постійних атак на об'єкти енергетичної інфраструктури роль УЗЕ стає стратегічною. Розподілена генерація в поєднанні з системами зберігання дозволяє створювати так звані "мікромережі", які можуть працювати повністю автоматично. В результаті, постачання електроенергії до критичних соціальних та промислових об'єктів інфраструктури буде безперервним, навіть у разі відмови основних мереж. УЗЕ не можуть бути дійсно ефективними без точного контролю електричних параметрів [6]. Балансування мережі завжди є питанням правильності, заснованої на точності даних про стан заряду та ємність зберігання. Коли струм або напруга неточні, це не тільки призводить до неефективного використання ресурсів батареї, але й викликає аварійні ситуації, які негативно впливають на стабільність всієї мережі. Тому розвиток метрологічної підтримки для вимірювання параметрів УЗЕ є важливою частиною розвитку надійних і безпечних гібридних систем електропостачання.

1.2 Класифікація та технічні характеристики УЗЕ

Інтеграція технологій зберігання енергії в сучасні сонячні електростанції вимагає глибоких знань фізико-хімічних процесів, що відбуваються в різних типах пристроїв зберігання, та їх технічних і метрологічних характеристик.

СЗЕ класифікуються за типом енергії, що використовується для довгострокового зберігання та перетворення. Загалом, системи зберігання класифікуються на п'ять основних типів: механічні, теплові, електричні, хімічні та електрохімічні. Механічні системи включають ГАЕС, які наразі становлять понад 90% світової потужності зберігання, а також системи стисненого повітря та маховики. Теплові системи базуються на фазовому переході матеріалів і тепловому зберіганні солей. Електричні системи, такі як суперконденсатори та надпровідні магнітні накопичувачі, характеризуються високою швидкістю реакції, але обмеженою ємністю. Хімічні системи включають енергію, збережену в водні або синтетичному природному газі, але в сучасних СЕС та мікромережах найбільш застосовними та затребуваними є електрохімічні системи зберігання енергії (акумуляторні системи). Електрохімічні пристрої зберігання характеризуються високою модульністю, компактністю та швидким масштабуванням, що робить їх ідеальними для балансування генерації СЕС на рівні окремих домогосподарств або промислових об'єктів [3].

Як видно з наведеної структурної схеми (рис. 1.2), сучасна установка збереження енергії є комплексним апаратно-програмним рішенням, що об'єднує силову та інформаційну складові. Згенерована електроенергія від відновлюваних джерел (наприклад, сонячних панелей) надходить до PCS, ядром якої є двонаправлений інвертор. Він відповідає за перетворення DC у AC для видачі в загальну електричну мережу, або ж навпаки — перетворює струм мережі для заряду акумуляторних модулів.

Безпеку та контроль за станом самих батарей (напругою, струмом, температурою) здійснює BMS, метрологічне забезпечення якої є предметом даного дослідження. Усі процеси системи координуються центральною системою EMS. Саме вона збирає масив даних від BMS, джерел генерації та

зовнішньої мережі, після чого віддає команди інвертору PCS щодо переходу в режим заряду або розряду для ефективного балансування потужності.

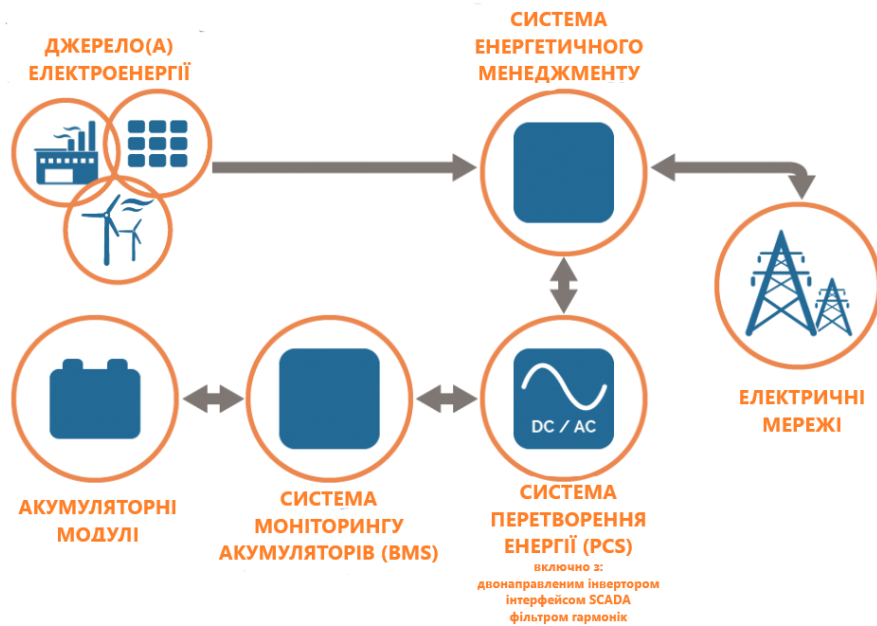


Рисунок 1.2 – Узагальнена структурна схема та алгоритм функціонування системи накопичення енергії у складі СЕС [19].

Літій-нікель-марганець-кобальтові акумулятори мають вищу питому енергетичну щільність і можуть зберігати більше енергії в одиниці об'єму. Це робить їх популярними в системах, де розміри є ключовим фактором. Метрологічно елементи NMC легше діагностувати, оскільки напруга має виражену залежність від рівня заряду. Однак вони більш схильні до перегріву і вимагають суворого контролю температури та складних систем пожежогасіння.

Ванадієві редокс-акумулятори все частіше використовуються у великих промислових СЕС. У таких системах енергія зберігається в рідких електролітах у зовнішніх баках. Основною перевагою редокс-акумуляторів є можливість незалежного масштабування потужності та ємності, а також майже необмежений термін служби циклів. Метрологічне забезпечення таких систем включає не тільки контроль електричних величин, але й вимірювання фізико-хімічних параметрів електроліту (потенціал і рівень рідини в баках) [7].

Для технічних аспектів СЗЕ необхідно згадати основні електричні параметри, які є основою для роботи систем управління. Першим і найважливішим параметром є номінальна ємність, яка визначає, скільки енергії

або електричного заряду може бути видано повністю зарядженим пристроєм зберігання. Фактична ємність акумулятора на практиці поступово зменшується під час експлуатації через деградацію активних матеріалів, що вимагає періодичного перерахунку метрологічною системою. Наступним важливим параметром є SoC, який відображає поточний рівень заповнення енергією пристрою зберігання у відсотковому вираженні. Точний розрахунок SoC необхідний для уникнення глибокого розряду або перезаряду, що може призвести до незворотного пошкодження елементів. SoH відображає стан зносу акумулятора порівняно з його початковим станом. З метрологічної точки зору, вимірювання внутрішнього опору є складним завданням, оскільки вимагає аналізу реакції системи на імпульсні навантаження та використання електрохімічної імпедансної спектроскопії. Також важливо враховувати DoD, яка є мірою того, яка частина ємності використовується в одному циклі. Чим менша середня глибина розряду, тим довше прослужить акумуляторна установка, і метрологічні інженери повинні встановлювати системи захисту на дуже суворі межі робочого діапазону.

Енергоефективність СЗЕ оцінюється за допомогою коефіцієнта ефективності зворотного циклу, який враховує втрати енергії під час перетворення змінного струму в постійний, хімічних реакцій в акумуляторі та роботи допоміжного обладнання, такого як системи охолодження. Цей показник становить 85-95% у сучасних літій-іонних системах [11]. Однак вимірювання цього коефіцієнта в реальних умовах експлуатації СЕС ускладнюється постійною зміною потужності зарядки через коливання сонячної інсоляції. Це вимагає розробки розумного вимірювального обладнання, здатного виконувати інтеграцію потужності в реальному часі. Зокрема, параметри потужності, такі як питома потужність (Вт/кг) та енергетична щільність (Вт·год/кг), мають велике значення. Ці параметри використовуються для визначення здатності СЗЕ забезпечувати велику потужність для мережі у разі високого навантаження.

Для систем стабілізації СЕС часто потрібно досягти швидкої доставки енергії (висока потужність), тоді як для автономних енергосистем ключовим є довгострокове зберігання енергії (висока щільність). Робота на високих струмах

супроводжується інтенсивним виділенням тепла, тому контроль температури є ключовим елементом метрологічного забезпечення. Температура кожного елемента повинна контролюватися до десятих часток градуса, оскільки нерівномірне нагрівання всередині акумуляторного блоку призводить до дисбалансу елементів і прискорення старіння всієї системи.

З різних типів і характеристик, розглянутих тут, можна сказати, що СЗЕ для СЕС в Україні рухаються в напрямку інтелектуальних систем зберігання на основі технології LFP з інтегрованими системами моніторингу. Для метрологічної служби це означає необхідність розробки нових методів аналізу невизначеності вимірювань у динамічних режимах, де параметри струму і напруги постійно змінюються за нелінійними законами. Правильний вибір вимірювального обладнання та розуміння фізичних меж кожної технології зберігання є ключем до забезпечення надійного метрологічного забезпечення, яке дозволить максимально реалізувати потенціал сонячної енергії в децентралізованій енергетичній системі [14].

1.3 Огляд національних та міжнародних стандартів щодо випробувань акумуляторних систем

Будь-яка розробка систем вимірювання для УЗЕ має спиратися на чинні стандарти та закони. Без цього просто неможливо гарантувати, що акумуляторне обладнання працюватиме безпечно, а результати моніторингу будуть достовірними. В Україні нормативна база зараз активно адаптується до європейських вимог ENTSO-E, тому під час проектування орієнтуються як на вітчизняні стандарти, так і на міжнародні норми.

Головним документом, який регламентує діяльність у цій сфері, є Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1]. Саме він зобов'язує регулярно проводити перевірку та калібрування всіх датчиків струму, напруги і лічильників, які входять BMS. Якщо говорити про самі акумуляторні системи, то світовим орієнтиром тут є серія стандартів IEC 62933. Зокрема, стандарт IEC 62933-2-1 [6] чітко прописує, як саме треба тестувати УЗЕ і які вимірювальні

прилади для цього використовувати. Цей документ регламентує умови вимірювання ККД перетворення, швидкості відгуку мережі та реальної ємності системи. Типовий зовнішній вигляд сучасної промислової акумуляторної установки, яка підлягає таким перевіркам та сертифікації, показано на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд промислової установки збереження енергії на базі літій-залізо-фосфатних акумуляторів [18]

З огляду на переважне використання потужних літій-іонних акумуляторних батарей у сонячній енергетиці, до них висуваяться суворі вимоги щодо експлуатаційної безпеки. Ці вимоги регламентуються міжнародним стандартом ІЕС 62619 (гармонізованим в Україні як ДСТУ EN 62619). Відповідно до його положень, система моніторингу повинна забезпечувати миттєве реагування у разі виходу показників напруги або температури будь-якої з комірок за встановлені безпечні межі.

Додатковим нормативним документом у цій сфері є стандарт ДСТУ EN 62620, який встановлює методики вимірювання внутрішнього опору та визначення втрати ємності. Це є необхідною умовою для достовірного оцінювання ступеня деградації акумуляторної батареї.

Важливою технічною особливістю УЗЕ є оперування постійними струмами значної величини. Це зумовлює необхідність застосування

спеціалізованих первинних перетворювачів (прецизійних шунтів або датчиків на ефекті Холла). Вимоги до точності таких засобів вимірювальної техніки та їхньої електромагнітної сумісності (стійкості до завад від інверторів) регламентуються стандартом ІЕС 61869, а також технічними умовами провідних виробників.

Водночас достовірність розробленої методики вимірювань підлягає практичному підтвердженню. Ці процедури спираються на стандарт ДСТУ ISO/IEC 17025:2017, що встановлює загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. У разі невідповідності точності системи моніторингу зазначеним нормам, її вимірювальні дані не зможуть бути використані для комерційного обліку електроенергії.

Підсумовуючи, слід зазначити, що в Україні вже сформовано необхідну нормативну базу для впровадження промислових систем збереження енергії. Отже, завдання розроблення метрологічного забезпечення полягає у створенні комплексного вимірювального тракту, який би повністю відповідав вимогам національного законодавства та міжнародних стандартів ІЕС. Зазначені нормативні вимоги слугуватимуть базовим критерієм для обґрунтованого вибору первинних перетворювачів та розроблення алгоритмів моніторингу в наступному розділі роботи.

1.4 Аналіз існуючих систем моніторингу електричних параметрів УЗЕ та їхні метрологічні недоліки

Для забезпечення високоточного збору вимірювальної інформації архітектура сучасних систем керування BMS базується на дворівневому принципі розділення функцій. Первинний рівень обробки сигналів реалізується безпосередньо у вимірювальному тракті, основу якого становить спеціалізована мікросхема AFE. Даний компонент здійснює безпосередній багатоканальний моніторинг падіння напруги на кожній окремій акумуляторній комірці, а також контроль температурних показників за допомогою матриці термісторів.

Аналогові вимірювальні сигнали оцифровуються за допомогою вбудованих прецизійних АЦП високої розрядності, після чого у вигляді цифрового коду

передаються через гальванічно ізольовані послідовні інтерфейси зв'язку (наприклад, SPI, I2C або їх ізольовані модифікації типу isoSPI) до центрального мікроконтролера (MCU). Центральний обчислювальний контролер виконує функції вищого рівня: математичну обробку масивів даних, фільтрацію завад, розрахунків інтегральних параметрів SoC, SoH та формування сигналів керування для захисних комутаційних апаратів. Узагальнену структурну схему організації вимірювальних каналів сучасної BMS, яка деталізує архітектуру інформаційних зв'язків між первинним аналоговим інтерфейсом та цифровим ядром. Незважаючи на високу технологічність таких систем, при їх інтеграції у склад СЕС виникає низка специфічних метрологічних проблем. Це зумовлено високою стохастичністю сонячної генерації: зміна рівня інсоляції призводить до різких коливань потужності та стрибків напруги в мережі. У таких жорстких перехідних (динамічних) режимах стандартні системи моніторингу часто демонструють значне зниження точності вимірювань.

Найбільш критичним аспектом є достовірне визначення SoC. На практиці переважна більшість систем використовує метод кулонівського підрахунку, який полягає в безперервному інтегруванні струму за часом. Проте, як зазначається у дослідженнях метрологічних викликів для BMS [23], будь-який первинний перетворювач струму (як прецизійний шунт, так і датчик на ефекті Холла) характеризується власною інструментальною похибкою та дрейфом нульової лінії. При безперервному інтегруванні цих даних навіть мінімальна систематична похибка з часом акумулюється, що призводить до суттєвого відхилення розрахункового рівня заряду від фактичного.

Ще одним слабким місцем є вплив температури на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). У контейнерах промислових УЗЕ під час інтенсивного заряду чи розряду температурні показники можуть суттєво коливатися. У рекомендаціях щодо проєктування від виробників електроніки [25] наголошується, що через температурний дрейф джерела опорної напруги мікросхеми, похибка вимірювання напруги на комірці може зростати в кілька разів. Для LFP акумуляторів, які відзначаються вкрай пологою кривою розряду, помилка навіть у 10 мілівольт може призвести до хибного оцінювання

залишкової ємності на 5–10%.

Таким чином, детальний аналіз підтверджує, що базові алгоритми систем моніторингу часто не здатні забезпечити необхідну точність вимірювань в умовах реальної експлуатації на СЕС. Їхня метрологічна надійність знижується через накопичення інтегральних похибок підрахунку струму та температурний дрейф апаратної частини. Це зумовлює необхідність розроблення спеціалізованого метрологічного забезпечення, здатного компенсувати зазначені недоліки як на апаратному, так і на алгоритмічному рівнях.

1.5 Постановка завдання дослідження

З огляду на проведений у першому розділі аналіз, можна констатувати, що для надійної роботи УЗЕ у складі сонячних електростанцій стандартних BMS недостатньо. Висока динаміка процесів заряду-розряду, специфічна плоска розрядна характеристика LFP-акумуляторів, температурні коливання та електромагнітні завади від силових інверторів призводять до постійного накопичення інструментальних і методичних похибок. Це унеможливує точне визначення SoC та SoH батареї. Отже, існує гостра необхідність у розробленні спеціалізованого метрологічного забезпечення, яке б компенсувало ці недоліки та гарантувало достовірність даних для системи енергоменеджменту.

Виходячи з виявлених проблем, головною метою подальшого дослідження є розроблення комплексного метрологічного забезпечення вимірювання електричних параметрів УЗЕ. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі конкретні задачі:

- здійснити обґрунтований вибір засобів вимірювальної техніки (первинних перетворювачів струму, напруги та температури), що забезпечать необхідну точність та експлуатаційну безпеку;
- розробити апаратно-структурну схему вимірювальних каналів із забезпеченням жорсткої часової синхронізації збору даних;
- сформулювати математичні алгоритми опрацювання вимірювальної інформації для комбінованого розрахунку SoC та SoH накопичувачів;

- виконати розрахунок сумарних інструментальних похибок для кожного вимірювального каналу;
- провести оцінювання невизначеності вимірювань за типом А та типом В згідно з міжнародними настановами GUM;
- розробити практичні рекомендації щодо регламенту метрологічного обслуговування та калібрування запропонованої вимірювальної системи.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УЗЕ

2.1. Вибір та обґрунтування вимірюваних параметрів

Будь-яка система моніторингу починається з первинних перетворювачів. Якщо датчик на самому початку ланцюга видає сигнал із похибкою, то ніякі найсучасніші мікроконтролери та алгоритми фільтрації цього вже не виправлять. Тому насамперед нам потрібно було вирішити класичну інженерну дилему: чим саме вимірювати великі струми (до кількох сотень ампер), які циркулюють між акумуляторами та інвертором СЕС.

На практиці для таких задач використовують або прецизійні резистивні шунти, або датчики на ефекті Холла. Шунти є дуже точними і майже не мають так званого «дрейфу нуля», що ідеально підходить для підрахунку ампер-годин. Але вони мають суттєвий мінус – відсутність гальванічної розв'язки. Тобто вимірювальна електроніка електрично з'єднана з високовольтною силовою шиною, що в промислових УЗЕ є небезпечним.

З іншого боку, як зазначається у технічній документації компанії LEM [16], сучасні компенсаційні датчики Холла (із замкненим контуром) здатні забезпечити гальванічну ізоляцію і при цьому мають клас точності на рівні 0,1 – 0,5%. Тому для забезпечення максимальної безпеки експлуатації та захисту каналів АЦП від імпульсних завад, для нашої розробки було обрано промисловий перетворювач струму компенсаційного типу (наприклад, серії LEM SAB або аналог). Його зовнішній вигляд та спосіб монтажу на силовий кабель наведено на рис. 2.1.

Наступний, не менш важливий етап – це вибір засобів для вимірювання напруги на кожній окремій комірці батареї. Оскільки ми працюємо з LFP хімією, звичайні дільники напруги та вбудовані АЦП дешевих мікроконтролерів категорично не підходять. Робоча напруга LFP-комірки під час розряду тримається на рівні 3,2–3,3 В майже весь час, і лише наприкінці різко падає. Тому, щоб «зловити» реальний стан заряду, потрібна точність вимірювання на

рівні хоча б 1–2 мілівольт.

Для вирішення цієї задачі провідні виробники електроніки пропонують використовувати спеціалізовані мікросхеми AFE. Проаналізувавши рекомендації щодо проєктування систем моніторингу від Texas Instruments [24] та Analog Devices [25], зупинили свій вибір на архітектурі з використанням багатоканальних прецизійних AFE-моніторів (типу bq79616 або LTC6813). Для безконтактного вимірювання великих постійних та змінних струмів у силових колах установок збереження енергії доцільно застосовувати перетворювачі струму на ефекті Холла компенсаційного типу (із замкненим контуром). На відміну від датчиків прямого підсилення, компенсаційна топологія забезпечує значно вищу лінійність, мінімальний температурний дрейф нульової точки та широку смугу пропускання. Це є критично важливим для точної фіксації високодинамічних перехідних процесів та струмових пульсацій, що виникають під час роботи силових інверторів. Загальний вигляд типового промислового перетворювача такого класу наведено на рис. 2.1.

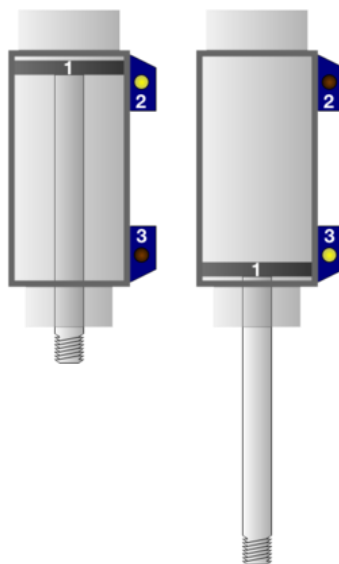


Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд перетворювача струму на ефекті Холла компенсаційного типу [16]

Ці мікросхеми вже мають на борту високоточний 16-бітний АЦП, вбудовані джерела опорної напруги з низьким температурним дрейфом та мультиплексори. Одна така мікросхема здатна одночасно і з високою

синхронністю вимірювати напругу на 16 послідовно з'єднаних комірках. Крім того, вони підтримують підключення зовнішніх NTC-термісторів, що автоматично закриває нашу потребу у вимірюванні температури акумуляторних модулів.

Отже, обрана комбінація первинних засобів вимірювання (ізольований датчик струму на ефекті Холла та прецизійна спеціалізована AFE-мікросхема) повністю відповідає жорстким вимогам до обладнання сонячних електростанцій. Вона гарантує електробезпеку, захист від завад та достатню точність для подальшої програмної обробки даних. На базі цих компонентів у наступному підрозділі буде побудовано загальну структурну схему метрологічного забезпечення.

2.2. Вибір засобів вимірювальної техніки (ЗВТ)

Наявність навіть найточніших прецизійних датчиків ще не гарантує достовірного результату, якщо ми неправильно зніматимемо з них дані. З точки зору класичної метрології, струм та напруга кожної комірки у досліджуваній системі визначаються методом прямих вимірювань. Тобто значення фізичної величини отримуються безпосередньо з АЦП мікросхеми моніторингу або датчика Холла. Натомість електрична потужність та загальний SoC визначаються шляхом непрямих вимірювань, оскільки вони обчислюються мікроконтролером математично на основі первинних даних. У цьому контексті виникає важлива технічна проблема, пов'язана із синхронізацією збору даних. Оскільки сонячна електростанція характеризується високою динамікою перехідних процесів, невідповідність моментів часу вимірювання може призвести до значних інструментально-методичних похибок. Наприклад, якщо при різкій зміні навантаження інвертора система фіксує напругу в момент часу t_1 , а струм – із затримкою у кілька мілісекунд (у момент t_2), то розрахована миттєва потужність ($P = U \cdot I$) міститиме суттєву методичну похибку.

Для уникнення цього явища, відповідно до рекомендацій щодо проектування акумуляторних систем керування [24], доцільно застосовувати

метод синхронної вибірки (Synchronous Sampling). Це означає, що команди на початок перетворення в АЦП для каналу напруги та каналу струму повинні подаватися центральним контролером абсолютно одночасно. Відповідні часові діаграми синхронного зчитування сигналів наведено на рис. 2.2.

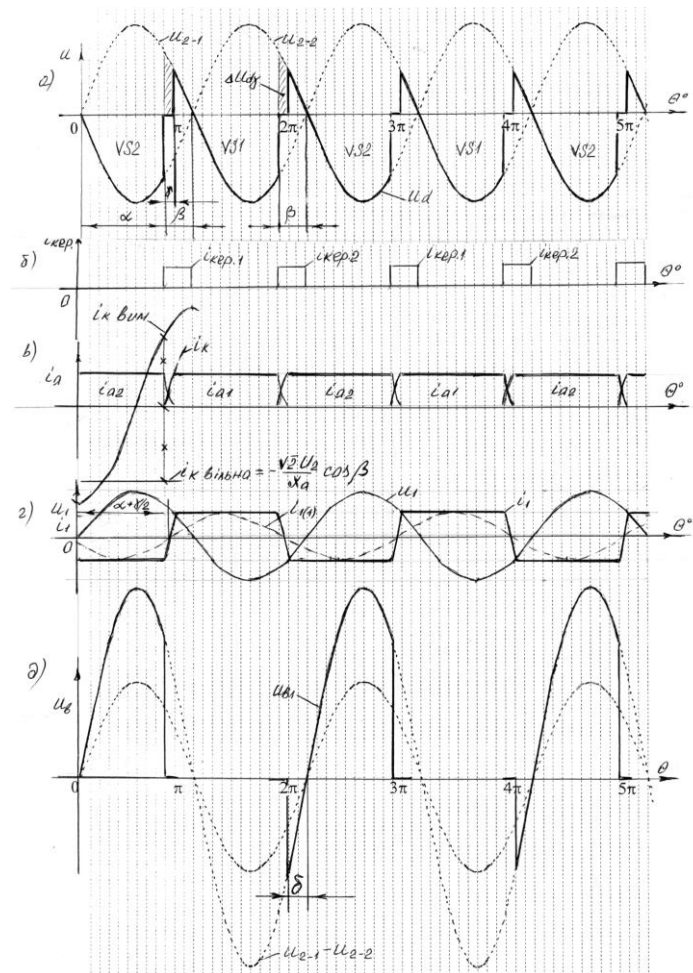


Рисунок 2.2 – Часові діаграми синхронного вимірювання струму та напруги в динамічних режимах [25]

Інженерна практика проектування систем збереження енергії показує, що для вимірювання струму неможливо обійтися якимось одним ідеальним сенсором. Нам доводиться шукати компроміс. З одного боку, використання класичного вимірювального шунта є абсолютно виправданим, коли нам потрібна еталонна точність та стабільність з часом. Оскільки шунт — це пасивний шматок металу, його похибка залежить лише від температури, що дозволяє легко досягти класу точності 0,1 або навіть 0,05 [14]. Для алгоритму кулонівського підрахунку

(визначення залишку ємності акумулятора) такий датчик є просто незамінним, адже він не накопичує методичної похибки.

Проте в промислових УЗЕ застосування лише шунтів є ризикованим. Головна проблема – відсутність гальванічної розв'язки. Якщо станеться пробій на високовольтній силовій шині, висока напруга може піти по вимірювальних проводах і спалити всю електроніку. Крім того, при струмах у кілька сотень ампер шунт працює як обігрівач, тому його доводиться додатково охолоджувати. Зовнішній вигляд такого прецизійного шунта показано на рис. 2.3.

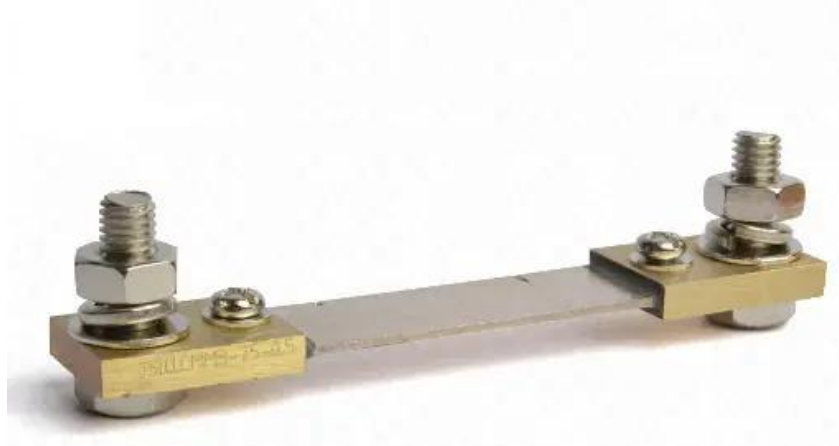


Рисунок 2.3 – Прецизійний вимірювальний шунт для кулонівського підрахунку стану заряду [15]

З іншого боку, як альтернативу та доповнення до шунтів, розглядаємо датчики струму на ефекті Холла. Їхня головна перевага — повна гальванічна ізоляція, що гарантує безпеку системи моніторингу під час роботи з високовольтними акумуляторними стрінгами [16]. Датчики компенсаційного (закритого) типу (рис. 2.4) чудово справляються зі швидкими перехідними процесами в СЕС. Але з точки зору метрології вони мають неприємну особливість: напругу зміщення (так званий «дрейф нуля»), яка плаває залежно від температури та сусідніх магнітних полів. Щоб компенсувати це, до алгоритмів нашої системи закладається програмне автокалібрування: контролер BMS запам'ятовує «нуль» датчика під час пауз, коли акумулятор не заряджається і не розряджається [27].

Що стосується вимірювання напруги, то тут головне правило –

вимірювальне коло не повинно розряджати саму батарею. Тому спеціалізовані AFE-мікросхеми, про які ми згадували раніше, мають надзвичайно високий вхідний опір (імпеданс) [25]. Вони здатні синхронно зчитувати напругу з десятків комірок із похибкою всього 1–2 мілівольти навіть при стрибках температури в контейнері. А для контролю загальної напруги високовольної шини (яка може сягати 800-1000 В) ми додатково закладаємо цифрові ізолюючі підсилювачі для захисту мікроконтролера.



Рисунок 2.4 – Датчик струму на ефекті Холла компенсаційного типу для систем оперативного захисту [16]

Оскільки УЗЕ працює в складі сонячної електростанції, метрологічне забезпечення не може обмежуватися лише внутрішніми параметрами батареї. Силкові інвертори СЕС є джерелом потужних гармонійних завад, тому в точці приєднання до мережі ми передбачаємо встановлення аналізаторів якості електроенергії (або інтелектуальних smart-лічильників) [22]. Це дозволить системі енергоменеджменту бачити, наскільки «брудний» струм видає інвертор, і вчасно коригувати його роботу.

Щоб уся ця апаратна база запрацювала як єдиний вимірювальний комплекс, обрані сенсори об'єднуються цифровими промисловими шинами (CAN або RS-485). Їх вибір обґрунтований високою стійкістю до електромагнітних завад, яких на СЕС завжди в надлишку [30].

Підсумовуючи, можна сказати, що запропоновано застосувати гібридний підхід: об'єднати високу точність шунтів для підрахунку енергії, надійність

датчиків Холла для оперативного захисту та прецизійність AFE-мікросхем для моніторингу напруги. Саме така архітектура створює міцний фундамент для надійного вимірювального комплексу.

2.3. Розроблення структурної схеми метрологічного забезпечення

На наступному етапі необхідно об'єднати весь набір сенсорів (шунт, датчик Холла, AFE-мікросхеми) у єдину, надійно працюючу апаратну структуру. Структурна схема – це своєрідний фундамент нашого метрологічного забезпечення. Вона показує, як саме фізичні сигнали від високовольної батареї перетворюються на цифрові дані, де проходить межа безпеки (гальванічна ізоляція) і куди ця інформація передається далі.

Центральним вузлом збору даних на нашій схемі є блок AFE. Як зазначалося раніше, спираючись на схемотехнічні рекомендації від Analog Devices [25], мікросхема AFE підключається безпосередньо до кожної комірки літій-іонної батареї. Застосовуємо топологію диференційного підключення: до плюса і мінуса кожної «банки» йдуть окремі вимірювальні лінії. Це критично важливо з точки зору метрології, адже дозволяє АЦП мікросхеми точно «бачити» напругу самої комірки, виключаючи падіння напруги на силових шинах під час протікання великих струмів. До цих же мікросхем підключаються термістори, рівномірно розподілені по корпусу акумуляторного модуля для моніторингу температурного дрейфу.

Далі йде канал вимірювання загального струму УЗЕ. Оскільки запропоновано гібридний підхід для підвищення надійності, на головній силовій шині послідовно розташовані два різні сенсори. Спочатку встановлено прецизійний шунт. Мілівольтовий сигнал з нього знімається окремим високорозрядним АЦП і використовується виключно для точного кулонівського підрахунку пройденної енергії. Відразу за шунтом на силовий кабель змонтовано компенсаційний датчик струму на ефекті Холла [16]. Оскільки його вихідний сигнал вже є гальванічно розв'язаним від високої напруги, він заводиться безпосередньо на аналоговий вхід центрального мікроконтролера. Це забезпечує

апаратний захист: якщо струм на сонячній станції різко стрибне (наприклад, через коротке замикання в інверторі), мікроконтролер миттєво відключить силові контактори, не чекаючи, поки цифрові фільтри шунта опрацюють дані.

Усі оцифровані значення напруг та температур від мікросхем AFE передаються до головного мікроконтролера MCU. Для забезпечення високого рівня завадостійкості та електробезпеки в умовах потужних електромагнітних полів сонячної електростанції, інформаційний обмін реалізовано по гальванічно ізольованій локальній послідовній шині (зокрема, за допомогою технології isoSPI або спеціалізованих цифрових ізоляторів) [24]. Наявність гальванічної розв'язки вимірювальних контурів від обчислювального ядра повністю виключає ризик аварійного пробою високої напруги акумуляторного масиву в низьковольтні кола керування.

Обробка сигналів виконується безпосередньо всередині MCU за допомогою спеціалізованого програмно-математичного забезпечення. На цьому етапі реалізується цифрова фільтрація високочастотних шумів, синхронізація даних та обчислення SoC і SoH акумуляторів. Сформований пакет метрологічної інформації транслюється через промисловий інтерфейс CAN, який характеризується високою диференційною стійкістю до зовнішніх впливів, EMS сонячної електростанції [30].

Функціонально-структурна схема інформаційно-вимірювальних каналів, яку наведено на рис. 2.5, наочно відображає описану конфігурацію інформаційних та вимірювальних трактів. Захист вимірювальних каналів від потужних високочастотних завад, що генеруються ШІМ-комутацією силового інвертора СЕС, апаратно реалізовано за допомогою інтеграції пасивних диференційних RC-фільтрів нижніх частот на кожному аналоговому вході мікросхеми AFE, а також завдяки застосуванню синфазних дроселів на лініях зв'язку.

Це мінімізує методичну похибку вимірювань і забезпечує необхідну стабільність роботи системи моніторингу в реальних динамічних режимах експлуатації УЗЕ.

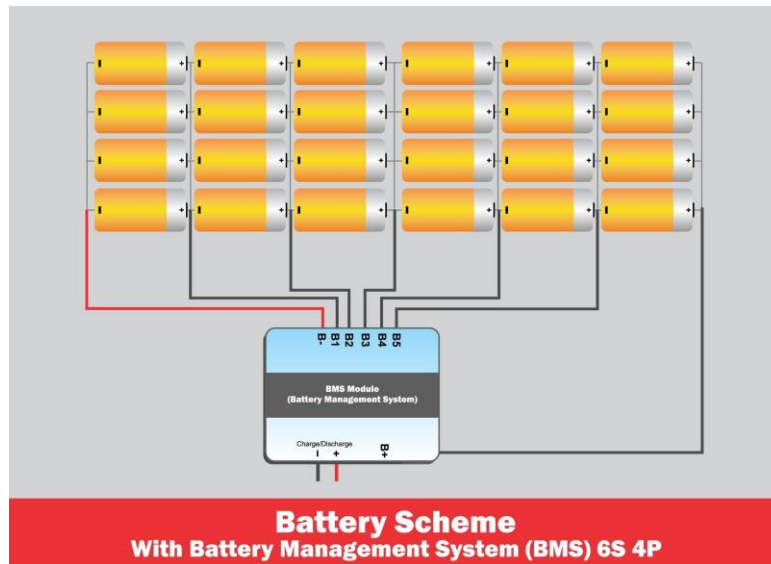


Рисунок 2.5 – Схема керування батареєю з ситемою BMS [10]

2.4. Методика збору та опрацювання вимірювальної інформації

Після того як ми сформували апаратну базу і розробили структурну схему, необхідно «навчити» нашу систему розуміти, що саме означають ці виміряні вольти й амperi. Оскільки фізично неможливо напряму виміряти ємність, що залишилася в акумуляторі (немає такого датчика), нам потрібні надійні математичні алгоритми. Для сонячної електростанції найбільш критичними є два параметри: поточний SoC та стан здоров'я, тобто SoH.

Почнемо зі стану заряду. В динамічних режимах, коли СЕС то заряджає батарею від сонця, то розряджає її в мережу, основним методом є кулонівський підрахунок. Його суть дуже проста: мікроконтролер бере дані з нашого прецизійного шунта і безперервно інтегрує струм за часом, буквально рахуючи кожну пропущену ампер-годину. Математично зміна стану заряду розраховується за формулою:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{C_{nom}} \int_{t_0}^t I(T) dT. \quad (2.1)$$

Але, як зазначається у сучасних дослідженнях метрологічних викликів для BMS [23], цей метод має один величезний недолік. Оскільки будь-який датчик струму має власну інструментальну похибку (шуми або зміщення нуля), ця

помилка під час інтегрування постійно накопичується. Якщо система працюватиме тижнями без зупинки, розрахований рівень SoC може відхилитися від реального на десятки відсотків.

Для візуалізації результатів вимірювання електричних параметрів та контролю стану установки збереження енергії (УЗЕ) доцільно використовувати спеціалізовані системи віддаленого моніторингу. На рисунку 2.6 наведено приклад інтерфейсу програмного комплексу Victron VRM, який дозволяє в режимі реального часу відслідковувати динаміку роботи системи. Як видно з наведених дашбордів, система забезпечує безперервну реєстрацію та візуалізацію ключових характеристик: поточних значень напруги, струму заряду/розряду акумуляторних батарей, а також перетікання енергії між сонячними панелями, УЗЕ та споживачем. Особливої уваги заслуговує тренд зміни стану заряду акумулятора (SoC), розрахунок якого базується на даних безперервних метрологічних вимірювань та алгоритмах корекції похибок, що розглядалися у попередніх розділах.

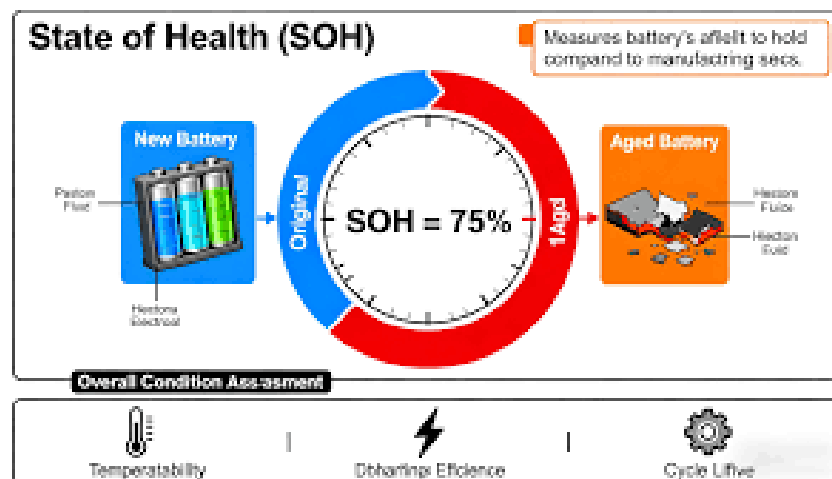


Рисунок 2.6 – Інтерфейс системи моніторингу Victron VRM для візуалізації метрологічних параметрів та стану УЗЕ) [21].

Алгоритм обчислення стану заряду базується на поєднанні методу інтегрування струму (кулонівського підрахунку) та методу корекції за напругою розімкненого ланцюга. Кулонівський підрахунок є основним методом у динамічних режимах: він передбачає безперервне вимірювання струму та його

інтегрування за часом для визначення кількості отриманих або відданих ампер-годин. Обґрунтування метрологічної складності цього методу полягає в тому, що будь-яка систематична похибка датчика струму (наприклад, зміщення нуля) при інтегруванні призводить до лінійного зростання помилки визначення SoC. Для компенсації цього явища методика передбачає періодичне перекалібрування «контрольних точок», коли акумулятор перебуває у стані спокою або досягає фази повного заряду, що фіксується за стабілізацією напруги при мінімальному струмі.

Метод напруги розімкненого ланцюга використовується як допоміжний для уточнення початкового значення SoC та усунення накопиченого дрейфу кулонівського методу. Для кожного типу акумуляторів (наприклад, LFP) заздалегідь розробляється таблична залежність OCV від SoC при різних температурах. Оскільки в робочій зоні літій-залізо-фосфатних елементів напруга змінюється дуже повільно, алгоритм опрацювання повинен враховувати ефекти гістерезису та релаксації напруги після зняття навантаження. Корекція SoC за напругою проводиться лише тоді, коли система перебуває у термодинамічній рівновазі, що підвищує достовірність метрологічної оцінки.

Алгоритм обчислення SoC комбінованим методом (кулонівський підрахунок + OCV) наведено на рис. 2.6. Окремо, для визначення деградації накопичувача, застосовується алгоритм обчислення SoH, який базується на аналізі фактичної ємності та внутрішнього опору (структуру алгоритму наведено на рис. 2.4). Методика оцінювання SoH базується на аналізі фактичної ємності, яку акумулятор здатний видати при повному циклі розряду, порівняно з його номінальним значенням. Алгоритм опрацювання фіксує кількість накопиченого заряду між точками повного заряду та розряду, виконуючи температурну корекцію отриманих даних, оскільки в'язкість електроліту та внутрішній опір суттєво залежать від зовнішніх умов. Крім ємності, важливим індикатором SoH є динаміка зміни внутрішнього опору. Обчислення опору проводиться на основі аналізу відгуку напруги на ступінчасту зміну струму навантаження. Збільшення цього показника понад встановлений поріг сигналізує про критичний знос елементів.

Температурна компенсація є інтегральною складовою обох алгоритмів. Оскільки ємність акумулятора та його вольт-амперні характеристики зміщуються при зміні температури, методика опрацювання вимірювальної інформації включає математичні коефіцієнти корекції для приведення результатів до стандартних умов (25°C). Це дозволяє уникнути помилкових висновків про стан енергосистеми в зимовий або літній періоди, забезпечуючи стабільність метрологічних характеристик системи моніторингу незалежно від сезону.

Узагальнення розроблених алгоритмів у єдину методику дозволяє створити надійний програмно-апаратний комплекс метрологічного забезпечення УЗЕ. Результати обчислень SoC та SoH передаються до системи керування інвертором СЕС, що дозволяє оптимізувати глибину розряду та запобігти передчасному старінню батарей. Таким чином, перехід від прямих вимірювань до розрахункових параметрів через інтелектуальне опрацювання інформації завершує формування другого розділу роботи, створюючи базу для практичного розрахунку похибок та оцінювання невизначеності вимірювань, що буде проведено в заключній частині бакалаврського дослідження.

Висновок до розділу

У другому розділі проведено комплексне проєктування апаратно-програмної структури метрологічного забезпечення установки збереження енергії. Обґрунтовано перелік критичних параметрів для моніторингу (напруга на комірках, загальний струм, температура та внутрішній опір), які є базовими величинами для оцінювання енергоефективності СЕС. Здійснено раціональний підбір засобів вимірювальної техніки: комбінація прецизійних шунтів для точного обліку заряду та датчиків Холла для оперативного контролю струму дозволяє досягти оптимального балансу між точністю та безпекою.

Запропонована функціонально-структурна схема інформаційно-вимірювальних каналів, яка забезпечує надійну інтеграцію вимірювальних контурів у єдину інформаційну мережу системи моніторингу. Це дозволяє

сформувати стійкий контур зворотного зв'язку для інтелектуального управління енергопотоками установок збереження енергії.

Водночас обрана опрацювання вимірювальної інформації, алгоритмічна реалізація якої описана у підрозділі 2.4 (формула 2.1), базується на комплексному поєднанні кулонівського підрахунку струму та динамічної корекції за показниками OCV. Такий комбінований підхід дозволяє ефективно компенсувати дрейф нуля первинних перетворювачів та мінімізувати накопичену інтегральну похибку визначення SoC.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ТА МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

3.1. Розрахунок інструментальних похибок каналів вимірювання

Третій розділ кваліфікаційної роботи присвячений кількісному оцінюванню точності розробленого метрологічного забезпечення, що є критично важливим етапом для підтвердження достовірності моніторингу установок збереження енергії. Розрахунок інструментальних похибок вимірювальних каналів базується на аналізі метрологічних характеристик усіх компонентів, що входять до складу інформаційно-вимірювальної ланцюга: від первинних перетворювачів до аналого-цифрових перетворювачів у складі системи керування акумуляторами. Визначення сумарної похибки дозволяє встановити межі довірчого інтервалу, у яких перебуває істинне значення вимірюваної величини, що є необхідною умовою для сертифікації системи та забезпечення її надійної роботи у складі сонячної електростанції [21].

Оскільки електрична потужність установки збереження енергії розраховується мікроконтролером непрямым методом на основі вимірянних значень напруги та струму, вона визначається за формулою:

$$P = U * I \quad (3.1)$$

Розрахунок інструментальної похибки каналу вимірювання напруги розпочинається з аналізу характеристик спеціалізованого аналогового інтерфейсу, що здійснює моніторинг кожної окремої комірки. Основну складову похибки тут формує похибка вбудованого джерела опорної напруги та похибка коефіцієнта підсилення вхідного каскаду. Крім того, важливе значення має похибка дискретизації АЦП, яка залежить від його розрядності. Для сучасних 16-бітних перетворювачів, що використовуються в прецизійних BMS, ця складова є мінімальною, проте при вимірюванні напруги на літій-залізо-фосфатних елементах, де робочий діапазон змін є дуже вузьким, навіть мікрвольтові шуми

можуть впливати на кінцевий результат. Сумарна похибка каналу напруги визначається як середньоквадратичне значення похибок усіх послідовних ланок, що дозволяє врахувати статистичну незалежність окремих чинників. Такий підхід дає змогу отримати реальну картину точності, яка для професійних систем моніторингу зазвичай не перевищує часток відсотка від діапазону вимірювання.

Канал вимірювання струму має складнішу структуру похибок через використання первинних датчиків, що працюють у силових колах із високим рівнем завад. У разі використання вимірювального шунта основною складовою інструментальної похибки є відхилення опору від номіналу (клас точності шунта) та додаткова похибка, спричинена його нагріванням під час протікання великих струмів. Якщо ж у системі встановлено датчик Холла, до розрахунку додається похибка нелінійності, похибка зміщення нуля (offset) та температурний дрейф чутливості. Розрахунок сумарної похибки каналу струму також включає похибку підсилювача сигналу та похибку АЦП контролера. Важливо враховувати, що для каналу струму інструментальна похибка безпосередньо впливає на точність кулонівського підрахунку енергії, тому навіть невелике систематичне відхилення призводить до накопичення значної інтегральної помилки при визначенні стану заряду акумулятора протягом тривалого часу експлуатації [25].

Згідно з теорією похибок для непрямих вимірювань, відносна похибка обчислення потужності визначається як корінь квадратний із суми квадратів відносних похибок прямих вимірювань напруги та струму за формулою:

$$\delta_P = \sqrt{\delta_V^2 + \delta_{IV}^2}. \quad (3.2)$$

Для підтвердження метрологічної надійності розробленої системи моніторингу УЗЕ необхідно провести розрахунок інструментальних похибок основних вимірювальних каналів. Загальна інструментальна похибка каналу вимірювання визначається як геометрична сума похибок складових елементів вимірювального ланцюга за формулою:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta_{\text{перв}}^2 + \Delta_{\text{лінії}}^2 + \Delta_{\text{АЦП}}^2)}, \quad (3.3)$$

де $\Delta_{\text{перв}}$ – абсолютна похибка первинного датчика; $\Delta_{\text{лінії}}$ — похибка, внесена з'єднувальними лініями; $\Delta_{\text{ацп}}$ – похибка аналого-цифрового перетворювача.

1. Розрахунок для каналу вимірювання напруги у якості первинного перетворювача та АЦП обрано спеціалізовану мікросхему AFE з 16-бітною роздільною здатністю. Номінальна робоча напруга комірки LiFePO₄ становить $U_{\text{ном}} = 3,2$ В. За паспортними даними виробника, відносна похибка вимірювання напруги мікросхемою становить $\Delta_v = \pm 0,1\%$.

Абсолютна похибка вимірювання напруги розраховується за формулою:

$$\Delta_U = \frac{\delta_U}{100} * U_{\text{ном}}. \quad (3.4)$$

Підставивши значення, отримуємо: $\Delta_v = (0,1 / 100) * 3,2 = 0,0032$ В = 3,2 мВ.

Похибка квантування 16-бітного АЦП для діапазону 5 В становить:

$$\Delta_{\text{квант}} = \frac{5}{2^{16}} = \frac{5}{65536} \approx 0,076 \text{ мВ}.$$

Отже, домінуючою є похибка самої мікросхеми, а сумарна інструментальна похибка каналу напруги становить $\Delta_{\varepsilon_U} \approx \pm 3,2$ мВ, що задовольняє вимоги до моніторингу плоских розрядних характеристик LFP акумуляторів.

2. Розрахунок для каналу вимірювання струму для вимірювання струму УЗЕ обрано прецизійний шунт з номінальним струмом $I_{\text{ном}} = 200$ А та класом точності 0,1 (відносна похибка $\delta_i = \pm 0,1\%$).

Абсолютна похибка шунта визначається за формулою:

$$\Delta_i = \frac{\delta_i}{100} * I_{\text{ном}}. \quad (3.5)$$

Підставляємо значення: $\Delta_i = (0.1 / 100) * 200 = 0.2A$.

Отримані результати вибору ЗВТ та їхніх інструментальних похибок зведено до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Метрологічні характеристики ЗВТ УЗЕ

Параметр вимірювання	Тип ЗВТ (перетворювача)	Діапазон вимірювання	Клас точності/ Відносна похибка	Розрахункова абсолютна похибка (Δ)
Напруга комірки (В)	Багатоканальний AFE (16-bit)	0 ... 5 В	$\pm 0,1 \%$	$\pm 3,2$ мВ
Загальний струм (А)	Прецизійний вимірювальний шунт	-200 ... +200 А	0,1	$\pm 0,2$ А
Температура ($^{\circ}\text{C}$)	Напівпровідниковий NTC термістор	-20 ... +85 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 1,0 \%$	$\pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$

Методика визначення сумарної похибки для обох каналів передбачає використання методу геометричного додавання складових похибок, що є стандартним підходом у метрології для незалежних випадкових величин. Отримана величина сумарної інструментальної похибки порівнюється з нормативними вимогами стандартів ІЕС та технічними умовами на експлуатацію УЗЕ. Це дозволяє зробити висновок про придатність обраних засобів вимірювальної техніки для вирішення поставлених задач. Окрім основної похибки, розрахунок також повинен враховувати додаткові похибки від впливу зовнішніх чинників, таких як електромагнітні наводки від інвертора СЕС та коливання температури в акумуляторній залі. Кількісне визначення цих параметрів створює базу для наступного етапу — оцінювання невизначеності вимірювань, що дозволяє перейти від простого розрахунку похибок до повного

метрологічного опису точності системи моніторингу в реальних динамічних умовах. Таким чином, проведений розрахунок інструментальних похибок є фундаментом метрологічної атестації, що гарантує єдність вимірювань та високу експлуатаційну надійність всієї установки збереження енергії [22].

3.2 Оцінювання невизначеності вимірювань електричних параметрів

Наступним критично важливим етапом метрологічного підтвердження розробленої системи є оцінювання невизначеності вимірювань, що відповідає сучасним міжнародним настановам GUM.

Для наочної класифікації всіх джерел, що впливають на кінцевий результат, побудовано діаграму причинно-наслідкових зв'язків (рис. 3.1). Вона демонструє розгалуження впливаючих факторів на складові невизначеності типу А (статистичні шуми, нестабільність інвертора) та типу В (інструментальна похибка датчиків, похибка дискретизації АЦП, температурний дрейф, електромагнітні завади) [24].

Для установок збереження енергії у складі СЕС, де режими роботи постійно змінюються, оцінювання невизначеності стає базовим інструментом для гарантування достовірності моніторингу енергобалансу.

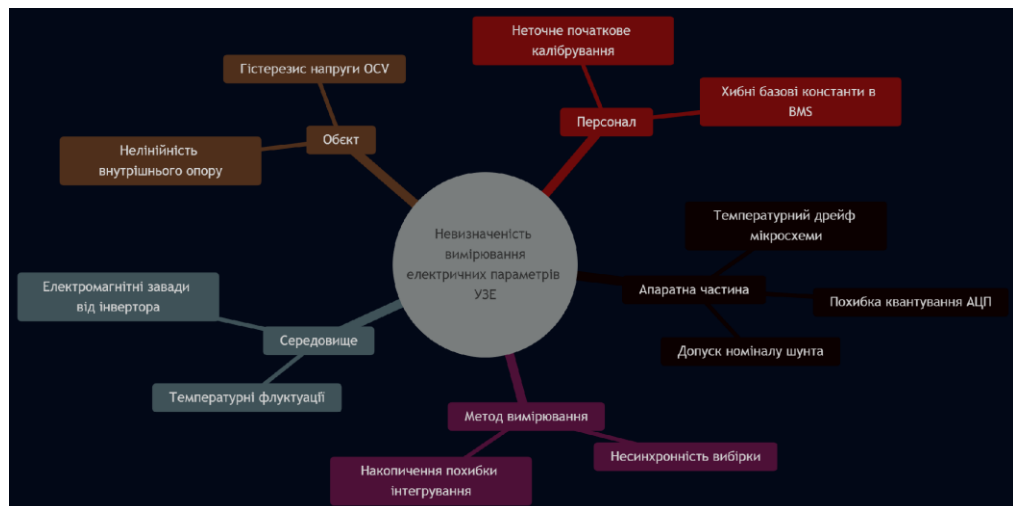


Рисунок 3.1 – Діаграма джерел невизначеності при вимірюванні електричних параметрів [9].

Оцінювання за типом А базується на статистичному аналізі послідовних результатів спостережень, отриманих у практично незмінних умовах. У контексті вимірювання електричних параметрів УЗЕ складова типу А відображає випадкові коливання значень напруги та струму, спричинені шумами вимірювальних каналів, нестабільністю роботи інверторів та динамічними змінами в хімічних процесах акумуляторів. Розрахунок цієї складової передбачає обчислення середнього арифметичного значення серії вимірювань та середнього квадратичного відхилення. Оскільки робота СЕС характеризується високою динамікою, для розрахунку невизначеності за типом А важливо обирати такі інтервали часу, де режим заряду або розряду можна вважати умовно стаціонарним. Велика величина складової типу А може свідчити про наявність значних електромагнітних завад у системі або про необхідність підвищення частоти дискретизації вимірювальних приладів [26].

Використовуючи раніше обрані ЗВТ (відносна похибка каналу напруги $\delta_V = 0,1\%$, відносна похибка каналу струму $\delta_I = 0,1\%$), отримуємо:

$$\delta_P = \sqrt{0.1^2 + 0.1^2} = \sqrt{0.01 + 0.01} = \sqrt{0.02} \approx 0.141\%$$

Отже, розрахункова відносна похибка визначення миттєвої потужності становить 0,14%, що свідчить про високий рівень точності запропонованого вимірювального тракту та повністю задовольняє жорсткі технічні вимоги, які висуваються до систем енергоменеджменту промислових СЕС. Отриманий результат підтверджує можливість прецизійного контролю процесів балансування потужності та ефективного згладжування піків генерації відновлюваної енергії. Водночас, відповідно до міжнародної настанови GUM (ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3), для повної характеристики точності вимірювального процесу та врахування стохастичних дестабілізуючих чинників необхідно перейти від класичного числення похибок до концепції оцінювання невизначеності вимірювань, що передбачає детальний розрахунок її складових за типами А та В з подальшим визначенням сумарної стандартної та розширеної невизначеності вимірювального каналу..

Оцінювання невизначеності за типом А (u_A) Здійснюється на основі статистичної обробки ряду з $n=10$ послідовних вимірювань напруги в усталеному режимі роботи УЗЕ. Стандартна невизначеність типу А дорівнює середньому квадратичному відхиленню (СКВ) середнього арифметичного і розраховується за формулою:

$$u_A = \sqrt{[\Sigma(x_i - x_{\text{ср}})^2 / (n \times (n-1))]} \quad (3.6)$$

На основі експериментальних даних (або результатів комп'ютерного моделювання шумів інвертора СЕС), для серії з 10 вимірювань напруги u_A становить 1,0 мВ, а для струму – 0,05 А.

Оцінювання невизначеності за типом В (u_B) Джерелом невизначеності типу В є інструментальна похибка ЗВТ (розрахована в п. 3.1), температурний дрейф та наводки. Оскільки розподіл похибки ЗВТ приймається як рівномірний (прямокутний), стандартна невизначеність за типом В розраховується за формулою:

$$U_B = \Delta_{\text{inst}} / \sqrt{3} \quad (3.7)$$

Для каналу напруги: $u_B(v) = 3,2 / 1,732 \approx 1,85$ мВ.

Для каналу струму: $u_A(i) = 0,2 / 1,732 \approx 0,115$ А.

Сумарна та розширена невизначеність Сумарна стандартна невизначеність (u_c) обчислюється як геометрична сума складових типів А і В за формулою:

$$U_c = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} \quad (3.8)$$

Для розрахунку розширеної невизначеності (U), яка визначає довірчий інтервал з імовірністю 95%, сумарна невизначеність множиться на коефіцієнт охоплення $k = 2$:

$$U = k \times u_c \quad (3.9)$$

Результати комплексного розрахунку зведено до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Бюджет невизначеності вимірювальних каналів УЗЕ

Величина	Невизначеність типу А (u_A)	Невизначеність типу В (u_B)	Сумарна стандартна невизначеність (u_c)	Коефіцієнт охоплення (k)	Розширена невизначеність (U)	Відносна невизначеність (%)
Напруга (В)	1,00 мВ	1,85 мВ	2,10 мВ	2	4,20 мВ	0,13 %
Струм (А)	0,05 А	0,115 А	0,125 А	2	0,25 А	0,12 %

Оцінювання за типом В ґрунтується на використанні всієї доступної неметричної інформації про джерела невизначеності. Основними джерелами для аналізу складових типу В є технічні специфікації виробників датчиків струму та напруги, дані сертифікатів про калібрування, відомості про роздільну здатність аналого-цифрових перетворювачів та межі допустимих основних похибок ЗВТ. У даній роботі при аналізі типу В особлива увага приділяється температурному дрейфу характеристик сенсорів та похибці, що виникає через дискретизацію сигналу. Для кожної складової за типом В визначається закон розподілу ймовірностей (найчастіше прямокутний або трикутний) і розраховується стандартна невизначеність. Суттєвим фактором для УЗЕ є також невизначеність, пов'язана з гістерезисом акумуляторних елементів та нелінійністю їхніх внутрішніх характеристик, що також включається до аналізу за типом В [28].

Після визначення всіх окремих складових проводиться розрахунок сумарної стандартної невизначеності вимірювального каналу. Цей процес

передбачає об'єднання складових типів А та В шляхом геометричного додавання, що дозволяє врахувати їхню взаємну незалежність. Отримана сумарна невизначеність дає комплексну оцінку якості вимірювання напруги чи струму в робочих умовах СЕС. Важливим аспектом є врахування коефіцієнтів чутливості, які відображають, наскільки зміна кожної вхідної величини впливає на кінцевий результат розрахункових параметрів, таких як стан заряду (SoC). Це дозволяє виявити найбільш «слабкі» ланки вимірювальної системи та зосередити зусилля на їхньому вдосконаленні.

Заключним етапом оцінювання є розрахунок розширеної невизначеності, яка визначає інтервал, у якому з заданою ймовірністю (зазвичай 95%) перебуває істинне значення електричного параметра. Для цього сумарна стандартна невизначеність множиться на коефіцієнт охоплення, який для нормального розподілу приймається рівним двом. Отримана розширена невизначеність подається у фінальному результаті вимірювання, що дозволяє інженерам та системним операторам приймати обґрунтовані рішення щодо безпечних режимів експлуатації УЗЕ. Такий підхід до метрологічного забезпечення повністю відповідає вимогам стандартів ISO/IEC 17025 та забезпечує високий рівень довіри до результатів моніторингу сонячних електростанцій. Впровадження методики оцінювання невизначеності дозволяє перейти від простої реєстрації даних до глибокої аналітики енергетичних процесів, що є необхідною умовою для інтеграції УЗЕ в інтелектуальні енергомережі майбутнього.

3.3 Дослідження впливу зовнішніх факторів на точність засобів вимірювальної техніки

Ефективність та метрологічна надійність систем моніторингу установок збереження енергії (УЗЕ) у реальних умовах експлуатації сонячних електростанцій (СЕС) суттєво залежать від дії дестабілізуючих зовнішніх чинників. Основними факторами, що вносять найбільшу додаткову похибку у результати вимірювань електричних параметрів, є температурні коливання навколишнього середовища та інтенсивні електромагнітні завади, які

генеруються силовими інверторами СЕС. Дослідження впливу цих факторів є критично важливим для коректного оцінювання невизначеності вимірювань та розроблення заходів щодо підвищення завадостійкості вимірювальних каналів [29].

Зокрема, динамічні зміни зовнішнього середовища спричиняють похибки при визначенні стану заряду (SoC). Якщо приймати C_{nom} як номінальну ємність акумуляторної батареї (наприклад, 100 А·год), то максимальна абсолютна похибка ΔQ , яка накопичується за час роботи t внаслідок інструментальної похибки вимірювання струму ΔI , визначається за такою залежністю:

$$\Delta Q = \Delta I * t \quad (3.10)$$

де ΔI – абсолютна похибка вимірювання струму, А; t – час роботи, год).

$$\Delta SoC = \frac{\Delta I * t}{C_{nom}} * 100\% \quad (3.11)$$

Вплив температури на точність засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) має комплексний характер і проявляється через зміну фізичних властивостей елементної бази. Для вимірювальних каналів струму, що використовують прецизійні шунти, основним джерелом додаткової похибки є температурний коефіцієнт опору (ТКО) матеріалу шунта. При протіканні великих струмів заряду або розряду відбувається самонагрівання шунта, що призводить до нелінійної зміни його опору та, як наслідок, до спотворення вимірюваного сигналу напруги. У випадку використання датчиків Холла температура впливає на дрейф «нуля» та чутливість напівпровідникового елемента, що вимагає впровадження складних схем термокомпенсації. Крім того, температурна нестабільність джерел опорної напруги в АЦП системи моніторингу безпосередньо впливає на точність квантування сигналів напруги на комірках УЗЕ. Дослідження показують, що в літній період при експлуатації в некондиційованих приміщеннях температурна похибка може перевищувати основну похибку приладу, що робить необхідним врахування температурного фактора при

розрахунку сумарної невизначеності [19].

Припустимо, УЗЕ працює безперервно протягом $t = 12$ годин (один цикл сонячної активності). Абсолютна похибка нашого шунта $\Delta I = 0,2$ А. Підставимо значення:

$$\Delta SoC = \frac{0.2 * 12}{100} * 100\% = 2.4\%$$

ЕМЗ від інверторного обладнання СЕС є ще більш складним чинником впливу. Сучасні мережеві інвертори працюють на високих частотах комутації силових ключів (зазвичай від 10 до 50 кГц), що супроводжується генеруванням широкосмугових завад та вищих гармонік струму. Ці завади поширюються як кондуктивним шляхом через силові шини постійного струму, так і через електромагнітні поля (випромінювані завади). Для високочутливих вимірювальних каналів напруги на комірках акумуляторів, лінії яких можуть мати значну довжину, ці завади виступають як антени, наводячи імпульсні перенапруги на входах BMS. Це може призводити до хибних спрацювань системи захисту або до некоректного розрахунку SoC. Особливо критичним є вплив високочастотних складових на роботу інтегральних АЦП, де без належної фільтрації завада може спричинити значне зміщення результату вимірювання (ефект аліасингу або накладання спектрів).

Для мінімізації впливу зазначених факторів у складі метрологічного забезпечення повинні бути передбачені технічні заходи захисту. До них належать використання екранованих витих пар для вимірювальних ліній, застосування синфазних фільтрів та гальванічної розв'язки вимірювальних каналів.

Дослідження впливу ЕМЗ також вимагає аналізу спектрального складу струму УЗЕ під час роботи інвертора в різних режимах (заряд, розряд, очікування), що дозволяє оптимально підібрати частоту зрізу цифрових та аналогових фільтрів. Температурна похибка, у свою чергу, може бути значно зменшена шляхом впровадження програмної корекції в алгоритми BMS на основі даних від інтегрованих датчиків температури, що дозволяє динамічно перераховувати результати вимірювань відповідно до поточного теплового

стану обладнання [27].

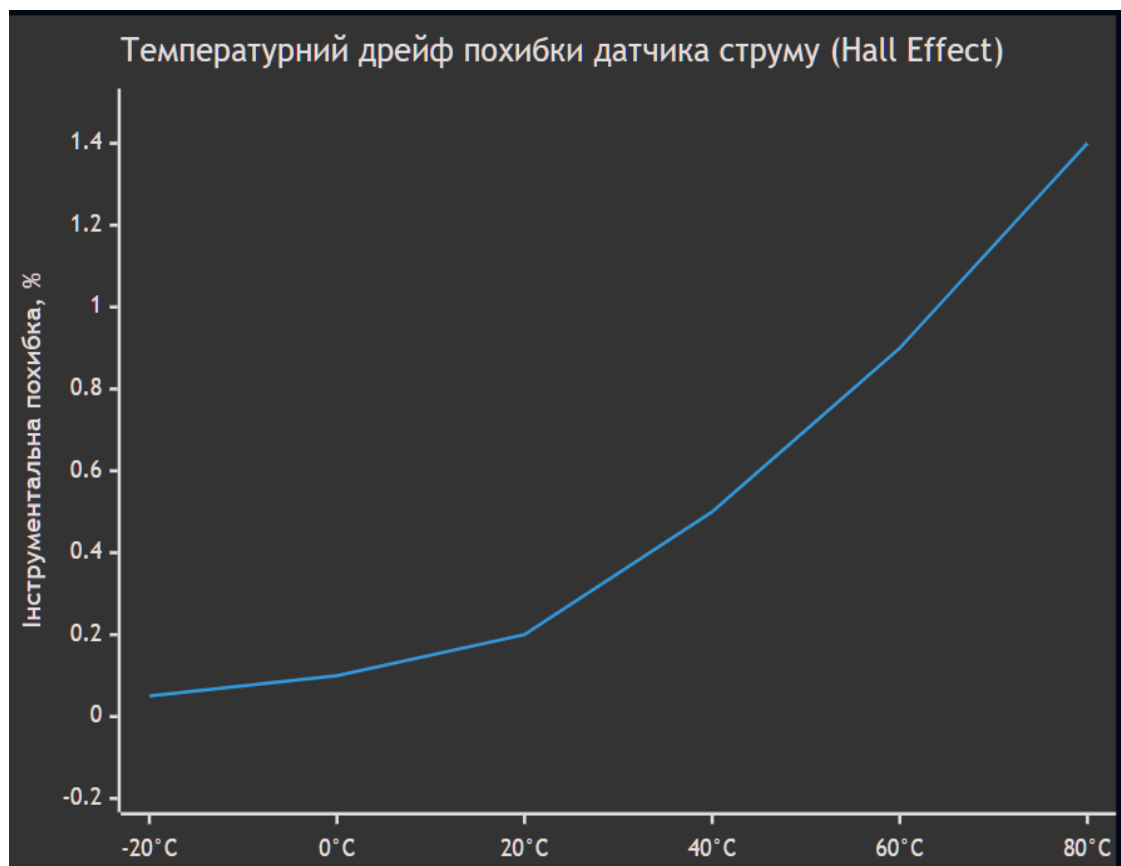


Рисунок 3.2 – Графік впливу температури на інструментальну похибку датчиків струму [8].

Таким чином, результати дослідження впливу зовнішніх факторів підтверджують, що реальна точність ЗВТ у складі СЕС суттєво відрізняється від паспортних даних, отриманих у лабораторних умовах. Врахування впливу температури та електромагнітної сумісності дозволяє створити більш адаптивну та надійну систему метрологічного контролю, яка забезпечує достовірність даних про енергобаланс установки збереження енергії навіть у складних експлуатаційних режимах. Це створює передумови для розроблення фінальних рекомендацій щодо метрологічної атестації та калібрування системи, що є завершальним етапом даної бакалаврської роботи.

3.4 Розроблення рекомендацій щодо калібрування та перевірки системи

Заключним етапом розроблення метрологічного забезпечення вимірювання електричних параметрів УЗЕ у складі СЕС є формування практичних рекомендацій щодо підтримання системи моніторингу в належному стані. Оскільки точність вимірювань безпосередньо впливає на безпеку експлуатації та економічну ефективність об'єкта, регламент метрологічного обслуговування повинен базуватися на вимогах Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та міжнародних стандартах серії ІЕС 62933. Основною метою такого обслуговування є своєчасне виявлення та усунення метрологічних відмов, компенсування часового дрейфу характеристик сенсорів та підтвердження відповідності ЗВТ встановленим класам точності. Розроблення регламенту включає визначення процедур калібрування, термінів проведення перевірок та переліку еталонного обладнання, необхідного для виконання робіт безпосередньо на місці експлуатації УЗЕ [24].

Процедура калібрування каналів вимірювання струму є найбільш критичною складовою регламенту через їхню схильність до накопичення похибок при кулонівському підрахунку. Рекомендовано впроваджувати дворівневу систему калібрування. Перший рівень – це автоматичне калібрування «нульової точки» (Zero-point adjustment), яке повинно виконуватися системою BMS щоразу, коли установка перебуває у стані спокою (струм дорівнює нулю). Це дозволяє нівелювати вплив температурного дрейфу та залишкової намагніченості датчиків Холла. Другий рівень передбачає періодичне калібрування каналу під навантаженням із використанням зовнішнього еталонного амперметра або прецизійного шунта вищого класу точності. Така перевірка дозволяє скоригувати коефіцієнт підсилення вимірювального тракту та забезпечити лінійність вимірювань у всьому діапазоні – від малих струмів заряду до максимальних розрядних потужностей [26].



Рисунок 3.3 – Еталонний цифровий мультиметр високої точності для калібрування каналу напруги комірок [7]

Реалізація регламенту метрологічного обслуговування потребує правильного підбору робочих еталонів. Згідно з метрологічними правилами, еталонне обладнання повинно мати точність щонайменше у 3–4 рази вищу, ніж ЗВТ, що підлягає калібруванню.

Оскільки запропонована система забезпечує відносну невизначеність каналу напруги на рівні 0,13% та каналу струму на рівні 0,12%, для проведення польового калібрування (безпосередньо на місці експлуатації сонячної електростанції) обрано сучасне портативне калібрувальне обладнання, характеристики якого зведено до таблиці 3.3.

Використання зазначеного обладнання забезпечує надійну метрологічну простежуваність результатів вимірювань до національних еталонів. Процедура повірки/калібрування каналу напруги зводиться до паралельного підключення щупів еталонного мультиметра до клем кожної комірки LFP і порівняння його показників із даними, які транслює BMS на дисплей оператора. У разі виявлення розбіжностей, що перевищують розраховану нами розширену невизначеність, проводиться програмне коригування коефіцієнтів підсилення у пам'яті контролера.

Таблиця 3.3 – Перелік рекомендованого еталонного обладнання для метрологічного обслуговування УЗЕ

Параметр, що перевіряється	Тип рекомендованого еталонного обладнання	Діапазон вимірювання / відтворення	Основна відносна похибка еталона
Напруга комірок (В)	Багатофункціональний цифровий мультиметр Fluke 287 (True-RMS)	0 ... 50 В (DC)	0,025 %
Загальний струм (А)	Прецизійні струмові кліщі Fluke i1010 спільно з мультиметром	1 ... 1000 А (DC)	0,05 % (з урахуванням похибки мультиметра)
Температура (°C)	Портативний сухоблочний калібратор температури Fluke 9142	-25 ... +150 °C	± 0,2 °C



Рисунок 3.4 – Еталонні струмові кліщі для безконтактної повірки вимірювальних каналів УЗЕ [15]

Таким чином, розроблене метрологічне забезпечення охоплює повний цикл: від первинного перетворення фізичних величин до обчислення параметрів SoC і методології підтвердження точності під час багаторічної експлуатації УЗЕ.

Калібрування каналів вимірювання напруги на окремих комірках акумуляторної батареї вимагає особливої обережності та високої точності еталонних приладів. Регламент повинен передбачати вибірку або повну перевірку напруг на клеммах елементів за допомогою прецизійного цифрового мультиметра. Для літій-залізо-фосфатних систем, де робоче вікно напруги є вузьким, рекомендується проводити перевірку в точках, близьких до стану повного заряду та глибокого розряду, де вольт-амперна характеристика стає більш крутою. Це дозволяє впевнитися, що система балансування комірок працює коректно і не допускає перезаряду окремих елементів. У разі виявлення розбіжностей, що перевищують розраховану розширену невизначеність, програмне забезпечення BMS повинно дозволяти внесення коригуючих коефіцієнтів для кожного окремого каналу вимірювання [23].

Метрологічне обслуговування також повинно охоплювати перевірку засобів вимірювання температури, оскільки від них залежить точність алгоритмів температурної компенсації. Рекомендовано проводити порівняльне вимірювання значень від інтегрованих датчиків із показниками еталонного термометра при різних режимах навантаження УЗЕ. Важливим аспектом є контроль цілісності ізоляції вимірювальних ліній та перевірка надійності контактних з'єднань, оскільки перехідний опір у ланцюгах може вносити значну методичну похибку у вимірювання напруги. Окрему увагу в регламенті слід приділити перевірці інтелектуальних лічильників енергії, які підлягають періодичній державній повірці згідно з встановленим міжповірочним інтервалом (зазвичай один раз на 4-6 років), оскільки вони забезпечують комерційний облік та взаємодію з енергомережею.

З інженерної точки зору, досягнення розширеної невизначеності на рівні 1,5% має критичне значення для експлуатації СЕС. Зниження похибки вимірювання струму та напруги дозволяє системі EMS використовувати

аккумуляторну батарею у більш широкому безпечному вікні заряду (від 10% до 90%) без ризику хибного спрацювання захисту інвертора. Завдяки розробленій апаратній базі та алгоритму корекції OCV, усувається явище «фантомного розряду» (коли система хибно вважає батарею розрядженою через дрейф нуля датчика Холла). У масштабах промислової сонячної електростанції це забезпечує оптимізацію циклів заряду-розряду, що, за експертними оцінками, здатне подовжити загальний термін служби дорогих літій-залізо-фосфатних накопичувачів на 15–20%.

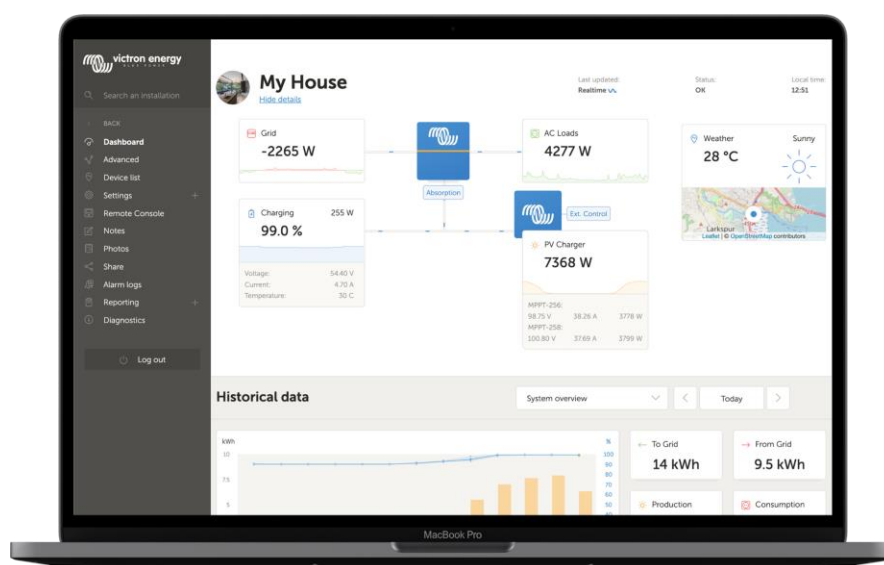


Рисунок 3.5 – Інтерфейс програмного комплексу для візуалізації метрологічних даних та стану здоров'я (SoH) акумулятора [8]

Графік проведення метрологічного обслуговування повинен бути структурованим за часом та подіями. Первинна перевірка та калібрування проводяться під час пусконаладжувальних робіт для встановлення базових метрологічних характеристик («відбитка» системи). Планове обслуговування рекомендується проводити не рідше одного разу на рік, бажано перед початком сезону максимальної сонячної активності. Позапланові перевірки повинні ініціюватися системою самодіагностики у разі виявлення аномальних стрибків напруги, спрацювання захисту від короткого замикання або після проведення ремонтних робіт із заміною окремих аккумуляторних модулів чи датчиків [11].

Вся інформація про проведені метрологічні операції повинна фіксуватися

у метрологічному паспорті установки або в електронному журналі подій. Документування результатів калібрування дозволяє відстежувати динаміку деградації сенсорів та прогнозувати термін їхньої заміни. Такий системний підхід до регламентації обслуговування забезпечує єдність вимірювань у складі СЕС, підвищує рівень довіри до даних про SoH акумуляторів та гарантує, що розроблене метрологічне забезпечення буде ефективно виконувати свою роль протягом усього терміну експлуатації об'єкта енергетики. Завершення розроблення регламенту підсумовує практичну частину роботи, демонструючи готовність запропонованої системи до реального впровадження та сертифікації.

Висновок до розділу

У третьому розділі було проведено комплексне оцінювання точності та розроблено практичні засади експлуатації метрологічного забезпечення УЗЕ, що дозволило зробити наступні висновки.

По-друге, застосування концепції невизначеності за типами А та В дозволило отримати повний метрологічний опис вимірювальних результатів у динамічних режимах роботи СЕС. Встановлено межі розширеної невизначеності, що гарантує високий рівень довіри до розрахованих показників SoC та So акумуляторів.

По-третє, дослідження впливу дестабілізуючих чинників виявило, що температурний дрейф та електромагнітні завади від інверторів є основними джерелами додаткових похибок. Обґрунтовані в роботі методи апаратної та програмної компенсації дозволяють ефективно нівелювати ці впливи, забезпечуючи стабільність вимірювань у широкому діапазоні експлуатаційних умов.

Запропонований підхід до періодичної перевірки ЗВТ гарантує єдність вимірювань та безпеку функціонування УЗЕ у складі енергосистеми. Таким чином, результати третього розділу повністю підтверджують науково-практичну цінність розробленого метрологічного забезпечення та його готовність до практичного впровадження на об'єктах сонячної енергетики України.

ВИСНОВКИ

Під час виконання бакалаврської роботи було розглянуто особливості функціонування УЗЕ у складі сучасних сонячних електростанцій України та проаналізовано ключові чинники, що впливають на достовірність моніторингу їхніх електричних параметрів. Було зосереджено увагу на необхідності прецизійного вимірювання напруги, струму та потужності для забезпечення стабільності енергосистеми та ефективного балансування стохастичної генерації СЕС. Окремий акцент зроблено на специфіці LFP акумуляторів як найбільш перспективного типу накопичувачів, що вимагають особливої точності метрологічного контролю через свої унікальні розрядні характеристики.

Другий розділ охоплює обґрунтування вибору засобів вимірювальної техніки, порівняльний аналіз переваг прецизійних шунтів і датчиків Холла. Було встановлено, що інтеграція сучасних сенсорів у єдину інформаційно-вимірювальну мережу BMS у поєднанні з інтелектуальними лічильниками дозволяє суттєво зменшити похибки при визначенні SoC та SoH накопичувача. Це підтверджено розробленням алгоритмів опрацювання вимірювальної інформації, які забезпечують значно вищу точність оцінки енергобалансу системи порівняно з використанням стандартних засобів моніторингу без метрологічного обґрунтування.

У завершальній частині дослідження проведено кількісне оцінювання точності вимірювальних каналів шляхом розрахунку інструментальних похибок та аналізу невизначеності вимірювань за міжнародними настановами. Було детально досліджено вплив дестабілізуючих зовнішніх чинників, таких як температурні коливання та електромагнітні завади від силових інверторів СЕС, на метрологічну надійність системи. На основі проведених розрахунків розроблено практичні рекомендації та регламент метрологічного обслуговування, що включає процедури калібрування обладнання безпосередньо на місці експлуатації.

Завдяки поєднанню прикладних розрахунків, аналізу сучасного обладнання та інструментального підходу до оцінювання точності вимірювальних каналів, вдалося повністю реалізувати мету дослідження.

Результати роботи підтверджують, що розроблення та впровадження комплексного метрологічного забезпечення у сферу збереження енергії суттєво підвищує достовірність роботи систем моніторингу. Запропоновані апаратно-алгоритмічні рішення безпосередньо сприяють оптимізації енергоефективності сонячних електростанцій, гарантують безпеку експлуатації та подовжують термін служби акумуляторних батарей.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII. Редакція від 01.01.2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>.
2. Міністерство енергетики України. Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mev.gov.ua>.
3. НЕК «Укренерго». Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей. Київ, 2023. 84 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-2023.pdf>.
4. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні: щорічна доповідь. Київ, 2023. 112 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/2023/report.pdf>.
5. IEC 62933-2-1:2017. Electrical energy storage (EES) systems – Part 2-1: Unit parameters and testing methods – General specification. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. 64 р. [Електронний ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/31332>.
6. IEC 62619:2022. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022. 52 р. [Електронний ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/60754>.
7. ДСТУ EN 62620:2017. Акумулятори та акумуляторні батареї, що містять лужний або інші некислотні електроліти. Літієві акумулятори та акумуляторні батареї промислового призначеності (EN 62620:2014, IDT). [Електронний ресурс]. URL: <https://uas.org.ua/ua/services/standartizatsiya/>.
8. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Geneva: ISO, 2008. 120 р. [Електронний ресурс]. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf.

9. International Energy Agency (IEA). Energy Storage Service Report 2023. Paris: IEA, 2023. 96 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-storage-2023>.
10. IRENA. Grid-scale battery storage: Innovation landscape brief. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019. 48 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Innovation-landscape-brief-Utility-scale-Batteries>.
11. Квасніков В. П. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник. Київ: Центр учбової літератури, 2021. 312 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://cul.com.ua/metrologiya-ta-vymiryuvalna-tehnika>.
12. Victron Energy. Marine & Off-grid Systems: Energy Storage technical overview. Almere: Victron Energy B.V., 2023. 115 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.victronenergy.com/upload/documents/Energy_Storage_System_Manual-en.pdf.
13. LEM International SA. Hall Effect current sensors: measurement technology and uncertainty. Geneva: LEM, 2021. 34 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.lem.com/en/file/3144/download>.
14. Huawei Digital Power. FusionSolar Smart PV and ESS Solution: Technical Specifications. Shenzhen: Huawei, 2023. 56 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://solar.huawei.com/download?p=ESS-Spec>.
15. SMA Solar Technology AG. Battery Storage Systems for Large-Scale Applications: Design Guidelines. Niestetal: SMA, 2021. 82 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://files.sma.de/downloads/BESS-Design-Guide.pdf>.
16. Тимченко Ю. Г. Розрахунок та мінімізація похибок у вимірювальних каналах систем моніторингу ВДЕ. Вісник інженерної академії України. 2022. № 3. С. 45–51. [Електронний ресурс]. URL: <https://visnyk-eng.com.ua/article/view/2022-3-45-51>.
17. Лукінюк М. В. Автоматизація та моніторинг об'єктів відновлюваної енергетики. Київ: Науковий світ, 2019. 420 с. [Електронний ресурс]. URL: https://kpi.ua/files/Lukiniuk_avtomatyzatsia.pdf.
18. НКРЕКП. Постанова № 616 «Про затвердження Правил надання

допоміжних послуг з регулювання частоти та активної потужності». Київ, 2022. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0616874-22>.

19. Gurova A., et al. Metrological Challenges in Battery Management Systems for Solar Applications. *Journal of Measurement Science*. 2023. Vol. 14. P. 112–125. [Електронний ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/acb123>.

20. Texas Instruments. Analog Front-End Design for Battery Management Systems: Application Note. Dallas: TI, 2022. 45 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ti.com/lit/an/sbaa359/sbaa359.pdf>.

21. Analog Devices. High-Precision Battery Monitoring for Energy Storage Systems. Wilmington: ADI, 2023. 38 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1595.pdf>.

22. ДСТУ ISO/IEC 17025:2017. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0146774-17>.

23. Пєлєвін А. С. Системы мониторинга и управления накопителями энергии в локальных электросетях. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 2. С. 67–74. [Електронний ресурс]. URL: <https://teched.org.ua/article/view/2021-2-67-74>.

24. Мазуренко Л. І. Гібридні системи енергозабезпечення з відновлюваними джерелами та накопичувачами енергії. Київ: Наукова думка, 2022. 288 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000018442>.

25. Energy Partnership Ukraine-Germany. BESS Market Analysis in Ukraine 2023. Kyiv, 2023. 62 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://energypartnership-ukraine.org/bess-market-analysis-2023>.

26. Schneider Electric. Smart Grid Measurement and ESS Integration Guide. Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2022. 104 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.se.com/ww/en/download/document/ESS_Integration_Guide/.