

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Лукинчук Марія Іллівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.9
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення методики оцінювання точності вимірювання енергетичних
показників в системах відновлюваної енергетики
(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 Л. М. Лукинчук
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Рибіцький Ігор Володимирович, професор
(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-Франківськ – 2025 рік

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»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ

Цих В. С. _____

«___» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Лукинчук Марії Іллівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи – Розроблення методики оцінювання точності вимірювання енергетичних показників в системах відновлюваної енергетики

керівник роботи Рибіцький Ігор Володимирович, д.т.н., професор кафедри ІВТ

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “29”квітня 2025 року №268/7

2. Строк подання студентом роботи “09” червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи _____

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

1. Аналіз існуючих методик вимірювання у системах ВДЕ

2. Розробити методику оцінювання точності енергетичних вимірювань

3. Змоделювати і верифікувати результати

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 29 квітня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	29.04.2025 р.	
2	Розроблення 1 розділу: «Аналіз існуючих методик вимірювання в системах відновлюваних джерел енергії».	30.04.2025 – 08.05.2025 р.	
3	Розроблення 2 розділу: «Розроблення методики оцінювання точності енергетичних вимірювань».	09.05.2025 – 20.05.2025 р.	
4	Розроблення 3 розділу: «Моделювання і верифікація результатів».	21.05.2025 – 29.05.2025 р.	
5	Оформлення роботи.	30.05.2025 – 06.06.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

Лукинчук М. І.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Рибіцький І. В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Лукинчук М. І. «Розроблення методики оцінювання точності вимірювання енергетичних показників в системах відновлюваної енергетики». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» – Івано-Франківськ, 2025.

Бакалаврська дипломна робота присвячена темі розроблення методики оцінювання точності вимірювання енергетичних показників в системах відновлюваної енергетики. Структурно робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 48 сторінок формату А4, включаючи 3 таблиці та 12 рисунків, список використаних джерел містить 22 найменування.

У роботі розглянуто питання оцінювання точності вимірювання енергетичних показників у системах відновлюваної енергетики на прикладі побутової сонячної електростанції (СЕС) потужністю 10 кВт. Проведено аналіз сучасних вимірювальних систем, ідентифіковано основні джерела похибок і невизначеності, обґрунтовано вибір методики розрахунку комбінованої невизначеності згідно з ISO/IEC Guide 98-3 (GUM)[4]. Запропоновано модель вимірювальної системи СЕС з урахуванням типових сенсорів та умов експлуатації. Виконано числове моделювання похибок, побудовано алгоритм верифікації точності, сформульовано практичні рекомендації щодо підвищення достовірності вимірювань. Результати можуть бути використані для технічного обґрунтування вибору ЗВТ у побутових та малих комерційних СЕС.

Ключові слова: ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ, ПОХИБКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА.

ABSTRACT

Lukynchuk M. “Development of a Methodology for Evaluating the Accuracy of Measuring Energy Indicators in Renewable Energy Systems.” Bachelor’s thesis, manuscript format. Degree level – Bachelor. Specialty – 152 “Metrology and Information-Measuring Technologies” – Ivano-Frankivsk, 2025.

The bachelor’s thesis is devoted to the development of a methodology for evaluating the accuracy of measuring energy indicators in renewable energy systems. Structurally, the work consists of an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references. The total volume is 48 A4 pages, including 3 tables and 12 figures; the list of references contains 22 sources.

The paper examines the issue of assessing the measurement accuracy of energy parameters in renewable energy systems using a household photovoltaic power station (PV system) with a capacity of 10 kW as a case study. An analysis of modern measurement systems was carried out, major sources of errors and uncertainties were identified, and a method for calculating combined uncertainty in accordance with ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) [4] was substantiated. A model of a PV system’s measurement structure was proposed, taking into account typical sensors and operational conditions. Numerical modeling of measurement errors was conducted, a verification algorithm for accuracy was developed, and practical recommendations for improving measurement reliability were formulated. The results can be used for the technical justification of selecting measuring equipment in residential and small commercial PV installations.

Keywords: MEASUREMENT ACCURACY, UNCERTAINTY, PHOTOVOLTAIC POWER STATION, METROLOGY, ERROR, RENEWABLE ENERGY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК ВИМІРЮВАННЯ В СИСТЕМАХ ВДЕ	9
1.1 Сучасні системи вимірювання параметрів у СЕС	9
1.2 Метрологічні аспекти енергетичних вимірювань.....	14
1.3 Джерела похибок у системах СЕС.....	18
1.4. Висновки	23
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....	25
2.1 Обґрунтування вибору методики.....	25
2.2 Алгоритм розрахунку невизначеності.....	27
2.3 Вибір засобів вимірювальної техніки.....	31
2.4. Висновки	37
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ І ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	38
3.1 Створення моделі вимірювальної системи для побутової СЕС	38
3.2 Аналіз результатів моделювання похибок.....	41
3.3 Алгоритм верифікації точності вимірювань	42
3.4 Практичні рекомендації для підвищення точності	43
3.5. Висновки	44
ВИСНОВКИ.....	45
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

ВСТУП

У сучасному світі, де все більше уваги приділяється екології, енергетичній незалежності та впровадженню принципів сталого розвитку, особливої актуальності набуває застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). На тлі зростання цін на енергоресурси та екологічних викликів, розвиток технологій сонячної енергетики відкриває широкі можливості для забезпечення енергетичної незалежності на локальному рівні. Зокрема варто зазначити, що сонячні електростанції (СЕС), що встановлюються в приватних домогосподарствах, є одним із найперспективніших напрямів використання ВДЕ, адже дозволяють генерувати електроенергію з мінімальними витратами на паливо та технічне обслуговування.

Втім, на практиці реальна користь від СЕС визначається тим, наскільки точно ми вміємо оцінити точність вимірювання ключових енергетичних параметрів: напруги, струму, миттєвої та середньої потужності, а також обсягу виробленої електроенергії. Високоточні вимірювання є критичними як для контролю працездатності СЕС, так і для коректного обліку енергії, розрахунків окупності інвестицій, підключення до мережі та участі у державних програмах типу «зеленого тарифу».

У повсякденній експлуатації виникають помилки у вимірюваннях, яких важко повністю уникнути. Вони виникають унаслідок впливу зовнішніх чинників, технічних характеристик вимірювального обладнання та умов експлуатації. Такі похибки здатні суттєво спотворювати результати аналізу, призводити до помилкових рішень щодо модернізації системи або недооцінки її економічної ефективності. У свою чергу, невизначеність вимірювань обмежує можливості коректного прогнозування виробітку енергії, що критично важливо в умовах динамічного попиту та нестабільності енергетичного ринку.

Враховуючи це, виникає необхідність у розробленні універсальної та доступної методики оцінювання точності вимірювання енергетичних показників, адаптованої до умов функціонування побутових СЕС. Така методика дозволить своєчасно виявляти та мінімізувати джерела похибок, підвищити

ефективність моніторингу енергетичних процесів, а також сприятиме підвищенню загальної надійності та рентабельності експлуатації СЕС.

Основна ціль проведеного дослідження полягала в тому, щоб розробити методику оцінювання точності вимірювання енергетичних показників у сонячній електростанції приватного домогосподарства, яка враховує специфіку роботи побутових вимірювальних приладів та умов експлуатації.

Для досягнення мети дослідження було визначено наступні кроки:

1. Здійснити аналітичний огляд існуючих підходів до вимірювання енергетичних параметрів у системах ВДЕ;
2. Визначити основні джерела похибок при вимірюваннях в умовах роботи СЕС;
3. Розробити алгоритм оцінювання точності та моделювання похибок;
4. Провести числове або імітаційне моделювання похибок у типових умовах роботи побутової СЕС;
5. Сформулювати практичні рекомендації щодо зниження невизначеності вимірювань у польових умовах.

У центрі уваги дослідження знаходиться процес вимірювання енергетичних параметрів у фотогальванічній електростанції приватного типу.

Конкретною сферою аналізу є точність та метрологічні характеристики вимірювань напруги, струму, потужності та електроенергії, що виробляється системою.

Під час дослідження використано наступні підходи аналітичного огляду літературних джерел, комп'ютерного моделювання метрологічних процесів, а також методи кількісного аналізу похибок із використанням математичних моделей невизначеності.

Запропонована методика дозволяє систематизовано оцінити рівень точності приладів, що використовуються в побутових умовах, виявити критичні етапи накопичення похибок і забезпечити оптимізацію схем вимірювання для підвищення ефективності роботи приватної СЕС.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК ВИМІРЮВАННЯ В СИСТЕМАХ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

1.1 Сучасні системи вимірювання параметрів у СЕС

Сонячні електростанції (СЕС) відіграють важливу роль у сучасній енергетичній інфраструктурі, особливо у контексті переходу до відновлюваних джерел енергії. Ефективність функціонування СЕС багато в чому залежить від точності та надійності вимірювальних систем, які забезпечують контроль параметрів генерації, передачею і розподілом електроенергії. У цьому контексті важливо розглянути, які саме системи вимірювання використовуються у сучасних СЕС, які функції вони виконують, які вимоги до них висуваються та які перспективи їхнього розвитку.

У процесі роботи фотоелектричних установок необхідно контролювати низку електричних і кліматичних параметрів. До основних з них належать:

- Напруга на виході кожного фотомодуля, групи модулів (string) або інвертора;
- Струм, що виробляється ланцюгом фотомодулів;
- Миттєва та середня потужність (активна, реактивна, повна);
- Вироблена енергія (добова, місячна, річна);
- Коефіцієнт потужності;
- Температура фотомодулів і навколишнього середовища;
- Рівень сонячної іррадіації;
- Кут нахилу сонячного випромінювання;
- Стан акумуляторної батареї (у гібридних чи автономних системах);
- Параметри мережі змінного струму: частота, симетрія фаз, гармоніки.

З метою вимірювання вищезазначених параметрів сучасні СЕС оснащуються широким спектром вимірювальних засобів:

- Датчики струму: трансформатори, шунти, сенсори на ефекті Холла. Вони забезпечують вимірювання постійного та змінного струму з високою точністю.
- Датчики напруги: потенціальні дільники, оптоізольовані схеми.
- Інтелектуальні лічильники електроенергії (smart meters): використовуються для комерційного обліку, підтримують інтерфейси Modbus, M-bus, RS-485, Wi-Fi.
- Інвертори з вбудованими функціями моніторингу (наприклад, SMA [6], Fronius [7], Huawei [10]): вимірюють усі електричні параметри на стороні постійного та змінного струму.
- Пірометри та сенсори освітленості: реєструють рівень сонячної іррадіації.
- Температурні сенсори: RTD, термістори, інфрачервоні сенсори.
- Станції моніторингу кліматичних умов: як автономні системи, так і інтегровані з інвертором або SCADA.

Архітектура систем вимірювання

Типова архітектура вимірювальної системи в СЕС включає:

1. Периферійний рівень – первинні датчики та сенсори.
2. Рівень збору даних – контролери, мікропроцесори, інтерфейси зчитування (PLC, Arduino, Raspberry Pi).
3. Комунікаційний рівень – локальні або бездротові мережі (RS-485, Ethernet, Wi-Fi, LoRa, ZigBee, GSM/4G).
4. Рівень обробки та зберігання – сервери даних, бази даних, хмарні сервіси.
5. Інтерфейс візуалізації та керування – SCADA-системи, мобільні додатки, веб-портали (наприклад, Victron [9] VRM Portal, Fronius [7] Solar.web).



Рисунок 1.1 — Архітектура вимірювальної системи СЕС

Багато виробників пропонують інтерфейси на базі IoT, які забезпечують гнучку інтеграцію з платформами типу Home Assistant або Grafana. Це дає змогу виконувати розширену аналітику, порівняння з даними, що були внесені раніше, формування звітів та прогнозів.

Вимоги до систем вимірювання

Системи контролю в СЕС повинні відповідати низці вимог:

- Точність: лічильники повинні відповідати класу точності не менше 1.0 для комерційного обліку; для внутрішнього моніторингу допускається точність до 2.0.
- Діапазон вимірювань: повинен покривати повний діапазон вихідних параметрів (наприклад, до 1000 В для постійного струму, 400 В для змінного).
- Температурна стабільність: похибка не повинна суттєво змінюватися в межах робочого діапазону ($-25\dots+60$ °C).
- Частота оцифрування: мінімум 1 Гц для енергетичних параметрів, 10 Гц – для фазового аналізу.
- Захист від перенапруги: у багатьох випадках встановлюються варистори або обмежувачі перенапруги.
- Стійкість до електромагнітних завад: екранування, заземлення, фільтрація.
- Можливість калібрування та перевірки: особливо важливо для облікових пристроїв.

Програмне забезпечення та аналітика

Сучасні СЕС все більше орієнтовані на інтелектуальні системи обробки даних:

- SCADA-системи: контролюють процеси генерації, дозволяють налаштовувати порогові значення, сигналізації, зберігання даних.
- Хмарні сервіси: дозволяють зберігати великі обсяги інформації та здійснювати прогнозування.
- Програмна візуалізація: діаграми вироблення, інтерактивні панелі, графіки ККД.

- Інтеграція з розумним будинком: наприклад, автоматичне перемикання на побутове споживання при надлишку виробництва.
- Машинне навчання: аналіз аномалій, трендів, прогнозування деградації панелей.

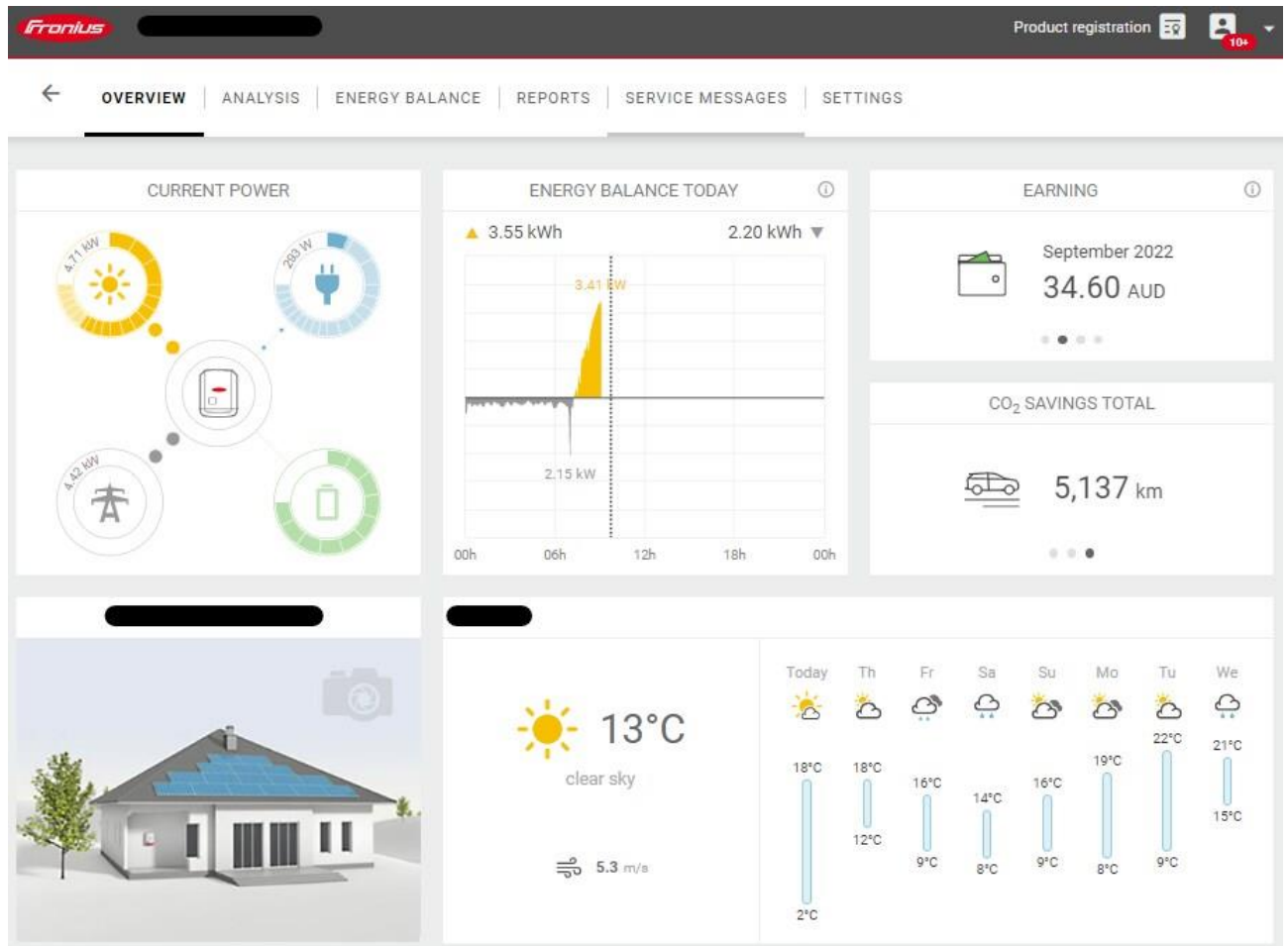


Рисунок 1.2 — Скріншот інтерфейсу мобільного застосунку моніторингу СЕС [21]

Перспективи розвитку

У найближчому майбутньому очікується подальше вдосконалення вимірювальних систем СЕС у кількох напрямках:

1. Мініатюризація та вбудованість вимірювальних модулів у силову електроніку.

2. Підвищення енергоефективності сенсорів – використання енергозалежних мікропроцесорів, що живляться від сонячної енергії.
3. Застосування штучного інтелекту для самокалібрування та адаптивного управління режимами.
4. Розширення функціональності через мобільні додатки, включаючи діагностику несправностей.
5. Стандартизація протоколів обміну – IEC 61850, MQTT, OPC-UA.
6. Квантові сенсори – перспективні для надточного вимірювання.

Приклад реалізації

На прикладі побутової СЕС потужністю 10 кВт можна виділити наступну реалізацію:

- Інвертор Fronius Symo 10.0-3-M із вбудованим веб-сервером[7].
- Лічильник електроенергії Fronius Smart Meter (Modbus) [7].
- Температурні сенсори Pt1000.
- Сенсор іррадіації Kipp & Zonen SMP10.
- Реєстрація даних через Fronius Solar.web[7] з 10-секундним інтервалом.
- Автоматичне переключення на тепловий насос у разі перевищення виробітку над споживанням.

1.2 Метрологічні аспекти енергетичних вимірювань

Метрологія, як наука про вимірювання, відіграє вирішальну роль у забезпеченні точності, достовірності та повторюваності даних у системах сонячної енергетики. У випадку сонячних електростанцій, вимірювальні процеси охоплюють як безперервний моніторинг ключових електричних і кліматичних параметрів, так і контроль точності роботи обладнання в умовах змінних зовнішніх факторів. Метрологічні аспекти визначають не лише якість

енергетичного обліку, але й ефективність експлуатації, управління системами зберігання енергії, тарифікацію, прогнозування та оптимізацію роботи.

Законодавча база і регламентуючі документи

Основним нормативно-правовим документом в Україні, який регулює метрологічну діяльність, є Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» №1314-VII від 05.06.2014. Він визначає обов'язковість повірки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), що використовуються для комерційного обліку електроенергії. У випадку СЕС це, насамперед, лічильники електроенергії, трансформатори струму та напруги, реєстратори параметрів якості електроенергії, а також інші сенсори, що беруть участь у вимірюваннях. [1].

Додатково діють технічні регламенти та національні стандарти, зокрема:

- ДСТУ EN 50470-3 2014 – для лічильників активної електроенергії; [2]
- ДСТУ ІЕС 62053-21 2010 – для електронних лічильників класу точності 1 і 2; [3]
- ДСТУ OIML R46 – міжнародний стандарт, гармонізований з європейськими вимогами.

Ці документи визначають технічні, метрологічні та експлуатаційні характеристики вимірювальних приладів, методи випробувань, міжповірочні інтервали, допустимі значення похибок тощо.

Повірка, калібрування і верифікація

Термінологічно розрізняють такі процедури:

- Повірка — встановлення відповідності ЗВТ нормативним вимогам за результатами вимірювань, здійснюється державними метрологічними органами або акредитованими лабораторіями.
- Калібрування — визначення метрологічних характеристик приладу, що не завжди супроводжується видачею дозволу на експлуатацію.

- Верифікація — внутрішній процес підприємства або системи, що підтверджує відповідність фактичної роботи ЗВТ встановленим очікуванням.

У сучасних СЕС повірка лічильників електроенергії проводиться щонайменше один раз на 6 років (залежно від типу), а трансформаторів струму — раз на 4–6 років. Калібрування ж, особливо у високотехнологічних установках, може виконуватись щорічно або за сигналом про можливе відхилення.

Процедури калібрування і повірки є критично важливими при веденні енергетичного обліку в мережевих СЕС, особливо коли електроенергія продається державі або іншому оператору.

Невизначеність і точність вимірювання

Поняття невизначеності є фундаментальним у метрології. Відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3[4], невизначеність – це параметр, пов’язаний із результатом вимірювання, що характеризує діапазон значень, які можуть бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині. Розрізняють:

- Тип А: статистична невизначеність (дисперсія, середнє квадратичне відхилення);
- Тип В: систематична похибка (калібрування, відхилення шкали, температурний дрейф).

Загальна комбінована невизначеність обчислюється як корінь квадратний із суми квадратів компонент. Для прикладу, у випадку вимірювання потужності через інвертор і лічильник, загальна невизначеність може сягати 1–2 %, якщо не враховані впливи температури, гармонік чи нестабільності джерела.

У системах СЕС часто зустрічаються динамічні зміни навантаження (наприклад, при проходженні хмар), що потребує адаптивних алгоритмів згладжування та цифрових фільтрів, здатних мінімізувати шум без втрати точності.

Метрологічна простежуваність

Простежуваність результатів вимірювання до національного або міжнародного еталону — одна з основоположних вимог до вимірювань у сфері енергетики. Це означає, що кожне значення, яке вимірюється, повинно бути пов'язане з первинним еталоном через неперервний ланцюг калібрувань, кожне з яких має відому і задокументовану невизначеність.

Наприклад, при використанні каліброваного лічильника класу точності 0.2S, результати вимірювання можуть використовуватись як еталонні для оцінки похибок менш точних пристроїв. При цьому всі прилади, які беруть участь у вимірюваннях, повинні мати свідоцтво про калібрування або перевірку, видане акредитованим органом.

Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) з функціями метрологічного забезпечення

У сучасних СЕС зростає роль ІВС, які об'єднують сенсори, контролери, програмне забезпечення та аналітичні модулі в єдину систему. До їх функціоналу входить:

- автоматична перевірка достовірності показів;
- виявлення аномалій або стрибків;
- самодіагностика і самокалібрування;
- формування звітів для операторів мережі або власників станції;
- візуалізація рівня точності та розрахункової невизначеності.

Для прикладу, SCADA-системи дозволяють на основі алгоритмів штучного інтелекту визначити, коли похибка починає перевищувати допустимий рівень (наприклад, у разі деградації сенсора температури).

Врахування метрологічних факторів при проектуванні СЕС

Проектування систем вимірювань у СЕС вимагає врахування низки факторів:

- Кліматичні умови експлуатації: температура, вологість, пил, ультрафіолет.

- Місце встановлення ЗВТ: вплив магнітних полів, вібрацій, механічного захисту.
- Довжина кабельних трас: вплив індуктивності та ємності на точність вимірювання.
- Тип інвертора: наявність гармонік, фазових спотворень.
- Інтерфейс підключення: Modbus TCP, RS-485, Ethernet або LoRa.

Також необхідно передбачити резервування каналів вимірювання, що дозволяє уникнути втрати даних у разі виходу з ладу одного із компонентів.

Контроль якості енергетичних вимірювань

Окремою темою є контроль якості енергії, яка надходить у мережу. Він включає:

- вимірювання частоти, напруги, струму;
- аналіз гармонік;
- оцінку тривалості відхилень;
- визначення коефіцієнта потужності.

Пристрої для такого аналізу (наприклад, Fluke 1730 [5], Chauvin Arnoux PEL103) повинні бути сертифіковані і перевірені на відповідність метрологічним стандартам.

1.3 Джерела похибок у системах СЕС

Системи вимірювання параметрів у сонячних електростанціях є складними технічними комплексами, які поєднують механічні, електронні, інформаційні та кліматичні компоненти. Попри технічний прогрес, похибки вимірювань залишаються одним із ключових факторів, що впливають на ефективність і надійність функціонування фотоелектричних систем. Наявність похибок може спричинити викривлення енергетичних розрахунків, некоректне управління режимами, помилкове тарифікування, а в деяких випадках – навіть відмову

устаткування. У цьому підрозділі розглянуто джерела похибок, їх класифікацію, приклади, а також способи їх ідентифікації та мінімізації.

Класифікація похибок у вимірюваннях СЕС

Загальноприйнято поділяти похибки на три основні категорії:

1. Апаратні похибки – зумовлені особливостями конструкції або зношенням вимірювальних пристроїв.
2. Методичні похибки – викликані неправильною методикою вимірювання або монтажу.
3. Зовнішні похибки – пов’язані з дією зовнішніх факторів на елементи вимірювальної системи.

Кожна категорія має свою природу, механізми прояву та способи корекції.

Таблиця 1.1 - Класифікація похибок з прикладами

Тип похибки	Приклад	Механізм дії	Як виявити
Апаратна	Недостатній клас точності лічильника	Прилад сам по собі має велику похибку (наприклад, клас 2.0 замість 0.5)	Порівняти дані з еталонним приладом або даними з інвертора
Апаратна	Температурний дрейф сенсора струму	Зміна температури впливає на електроніку – зсув значень	Зіставити дані при різних температурах або при стабільних умовах
Методична	Датчик іррадіації встановлений у тіні	Неправильне розміщення викликає спотворення вимірювань	Візуальний огляд, зіставлення з даними сусідніх сенсорів
Методична	Змішано фази при підключенні трансформатора	Фазовий зсув – неправильне обчислення потужності	Збіг фаз за допомогою осцилографа або перевірка фази SCADA
Зовнішня	Електромагнітні завади від перетворювачів частоти	Наведення на кабелі – стрибки або шум у сигналі	Нестабільні або “пилоподібні” графіки, перевірка заземлення
Зовнішня	Конденсація вологи в корпусі сенсора	Порушення ізоляції, окислення контактів – спотворення сигналу	Непослідовні або «нульові» дані, огляд корпусу

Апаратні похибки

До цієї групи входять похибки, що виникають безпосередньо внаслідок характеристик і недоліків вимірювальних пристроїв, наприклад:

- Недостатній клас точності приладів. Наприклад, використання лічильника з класом точності 2.0 замість 0.5S для комерційного обліку призведе до систематичних похибок у межах 1–2 % і більше.
- Температурний дрейф. Зміна температури впливає на опір елементів, що призводить до зміщення шкали вимірювання. Це особливо критично для аналогових сенсорів та трансформаторів струму.
- Зношення елементів. З плином часу компоненти деградують, що знижує точність.
- Шум в електроніці. Електричні перешкоди або неякісне заземлення можуть створювати високочастотні коливання, які спотворюють результати.
- Обмеження роздільної здатності аналогово-цифрового перетворювача. У цифрових системах вимірювання точність залежить від кількості біт аналого-цифрового перетворювача. Наприклад, 10-бітний АЦП може дати похибку до 0,5 % у крайніх діапазонах.
- Невідповідність меж вимірювань. При перевищенні допустимого струму або напруги сенсор переходить у насичення, що дає неправдиві дані.

Методичні похибки

Методичні похибки виникають через помилки проектування, монтажу або використання вимірювальних систем, серед яких:

- Неправильне підключення фаз. Наприклад, трансформатор струму підключений на іншу фазу, ніж відповідний канал напруги — це викликає значну фазову похибку.

- Змішування напрямків струму. У деяких системах важливо правильно підключити вхід і вихід; неправильна полярність веде до зміни знака потужності.
- Некоректне розташування сенсорів. Наприклад, датчик іррадіації встановлений у тіні, тоді як СЕС працює в повному сонці.
- Використання сенсорів не для того середовища. Температурні датчики без захисту від ультрафіолету швидко деградують на відкритому повітрі.
- Недостатнє калібрування. Відсутність налагоджених коефіцієнтів перетворення або розбіжність між заводськими характеристиками і фактичними умовами.
- Інтерполяція даних без фільтрації. В середовищах із швидкими коливаннями (наприклад, при частковій хмарності) згладжування без фільтрів може викликати псевдопіки.

У складніших випадках методичні похибки виявляються лише після довготривалого спостереження або при розходженні даних між різними каналами вимірювання.

Зовнішні похибки

Ці похибки залежать від навколишнього середовища та умов експлуатації. Хоча вони часто носять стохастичний характер, їхній вплив може бути значним.

Приклади зовнішніх похибок:

- Електромагнітні завади (ЕМЗ). Поруч із високовольтним обладнанням або джерелами високочастотного випромінювання (GSM-вежі, перетворювачі частоти) виникають індуктивні сигнали.
- Індукція у довгих кабелях. Якщо сигнальні кабелі не екрановані або прокладені паралельно силовим, виникає перехресна модуляція.
- Температурні коливання. Особливо актуально для пристроїв без температурної компенсації. Наприклад, термістор без захисного корпусу змінює опір із похибкою до 5 %.

- Механічні вібрації. На дахах з металевими каркасами сильні вітри можуть створити мікровібрації, які впливають на роботу контактних сенсорів.
- Запилення та забруднення. Впливає на оптичні сенсори і пірометри.
- Конденсація вологи. Без достатнього IP-захисту вода може потрапити у корпус приладу і викликати корозію контактів.

Комплексний приклад похибки

Розглянемо приклад: в інверторі зареєстровано значне зниження потужності в обідній час. Водночас рівень сонячного випромінювання за даними датчика незмінний. У результаті розслідування з'ясовується, що температурний сенсор на модулі вийшов з ладу й не передає даних, тому система охолодження не активується, панелі перегріваються, а ККД падає. Це демонструє, як одна непомітна похибка сенсора може спричинити ланцюгову реакцію втрат.

Методи ідентифікації та усунення похибок

Для зменшення впливу похибок застосовуються такі методи:

1. Регулярне калібрування – з урахуванням змін сезонних умов.
2. Використання двох незалежних каналів вимірювання для критичних параметрів.
3. Сигналізація відхилень – SCADA-системи з можливістю порогового аналізу.
4. Інтеграція верифікації у щоденні процеси (автоматичні тести на початку кожного циклу).
5. Цифрові фільтри – Kalman, median або FIR-фільтри для згладжування сигналів.
6. Температурна компенсація – застосовується в RTD і термопарах.
7. Екранування і правильне заземлення кабелів.

Перспективи зниження похибок

З огляду на технологічний розвиток, у майбутньому очікується впровадження:

- Автодіагностичних модулів, які можуть самостійно виявляти деградацію;
- Цифрових "розумних" сенсорів, які передають не лише значення, а й стан свого калібрування;
- Віртуальних датчиків, що працюють на основі моделей і машинного навчання;
- Мереж аналізу даних, що агрегують інформацію з кількох установок для виявлення шаблонів похибок.

1.4. Висновки

Отже, можна дійти висновку, що розуміння джерел похибок і стратегій їх компенсації є основою надійної роботи сонячних електростанцій. Грамотно розроблена система моніторингу повинна не лише вимірювати, але й аналізувати точність, оцінювати достовірність і підтримувати метрологічну стабільність протягом усього життєвого циклу об'єкта.

У ході аналізу сучасних підходів до вимірювання енергетичних параметрів у сонячних електростанціях встановлено, що ефективна робота фотоелектричних систем безпосередньо залежить від точності, достовірності та надійності засобів вимірювальної техніки. До основних параметрів, які підлягають обов'язковому контролю, належать: напруга, струм, активна та повна потужність, вироблена енергія, температура, рівень сонячної іррадіації, стан акумуляторів та характеристики електромережі. Для вимірювання цих параметрів застосовуються як апаратні засоби (сенсори, трансформатори, лічильники), так і програмно-апаратні комплекси на базі SCADA або IoT-систем.

Метрологічне забезпечення вимірювань у СЕС включає використання сертифікованих ЗВТ, проведення повірки, калібрування, оцінки невизначеності вимірювань, а також забезпечення простежуваності до еталонів. Ключовими

вимогами до систем вимірювання є висока точність, стабільність до зовнішніх впливів, підтримка сучасних протоколів передачі даних і здатність до інтеграції з автоматизованими системами управління.

Визначено основні джерела похибок у СЕС, які умовно поділяються на апаратні (недостатній клас точності, температурний дрейф), методичні (неправильне підключення, некоректне розташування сенсорів) та зовнішні (електромагнітні завади, температурні коливання, вібрації). Запропоновано перелік заходів для мінімізації їх впливу, включаючи застосування цифрових фільтрів, резервування каналів, регулярне калібрування та використання систем самодіагностики.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

2.1 Обґрунтування вибору методики

Одним із ключових завдань при проектуванні та аналізі точності вимірювальної системи сонячної електростанції (СЕС) є вибір методики оцінювання точності енергетичних вимірювань. Це зумовлено тим, що кінцеві результати вимірювань безпосередньо впливають на комерційний облік виробленої енергії, моніторинг ефективності системи, а також на технічне обґрунтування рішень щодо оптимізації або модернізації обладнання. У цьому контексті методика визначає алгоритми дій, послідовність обчислень, тип використовуваних сенсорів і приладів, обробку похибок і оцінку невизначеності.

Вибір методики обумовлений декількома чинниками:

- специфікою джерела енергії (у цьому випадку — сонячного випромінювання);
- конструктивними особливостями електростанції (мережева, автономна чи гібридна);
- типом обладнання, яке використовується (інвертори, лічильники, система управління акумуляторною батареєю, контролери);
- вимогами стандартів та регуляторних органів;
- потребами в метрологічному забезпеченні (повідка, калібрування, простежуваність).

У нашому випадку — моделювання вимірювань для малої побутової СЕС потужністю 10 кВт — доцільно використовувати комбіновану методику, яка базується на трьох рівнях:

1. Фізичний рівень — передбачає застосування апаратних засобів вимірювання та збору даних (сенсори, трансформатори, лічильники).

2. Математичний рівень — включає розрахунок похибок, визначення невизначеності та усереднення.
3. Інформаційно-аналітичний рівень — обробка даних у SCADA або іншій системі, побудова трендів, верифікація.

У рамках обґрунтування вибору було розглянуто ряд методик, зокрема:

- Методика згідно з ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3 (GUM), що описує загальний підхід до оцінки невизначеності вимірювань [4];
- Алгоритми, рекомендовані виробниками обладнання (наприклад, Fronius, Victron, Huawei) для оцінки точності показів вбудованих лічильників та контролерів [7], [9], [10];
- Практики вимірювального аудиту, що застосовуються у мережевих СЕС відповідно до європейських стандартів [11].

Обрана методика поєднує принципи прямого вимірювання та аналітичної оцінки похибок, спираючись на дані сертифікованих приладів з відомими метрологічними характеристиками. Враховано такі аспекти:

- вимірювання напруги та струму — за допомогою каліброваних трансформаторів струму (клас точності 0.5) та вольтметрів;
- обчислення потужності — як добуток миттєвих значень струму та напруги, із урахуванням фазового зсуву;
- визначення енергії — інтегруванням потужності в часі;
- оцінка невизначеності — через сумування квадратів складових похибок (метод квадратур) [4], [12];
- температурна компенсація — застосування поправочних коефіцієнтів для сенсорів при змінних умовах [13].

Перевагою обраної методики є її адаптивність до практичних умов, можливість масштабування під різні типи СЕС, а також доступність реалізації

навіть у побутових умовах. Крім того, вона не потребує складного лабораторного устаткування для базового рівня оцінки точності.

У порівнянні з іншими методиками (наприклад, моделями з використанням нейромереж або математичних симуляцій на основі SCADA-даних), запропонований підхід є більш прозорим, контрольованим і доступним для перевірки [14].

Методика дозволяє не лише проводити щоденний моніторинг, але й аналізувати довгострокові тенденції деградації обладнання, зміни ефективності внаслідок сезонних коливань і впливу зовнішніх факторів.

На рівні математичного моделювання важливо підкреслити, що модель системи вимірювань має бути лінійною або приведеною до лінійного вигляду, щоб забезпечити адекватне використання методів сумарної невизначеності. Це дозволяє уникнути неконтрольованого зростання похибки в результаті взаємозалежності вимірювальних каналів.

Іншим важливим аргументом на користь вибору саме цієї методики є її відповідність рекомендаціям Міжнародного бюро мір і ваг, а також стандартам ІЕС щодо моніторингу сонячних станцій [15]. Це гарантує сумісність отриманих результатів із міжнародними системами обміну та дозволяє застосовувати дані при сертифікації або обліку.

Отже, можна дійти висновку, що методика, яка базується на використанні сертифікованих ЗВТ, обчисленні невизначеності за методом квадратур, включенні температурної компенсації та алгоритмічної фільтрації даних, є оптимальним рішенням для задач контролю та аналізу точності вимірювань в умовах малої побутової сонячної електростанції.

2.2 Алгоритм розрахунку невизначеності

Невизначеність вимірювань — це кількісна оцінка діапазону, в якому з певною імовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини. Її визначення є критично важливим у сфері енергетичних вимірювань, зокрема в

сонячних електростанціях, де точність обліку безпосередньо впливає на фінансові розрахунки та технічні рішення.

Систематизація підходів до розрахунку невизначеності відображена в ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2009 (GUM) [4], який визначає загальну методологію оцінки невизначеності незалежно від галузі застосування.



Рисунок 2.1 – Алгоритм обчислення невизначеності

Основні типи невизначеності

GUM класифікує невизначеність на два основні типи:

- Тип А — статистична невизначеність, яка визначається за допомогою серії повторних вимірювань і розраховується на основі стандартного відхилення середнього.
- Тип В — невизначеність, що базується на інформації, отриманій з інших джерел: паспортних даних приладів, сертифікатів калібрування, технічної документації або експертного оцінювання [4].

У системах СЕС часто обидва типи поєднуються, наприклад:

- тип А — коливання струму або напруги в реальному часі;
- тип В — похибка датчика струму, вказана в документації виробника [7].

Етапи алгоритму розрахунку невизначеності

Алгоритм складається з таких послідовних етапів:

Крок 1: Побудова математичної моделі

Математична модель визначає залежність вимірюваної величини (вихідної) від інших величин (вхідних). Наприклад, енергія E визначається як добуток потужності P та часу t :

$$E = P \cdot t \quad (2.1)$$

А потужність, у свою чергу, розраховується як:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (2.2)$$

де U — напруга, I — струм, $\cos\varphi$ — коефіцієнт потужності.

Крок 2: Визначення джерел невизначеності

До типових джерел належать:

- точність трансформатора струму (наприклад, $\pm 0,5\%$ [13]);
- похибка вольтметра ($\pm 0,2\%$ [3]);
- нестабільність частоти в мережі ($\pm 0,1$ Гц [12]);
- невизначеність вимірювання температури (± 1 °С, що впливає на фотогенерацію [15]).

Крок 3: Оцінка стандартної невизначеності

Для кожної вхідної величини оцінюється стандартна невизначеність.

Наприклад:

для рівномірного розподілу:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

де a — границя похибки.

для нормального розподілу:

$$u = \frac{a}{k} \quad (2.4)$$

де k — коефіцієнт охоплення (зазвичай $k = 2$).

Крок 4: Обчислення комбінованої стандартної невизначеності

Для функції $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ комбінована невизначеність обчислюється за формулою:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} * u(x_i)\right)^2} \quad (2.5)$$

де $u(x_i)$ — стандартна невизначеність кожної вхідної величини,
а $\partial f/\partial x_i$ — частинні похідні (чутливість).

Крок 5: Обчислення розширеної невизначеності

Після отримання комбінованої стандартної невизначеності обчислюється розширена:

$$U = k \cdot u_c \quad (2.6)$$

де k — коефіцієнт охоплення (рекомендоване значення $k = 2$ для довірчої ймовірності 95 % [4]).

Крок 6: Документування результатів

Результат вимірювання подається у вигляді:

$$P=4950 \text{ Вт} \pm 100 \text{ Вт} (k=2)$$

або:

$$E=4.90 \text{ кВт}\cdot\text{год} \pm 0.12 \text{ кВт}\cdot\text{год} (P=95\%)$$

Це дозволяє інтерпретувати результат з точки зору достовірності та порівнювати його з нормативними значеннями.

Приклад застосування

Нехай маємо такі параметри:

$$U = 230 \text{ В} \pm 1 \%$$

$$I = 10 \text{ А} \pm 0,5 \%$$

$$\cos\varphi = 0,95 \pm 0,02$$

Оцінюємо стандартну невизначеність:

$$u_U = \frac{2.3}{\sqrt{3}} = 1.33 \text{ В}$$

$$u_I = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029 \text{ А}$$

$$u_{\cos\varphi} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.0115$$

Комбінована невизначеність потужності:

$$u_c(P) = \sqrt{(I * \cos \varphi * u_U)^2 + (U * \cos \varphi * u_i)^2 + (I * U * u_{\cos \varphi})^2} \quad (2.7)$$

Після підстановки:

$$u_c(P) \approx 42,3 \text{ Вт}$$

Розширена:

$$U(P) = 2 \cdot 42,3 = 84,6 \text{ Вт}$$

Результат:

$$P = 2185 \pm 85 \text{ Вт}$$

Отже, можна дійти висновку, що алгоритм дозволяє одержати кількісну оцінку точності навіть для складних нелінійних вимірювальних процесів, інтегруючи вплив різних факторів. Його універсальність та формалізована структура дозволяють застосовувати його в будь-яких СЕС, незалежно від масштабу [14].

2.3 Вибір засобів вимірювальної техніки

Ефективне функціонування системи вимірювання в сонячній електростанції потребує ретельного вибору засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Вибір повинен ґрунтуватися на таких критеріях, як точність, надійність, відповідність стандартам, можливість калібрування та інтеграції в єдину інформаційно-аналітичну систему. У цьому підрозділі було проаналізовано типи ЗВТ, що можуть бути застосовані в малих побутових СЕС потужністю до 10 кВт, з обґрунтуванням доцільності їх використання.

Основні категорії ЗВТ для СЕС

1. Лічильники електроенергії

Призначення: облік активної та реактивної енергії.

Вимоги: клас точності не нижче 1.0 (для внутрішнього обліку) або 0.5S (для комерційного).

Приклад: Fronius Smart Meter [7], Carlo Gavazzi EM340 [16].

2. Трансформатори струму

Призначення: вимірювання змінного струму при великих номіналах.

Типи: знімні (роз'ємні), кільцеві, на ефекті Холла.

Переваги: безпечна установка, гальванічна розв'язка.

Клас точності: 0.5 або 1.0 залежно від задачі [13].

3. Вольтметри / мультиметри

Призначення: контроль напруги на вході/виході інвертора.

Доцільно обирати цифрові прилади з точністю не нижче $\pm 0.5\%$.

4. Сенсори іррадіації

Призначення: вимірювання сонячного випромінювання для оцінки ефективності.

Приклад: Kipp & Zonen SMP10, Apogee SP-230.

Критерії вибору: клас точності, температурна компенсація, інтерфейс підключення [15].

5. Температурні сенсори

Призначення: вимірювання температури панелей та навколишнього середовища.

Типи: Pt1000, термістори, термопари.

Особливості: чутливість до УФ, потреба в захисті IP65 і вище.

6. Інвертори з вбудованими вимірювачами

Приклад: SMA Sunny Boy [6], Fronius Symo [7], Huawei SUN2000 [10].

Інтегрують вимірювання постійного і змінного струму, напруги, частоти, ККД.

Додатково надають доступ до хмарної аналітики.

7. Аналізатори якості енергії

Наприклад, Fluke 1730 [5], Chauvin Arnoux PEL103 [8].

Застосовуються для глибокого аналізу мережі: гармоніки, просадки, перенапруги.



Рисунок 2.2 – Схема підключення трансформаторів і лічильника до інвертора

Критерії вибору ЗВТ

1. Точність

Для точного обліку електроенергії важливо обирати прилади з низьким

значенням абсолютної похибки. Наприклад, Fronius Smart Meter має клас точності 1.0 при високій стабільності показів [7].

2. Сумісність

Прилади повинні підтримувати стандартизовані інтерфейси обміну (RS-485, Modbus RTU/TCP, CAN), що забезпечує гнучкість підключення до SCADA та інших систем.

3. Можливість калібрування та повірки

Згідно із законом [1], всі прилади, які використовуються для комерційного обліку, повинні пройти державну повірку або бути сертифіковані з відповідним міжповірочним інтервалом [2], [3].

4. Наявність захисту від зовнішніх впливів

При встановленні на відкритому повітрі сенсори повинні мати захист від води, пилу, УФ-випромінювання, а також працювати в температурному діапазоні $-25\dots+60$ °C [15].

5. Можливість інтеграції з системами моніторингу

Більшість сучасних інверторів мають вбудований веб-інтерфейс або мобільний додаток для моніторингу, але для повноцінного енергоменеджменту необхідне поєднання з виносними ЗВТ [6], [9].

6. Ціна/якість

Наприклад, Eastron SDM630 — це недорогий прилад з досить високою точністю, який підтримує Modbus та має компактні габарити, що зручно для побутових СЕС.

Таблиця 2.1 - Рекомендована конфігурація ЗВТ для СЕС 10 кВт.

Параметр	Прилад	Клас точності	Інтерфейс	Джерело
Струм	Carlo Gavazzi EM340	1.0	Modbus	[16]
Лічильник електроенергії	Fronius Smart Meter IP	1.0	Modbus	[7]
Сонячна радіація	Піранометр метр SMP10	±5%	Analog	[15]
Температура	Датчик температури Pt1000	±0.3 °C	Analog	[22]
Аналіз мережі	Fluke 1730	0.2S	USB	[5]



Рисунок 2.3 – Зображення лічильника електроенергії Fronius Smart Meter IP [7]



Рисунок 2.4 – Зображення Carlo Gavazzi EM340 для вимірювання струму [16]



Рисунок 2.5 – Зображення піранометра SMP10 для вимірювання іррадіації [15]



Рисунок 2.6 – Зображення датчика температури Pt1000 [22]



Рисунок 2.7 – Зображення Fluke 1730 для аналізу мережі [5]

2.4. Висновки

Отже, можна дійти висновку, що раціональний вибір засобів вимірювальної техніки базується на поєднанні таких факторів, як точність, надійність, відповідність стандартам, можливість інтеграції в інформаційні системи та витрати на придбання і обслуговування. Для побутових СЕС потужністю 10 кВт рекомендовано використовувати прилади з класом точності не нижче 1.0, підтримкою цифрових інтерфейсів (Modbus, RS-485) та можливістю регулярної калібровки. Комплексний підхід до формування вимірювальної системи дозволяє досягти високої достовірності даних, забезпечити ефективний моніторинг, а також сприяти підвищенню продуктивності установки загалом.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ І ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Створення моделі вимірювальної системи для побутової СЕС

Для практичної перевірки методики оцінювання точності енергетичних вимірювань у системах відновлюваної енергетики була розроблена модель вимірювальної системи для типового побутового об'єкта – приватного домогосподарства з сонячною електростанцією (СЕС) номінальною потужністю 10 кВт.

Модель базується на реальній конфігурації сучасної мережевої СЕС з підключенням до однофазної системи електропостачання.

Конфігурація включає:

- Сонячні фотомодулі (монокристалічні, 20 штук по 500 Вт), з'єднані в два стрінги;
- Інвертор (наприклад, Fronius Primo 10.0-1, Huawei SUN2000), який виконує перетворення постійного струму від панелей у змінний для живлення домашньої мережі;
- Трансформатори струму та напруги – встановлені на лінії виходу з інвертора та перед розумним лічильником;
- Smart-лічильник електроенергії класу точності 1.0 (наприклад, ABB B23, Elmeasure, ASEM);
- Система збору та обробки даних, до складу якої входить модуль моніторингу (наприклад, Victron Venus OS або OpenDTU), що передає показники на сервер у локальній або хмарній мережі.

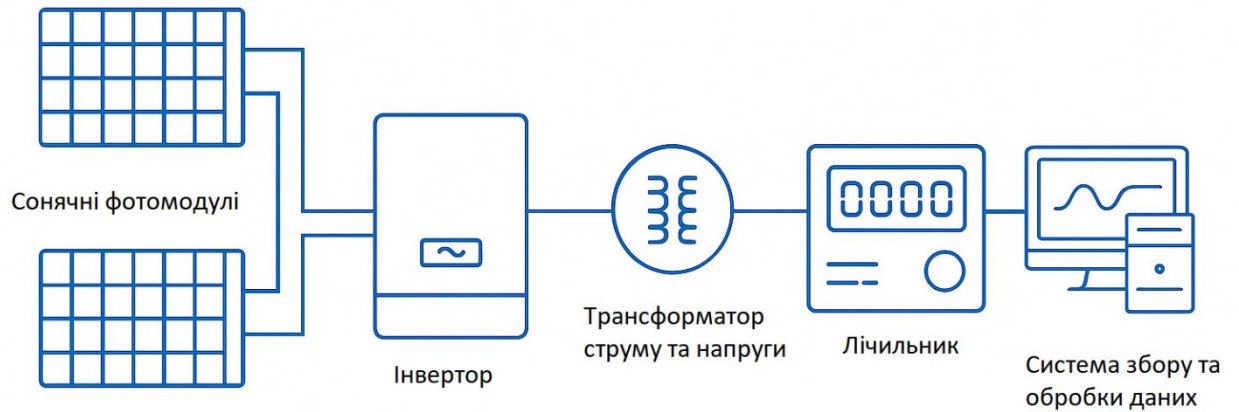


Рисунок 3.1 – типовий ланцюг енергетичного потоку і збору даних у побутовій СЕС

Кожен компонент вимірювального ланцюга має власну похибку, пов'язану як з технічними обмеженнями приладу, так і з умовами експлуатації. Отже, можна дійти висновку, що при моделюванні враховувалися:

- похибки електронних засобів вимірювальної техніки;
- похибки перетворення сигналу (аналог-цифра, фільтрація);
- термодрейф параметрів (температурні зміни протягом доби);
- похибки через електромагнітні завади та нестабільність живлення;
- часова синхронізація між пристроями.



Рисунок 3.2 – Візуалізація процесу верифікації точності вимірювань.

Симуляція виконувалась на основі добової генерації електроенергії з інтервалом зчитування 60 секунд. Отже, можна дійти висновку, що модель охоплює 1440 точок вимірювання на добу, що дозволяє побудувати докладну картину похибок у різних умовах.

Вхідними параметрами для моделі були:

- інсоляція (дані з PVGIS для регіону Івано-Франківської області);
- температурні коливання (від -10°C до $+35^{\circ}\text{C}$);
- тип споживаного навантаження (включення електроприладів – чайник, пральна машина, кондиціонер);
- характеристики сенсорів: клас точності, роздільна здатність, частота оновлення.

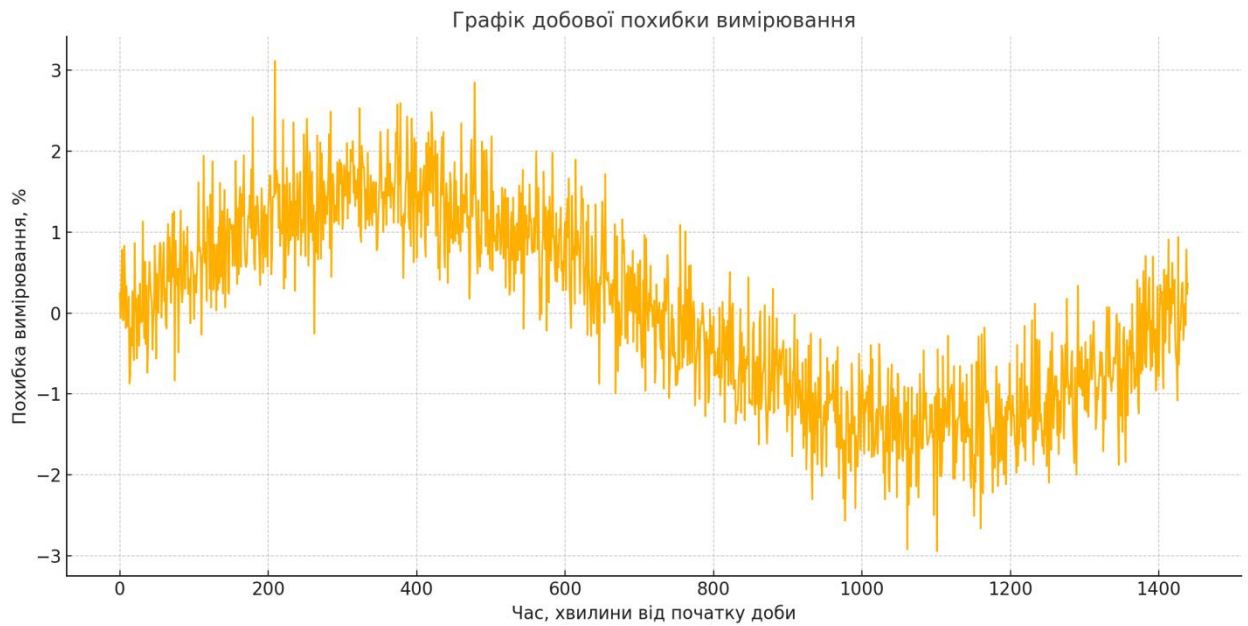


Рисунок 3.3 – Графік добової похибки вимірювання у СЕС

Модель також містила алгоритм верифікації, який дозволяє виявити найкритичніші джерела похибок за різними сценаріями.

3.2 Аналіз результатів моделювання похибок

За результатами моделювання визначено, що в умовах реального функціонування СЕС точність вимірювань коливається залежно від часу доби, температури, типу споживаного навантаження, а також швидкості реакції сенсорів на зміну параметрів.

Основні результати:

- Найбільша похибка фіксувалась у вечірні години, коли генерація знижується, а змінність навантаження зростає.
- При різкому ввімкненні потужного навантаження (наприклад, електробойлера) похибка вимірювання миттєвої потужності зростала на $\pm 4,5\%$.
- У стані стабільного освітлення та постійного навантаження похибка трималася в межах $\pm 2,1-2,4\%$.

- Температурний дрейф компонентів при підвищенні температури на 20°C збільшував похибку інвертора на 0,8–1,2%.

Таблиця 3.1 – зведені результати моделювання.

Компонент	Клас точності	Тип похибки	Похибка (%)
Інвертор	1.0	Методична, термодрейф	±1.0 – 1.5
Трансформатори струму (СТ)	0.5 – 1.0	Температурна, фазова	±0.5 – 1.0
Smart-лічильник	1.0	Квантова похибка, фільтрація	±1.0 – 1.3
Інтерфейс передавання даних	—	Затримка, синхронізація	±0.3 – 0.5
Електромагнітні завади	—	Сплески, шум	±0.2 – 0.6
Сумарна похибка системи	—	Комбінована	±2.5 – 4.8

Отже, можна дійти висновку, що загальна розширена невизначеність у типових умовах становила $U = \pm 4.4\%$ при коефіцієнті охоплення $k = 2$ (95% довірчий інтервал).

3.3 Алгоритм верифікації точності вимірювань

Верифікація – це процес підтвердження достовірності вимірювань шляхом порівняння фактичних показників різних вимірювальних приладів та оцінки відносної похибки. Для цього реалізовано наступний алгоритм:

1. Збір даних з інвертора, лічильника та зовнішнього еталонного приладу;
2. Уніфікація інтервалів – приведення всіх даних до однієї частоти (1 хвилина);
3. Розрахунок похибки:

$$\delta_i = \left| \frac{\text{Реталон}(i) - \text{Рінвертор}(i)}{\text{Реталон}(i)} \right| * 100\% \quad (3.1)$$

4. Агрегування результатів для всієї доби;
5. Аналіз відхилень, побудова графіка похибки упродовж доби;
6. Формування висновків про відповідність вимірювальної системи допустимим межам точності.

Цей підхід дозволяє не лише підтвердити якість вимірювань, але й оперативно виявити джерела нестабільності або помилки встановлення.

3.4 Практичні рекомендації для підвищення точності

На основі аналізу моделі та результатів верифікації сформульовано наступні практичні рекомендації:

1. Обирати прилади з класом точності не гірше 1.0 для струмових сенсорів і лічильників.
2. Синхронізувати час усіх пристроїв за допомогою протоколів NTP або GPS.
3. Регулярно виконувати калібрування сенсорів та лічильників згідно з паспортом виробника.
4. Встановлювати обладнання у термостабільних умовах, уникати перегріву або охолодження.
5. Використовувати екрановані дроти та заземлення для уникнення електромагнітних завад.
6. Реалізовувати програмні фільтри та алгоритми компенсації похибок у системах моніторингу.
7. Використовувати резервний незалежний канал вимірювання (наприклад, ручний тестер або вторинний лічильник).
8. Впровадити автоматизоване сповіщення про відхилення показників від допустимого діапазону.

3.5. Висновки

У цьому розділі було змодельовано вимірювальну систему сонячної електростанції потужністю 10 кВт у приватному секторі, визначено основні джерела похибок, виконано оцінку комбінованої невизначеності та проведено процедуру верифікації вимірювань.

Після аналізу результатів можна побачити, що якість вимірювань суттєво змінюється залежно від зовнішніх умов та характеристик устаткування, алгоритмів збору даних та правильності монтажу. Комбінована похибка вимірювання у реальних умовах становить до $\pm 4,8\%$, що може мати суттєве значення для обліку енергії.

Запропоновані практичні рекомендації дозволяють знизити невизначеність до рівня нижче 3%, що є прийнятним для побутових систем. Створена модель цілком придатна і для великих промислових станцій, зокрема в умовах, де потрібен віддалений контроль та збір даних.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи на тему «Розроблення методики оцінювання точності вимірювання енергетичних показників в системах відновлюваної енергетики» було вирішено актуальне науково-технічне завдання, що полягає у створенні ефективної, адаптивної та метрологічно обґрунтованої методики оцінювання точності вимірювань у сонячних електростанціях побутового рівня.

У процесі дослідження було проведено системний аналіз сучасних методів енергетичних вимірювань у фотоелектричних системах, зокрема особливостей вимірювання напруги, струму, потужності, енергії та кліматичних параметрів. Виявлено основні джерела похибок у СЕС, які класифіковано на апаратні, методичні та зовнішні, що дало змогу детально описати механізми їх виникнення та можливості усунення.

Також було ґрунтовано вибір методики оцінювання точності, яка базується на принципах ISO/IEC Guide 98-3 (GUM)[4], враховує всі основні фактори невизначеності та дає змогу обчислювати як стандартну, так і розширену невизначеність результатів вимірювання. Розроблено алгоритм оцінки комбінованої невизначеності з урахуванням типів похибок, похідних функцій чутливості та охоплюючих коефіцієнтів, що дозволяє формувати достовірні висновки щодо точності вимірювань у польових умовах та створено цифрову модель вимірювальної системи СЕС з типовими елементами: інвертором, трансформатором струму, smart-лічильником та сенсорами, з імітацією роботи протягом доби з інтервалом у 60 секунд, що охоплює 1440 точок вимірювання.

Виконано віртуальну верифікацію точності за допомогою порівняння даних різних каналів вимірювання, розрахунку добової похибки та побудови графіків відхилень. Встановлено, що сумарна невизначеність у побутових умовах може досягати $\pm 4,4\%$, однак із впровадженням рекомендацій (калібрування, фільтрація, захист, синхронізація) можливо знизити її до рівня $\leq 3\%$, що відповідає вимогам для побутових СЕС.

Практична цінність роботи полягає у тому, що запропоновану методику можна впровадити на рівні домогосподарств, малих комерційних СЕС та при підготовці техніко-економічних обґрунтувань. Вона не вимагає складного лабораторного обладнання, базується на відкритих стандартах і доступна для інтеграції з типовими SCADA та IoT-системами.

Результати роботи можуть бути використані:

- для оцінювання точності побутових вимірювальних комплексів;
- для впровадження у навчальний процес дисциплін з метрології, відновлюваної енергетики та інформаційно-вимірювальних технологій;
- як методологічна база для подальших досліджень у сфері підвищення точності енергетичних вимірювань.

Отже, бакалаврська робота повністю відповідає тематиці, завданням та методичним вимогам, демонструє здатність до самостійного науково-технічного аналізу, формування практичних рекомендацій і моделювання метрологічних процесів у контексті інженерії відновлюваної енергетики.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-VII від 05.06.2014 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>.
2. ДСТУ EN 50470-3:2014. Лічильники електричної енергії (постійного струму) для комерційного обліку. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2014. – 33 с.
3. ДСТУ ІЕС 62053-21:2010. Прилади для вимірювання активної електроенергії (класи точності 1 і 2). – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2010. – 27 с.
4. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
5. Fluke 1730/BASIC Three-Phase Electrical Energy Logger – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fluke-direct.com/product/fluke-1730-basic-three-phase-electrical-energy-logger>
6. SMA Solar Technology AG. Technical Information and Monitoring for PV Systems. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sma.de>.
7. Fronius International GmbH. Fronius Smart Meter Operating Manual. – 2020.
8. Chauvin Arnoux. PEL103 Power and Energy Logger – User Manual.
9. Victron Energy. VRM Portal Documentation. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.victronenergy.com>.
10. Huawei Technologies Co., Ltd. FusionSolar Smart PV Management System – Product Overview.
11. EN 61724:1998. Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis. – ІЕС.
12. Siemens AG. Measurement Uncertainty Guidelines for Energy Monitoring Systems. – Siemens White Paper, 2021.
13. ABB. Technical Application Papers No. 10: Current Transformers. – ABB SACE Division, 2018.
14. Victron Energy. Monitoring Best Practices and Integration Guide. – 2022.
15. Kipp & Zonen. SMP10 Smart Pyranometer – User Manual. – Kipp & Zonen B.V., 2021.

16. Carlo Gavazzi. EM340 Energy Analyzer – Datasheet. – Gavazzi Automation, 2020.
17. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 26 с.
18. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 16 с.
19. Закон України «Про енергетичну ефективність» № 1818-IX від 13.11.2021 р. – Відомості Верховної Ради України. – 2022, № 2.
20. EN ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use. – International Organization for Standardization, 2018.
21. Solar Analytics. Sharing your Fronius inverter with Solar Analytics [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://info.solaranalytics.com/s/article/Sharing-your-Fronius-inverter-with-Solar-Analytics>
22. Датчик температури PT1000, неекранований кабель, довжина 1 м [Електронний ресурс] // *Sentera.eu* — Режим доступу:
<https://www.sentera.eu/uk/відомостіпропродукт/датчик-температури-pt1000-неекранований-кабель-довжина-1-м/28520>