

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

---

Коваль Богуслав Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.317.7:006.91:621.311

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Метрологічне забезпечення систем обліку електроенергії в мережах з

двосторонніми потоками потужності

(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

Коваль Б.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник доцент кафедри ІВТ Чупа Володимир Михайлович

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

# 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

Доцент кафедри  
інформаційно-вимірювальних  
технологій та енергетичного  
менеджменту  
В.М. Чупа

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Ковалю Богуславу Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Метрологічне забезпечення систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності

керівник роботи Чупа Володимир Михайлович, доцент

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

затверджені наказом ІФНТУНГ від “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

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

Аналіз систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності

Метрологічна оцінка похибок вимірювання під час експлуатації мереж з двосторонніми потоками потужності

Розроблення удосконаленої схеми для мережі з двосторонніми потоками енергії

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>                 |                |                  |
| <i>Рецензент</i>            | <i>Доцент Миндюк В.Д.</i>                 |                |                  |
|                             |                                           |                |                  |
|                             |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання 27.01.2026

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Вступ                               | 14.03.2026 – 18.04.2026        |          |
| 2     | Розроблення 1 розділу               | 18.04.2026 – 30.04.2026        |          |
| 3     | Розроблення 2 розділу               | 30.04.2026 – 15.05.2026        |          |
| 4     | Розроблення 3 розділу               | 15.05.2026 – 28.06.2026        |          |
| 5     | Оформлення роботи                   | 28.06.2026 – 01.06.2026        |          |
|       |                                     |                                |          |
|       |                                     |                                |          |
|       |                                     |                                |          |
|       |                                     |                                |          |
|       |                                     |                                |          |
|       |                                     |                                |          |
|       |                                     |                                |          |

Студент

(підпис)

Коваль Б.В

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Чупа В.М

(прізвище та ініціали)

## Анотація

**Коваль Б.В. «Метрологічне забезпечення систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2026.**

Бакалаврська робота присвячена темі метрологічного забезпечення систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновка, переліку використаних джерел та додатка. Загальний обсяг – 52 сторінок, 2 рисунка. Кількість використаних джерел – 11 од.

У роботі розглянуті основні компоненти метрологічного забезпечення систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності шляхом аналізу інформації із різних наукових джерел. Були описані основні компоненти мереж з двосторонніми потоками електроенергії та фактори, що впливають на точність вимірювань електроенергії в умовах функціонування Smart Grid та відновлюваних джерел енергії.

У роботі було проведено аналіз сучасного стану розвитку електромереж та систем обліку електроенергії, принципи функціонування smart-лічильників та автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії. Досліджено основні метрологічні характеристики сучасних засобів обліку та виконано аналіз джерел похибок, що виникають під час вимірювання електроенергії.

У практичній частині роботи було оцінено точність лічильників різних класів точності. Також, було проаналізовано вплив гармонічних спотворень, відхилень напруги та реверсивних потоків потужності на результати вимірювань. На основі проведеного в цій роботі дослідження запропоновано удосконалену структуру системи обліку електроенергії, що передбачає

використання автоматизованої системи комерційного обліку, розумних лічильників та централізованого моніторингу параметрів мережі.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для підвищення точності комерційного обліку електроенергії в умовах розвитку розподіленої генерації та впровадження концепції Smart Grid.

**Ключові слова:** МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ, ДВОСТОРОННІ ПОТОКИ ПОТУЖНОСТІ, SMART-GRID, SMART-ЛІЧИЛЬНИК, АСКОВЕ, РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ.

## **Abstract**

**Koval, B.V. «Metrological implementation of the electricity metering systems in networks with two-way power flows». Diploma work of educational level – bachelor, in the form of a manuscript. Speciality – 152 “Metrology and information and measuring equipment”. – Ivano-Frankivsk, 2026.**

The bachelor's work is devoted to the topic of metrological implementation of the electricity metering systems in networks with two-way power flows. The work consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of sources used and an appendix. The total volume is 52 pages, 2 pictures. The number of sources used – 11 units.

The work analyzed the current state of development of power grids and electricity metering systems, the principles of operation of smart-meters and automated commercial electricity metering systems. The main metrological characteristics of modern metering devices were studied and the sources of errors that arise during electricity metering were analyzed.

In the practical part of the work, the accuracy of meters of different accuracy classes was assessed. Also, the influence of harmonic distortions, voltage deviations and reverse power flows on the measurement results was analyzed. Based on the research conducted in this work, an improved structure of the electricity metering system was proposed, which involves the use of an automated commercial metering system, smart meters and centralized monitoring of network parameters.

The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained results to increase the accuracy of commercial electricity metering in the context of the development of distributed generation and the implementation of the Smart Grid concept.

**Keywords:** METROLOGICAL PROVISION, ELECTRICITY, TWO-WAY POWER FLOWS, SMART-GRID, SMART-METER, ASKOE, DISTRIBUTED GENERATION, RENEWABLE ENERGY, MEASUREMENT ACCURACY.

## Зміст

|                                                                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Вступ.....</b>                                                                                                                                 | <b>10</b> |
| <b>Розділ 1: Теоретичні основи систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності.....</b>                                | <b>12</b> |
| 1.1 Сучасний стан розвитку енергетичних мереж.....                                                                                                | 12        |
| 1.2 Особливості двосторонніх потоків потужності в електричних мережах.....                                                                        | 16        |
| 1.3 Системи обліку електроенергії.....                                                                                                            | 20        |
| 1.4 Метрологічне та нормативне забезпечення систем обліку електроенергії.....                                                                     | 27        |
| <b>РОЗДІЛ 2. Аналіз проблем метрологічного забезпечення в умовах двосторонніх потоків потужності.....</b>                                         | <b>31</b> |
| 2.1 Аналіз впливу двосторонніх потоків потужності на точність обліку електроенергії.....                                                          | 31        |
| 2.2. Аналіз метрологічних характеристик smart-лічильників двосторонніми потоками потужності.....                                                  | 34        |
| <b>РОЗДІЛ 3. Оцінювання точності та метрологічне забезпечення систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності...37</b> | <b>37</b> |
| 3.1. Аналіз джерел похибок у системах обліку електроенергії.....                                                                                  | 37        |
| 3.2. Оцінювання точності smart-лічильників у різних режимах роботи мережі.....                                                                    | 40        |
| 3.3. Аналіз впливу показників якості електроенергії на результати вимірювань.....                                                                 | 44        |
| 3.4 Рекомендації щодо підвищення точності систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності.....                         | 45        |
| <b>Висновки.....</b>                                                                                                                              | <b>48</b> |



|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Список використаних джерел.....                                                                         | 50 |
| Додатки.....                                                                                            | 52 |
| Додаток А. Удосконалена схема для мережі з двосторонніми потоками з використанням сонячної станції..... | 52 |

## Вступ

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним впровадженням відновлюваних джерел енергії, включно з системами розподіленої (розмежованої) генерації та концепцією “Smart Grid”, який передбачає двосторонній обмін даними для керування розподілом та споживанням енергії. Стрімке зростання кількості сонячних і вітрових електростанцій, а також побутових та промислових споживачів, які досить часто є виробниками енергії, призводять до появи двосторонніх потоків потужності в електричних мережах.

Навідміну від традиційних систем електропостачання, де передача електроенергії здійснювалася в одному напрямку — від електростанції до споживача, сучасні мережі працюють у значно складніших режимах із можливістю реверсивного перетікання електроенергії. У таких умовах особливого значення набуває забезпечення точного, надійного та стабільного обліку електроенергії. Системи комерційного та технічного обліку повинні функціонувати при зміні напрямку потоку потужності, наявності гармонічних спотворень, коливань напруги та інших факторів, характерних для мереж із розподіленою генерацією. Водночас підвищуються вимоги до метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, їх класів точності, методів калібрування та повірки.

Метрологічне забезпечення систем обліку електроенергії є важливою складовою ефективного функціонування електроенергетичних систем. Воно забезпечує єдність та достовірність вимірювань, дозволяє мінімізувати похибки обліку, знижує втрати електроенергії та підвищує якість енергетичного менеджменту. Особливо актуальною ця проблема є для мереж із двосторонніми потоками потужності, де традиційні підходи до обліку електроенергії часто виявляються недостатньо ефективними та точними. З кожним днем, точність двосторонніх потоків стає все більш потрібним показником, бо дана система вже давно стала щоденністю для багатьох людей,

наприклад – для власників мережесих сонячних електростанцій, де будинок може споживати менше, чим генерує СЕС, тому частина енергії буде віддаватись в мережу, що створює двосторонній потік потужності.

## **Розділ 1: Теоретичні основи систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності**

### **1.1. Сучасний стан розвитку енергетичних мереж**

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується суттєвими змінами у структурі генерації, передачі та споживання електричної енергії. Традиційні централізовані системи електропостачання поступово трансформуються в інтелектуальні енергетичні мережі, здатні забезпечувати двосторонній обмін електроенергією та інформацією між усіма учасниками енергосистеми. Основними причинами таких суттєвих змін є активний розвиток відновлюваної енергетики, зростання вимог до енергоефективності, цифровізація енергетичного сектору та необхідність підвищення надійності електропостачання. Традиційна модель енергетичної системи базувалася на роботі великих централізованих електростанцій, які виробляли електроенергію та передавали її через магістральні й розподільчі мережі до кінцевих споживачів. У таких мережах потоки потужності мали односторонній характер — від джерела генерації до споживача. Системи обліку електроенергії, засоби релейного захисту та елементи керування мережами проєктувалися саме для такого режиму роботи. Однак останніми роками спостерігається стрімке збільшення кількості об'єктів розподіленої генерації, насамперед сонячних та вітрових електростанцій. Значна частина таких джерел підключається безпосередньо до розподільчих мереж низької та середньої напруги. Це призводить до зміни характеру потоків електричної енергії та виникнення реверсивних режимів роботи мереж. Енергетична доктрина змушена мінятисть, щоб прийняти новий ключовий напрямок розвитку енергетичної концепції “Smart Grid”. Під поняттям “Smart Grid”, що в перекладі з англійської мови означає “розумна мережа” інтелектуальну електричну мережу, яка забезпечує автоматизоване управління процесами генерації, передачі, розподілу та споживання електроенергії з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Основною особливістю таких мереж є можливість оперативного збору, обробки та передачі даних у режимі реального часу.

Інтелектуальні мережі дозволяють здійснювати автоматичний контроль режимів роботи енергосистеми, забезпечувати інтеграцію відновлюваних джерел енергії, підвищувати енергоефективність розподілення енергії, знижувати технологічні втрати, покращувати якість електроенергії, та реалізовувати двосторонній обмін електроенергією між споживачем і мережею.

Важливою складовою сучасних електричних мереж є розподілена генерація. До неї належать невеликі генеруючі установки, розташовані безпосередньо поблизу споживача або інтегровані в локальні мережі. Найпоширенішими джерелами розподіленої генерації є:

- сонячні електростанції;
- вітрові електростанції;
- біогазові установки;
- когенераційні установки.

В Україні та в ЄС, розвиток мереж з двосторонніми потоками прискорився через розвиток відновлюваних джерел енергії. Сонячна енергетика в Україні є першим по популярності в Україні відновлюваним джерелом енергії. Зараз активно розвиваються методи впровадження сонячних станцій в приватному та комерційному секторі. Розвиток розподіленої генерації сприяв появі нового типу учасника енергоринку – споживача енергії, який одночасно є виробником електроенергії. Наприклад, власник приватного будинку з сонячною електростанцією може не лише споживати електроенергію з мережі, а й передавати надлишок виробленої електроенергії назад до електромережі. У таких умовах потоки потужності в мережі стають двосторонніми. В одні періоди часу електроенергія надходить від мережі до споживача, а в інші — від споживача до мережі. Це ускладнює роботу систем електропостачання та висуває нові вимоги до систем обліку електроенергії й метрологічного забезпечення вимірювань. Двосторонні потоки потужності створюють низку технічних проблем, серед яких:

- складність балансування навантаження;
- зміна рівнів напруги в мережі;
- поява гармонічних спотворень;
- перевантаження окремих елементів мережі;
- необхідність модернізації систем релейного захисту;
- підвищені вимоги до точності обліку електроенергії.

Тим не менше, розподілена генерація має багато переваг. Розподілена генерація мінімізує втрати в передавальній мережі, створює більше точок управління мережею, що дозволяє зменшити залежність для окремих регіонів від певної розподільчої мережі. В рамках сталого розвитку, розподілена генерація зменшує викиди CO<sub>2</sub> завдяки підвищенню енергетичної ефективності і скорочення використання вугілля в якості палива для електростанцій. Порівняно з Німеччиною та окремими іншими європейськими країнами, зокрема Данією, де модернізація електроенергетичних систем (ЕЕС) відбувається досить активно, розвиток ЕЕС України протягом останніх двадцяти років залишався повільним, а їх структура зазнала незначних змін. Сучасний стан електроенергетики України характеризується значним рівнем зношеності обладнання, високими втратами електроенергії (до 10–15 %) та недостатнім рівнем надійності функціонування системи. [1]

З метою модернізації ЕЕС урядом реалізується низка заходів, серед яких:

- підвищення енергоефективності щонайменше на 40 %;
- впровадження енергозберігаючих ламп у системах освітлення;
- розвиток і широке застосування «розумних» систем обліку та вимірювання електроенергії в промисловому і побутовому секторах.

Особливо важливим стає використання сучасних цифрових засобів вимірювання та розумних лічильників, здатних виконувати двосторонній облік електроенергії. Такі лічильники дозволяють окремо реєструвати обсяги спожитої та відпущеної в мережу електроенергії, вести багатотарифний облік,

передавати дані дистанційно та забезпечувати інтеграцію з автоматизованими системами комерційного обліку електроенергії. Крім того, цифровізація енергетики супроводжується активним впровадженням автоматизованих систем керування та моніторингу. Використання сучасних комунікаційних технологій та хмарних сервісів дозволяє підвищити ефективність функціонування електричних мереж та оперативність реагування на аварійні режими роботи. У цих умовах особливого значення набуває забезпечення точності, надійності та достовірності вимірювань електроенергії, що робить метрологічне забезпечення однією з ключових складових ефективного функціонування сучасних електроенергетичних систем.

## 1.2. Особливості двосторонніх потоків потужності в електричних мережах

Традиційні електричні мережі проектувалися за принципом централізованого електропостачання, при якому електрична енергія вироблялася на великих електростанціях та передавалася до кінцевих споживачів через системи передачі та розподілу. У такій вертикалі напрямок потоку потужності був постійним і одностороннім – від джерела генерації до навантаження. Усі елементи енергосистеми, включаючи системи релейного захисту, автоматизації, диспетчерського управління та комерційного обліку електроенергії, розроблялися з урахуванням саме такого режиму роботи. Однак, розвиток сучасної енергетики, активне впровадження відновлюваних джерел енергії та технологій розподіленої генерації суттєво змінили принцип функціонування електричних мереж. У сучасних умовах значна кількість споживачів електроенергії одночасно виконує функції генераторів, передаючи надлишок виробленої електроенергії назад до мережі. Це призводить до виникнення двосторонніх потоків потужності, які є однією з ключових особливостей сучасних електроенергетичних систем.

Двосторонній потік потужності – це режим роботи електричної мережі, при якому передача електроенергії може здійснюватися в обох напрямках залежно від режиму генерації та споживання. У певний момент часу споживач може отримувати електроенергію з мережі, а в інший – передавати надлишкову електроенергію назад до системи розподілу. Найбільш поширеним прикладом виникнення двосторонніх потоків потужності є використання сонячних електростанцій у приватних домогосподарствах або на підприємствах.

Основними причинами виникнення двосторонніх потоків потужності є:

- розвиток розподіленої генерації;
- збільшення кількості відновлюваних джерел енергії;
- впровадження мікромереж та локальних енергосистем;
- поява активних споживачів електроенергії;



- розвиток систем накопичення енергії;
- цифровізація та автоматизація електричних мереж.

Особливе значення у формуванні двосторонніх потоків потужності мають відновлювані джерела енергії. Сонячні та вітрові електростанції характеризуються нестабільністю генерації, яка залежить від погодних умов, часу доби та сезонних факторів. У результаті обсяги виробленої електроенергії постійно змінюються, що ускладнює балансування енергосистеми та створює додаткові вимоги до систем керування й обліку електроенергії. У традиційних мережах розподільчі системи будувалися таким чином, щоб електроенергія надходила від підстанції до споживача. При появі локальних джерел генерації частина електроенергії починає передаватися у зворотному напрямку – від споживача до трансформаторної підстанції або навіть до магістральної мережі. Це призводить до зміни режимів роботи електричних мереж та появи нових технічних проблем.

Однією з основних проблем двосторонніх потоків потужності є складність підтримання стабільного рівня напруги в мережі. У разі значної локальної генерації може виникати підвищення напруги в окремих вузлах мережі, особливо в мережах низької напруги. Це пов'язано з тим, що розподільчі мережі первинно не проектувалися для передачі потужності у зворотному напрямку. Проблемою є і зміна режимів навантаження трансформаторів та ліній електропередачі. При реверсивних потоках потужності можливі перевантаження окремих елементів мережі, що призводить до прискореного зношування обладнання та зниження надійності електропостачання. Значний вплив двосторонні потоки потужності мають і на якість електроенергії. Інверторні системи сонячних та вітрових електростанцій можуть створювати гармонічні спотворення, коливання частоти та інші небажані явища. Погіршення показників якості електроенергії негативно впливає як на роботу електрообладнання споживачів, так і на точність систем обліку електроенергії. В умовах двосторонніх потоків потужності суттєво

зростає роль систем комерційного обліку електроенергії. Традиційні індукційні електролічильники не здатні забезпечувати коректний облік електроенергії при реверсивному напрямку потоку потужності. У деяких випадках вони можуть обертатися у зворотному напрямку або некоректно враховувати обсяги спожитої та відпущеної електроенергії. Для роботи в сучасних електричних мережах використовуються цифрові smart-лічильники, які забезпечують:

- двосторонній облік електроенергії;
- окремий облік споживання та генерації;
- вимірювання активної та реактивної енергії;
- дистанційне зчитування даних;
- багатотарифний облік;
- передачу інформації до автоматизованих систем обліку.

Smart-лічильники є важливою складовою автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Такі системи дозволяють у режимі реального часу контролювати режими споживання та генерації, здійснювати аналіз параметрів мережі та підвищувати ефективність енергетичного менеджменту. Умови двосторонніх потоків потужності висувають підвищені вимоги до метрологічного забезпечення систем обліку. Засоби вимірювальної техніки повинні забезпечувати високу точність вимірювань незалежно від напрямку потоку енергії, наявності гармонік, коливань напруги та інших дестабілізуючих факторів. Особливого значення набувають питання калібрування, повірки та оцінки похибок електролічильників і вимірювальних трансформаторів. Крім технічних проблем, двосторонні потоки потужності створюють і нові організаційно-економічні завдання. Необхідно забезпечити коректний розрахунок між споживачами, операторами систем розподілу та виробниками електроенергії. Для цього застосовуються механізми «зеленого» тарифу, Net-Billing та інші моделі, які потребують високої достовірності вимірювань.

Важливим напрямком розвитку сучасних електромереж є впровадження концепції Smart Grid, у межах якої двосторонні потоки потужності стають стандартним режимом роботи енергосистеми. Інтелектуальні мережі забезпечують автоматичне керування режимами генерації та споживання, інтеграцію систем накопичення енергії, адаптивне балансування навантаження та оптимізацію режимів роботи мережі. Перспективним рішенням для роботи в умовах двосторонніх потоків потужності є використання цифрових підстанцій, інтелектуальних вимірювальних систем та технологій Інтернету речей (IoT). Такі технології дозволяють здійснювати безперервний моніторинг параметрів електричної мережі та оперативно реагувати на зміну режимів роботи.

### 1.3 Системи обліку електроенергії

Системи обліку електроенергії є невід'ємною складовою сучасної електроенергетики та виконують важливу роль у забезпеченні контролю виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії. В умовах розвитку інтелектуальних електричних мереж, розподіленої генерації та двосторонніх потоків потужності значення систем обліку суттєво зростає. Саме достовірність вимірювань електроенергії визначає ефективність функціонування ринку електроенергії, правильність фінансових розрахунків між його учасниками та якість управління режимами електричних мереж. Сучасний розвиток енергетики характеризується переходом до концепції Smart Grid, що базується на використанні інтелектуальних технологій, цифровізації процесів управління та автоматизації електроенергетичних систем [2]. Поступово, вітова енергетика переходить до використання «інтелектуальних» технологій, серед яких важливе місце займають Smart Grid, Smart Metering, системи управління попитом (Demand Response) та системи накопичення енергії [2].

У сучасних умовах системи обліку повинні не лише вимірювати обсяги споживання електроенергії, але й підтримувати функції двостороннього обліку, аналізу параметрів якості електроенергії, дистанційного моніторингу та інтеграції з автоматизованими системами керування електромережами.

Системи обліку електроенергії виконують такі основні функції:

- вимірювання активної та реактивної електроенергії;
- контроль режимів електроспоживання;
- визначення втрат електроенергії;
- формування даних для комерційних розрахунків;
- моніторинг параметрів якості електроенергії;
- автоматичне накопичення та архівування інформації;
- передача даних до диспетчерських центрів;

- підтримка балансування енергосистеми.

Концепція Smart Grid передбачає створення інтелектуальної електромережі, яка здатна автоматично адаптуватися до змін режимів роботи, забезпечувати двосторонню взаємодію між виробниками та споживачами електроенергії, а також підтримувати інтеграцію відновлюваних джерел енергії [2]. Smart Grid є основою інноваційної модернізації електроенергетики та забезпечує скоординоване управління електричними мережами, електростанціями та споживачами за допомогою сучасних двосторонніх комунікацій. Smart Grid поєднує інформаційні технології, засоби комунікації, інтелектуальні вимірювальні системи, системи автоматизації, системи управління навантаженням, системи накопичення енергії, технології Smart Metering. У структурі Smart Grid особливу роль відіграють системи обліку електроенергії, оскільки саме вони забезпечують інформаційну основу для автоматизованого управління енергомережами.

З часом, внаслідок розвитку систем обліку електроенергії появилася так звана АСКОЕ (автоматизована система комерційного обліку електроенергії). Дана система є комплексом програмно-технічних засобів, призначена для автоматичного вимірювання, збору, передачі, обробки, зберігання та аналізу даних про обсяги споживання або генерації електроенергії.

Необхідність впровадження АСКОЕ зумовлена:

- розвитком ринку електроенергії;
- зростанням кількості споживачів;
- появою розподіленої генерації;
- необхідністю точного комерційного обліку;
- потребою дистанційного контролю електроспоживання.

Сучасні АСКОЕ дозволяють:

- автоматизувати процес обліку;
- мінімізувати людський фактор;

- зменшити комерційні втрати;
- підвищити точність вимірювань;
- здійснювати постійний моніторинг режимів роботи мережі;
- оперативно виявляти аварійні ситуації;
- забезпечувати балансування енергосистеми.

АСКОЕ мають базову багаторівневу структуру, що складається з трьох основних рівнів: нижній, середній, верхній [3]. Нижній рівень є базовим рівнем вимірювання параметрів електроенергії. До його складу входять:

- електrolічильники;
- smart-лічильники;
- трансформатори струму;
- трансформатори напруги;
- датчики параметрів мережі;

Основним завданням цього рівню є базові вимірювання активної та реактивної електроенергії, вимірювання струму та напруги, визначення частоти та фіксація напрямку потоку потужності. У сучасних Smart Grid мережах цей рівень базується переважно на smart-лічильниках та інтелектуальних датчиках. У лекції зазначено, що перспективні технічні засоби Smart Grid включають інтелектуальні датчики інформації, контрольно-вимірювальні засоби та інтелектуальні прилади обліку [2].

Середній рівень АСКОЕ відповідає за збір та передачу інформації від вимірювальних засобів до серверів обробки даних. До його складу входять наступні компоненти:

- модеми;
- маршрутизатори;
- контролери;
- комунікаційні шлюзи;

Для передачі інформації застосовуються оптоволоконні лінії зв'язку, Wi-Fi, GSM та радіоканали. Середній рівень забезпечує безперервний зв'язок між компонентами системи, автоматичне зчитування даних та передачу даних в реальному часі. Smart-Grid базується на інтегрованих системах інформаційного обміну та засобах комунікації, які забезпечують взаємодію між усіма елементами енергосистеми, тому даний рівень має величезний вплив на якість роботи двосторонніх мереж.

Верхній рівень АСКОЕ є центром обробки та аналізу інформації. До його складу входять:

- сервери баз даних;
- диспетчерські центри;
- SCADA-системи;
- програмне забезпечення;
- аналітичні модулі;

Верхній рівень забезпечує аналіз даних, прогнозування навантаження в мережі та інтеграцію з іншими енергетичними системами. У концепції Smart Grid верхній рівень АСКОЕ може взаємодіяти із системами автоматизації підстанцій, системами управління попитом, білінговими платформами та системами прогнозування генерації відновлюваних джерел енергії. Ця система може мати наступну структуру, що зображена на рисунку 1.1.

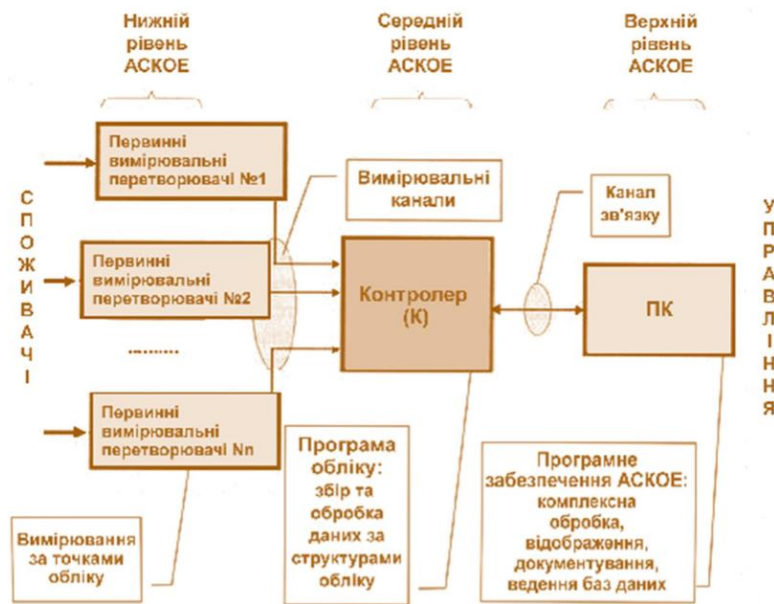


Рисунок 1.1 – Структура АСКОЕ

Ключовим приладом та складовою сучасних АСКОЕ є Smart-лічильники. Smart-лічильник — це цифровий інтелектуальний електролічильник, здатний не лише вимірювати обсяги споживання електроенергії, але й автоматично передавати інформацію до центрів обробки даних. На відміну від традиційних електролічильників, smart-лічильники забезпечують:

- двосторонній облік електроенергії;
- дистанційне зчитування показників;
- багатотарифний облік;
- контроль якості електроенергії;
- передачу інформації в режимі реального часу;
- виявлення несанкціонованого втручання;
- інтеграцію з інформаційними системами.

Інтелектуальні лічильники є одним із ключових елементів сучасних Smart Grid систем та необхідною складовою автоматизації електричних мереж.

Типовий smart-лічильник складається з:

- вимірювальних перетворювачів;



- аналого-цифрових перетворювачів;
- мікропроцесора;
- модуля пам'яті;
- комунікаційного модуля;
- інтерфейсів передачі даних;
- дисплея;
- системи захисту інформації.

Мікропроцесор smart-лічильника виконує:

- обчислення активної та реактивної енергії;
- визначення напрямку потоку потужності;
- аналіз параметрів мережі;
- архівування інформації;
- контроль режимів роботи.
- Основні функції smart-лічильників

Сучасні smart-лічильники здатні:

- здійснювати високоточний облік електроенергії;
- працювати в умовах двосторонніх потоків потужності;
- окремо враховувати спожиту та генеровану енергію;
- вимірювати параметри якості електроенергії;
- передавати дані дистанційно;
- підтримувати багатотарифні режими;
- виконувати автоматичну діагностику;
- взаємодіяти з системами Smart Grid.

Особливо важливою є функція визначення напрямку потоку потужності, оскільки в мережах із розподіленою генерацією напрямок передачі електроенергії може змінюватися багаторазово протягом доби.

У країнах ЄС активно впроваджуються smart-лічильники та системи Smart Metering. У лекції зазначається, що згідно з даними Єврокомісії понад 200 млн електролічильників було замінено на «інтелектуальні» системи обліку [2]. В Україні розвиток Smart Grid та Smart Metering також є одним із пріоритетних напрямків модернізації енергетики. У лекційних матеріалах зазначено, що впровадження Smart Grid технологій дозволить зменшити втрати електроенергії, покращити спостережуваність мережі та забезпечити прозорість для кінцевих споживачів. Таким чином, сучасні системи обліку електроенергії є складними інформаційно-вимірювальними комплексами, які забезпечують автоматизований контроль режимів електроспоживання та генерації. Особливе значення в умовах розвитку Smart Grid мають АСКОВЕ, Smart Metering та smart-лічильники, які забезпечують двосторонній облік електроенергії, інтеграцію розподіленої генерації та підвищення ефективності функціонування електроенергетичних систем.

#### 1.4. Метрологічне та нормативне забезпечення систем обліку електроенергії

У сучасних електроенергетичних системах точність вимірювань електричної енергії має надзвичайно важливе значення. В умовах розвитку Smart Grid, інтеграції відновлюваних джерел енергії та появи двосторонніх потоків потужності вимоги до систем обліку електроенергії суттєво зростають. Саме тому особливу роль відіграє метрологічне забезпечення систем обліку, яке гарантує єдність, точність та надійність вимірювань. Метрологічне забезпечення є важливою складовою функціонування автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії, smart-лічильників та інтелектуальних енергомереж. Від якості метрологічного забезпечення залежить правильність комерційних розрахунків, ефективність балансування енергосистеми, рівень втрат електроенергії та стабільність функціонування ринку електричної енергії. Основною метою метрологічного забезпечення є:

- забезпечення достовірності результатів вимірювань;
- досягнення необхідної точності обліку;
- зменшення похибок вимірювання;
- забезпечення єдності вимірювань;
- контроль відповідності засобів вимірювальної техніки встановленим вимогам.

У цій сфері метрологічне забезпечення має особливе значення, оскільки навіть незначні похибки вимірювання можуть призводити до суттєвих економічних втрат та проблем зі сторони енергоменеджменту. В умовах великої кількості споживачів та значних обсягів переданої електроенергії похибки систем обліку безпосередньо впливають на правильність фінансових розрахунків між учасниками ринку електроенергії. Особливо актуальним метрологічне забезпечення є для мереж із двосторонніми потоками потужності. У таких мережах напрямок передачі електроенергії може змінюватися залежно від режиму роботи локальних джерел генерації та навантаження. Це створює

додаткові вимоги до точності вимірювань та стабільності роботи засобів обліку. Основними складовими метрологічного забезпечення є:

- нормативна база;
- засоби вимірювальної техніки;
- методики вимірювання;
- повірка та калібрування;
- контроль метрологічних характеристик;
- оцінка похибок вимірювання.

У сучасних Smart Grid системах метрологічне забезпечення охоплює не лише окремі електrolічильники, але й цілі вимірювальні комплекси, до складу яких входять smart-лічильники, датчики, канали передачі даних та автоматизовані системи обробки інформації. У мережах із розподіленою генерацією та двосторонніми потоками потужності системи обліку працюють у значно складніших умовах порівняно з традиційними електромережами. Особливостями таких мереж є змінний напрямок потоку потужності, що є основною проблемою в точності вимірювань, наявність локальних джерел генерації, нестабільність режимів роботи та необхідність двостороннього обліку електроенергії. У таких умовах традиційні індукційні електrolічильники часто не забезпечують необхідної точності вимірювань. Саме тому в сучасних мережах використовуються smart-лічильники та автоматизовані системи обліку.

Всі вимірювання та процеси, що пов'язані з енергетикою регулюються низкою законодавчих та нормативних документів. Функціонування сучасних систем обліку електроенергії неможливе без чіткого нормативно-правового регулювання. Умови розвитку Smart Grid, інтеграції відновлюваних джерел енергії та появи двосторонніх потоків потужності потребують встановлення єдиних вимог до точності вимірювань, організації комерційного обліку, передачі даних та метрологічного контролю засобів вимірювальної техніки. Нормативно-правова база у сфері обліку електроенергії визначає вимоги до

систем обліку, порядок організації комерційного обліку, правила використання електролічильників, вимоги до точності вимірювань, порядок повірки та калібрування, вимоги до автоматизованих систем обліку тощо. Особливого значення нормативне регулювання набуває в умовах сучасних електромереж із двосторонніми потоками потужності, де споживачі можуть одночасно виступати виробниками електроенергії. Одним із основних нормативних документів у сфері метрологічного забезпечення є Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [4]. Цей закон визначає правові основи забезпечення єдності вимірювань в Україні. Основними завданнями закону є:

- забезпечення достовірності результатів вимірювань;
- захист інтересів держави та споживачів;
- встановлення вимог до засобів вимірювальної техніки;
- регулювання метрологічного контролю;
- визначення правил повірки та калібрування.

Закон регламентує використання засобів вимірювальної техніки у сфері законодавчо регульованої метрології, до якої належать і системи комерційного обліку електроенергії.

Відповідно до закону електролічильники повинні проходити періодичну повірку через встановлений міжповірочний інтервал, який залежить від типу та класу точності приладу. Для сучасних електронних та smart-лічильників міжповірочний інтервал зазвичай становить від 6 до 16 років. Особливе значення закон має для smart-лічильників та автоматизованих систем обліку, оскільки сучасні цифрові системи вимірювання потребують підвищених вимог до захисту інформації, точності та стабільності роботи.

Також, важливим нормативним документом є Закон України «Про ринок електричної енергії» [5], який визначає принципи функціонування сучасного ринку електроенергії. Закон регламентує взаємодію учасників ринку, особливо в двосторонніх мережах, де є багато сторін, що споживають та виробляють

енергію. Це потрібно як і споживачу, так і державі, яка визначає правила комерційного обліку, встановлює вимоги до операторів систем розподілу, регулює діяльність постачальників електроенергії та визначає права та обов'язки споживачів. Однією з ключових особливостей закону є впровадження принципів лібералізованого ринку електроенергії, у межах якого особливу роль відіграє точний комерційний облік. У сучасних умовах закон враховує впровадження та використання smart-лічильників з інтеграцією розподіленої генерації. Велике значення має підтримка механізмів «зеленого» тарифу та net billing, які неможливі без високоточного двостороннього обліку електроенергії.

## РОЗДІЛ 2. Аналіз проблем метрологічного забезпечення в умовах двосторонніх потоків потужності

### 2.1. Аналіз впливу двосторонніх потоків потужності на точність обліку електроенергії

Сучасні електричні мережі все частіше функціонують в умовах двосторонніх потоків потужності, що зумовлено активним розвитком відновлюваної енергетики, розподіленої генерації та концепції Smart Grid. На відміну від традиційних електромереж, у яких електроенергія передавалася виключно від централізованих електростанцій до споживачів, сучасні мережі характеризуються змінним напрямком потоку потужності. Це створює нові технічні та метрологічні проблеми, які безпосередньо впливають на точність систем обліку електроенергії. Однією з головних особливостей мереж із двосторонніми потоками потужності є можливість передачі електроенергії як від мережі до споживача, так і у зворотному напрямку — від локального джерела генерації до електромережі. Найбільш поширеним прикладом є приватні сонячні електростанції, які в денний час можуть генерувати більше електроенергії, ніж споживає об'єкт.

Активна потужність електричної мережі визначається формулою:

$$P = U * I * \cos\varphi \quad (2.1)$$

де:

- $P$  – активна потужність, Вт;
- $U$  – напруга, В;
- $I$  – сила струму, А;
- $\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності.

При традиційному режимі роботи потужність має додатне значення, електроенергія передається від джерела генерації до споживача. Однак у мережах із розподіленою генерацією можливий реверсивний режим роботи.

Якщо потужність локальної генерації перевищує потужність навантаження, частина електроенергії передається назад до мережі. Наприклад, якщо сонячна електростанція генерує 5 кВт, а навантаження будинку становить 3 кВт, тоді надлишок потужності:

$$P_{\text{реверс}} = P_{\text{ген}} - P_{\text{нав}} \quad (2.2)$$

де:

- $P_{\text{реверс}}$  – реверсивний потік потужності;
- $P_{\text{ген}}$  – потужність генерації;
- $P_{\text{нав}}$  – потужність навантаження.

Така спрощена формула показує, що при цій ситуації, 2 кВт електроенергії передаватимуться від споживача назад до електромережі. Саме реверсивні режими роботи створюють основні труднощі для систем обліку електроенергії. Традиційні індукційні електролічильники проектувалися для роботи в умовах одностороннього потоку потужності. При зміні напрямку передачі електроенергії такі лічильники можуть працювати нестабільно, обертатись в зворотному напрямку та збільшувати похибку вимірювання. Через це, з'являється ще одна проблема – точність вимірювання зменшується, що несе фінансові втрати та зменшення контролю обліку електроенергії.

Також, у сучасних електромережах однією з найбільших проблем є наявність гармонічних спотворень. Гармоніки виникають внаслідок роботи інверторів сонячних електростанцій, частотних перетворювачів, імпульсних джерел живлення та іншого електронного обладнання. У реальних умовах форма струму та напруги відрізняється від ідеальної синусоїди, що негативно впливає на точність систем обліку електроенергії. Підвищений рівень гармонік призводить до додаткових втрат електроенергії, нагрівання обладнання, збільшення похибок вимірювання та погіршення якості електроенергії. Контроль гармонічних спотворень є важливою складовою сучасних систем моніторингу якості електроенергії.



Важливим фактором є коефіцієнт потужності. У мережах з двосторонніми значення коефіцієнта потужності може суттєво змінюватися залежно від режимів роботи інверторних систем. Низьке значення коефіцієнта потужності призводить до збільшення струмів у мережі, додаткових втрат електроенергії та зростання навантаження на електрообладнання. Необхідно розуміти, що у таких мережах зростає вплив нестабільності напруги. Якщо умовна сонячна електростанція генерує багато енергії, напруга в локальних мережах може перевищувати допустимі межі. Через це, необхідний підвищений контроль відносного відхилення напруги. Це виконується завдяки наступній формулі:

$$\Delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \quad (2.3)$$

де:

- $\Delta U$  – відхилення напруги;
- $U$  – фактична напруга;
- $U_n$  – номінальна напруга.

У сучасних Smart Grid системах традиційні індукційні лічильники поступово замінюються smart-лічильниками. Smart-лічильники здатні здійснювати двосторонній облік електроенергії, визначати напрямок потоку потужності, контролювати параметри якості електроенергії, виконувати дистанційне зчитування показників та інтегруватися з АСКОЕ і Smart Grid. Застосування smart-лічильників дозволяє суттєво підвищити точність систем обліку електроенергії в умовах реверсивних потоків потужності та нестабільних режимів роботи електромереж.

## 2.2. Аналіз метрологічних характеристик smart-лічильників у мережах із двосторонніми потоками потужності

Розвиток концепції Smart Grid та активне впровадження розподіленої генерації призвели до суттєвого зростання вимог до систем обліку електроенергії. У сучасних електричних мережах традиційні індукційні електролічильники поступово замінюються інтелектуальними засобами обліку, які забезпечують не лише вимірювання спожитої електроенергії, а й виконують функції моніторингу параметрів мережі, аналізу якості електроенергії та дистанційного обміну даними. Саме тому smart-лічильники сьогодні розглядаються як один із ключових елементів інтелектуальних енергетичних систем. На відміну від традиційних засобів обліку, smart-лічильники здатні функціонувати в умовах двосторонніх потоків потужності, які виникають при роботі сонячних електростанцій, вітроенергетичних установок та інших джерел розподіленої генерації. У таких умовах напрямок передачі електроенергії може неодноразово змінюватися протягом доби залежно від співвідношення між рівнем генерації та споживання. Це створює додаткові вимоги до точності вимірювань та стабільності роботи засобів обліку.

Однією з найважливіших метрологічних характеристик smart-лічильника є його клас точності. Даний параметр визначає максимально допустиме відхилення результатів вимірювання від еталонного значення та безпосередньо впливає на достовірність комерційного обліку електроенергії. У сучасних системах обліку найчастіше застосовуються лічильники класів точності 1.0, 0.5 та 0.2. Використання таких приладів дозволяє забезпечити високу достовірність вимірювань навіть в умовах нестабільних режимів роботи електромережі. Найосновніший критерій оцінки засобів вимірювання, в тому числі і розумних лічильників є відносна похибка, що визначається наступною формулою:

$$\delta = \frac{W_m - W_{ref}}{W_{ref}} * 100\% \quad (2.4)$$

де:

- $W_m$  – значення електроенергії, виміряне лічильником;
- $W_{ref}$  – еталонне значення.

Показник еталонного значення використовується під час випробувань, повірки та оцінювання відповідності лічильників встановленим метрологічним вимогам. Особливого значення в сучасних електромережах набуває питання впливу гармонічних спотворень на точність вимірювань. Поява великої кількості силової електроніки, інверторів сонячних електростанцій та частотних перетворювачів призводить до відхилення форми струму та напруги від ідеальної синусоїди. Внаслідок цього зростає ймовірність виникнення додаткових похибок обліку, особливо у випадку використання застарілих засобів вимірювання. Контроль гармонічних спотворень сьогодні є однією з основних функцій сучасних систем моніторингу якості електроенергії. На відміну від традиційних електролічильників, сучасні smart-лічильники здатні не лише виконувати облік електроенергії, але й реєструвати параметри якості електроенергії, включаючи відхилення напруги, коефіцієнт потужності, наявність гармонік та інші показники. Завдяки цьому оператори систем розподілу отримують можливість оперативно контролювати режими роботи мережі та виявляти відхилення, які можуть впливати на точність вимірювань.

Ще одним важливим фактором є вплив реверсивних потоків потужності. Традиційні індукційні лічильники створювалися для роботи в умовах односпрямованого потоку енергії. При зміні напрямку передачі електроенергії такі прилади можуть працювати некоректно, що призводить до спотворення результатів обліку. Smart-лічильники, навпаки, спеціально адаптовані для роботи в умовах двостороннього обміну електроенергією. Вони здатні окремо враховувати обсяги спожитої та відпущеної електроенергії, що є необхідною умовою функціонування сучасних механізмів net metering та net billing. Важливу роль у забезпеченні точності вимірювань відіграє також контроль

параметрів напруги, бо у мережах з високою концентрацією сонячних та вітрових електростанцій нерідко спостерігається підвищення рівня напруги в години максимальної генерації. Такі відхилення можуть негативно впливати як на роботу електрообладнання, так і на точність вимірювань. Сучасні smart-лічильники здатні фіксувати подібні події та передавати відповідну інформацію до автоматизованих систем моніторингу. Додатковою перевагою smart-лічильників є можливість їх інтеграції до складу АСКОЕ. У цьому випадку результати вимірювань автоматично передаються до центрального сервера, де здійснюється їх обробка, архівування та подальший аналіз. Використання централізованих систем моніторингу дозволяє підвищити оперативність контролю параметрів електромережі, спростити процес збору інформації та забезпечити більш ефективне управління енергосистемою.

### **РОЗДІЛ 3. Оцінювання точності та метрологічне забезпечення систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності**

#### **3.1. Аналіз джерел похибок у системах обліку електроенергії**

Однією з найважливіших умов ефективного функціонування сучасних систем обліку електроенергії є забезпечення високої точності вимірювань. Через те, що в системах електропостачання, зокрема з двосторонніми потоками потужності, є дуже багато компонентів (споживачі, генератори енергії в великих кількостях), навіть одне погане вимірювання спричиняє неточності у всьому ланцюжку. В умовах розвитку Smart Grid, розподіленої генерації та двосторонніх потоків потужності вимоги до метрологічних характеристик систем обліку суттєво зростають. Це пов'язано з тим, що навіть незначні похибки вимірювання можуть призводити до спотворення результатів комерційного обліку та фінансових розрахунків між учасниками ринку електроенергії. У сучасних системах обліку результат вимірювання залежить не лише від характеристик електролічильника, а й від роботи всієї вимірювальної системи загалом. До складу вузла обліку можуть входити електролічильники, трансформатори струму, трансформатори напруги, канали передачі даних, а також автоматизовані системи збору інформації. Кожен із цих елементів вносить власну похибку, що впливає на достовірність кінцевого результату вимірювання.

Одним із головних джерел похибки є сам електролічильник. У сучасних системах Smart Grid дедалі частіше використовуються багатофункціональні цифрові прилади обліку, які забезпечують двосторонній облік електроенергії та контроль параметрів якості електроенергії. Як приклад можна розглянути трифазний smart-лічильник Landys+Gyr E650[7], який використовується в промислових та комерційних системах обліку.



Рисунок 3.1 – зовнішній вигляд розумного електролічильника E650 від виробника Landys+Gyr [7]

Даний прилад підтримує чотириквadrантне вимірювання електроенергії та має клас точності 0.5S для активної енергії. Використовуючи формулу 2.4, можна оцінити відносну похибку приладу. Наприклад, якщо фактичне значення електроенергії становить 1000 кВт·год, то для лічильника класу точності 1,0 максимально допустиме відхилення може становити:

$$\Delta W = 1000 * \frac{1}{100} = 10 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Відповідно, для лічильника цієї ж моделі, але з точністю 0,5 відхилення становитиме:

$$\Delta W = 1000 * \frac{0,5}{100} = 5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, використання приладів вищого класу точності дозволяє суттєво зменшити похибку комерційного обліку. Окрім похибки самого лічильника, важливим джерелом неточностей є вимірювальні трансформатори струму та

напруги. У високовольтних і промислових мережах пряме підключення електролічильників часто неможливе через великі значення струмів і напруг. У таких випадках використовуються трансформатори струму та напруги, які також мають власні метрологічні характеристики.

Особливого значення в мережах із двосторонніми потоками потужності набуває вплив гармонічних спотворень. Джерелами гармонік є інвертори сонячних електростанцій, зарядні станції електромобілів, частотні перетворювачі та інші пристрої силової електроніки. У результаті форма струму та напруги відхиляється від ідеальної синусоїди, що негативно впливає на точність вимірювання. Для контролю якості електроенергії та гармонічних спотворень у сучасних енергосистемах використовуються спеціалізовані аналізатори якості електроенергії. На точність вимірювань також впливають відхилення напруги від номінального значення. В умовах високої концентрації сонячних електростанцій у локальних мережах нерідко виникають перенапруги, які можуть впливати як на роботу електрообладнання, так і на характеристики засобів вимірювання. Крім технічних факторів, джерелом похибок можуть бути помилки передачі та обробки даних. У сучасних АСКОЕ результати вимірювань передаються каналами зв'язку до центральних серверів. При порушенні синхронізації часу, втраті пакетів даних або програмних збоях можливе виникнення додаткових похибок обліку. Таким чином, на точність систем обліку електроенергії в мережах із двосторонніми потоками потужності впливає велика кількість факторів. Основними джерелами похибок є метрологічні характеристики електролічильників, похибки вимірювальних трансформаторів, гармонічні спотворення, нестабільність напруги, реверсивні режими роботи мережі та особливості передачі даних у складі АСКОЕ. У сучасних умовах забезпечення високої точності вимірювань можливе лише за умови використання smart-лічильників високого класу точності, сучасних систем моніторингу якості електроенергії та автоматизованих систем обліку.

### 3.2. Оцінювання точності smart-лічильників у різних режимах роботи мережі

Одним із ключових завдань метрологічного забезпечення систем обліку електроенергії є забезпечення необхідної точності вимірювань у різних режимах роботи електричної мережі. Особливої актуальності це питання набуває в умовах широкого використання відновлюваних джерел енергії та появи двосторонніх потоків потужності. У таких мережах електролічильники повинні забезпечувати однаково високу точність як під час споживання електроенергії з мережі, так і під час передачі надлишкової електроенергії від споживача до мережі. Для проведення аналізу розгляну три реальні класи точності електролічильників, які широко використовуються в сучасних системах обліку:

- клас точності 1.0;
- клас точності 0.5;
- клас точності 0.2.

Як приклад сучасного smart-лічильника можна розглянути Landis+Gyr E650, який підтримує двосторонній облік електроенергії та має клас точності 0.5 для активної енергії. Для оцінювання впливу класу точності припустимо, що за розрахунковий період споживач використав 1000 кВт·год електроенергії. Максимально допустиме відхилення результатів вимірювання визначається за формулою:

$$\Delta W = W * \frac{\delta}{100} \quad (3.1)$$

де:

$W$  – фактичний обсяг електроенергії;

$\delta$  – клас точності лічильника.

Для лічильника класу точності 1.0 отримую:



$$\Delta W = 1000 * \frac{1}{100} = 10 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, результат вимірювання може перебувати в межах від 990 до 1010 кВт·год.

Для лічильника класу 0.5:

$$\Delta W = 1000 * \frac{0,5}{100} = 5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

У цьому випадку виміряне значення перебуватиме в межах від 995 до 1005 кВт·год.

Для високоточного лічильника класу 0.2:

$$\Delta W = 1000 * \frac{0,2}{100} = 2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Результат вимірювання знаходитиметься в діапазоні від 998 до 1002 кВт·год.

Отримані результати показують, що використання сучасних високоточних smart-лічильників дозволяє суттєво зменшити невизначеність результатів вимірювання. Особливо це важливо для комерційних вузлів обліку та об'єктів із власною генерацією, де навіть незначні похибки можуть призводити до фінансових втрат. Розглянемо практичний приклад для мережі з двостороннім потоком потужності. Припустимо, що приватна сонячна електростанція за добу виробила 30 кВт·год електроенергії, з яких 18 кВт·год було використано для власних потреб, а 12 кВт·год передано до мережі. У випадку використання застарілого індукційного лічильника можливі помилки обліку при зміні напрямку потоку енергії. Натомість сучасний smart-лічильник окремо реєструє обсяг спожитої та відпущеної електроенергії, що дозволяє забезпечити коректний двосторонній облік. Додатковою перевагою smart-лічильників є можливість контролю параметрів якості електроенергії. Проведений аналіз показує, що підвищення класу точності smart-лічильників безпосередньо

впливає на достовірність комерційного обліку електроенергії. В умовах двосторонніх потоків потужності найбільш ефективним рішенням є використання цифрових smart-лічильників класу точності 0.5 та 0.2, які забезпечують коректний двосторонній облік електроенергії, контроль параметрів мережі та інтеграцію з АСКОЕ.

### 3.3. Аналіз впливу показників якості електроенергії на результати вимірювань

Точність систем обліку електроенергії залежить не лише від метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, але й від параметрів електричної мережі, в якій вони експлуатуються. В умовах широкого впровадження відновлюваних джерел енергії та силової електроніки особливого значення набувають показники якості електроенергії. До основних факторів, які можуть впливати на результати вимірювань, належать гармонічні спотворення, відхилення напруги та зміна коефіцієнта потужності. У сучасних мережах значна частина навантаження представлена нелінійними споживачами. До них належать інвертори сонячних електростанцій, зарядні станції електромобілів, частотні перетворювачі, комп'ютерна техніка та імпульсні джерела живлення. Робота такого обладнання призводить до появи гармонічних складових струму та напруги, які викликають додаткові похибки вимірювання. Для оцінювання рівня гармонічних спотворень використовується коефіцієнт THD (Total Harmonic Distortion), який характеризує співвідношення між вищими гармоніками та основною гармонікою сигналу. Згідно з рекомендаціями IEEE 519 [9] та вимогами щодо якості електроенергії, для більшості низьковольтних мереж значення THD не повинно бути більше 5 %. Для демонстрації впливу гармонік розгляну три режими роботи мережі: нормальний режим (2% THD), помірне спотворення (5% THD), високе спотворення (10% THD). При THD до 2 % сучасні smart-лічильники класу точності 0.5S практично не зазнають додаткових похибок. При збільшенні THD до 5 % починає спостерігатися вплив гармонічних складових на результати вимірювань, особливо у випадку значної частки інверторного обладнання. При THD понад 10 % можливе помітне погіршення точності вимірювання навіть для сучасних цифрових приладів обліку.

Другим важливим фактором є відхилення напруги від номінального значення. Відповідно до вимог ДСТУ EN 50160 [10] напруга в мережі низької напруги повинна знаходитися в межах  $\pm 10\%$  від номінального значення. Для мережі 230 В допустимий діапазон становить від 207 до 253 В. У мережах із

високою концентрацією сонячних електростанцій нерідко спостерігається підвищення напруги в години максимальної генерації. Наприклад, якщо локальна мережа працює при напрузі 248 В, відхилення від номінального значення становить:

$$\Delta U = \frac{248 - 230}{230} * 100 = 7,8\%$$

Таке значення ще не перевищує допустимі межі, тривала робота в подібному режимі може негативно впливати на точність вимірювань та ресурс електрообладнання. Ще одним важливим показником є коефіцієнт потужності. У традиційних мережах значення  $\cos\varphi$  зазвичай знаходиться в межах від 0.95 до 1.0. Однак при використанні інверторних систем та великої кількості нелінійного навантаження цей показник може знижуватися.

Нехай активна потужність становить 5 кВт, а повна потужність — 5.5 кВА. В такому випадку:

$$\cos\varphi = \frac{5}{5,5} = 0,91$$

Зниження коефіцієнта потужності призводить до збільшення струму в мережі, що викликає додаткові втрати та може впливати на результати вимірювання електроенергії.

Таким чином можна зробити висновок, що найбільший вплив на результати вимірювань у мережах із двосторонніми потоками потужності мають реверсивні режими роботи, клас точності засобів обліку та гармонічні спотворення. Саме тому сучасні системи обліку повинні комплектуватися smart-лічильниками високого класу точності та засобами моніторингу якості електроенергії. Використання АСКОЕ та аналізаторів якості електроенергії дозволяє своєчасно виявляти фактори, що впливають на точність вимірювань, та забезпечувати достовірність результатів комерційного обліку електроенергії.

### 3.4. Рекомендації щодо підвищення точності систем обліку електроенергії в мережах з двосторонніми потоками потужності

Проведене дослідження показало, що точність систем обліку електроенергії в мережах із двосторонніми потоками потужності залежить від комплексу технічних та метрологічних факторів. Найбільший вплив на достовірність результатів вимірювань мають клас точності електrolічильників, похибки вимірювальних трансформаторів, гармонічні спотворення, відхилення напруги та особливості роботи мереж із розподіленою генерацією. У зв'язку з цим для підвищення точності обліку необхідно впроваджувати комплекс заходів, спрямованих на вдосконалення як окремих засобів вимірювання, так і системи обліку в цілому. Одним із найбільш ефективних способів підвищення точності є заміна застарілих індукційних електrolічильників сучасними smart-лічильниками. У традиційних системах обліку індукційні лічильники розраховувалися на роботу в умовах односпрямованого потоку потужності та не враховували можливість передачі електроенергії від споживача до мережі. При підключенні сонячних електростанцій це може призводити до неправильного обліку електроенергії або навіть до реверсивного обертання диска лічильника. На відміну від них, сучасні smart-лічильники забезпечують чотириквadrантний облік енергії та окремо реєструють обсяги спожитої та відпущеної електроенергії. Як приклад можна розглянути лічильник Landis+Gyr E650, який використовується в промислових вузлах обліку та підтримує вимірювання активної і реактивної енергії в обох напрямках потоку потужності. Для побутових та малих комерційних об'єктів широко використовуються лічильники серії NIK 2303, які також підтримують двосторонній облік та інтеграцію з АСКОЕ. Використання таких приладів дозволяє усунути похибки, пов'язані зі зміною напрямку потоку електроенергії.

Особливу увагу необхідно приділяти вибору класу точності засобів вимірювальної техніки. У підрозділі 3.2 було показано, що для обліку 1000 кВт·год похибка лічильника класу 1.0 може досягати 10 кВт·год, тоді як для

класу 0.5S вона зменшується до 5 кВт·год, а для класу 0.2S – до 2 кВт·год. Якщо розглядати сонячну електростанцію потужністю 30 кВт, яка за рік відпускає до мережі близько 35 000 кВт·год електроенергії, то потенційна різниця між похибкою лічильника класу 1.0 та класу 0.2S може становити сотні кіловат-годин на рік. Саме тому для комерційних вузлів обліку доцільно використовувати лічильники класу точності не нижче 0.5S, а для великих генеруючих установок – 0.2S.

Ще одним важливим напрямком є вдосконалення вузлів обліку, які використовують вимірювальні трансформатори струму та напруги. На практиці нерідко трапляються ситуації, коли високоточний лічильник працює спільно з трансформаторами нижчого класу точності. У такому випадку переваги дорогого лічильника практично нівелюються. Наприклад, застосування лічильника класу 0.2S разом із трансформатором струму класу 1.0 призводить до того, що сумарна точність вузла обліку визначатиметься саме характеристиками трансформатора. Тому під час модернізації системи обліку необхідно розглядати вузол обліку як єдиний вимірювальний комплекс. Значний вплив на результати вимірювань у сучасних мережах мають гармонічні спотворення. Джерелами гармонік є інвертори сонячних електростанцій, зарядні станції електромобілів, частотні перетворювачі та інші пристрої силової електроніки. При високому рівні гармонічних спотворень виникають додаткові втрати електроенергії, нагрівання обладнання та збільшення похибок вимірювання. Для зменшення впливу гармонік доцільно використовувати інвертори з низьким рівнем THD, а також застосовувати активні та пасивні фільтри гармонік. Сучасні мережеві інвертори забезпечують коефіцієнт гармонічних спотворень струму менше 3 %, що відповідає сучасним вимогам до якості електроенергії. Використання такого обладнання дозволяє зменшити вплив гармонік не лише на систему обліку, але й на всю електромережу.

Важливим елементом підвищення точності є постійний контроль показників якості електроенергії. Для цього доцільно використовувати

аналізатори якості електроенергії. Використання таких засобів дає можливість оперативно виявляти причини виникнення додаткових похибок вимірювання. Окрему увагу необхідно приділяти питанням метрологічного контролю. Навіть найсучасніший smart-лічильник з часом може змінювати свої метрологічні характеристики під впливом температури, старіння електронних компонентів та умов експлуатації. Саме тому важливим елементом метрологічного забезпечення є своєчасне проведення періодичної повірки. Регулярна повірка дозволяє підтвердити відповідність приладу встановленому класу точності та своєчасно виявити відхилення метрологічних характеристик.

Значний потенціал для підвищення точності обліку має впровадження автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії. Використання АСКОЕ дозволяє автоматизувати процес збору та передачі вимірювальної інформації, мінімізувати вплив людського фактора та забезпечити постійний моніторинг параметрів мережі. Крім того, сучасні АСКОЕ здатні автоматично виявляти аномальні режими роботи, втрати електроенергії та можливі несправності засобів вимірювання. На основі проведеного дослідження можна запропонувати удосконалену структуру системи обліку для мереж із двосторонніми потоками потужності. Приклад удосконаленої структури для мережі з двосторонніми потоками з використанням сонячної станції буде подано в додатку А. Така система повинна включати smart-лічильник класу точності 0.5S або 0.2S, вимірювальні трансформатори відповідного класу точності, засоби контролю якості електроенергії, автоматизовану систему збору даних та механізми регулярного метрологічного контролю. Додатково доцільно передбачити використання інверторів із низьким рівнем гармонічних спотворень та програмних засобів аналізу режимів роботи мережі.

## Висновки

Під час написання кваліфікаційної роботи було проведено дослідження особливостей метрологічного забезпечення систем обліку електроенергії в мережах із двосторонніми потоками потужності. Актуальність даної теми зумовлена активним розвитком відновлюваної енергетики, впровадженням розподіленої генерації та переходом до концепції Smart Grid, що призводить до зміни традиційних режимів роботи електричних мереж і висуває нові вимоги до точності вимірювання електроенергії. У першому розділі було проаналізовано сучасний стан розвитку електроенергетичних мереж, особливості функціонування мереж із двосторонніми потоками потужності, принципи роботи автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії та smart-лічильників. Проведений аналіз показав, що традиційні підходи до обліку електроенергії не повністю відповідають вимогам сучасних мереж із розподіленою генерацією. Також було встановлено, що забезпечення необхідної точності вимірювань є одним із ключових завдань розвитку Smart Grid.

У другому розділі досліджено вплив двосторонніх потоків потужності на функціонування систем обліку електроенергії та проаналізовано метрологічні характеристики сучасних smart-лічильників. Встановлено, що на точність вимірювань істотно впливають реверсивні режими передачі електроенергії, гармонічні спотворення, відхилення напруги та коефіцієнт потужності. Показано переваги smart-лічильників порівняно з традиційними індукційними приладами обліку, особливо в умовах двостороннього обміну електроенергією.

У третьому розділі виконано аналіз основних джерел похибок у системах обліку електроенергії та проведено оцінювання точності smart-лічильників різних класів точності. На практичних прикладах показано вплив класу точності приладів обліку на результати вимірювань. Встановлено, що застосування лічильників класу точності 0,5S та 0,2S дозволяє суттєво зменшити похибки комерційного обліку порівняно з лічильниками класу 1,0.



Також досліджено вплив показників якості електроенергії на достовірність результатів вимірювання та визначено фактори, які найбільше впливають на точність систем обліку. На основі проведеного дослідження запропоновано удосконалену структуру системи обліку електроенергії для мереж із двосторонніми потоками потужності, яка включає smart-лічильник, засоби контролю якості електроенергії, автоматизовану систему комерційного обліку електроенергії та централізований модуль моніторингу. Запропонована структура дозволяє підвищити достовірність результатів вимірювання, забезпечити контроль параметрів якості електроенергії та своєчасно виявляти фактори, що впливають на точність обліку. Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих результатів під час модернізації існуючих систем обліку електроенергії, впровадження Smart Grid та інтеграції відновлюваних джерел енергії до електричних мереж. Запропоновані рекомендації можуть бути використані операторами систем розподілу, енергопостачальними організаціями та власниками об'єктів розподіленої генерації для підвищення точності комерційного обліку електроенергії та ефективності функціонування сучасних електроенергетичних систем.

Список використаних джерел:

1. Добровольська Л.Н., Волинець В. І., Собчук Д. С., Черкашина В. В. ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ, 2016. 11 с. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-02/%D0%9F%D0%9E%D0%A1%D0%86%D0%91%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%D1%81%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA%2016%20%D0%BB%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%96%D0%B2%20%281%29.pdf>
2. Райтер П.М. SMART GRID ЯК ОСНОВА ІННОВАЦІЙНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЄВРОІНТЕГРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ: лекція. С. 5, 24, 25, 27, 28, 29, 37.
3. Рудянин В.О. Розробка системи автоматизованого обліку електроенергії для побутових споживачів РЕМ С. 19-26. URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/43065/2/%D0%A0%D1%83%D0%B4%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%BD%20%D0%92.%D0%9E.\\_%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/43065/2/%D0%A0%D1%83%D0%B4%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%BD%20%D0%92.%D0%9E._%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0.pdf)
4. Закон України про метрологію та метрологічну діяльність (ВВР, 2014, №30, ст.1008). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>
5. Закон України про ринок електричної енергії (ВВР, 2017, №27-28). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>
6. І.В. Гладь, Ю.Ф. Романюк. СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ. С. 16, 25-26, 60-67, 122-124
7. Smart-лічильник електроенергії E650. URL: <https://www.landisgyr.com/nam/en/home/devices/asia-pacific/e650>
8. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. Метрологія та вимірювальна техніка. С.62-75.

9. Стандарт IEE 519-2014. URL:  
<https://www.mirusinternational.com/downloads/White%20Paper%20-%20IEEE%20Std%20519-2014%20Harmonic%20Limits.pdf>
10. Національний стандарт України ДСТУ EN50160:2023 про характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. URL:  
[https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3%20EN%2050160\\_2023%20%D0%A5%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8%20%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%B8%20%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%B2%20%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D1%85%20%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B0%D1%85%20%D0%B7%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%97%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3%20EN%2050160_2023%20%D0%A5%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8%20%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%B8%20%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%B2%20%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D1%85%20%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B0%D1%85%20%D0%B7%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%97%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96.pdf)
11. Smart-лічильник електроенергії моделі 2303. URL:  
<https://nik.net.ua/product/nik-2303-new>

## ДОДАТКИ

### Додаток А

Удосконалена схема для мережі з двосторонніми потоками з використанням сонячної станції

