

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

УДК 621.311

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2026.73.005>**ОЦІНКА ВПЛИВУ СУМАРНОЇ ВЕКТОРНОЇ ПОХИБКИ ТА ПРОБЛЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ШИРОКОМАСШТАБНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСИСТЕМ****Б.С. Стогній\***, акад. НАН України, **О.В. Сподинський\*\***Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [a.spodynskyi@gmail.com](mailto:a.spodynskyi@gmail.com)

У статті виконано оцінку сумарної векторної похибки TVE (Total Vector Error) розрахункового фазора в різних середовищах доступу локальних обчислювальних мереж, визначених у стандарті IEEE C37.118.1-2011. Досліджено критичну роль точної синхронізації часу для технології синхрофазорів. Фазори, синхронізовані з абсолютним часом, є основою для блоків вимірювання фазорів PMU (Phasor Measurement Unit), які використовуються для моніторингу енергосистеми. Оцінка TVE була проведена для трьох моделей локальних мереж: CSMA/CD, CSMA/AMP та комутованого Ethernet з урахуванням стандартизованих значень пропускної здатності BW (Bandwidth) мережі 0,1, 1 та 10 Гбіт/с відповідно до стандарту IEC 61850-9-2:2011, а також кількості вузлів. Проаналізовано вплив похибок вимірювальних каналів і похибок PMU на продуктивність критично важливих застосувань широкомасштабної системи моніторингу WAMS (Wide Area Monitoring System), таких як локалізація порушень, виявлення коливань та динамічна оцінка пропускної здатності ліній DLR (Dynamic Line Rating). Результати аналізу демонструють, що TVE є чутливою до типу локальних обчислювальних мереж та кількості вузлів, а точність синхронізації часу залишається значною проблемою, що впливає на надійність застосувань WAMS.

**Ключові слова:** фазор, енергосистема, локальна мережа, сумарна векторна похибка, синхронізація часу, PMU, WAMS.

**Вступ.** Основою моніторингу є інформаційні процедури, за допомогою яких отримується кількісна або якісна інформація про властивості об'єкта моніторингу та його стан. Водночас обробка інформації передбачає операції збирання, введення, записування, перетворення, зчитування, зберігання та реєстрації [1, 2]. Технологія фазорних вимірювань, історія якої сягає математичного методу, розробленого Протеусом Штайнметцем у 1916 році для аналізу мереж змінного струму, сьогодні є критично важливою для моніторингу та експлуатації енергосистем [3]. У 1992 році Джей Мерфі розвинув цей метод для обчислення фазорів, синхронізованих з абсолютним часом, що призвело до створення першого блоку вимірювання фазорів PMU (Phasor Measurement Unit). Синхронізація фазорів була стандартизована в [4], а згодом кодифікована (тобто визначено перетворення фізичних величин у строго визначений цифровий формат), як [5] у 2005 році, з оновленою версією у 2012 році.

**Метою роботи** є комплексна оцінка впливу сумарної векторної похибки TVE (Total Vector Error) та проблем синхронізації часу на надійність і точність функціонування широкомасштабних систем моніторингу енергосистем WAMS (Wide Area Monitoring System).

Пристрій синхронізованих векторних вимірювань (PMU) є надійним інструментом, здатним оцінювати фазори як у стаціонарних, так і в перехідних умовах. Однак традиційні оцінювачі фазорів, які покладаються на алгоритм дискретного перетворення Фур'є, можуть створювати значні помилки величини та фази, що збільшує сумарну векторну похибку TVE.

На противагу перетворенню Фур'є, фільтр Калмана вважається потужним алгоритмом для оцінки фазорів при крокових змінах з меншою похибкою [6].

Оскільки енергосистеми є великими та географічно розподіленими, системи збору даних енергоспоживання потребують спільного джерела часу. PMU додають до вимірювань часові мітки відносно джерела часу, такого як Глобальна система позиціонування GPS (Global Positioning System). Дані PMU використовуються для ситуаційної обізнаності, аналізу подій та моніторингу стабільності системи. Однак продуктивність та надійність кінцевих застосувань WAMS, які використовують синхрофазори, критично залежать від якості вимірювань, які містять похибки, спричинені як похибками PMU, так і похибками вимірювальних каналів. Стандарт [5] визначив допустиму похибку вимірювань, яка називається сумарною векторною похибкою або TVE. TVE представляє собою геометричну різницю між ідеальним (еталонним) вектором та вектором, виміряним пристроєм PMU, виражену у відсотках:

$$\text{TVE} = \sqrt{\frac{(X_{r \text{ meas}} - X_{r \text{ ideal}})^2 + (X_{i \text{ meas}} - X_{i \text{ ideal}})^2}{X_{r \text{ ideal}}^2 + X_{i \text{ ideal}}^2}} \times 100\% \quad (1)$$

де  $X_{r \text{ meas}}$  та  $X_{i \text{ meas}}$  – реальна та уявна частини виміряного вектора;  $X_{r \text{ ideal}}$  та  $X_{i \text{ ideal}}$  – реальна та уявна частини ідеального (еталонного) вектора.

Якщо відомі похибки амплітуди та фазового кута, формулу (1) можна представити у більш наочному вигляді:

$$\text{TVE} = \sqrt{2 + 2 \cdot \left(\frac{A_{\text{meas}}}{A_{\text{ideal}}}\right) \cdot [1 - \cos(\varphi_{\text{meas}} - \varphi_{\text{ideal}})] + \left(\frac{A_{\text{meas}}}{A_{\text{ideal}}} - 1\right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

де  $\varphi_{\text{meas}}$  – вимірний фазовий кут;  $\varphi_{\text{ideal}}$  – ідеальний фазовий кут.

Однак найчастіше для спрощених розрахунків використовують наближену формулу:

$$\text{TVE} \approx \sqrt{\left(\frac{A_{\text{meas}} - A_{\text{ideal}}}{A_{\text{ideal}}}\right)^2 + (\Delta\varphi)^2} \quad (3)$$

де  $A_{\text{meas}}$  – виміряна амплітуда;  $A_{\text{ideal}}$  – ідеальна амплітуда;  $\Delta\varphi$  – похибка фазового кута в радіанах.

У стаціонарних умовах максимально допустима TVE для PMU має бути в межах 1%. Вимоги до точності PMU можуть бути послабленими при динамічних вхідних сигналах, таких як модуляція, швидкість зміни частоти та зміна фазового кроку. Наприклад, для вхідного сигналу з модуляцією TVE має бути в межах 3%, порівняно з 1% у стаціонарних умовах.

TVE виражає невизначеність у результаті вимірювання, що складається з похибки амплітуди та похибки фази.

Хоча стандарт [5] визначив допустиму похибку TVE, він не обмежив метод, який слід використовувати для оцінки фазорів. Як альтернатива перетворенню Фур'є, фільтр Калмана може бути оновлений за допомогою високопотоківих критичних за часом вимірюваних миттєвих значень SV (Sampled Values), визначених стандартом зв'язку [7]. Фільтр Калмана є математичним методом для обчислення оптимальних оцінок станів динамічної системи [6]. Ці поточкові значення SV передаються по шині процесу підстанції з високою частотою вибірки 80 або 256 вибірок/період.

Стандарт [7] визначає шину процесу та шину підстанції, обидві підтримують технологію Ethernet. Шина процесу реалізує стандартизовані значення пропускної здатності BW: 0,1, 1 та 10 Гбіт/с. Блок об'єднання MU (Merging Unit) відповідає за відбір та створення високопотоківих пакетів SV. Блок об'єднання MU – це пристрій для оцифрування аналогових сигналів, отриманих від вимірювальних трансформаторів струму та напруги, та перетворення їх у цифровий формат для передачі через комунікаційну мережу.

Енергосистема у процесі свого функціонування широко використовує точну синхронізацію часу як фундаментальний інструмент для забезпечення ефективного моніторингу стану мережі, підвищення ситуаційної обізнаності операторів, узгодженої координації режимів роботи та реалізації функцій релейного захисту й автоматики. У складних та географічно розподілених застосуваннях усі засоби вимірювання, керування та

обробки даних повинні бути жорстко синхронізовані відносно єдиного еталонного часу – всесвітнього координованого часу UTC (Coordinated Universal Time). Така синхронізація є необхідною умовою для коректної інтеграції даних, отриманих із різних вузлів енергосистеми, а також для забезпечення узгодженої роботи децентралізованих алгоритмів аналізу та керування в реальному часі.

Для технології синхрофазорів потрібен надійний доступ до UTC, оскільки PMU мають одні з найжорсткіших вимог до точності часу серед усіх устаткувань у енергосистемі, через високочастотну звітність та широке географічне розташування пристроїв. Концентратори фазорних даних PDC (Phasor Data Concentrator) виконують збір, обробку та вирівнюють за часом дані від кількох PMU [8].

У більшості сучасних пристроїв синхронізованих векторних вимірювань, що експлуатуються в енергосистемах України, основним джерелом синхронізації часу залишається сигнал глобальної навігаційної супутникової системи GPS [9]. Водночас супутникові сигнали GPS характеризуються низькою енергетичною потужністю на приймальній стороні, що робить їх особливо вразливими до впливу як антропогенних, так і природних факторів. До таких факторів належать електромагнітні завади, навмисне або ненавмисне глушіння сигналу, а також спуфінг, тобто «підміни» сигналу супутника, який може призводити до навмисного викривлення часових міток.

Порушення доступності або цілісності GPS-сигналу можуть негативно впливати на функціонування синхрофазорної інфраструктури, зокрема спричиняти помилкові спрацювання алгоритмів моніторингу, формування хибних тривог та зростання експлуатаційних витрат, пов'язаних із додатковими перевірками та втручанням персоналу. Водночас за сучасних умов такі збої, як правило, не призводять до масштабних аварійних відмов енергосистеми, однак істотно знижують надійність та довіру до результатів вимірювань.

З огляду на зазначені уразливості, рішення, що базуються виключно на використанні GPS як джерела точного часу, не можуть розглядатися як достатні для забезпечення критично важливих застосувань. До моменту впровадження резервованих та захищених механізмів синхронізації, а також гарантування цілісності часових міток і вимірювальних даних, використання PMU для автоматизованого керування та інших відповідальних функцій має бути обмеженим [10]. Слід враховувати, що перспективні застосування технології синхрофазорів висувають надзвичайно жорсткі вимоги до точності синхронізації, які можуть передбачати забезпечення часової роздільної здатності на рівні до 1 мікросекунди. Передавання вимірних значень синхрофазорів у режимі реального часу є одним із ключових компонентів функціонування систем моніторингу енергосистем. Оскільки технологія синхрофазорів потребує високої точності, мінімальної затримки та гарантованої пропускну здатності, спроможність локальних обчислювальних мереж (ЛОМ) забезпечувати стабільну передачу даних без додаткових спотворень має вирішальне значення.

Вплив типу мережевої технології та доступної пропускну здатності на формування сумарної векторної похибки TVE при передаванні потоків SV стандартизовані у [7].

SV-пакети передаються з високою частотою вибірки, що створює значне навантаження на мережу і вимагає від ЛОМ не лише достатньої пропускну здатності, але й стабільного часу доставки пакетів. Будь-які затримки, варіації затримок або втрати пакетів безпосередньо впливають на якість реконструкції фазора та можуть збільшувати TVE за межі допустимих норм.

Оскільки SV-трафік є часово критичним, у стандарті IEC61850 визначено кілька типів мережевих технологій, які можуть бути застосовані для передачі цих потоків. Розглянемо три найпоширеніші моделі ЛОМ: CSMA/CD, CSMA/AMP та комутований Ethernet. Кожна з них має різні механізми доступу до середовища й відповідно різний рівень детермінованості передавання інформації.

Множинний доступ з контролем несучої частоти та виявленням колізій CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) це технологія множинного доступу до загального середовища в локальній комп'ютерній мережі з контролем колізій. Коли мережеве

середовище зайняте кількома вузлами одночасно, виникають колізії, тобто накладання сигналів один на одного, що призводить до повторної передачі та збільшення часу доставки пакету. У системах, де критично важлива мінімальна затримка, цей механізм стає суттєвим джерелом похибок.

Множинний доступ з контролем несучої частоти, арбітражем, моніторингом та пріоритетом CSMA/AMP (Carrier Sense Multiple Access with Arbitration, Monitoring, and Priority) передбачає пріоритетне обслуговування трафіку. У разі колізії перевага надається повідомленням із вищим пріоритетом, що частково зменшує випадковість у часі доставки пакетів. Проте при збільшенні кількості вузлів навіть цей механізм може спричинити надмірні затримки.

Комутований Ethernet забезпечує найвищий рівень детермінованості, оскільки кожен вузол має окремий канал зв'язку з комутатором. Відсутність колізій та підтримка повнодуплексного режиму значно підвищують надійність передачі SV-трафіку.

Результати аналізу підтверджують, що здатність до підтримання  $TVE \leq 1\%$  залежить не лише від алгоритмів обробки сигналів, але й від вибору мережевої інфраструктури. Для ефективного функціонування PMU і SV-передачі в рамках WAMS необхідно забезпечити:

- достатню пропускну здатність 1–10 Гбіт/с залежно від типу мережі;
- мінімізацію колізій та джитеру, тобто небажаного відхилення від ідеальної періодичності або синхронності сигналу;
- використання комутованих рішень із високою детермінованістю передачі.

Похибки вимірювання PMU, спричинені як помилками самого пристрою (алгоритм, точність синхронізації), так і вимірювальними каналами (вимірювальні трансформатори, кабелі) є критично важливими для надійності застосувань WAMS.

Для кількісної оцінки впливу похибок вимірювання на застосування WAMS описано результати з помилками та без них [6]. Застосунки WAMS поділяються на ті, що мають **якісні виходи** (виявлення коливань, острівного режиму) та **кількісні виходи** (місцезнаходження несправності, динамічні характеристики лінії). Для якісних виходів вплив вимірюється коефіцієнтом відмов, що включає невіддале виявлення та хибні тривоги. Для кількісних виходів вплив описується похибкою вихідних результатів.

**Локалізація порушень енергосистеми.** Програми визначення місцезнаходження порушень в енергосистемі застосовуються для оперативного виявлення та просторової локалізації збурень, зокрема таких подій, як раптова втрата генерувальних потужностей або інші значні дисбаланси режиму. В основі відповідних алгоритмів лежить принцип поширення електромеханічної хвилі вздовж електричної мережі, яка виникає внаслідок порушення усталеного режиму та реєструється фазовимірювальними пристроями, розташованими у різних вузлах системи. Локалізація джерела збурення здійснюється шляхом аналізу різниці часу прибуття TDOA (Time Difference of Arrival) зміщення фазового кута, зафіксованого різними PMU, що дозволяє визначити координати події у просторі мережі. TDOA – це метод визначення місцезнаходження джерела сигналу, що базується на розрахунку різниці в часі прибуття одного й того самого сигналу до кількох приймачів із відомими координатами. При цьому параметр TDOA виступає кількісним виходом алгоритму локалізації та безпосередньо впливає на точність визначення місця порушення.

**Виявлення коливань.** Виявлення міжсистемних коливань в енергосистемі ґрунтується на аналізі вимірювань відносних фазових кутів між вибраними вузлами мережі та їхньому порівнянні з попередньо визначеними пороговими значеннями. Проте ефективність такого аналізу безпосередньо залежить від сумарної невизначеності вимірювального каналу, яка складається з похибок вимірювальних трансформаторів струму/напруги та самих пристроїв PMU. Оскільки вимірювальні трансформатори можуть мати як позитивні, так і від'ємні похибки, при їхніх різних знаках результуюча похибка різниці кутів лише зростає. Це створює значне статичне зміщення у вимірюваннях, яке необхідно враховувати при калібруванні системи, оскільки воно може бути співмірним з амплітудою самих коливань.

Похибки оцінки фазового кута, величина яких у динамічних режимах може досягати значень, допустимих стандартом (зокрема, TVE до 3% для модульованого вхідного сигналу,

що відповідає приблизно  $1,8^\circ$  за номінальної частоти 50 Гц), здатні суттєво впливати на надійність алгоритмів виявлення. Зокрема, у випадку неколивальних режимів, коли випадкові флуктуації фазового кута або похибки вимірювання перевищують встановлені порогові значення, виникає ризик хибного спрацювання алгоритму та формування помилкової тривоги.

Результати аналізу підтверджують, що за наявності реальної події міжсистемного коливання кутова похибка РМУ з високою ймовірністю не призводить до невдалого виявлення. Водночас частота хибних спрацювань істотно зростає зі збільшенням похибки фазового кута.

**Виявлення острівного режиму.** Виявлення острівного режиму, тобто стану ізольованого функціонування ділянки мережі з підключеною розподіленою генерацією, належить до класу якісних застосувань WAMS. Такі алгоритми спрямовані не на точну кількісну оцінку параметрів режиму, а на своєчасне розпізнавання факту виникнення острівного режиму з метою забезпечення безпеки та надійності роботи енергосистеми. Одним із найбільш поширених підходів до виявлення острівного режиму є метод, заснований на аналізі частотних характеристик, який використовує миттєве відхилення частоти FD (Frequency Deviation) та інтеграл відхилення частоти IOFD (Integral of Frequency Deviation), як ключові діагностичні показники [6].

**Динамічна оцінка пропускної здатності ліній.** Динамічна оцінка пропускної здатності повітряних ліній електропередачі DLR (Dynamic Line Rating) належить до класу кількісних застосувань широкомасштабних систем моніторингу та спрямована на визначення максимально допустимого струмового навантаження лінії з урахуванням її поточного теплового стану. Для реалізації цього підходу використовуються синхронні вимірювання фазорів напруги та струму, отримані пристроями синхронізованих векторних вимірювань РМУ, встановленими на обох кінцях лінії електропередачі, що дає змогу оцінити її електричні параметри, зокрема комплексний опір. Додатково до електричних вимірювань у розрахунках DLR враховуються метеорологічні дані, такі як температура навколишнього середовища, швидкість і напрямок вітру, які істотно впливають на тепловий баланс провідника.

Наявність похибок у вимірюваннях РМУ неминуче призводить до невизначеності в оцінці параметрів лінії та, як наслідок, до похибки результатів динамічної оцінки пропускної здатності. У більшості випадків основну увагу зосереджено на оцінці впливу похибки фазового кута, оскільки саме вона є домінуючим фактором, що визначає точність обчислення опору лінії та подальших теплових розрахунків. Навіть відносно невеликі кутові похибки можуть призводити до суттєвого розкиду оцінок DLR, особливо в режимах, близьких до граничних.

Проведене дослідження сумарної векторної похибки TVE у локальних обчислювальних мережах підтвердило, що ефективність і надійність функціонування пристроїв синхронізованих векторних вимірювань критично залежать як від типу використовуваної мережевої технології, так і від доступної пропускної здатності каналу зв'язку. Отримані результати показали, що комутований Ethernet забезпечує найвищий рівень продуктивності та детермінованості передачі даних, задовольняючи вимоги щодо допустимого рівня TVE при пропускних здатностях 1 Гбіт/с і 10 Гбіт/с. Водночас стандартизована швидкість 0,1 Гбіт/с виявилася недостатньою для підтримання вимог до TVE для всіх розглянутих типів локальних мереж, що обмежує можливість її використання у часово критичних синхрофазорних застосуваннях.

#### **Висновки.**

1. Надійне функціонування технології синхрофазорів у складі широкомасштабних систем моніторингу енергосистем WAMS значною мірою визначається цілісністю та доступністю джерел точного часу. З огляду на вразливість супутникових систем синхронізації, зокрема GPS, до завад, глушіння та спуфінгу, існують суттєві ризики для реалізації критично важливих застосувань, включаючи автоматизоване керування режимами енергосистеми. До моменту впровадження резервованих, захищених і високнадійних механізмів розподілу часу

використання синхрофазорних вимірювань у автоматизованому керуванні енергосистемами неможливе.

2. Аналіз чутливості застосувань WAMS до похибок вимірювання показав явну залежність їхньої продуктивності від типу реалізованого алгоритму. Зокрема, застосування з кількісними виходами, такі як локалізація порушень у мережі та динамічна оцінка пропускної здатності ліній DLR, характеризуються високою чутливістю до похибок фазового кута. Навіть динамічні похибки PMU, що залишаються в межах допустимих значень стандарту, можуть призводити до значних похибок у визначенні місця збурення або оцінці пропускної здатності ліній, що знижує практичну цінність отриманих результатів. Водночас застосування з якісними виходами, зокрема алгоритми виявлення міжсистемних коливань, менш схильні до невдалого виявлення подій, проте залишаються вразливими до хибних спрацьовувань. Частота таких хибних тривог зростає зі збільшенням похибки фазового кута, особливо за умов наявності неколивальних флуктуацій великої амплітуди, що негативно впливає на надійність та сприйняття системи операторами.

3. Ефективним шляхом підвищення точності результатів, зокрема, для задач динамічної оцінки пропускної здатності ліній, є компенсація та калібрування похибок вимірювального каналу. Усунення систематичних похибок трансформаторів та з'єднувальних елементів дає змогу зменшити вимоги до точності самих пристроїв синхронізованих векторних вимірювань без погіршення кінцевої точності результатів, що є практично доцільним та економічно обґрунтованим підходом.

4. У цілому для забезпечення надійного функціонування інтелектуальних енергетичних мереж у перспективі необхідні суттєві вдосконалення систем розподілу точного часу, а також подальше уточнення вимог до точності синхрофазорних вимірювань з урахуванням динамічних режимів роботи та специфіки алгоритмів конкретних застосувань WAMS.

1. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 62–69. URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1142/1016>
2. Кириленко О.В., Стогній Б.С., Денисюк С.П., Сопель М.Ф. Smart-моніторинг електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 48–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048>
3. Steinmetz C. P. Theory and calculation of alternating current phenomena vol. 4: McGraw-Hill Book Company, inc., 1916. <https://archive.org/details/theorycalculation00steirich/page/6/mode/2up>
4. IEEE 1344-1995 IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems <https://ieeexplore.ieee.org/document/8684605/amendments#amendments>
5. IEEE C37.118.1-2011 IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems <https://ieeexplore.ieee.org/document/6111219>
6. Phadke A. Synchronized phasor measurements in power systems. *IEEE, Computer Applications in Power*, 1993. Vol. 6. Pp. 10–15. <https://ieeexplore.ieee.org/document/207465>
7. IEC 61850-9-2:2011 Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3 <https://webstore.iec.ch/en/publication/6023>
8. Денисюк С.П., Сопель М.Ф., Сподинський О.В., Довгодько Ю.М. Синхрофазори в сучасних енергосистемах: визначення, вимірювання та архітектура WAMS. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 15(2). С. 181–187. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-21>
9. Белоха Г.С., Денисюк С.П., Дерев'янка Д.Г., Жуйков В.Я., Сопель М.Ф., Сподинський О.В. SMART-моніторинг ефективності функціонування локальних електроенергетичних систем. Одеса: Видавничий дім «Гальветика», 2025. 280 с.
10. Блінов І.В., Денисюк С.П., Лежнюк П.Д., Ущатовський К.В., Слободян Р.О., Козачук О.І., Мірошник В.О., Сподинський О.В. Цифрова трансформація електроенергетики України. Реалізація в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення. Одеса: Видавничий дім «Гальветика», 2024. 362 с.

**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF TOTAL VECTOR ERROR AND TIME SYNCHRONIZATION ISSUES ON THE OPERATION OF WIDE-AREA POWER SYSTEM MONITORING SYSTEMS****B.S. Stognii, O.V. Spodynskyi**Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukrainee-mail: [a.spodynskyi@gmail.com](mailto:a.spodynskyi@gmail.com)

*In this paper, the total vector error (TVE) of the estimated phasor is assessed for different local area network (LAN) access environments defined in Standard IEEE C37.118.1-2011, and the critical role of accurate time synchronization for synchrophasor technology is investigated. Phasors synchronized to absolute time constitute the foundation of phasor measurement units (PMUs), which are widely used for power system monitoring. The TVE assessment is performed for three local network models – CSMA/CD, CSMA/AMP, and switched Ethernet – taking into account standardized network bandwidth (BW) values of 0.1, 1, and 10 Gbit/s in accordance with Standard IEC 61850-9-2:2011, as well as the number of network nodes. A methodology for evaluating the impact of internal and external PMU measurement errors on the performance of critical wide-area monitoring system (WAMS) applications is analyzed, including disturbance localization, oscillation detection, and dynamic line rating (DLR). The analysis results demonstrate that TVE is highly sensitive to the type of local area network and the number of nodes, while the accuracy of time synchronization remains a significant challenge affecting the reliability of WAMS applications.*

**Keywords:** phasor, power system, local area network, total vector error, time synchronization, PMU, WAMS.

1. Stognii B.S., Sopel M.F. Fundamentals of monitoring process in electroenergy. About the concept of monitoring process. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 1. Pp. 62–69. (Ukr) URL: <https://techmed.org.ua/index.php/techmed/article/view/1142/1016>
2. Kyrylenko O.V., Stognii B.S., Denysiuk S.P., Sopel M.F. Smart-monitoring of electrical power systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 5. Pp. 48–62. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2024.05.048>
3. Steinmetz C. P., Theory and calculation of alternating current phenomena vol. 4: McGraw-Hill Book Company, inc., 1916. <https://archive.org/details/theorycalculation00steirich/page/6/mode/2up>
4. IEEE 1344-1995 IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems <https://ieeexplore.ieee.org/document/8684605/amendments#amendments>
5. IEEE C37.118.1-2011 IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems <https://ieeexplore.ieee.org/document/6111219>
6. Phadke A. Synchronized phasor measurements in power systems. *IEEE, Computer Applications in Power*, 1993. Vol. 6. Pp. 10–15. <https://ieeexplore.ieee.org/document/207465>
7. IEC 61850-9-2:2011 Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3 <https://webstore.iec.ch/en/publication/6023>
8. Denysiuk S.P., Sopel M.F., Spodynskyi O.V., Dovhodko Y.M. Synchrophasors in Modern Power Systems: Definition, Measurement, and WAMS Architecture. *Scientific bulletin of Tavria State Agrotechnological University*, 2025. Vol. 15, No. 2 T. 15(2). Pp. 181–187. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-21>
9. Bielokha H.S., Denysiuk S.P., Derevianko D.H., Zhuikov V.Y., Sopel M.F., Spodynskyi O.V. SMART Monitoring of the Operational Efficiency of Local Electric Power Systems. Odesa: Galvetika Publishing House, 2025. 280 p.
10. Blinov I.V., Denysiuk S.P., Lezhniuk P.D., Ushchapovskyi K.V., Slobodian R.O., Kozachuk O.I., Miroshnyk V.O., Spodynskyi O.V. Digital Transformation of the Electric Power Industry of Ukraine: Implementation under Martial Law and Post-War Recovery. Odesa: Galvetika Publishing House, 2024. 362 p.

Надійшла: 22.12.2025

Прийнята: 16.02.2026

Submitted: 22.12.2025

Accepted: 16.02.2026