

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ВІД ПРИСТРОЇВ ВИМІРЮВАННЯ ФОРМИ СИГНАЛІВ СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ МЕРЕЖІ

**Д.В. Войтов**

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [dmytrovoitov@gmail.com](mailto:dmytrovoitov@gmail.com)

*У цій роботі розглянуто розвиток моніторингу стану енергетичних мереж у напрямку отримання більш детальної інформації щодо основних сигналів, що їх характеризують. Передусім ідеться про новий тип сенсорів струму та напруги – WMU (waveform measuring unit – пристрій вимірювання форми сигналу) та його можливості порівняно з іншими приладами подібної тематики. Проаналізовано низку науково-прикладних робіт за тематикою застосування інформації, одержаної від WMU. Коротко досліджено основні течії використання даних, отриманих від WMU для забезпечення більшої обізнаності станом якості енергії в енергетичній системі. Окремо приділено увагу застосуванню фігур Ліссажу, побудованих на сигналах, отриманих від WMU, як в теоретичній, так і в практичній сферах. Окреслено позитивні та негативні риси використання WMU та приладів, що застосовуються для вирішення аналогічних задач в Україні (PMU – phasor measurement unit – пристрій вимірювання фазорів та PQA – power quality analyzer – аналізатор якості електроенергії). Бібл. 11, рис. 3, таблиця.*

**Ключові терміни:** електроенергетична система, моніторинг, WMU, PMU, PQA, фігури Ліссажу, частота дискретизації, якість енергії.

**Вступ.** Еволюція енергетики це постійний процес, що не припиняється за жодних причин. Проводяться різноманітні дослідження, розробляються та впроваджуються нові ідеї, алгоритми, системи, прилади та обладнання. Одним із важливих напрямків розвитку є вдосконалення моніторингу стану енергетичних мереж, а саме сигналів напруги та струму, які несуть найбільш детальну та автентичну інформацію щодо ситуації в самій системі [1–3]. Із появою PMU (phasor measurement unit – пристрій вимірювання фазорів) з'явилася можливість збирати ці дані в синхронізованій за часом формі у великих масштабах. Зі свого боку, це дало змогу моніторити та керувати станом енергетичної системи на значних територіях, започаткувавши системи WAMS (wide area monitoring system – система широкомасштабного моніторингу) та WAMPAC (wide area monitoring, protection and control – система глобального моніторингу, захисту та контролю). Тепер з'явилися нові прилади – WMU (waveform measuring unit – пристрій вимірювання форми сигналу), які дають можливість ще точніше контролювати параметри енергосистеми та підвищують обізнаність енергетиків щодо її стану.

Метою статті є аналіз використання WMU для моніторингу стану енергосистеми та сфера застосування цього обладнання в енергетиці України.

**1. Пристрій вимірювання форми сигналу.** Останнім часом набирає популярності ідея використання даних від WMU для визначення місця подій в електричних мережах [4–11]. WMU являє собою новий виток розвитку сенсорів струму та напруги, якоюсь мірою наслідуючи PMU, але з високою частотою дискретизації та відсутністю перетворення вхідних сигналів струмів та напруг на відповідні синхрофазори. За аналогією з PMU, WMU фіксують необхідні параметри синхронізованих за часом струмів та напруг (частоти, кути, амплітуди). Ці виміри отримали назву синхроформ сигналів за аналогією з синхрофазорами, які вимірюються PMU. Ключовою відмінністю WMU від PMU є кількість вимірних та оброблених даних за одиницю часу та робота напряму з вимірними аналоговими величинами без додаткових перетворень. Так, стандартною кількістю точок вимірів за період є 256 (до 1024), що дає частоту дискретизації 12,8 кГц (до 51,2 кГц) у випадку електричної мережі частотою 50 Гц. Це дає змогу виявляти наявність вищих гармонік та аналізувати перехідні процеси в електричних мережах [4]. Відсутність необхідності перетворення вхідних сигналів на синхрофазори також дозволяє зменшити навантаження на розрахункові потужності приладу та спростити обробку отриманих даних.

Отримання синхронізованих сигналів може відбуватися в одному із трьох варіантів – вибірка інформації необхідної тривалості, вибірка даних певного проміжку з якоюсь періодичністю та постійне опитування. Як можна побачити у прикладі (рис. 1), для надійного виявлення короткоплинної події необхідне чітке визначення місця події з вибіркою даних необхідної тривалості саме в цьому проміжку або постійне опитування сигналу, так як періодичне опитування може не охопити дані з необхідного сегменту. Певна річ, постійне опитування сигналів є найінформативнішим, але й накладає максимальні обмеження на пристрої обробки даних, що підсилюється ще й високою частотою дискретизації останніх. Саме тому чітке та швидке виявлення необхідної події в енергетичній мережі є таким важливим.

Ураховуючи частоту дискретизації, інформації від PMU буде недостатньо для аналізу короткоплинної події, окрім ситуації постійного опитування. Звісно, у такому випадку треба зробити ремарку, що подібні задачі і не ставляться перед PMU, що встановлюються для моніторингу перетоків потужностей у нормальних режимах роботи енергетичних мереж. Водночас дані від WMU цілком достатньо для проведення аналізу швидкоплинних процесів у мережах, що вказує на широкий потенціал застосування останніх.

Наразі можна припустити, що пристрої WMU принесуть найбільше користі в мікромережах із розподіленою генерацією, сегментах мережі з відновлювальними джерелами генерації та розподільчих мережах в цілому, де необхідно приділити значну увагу не тільки аварійним подіям, але й подіям, що характеризують якість електроенергії. Це пов'язано з тим, що саме в таких сегментах мережі знаходиться велика кількість батарей конденсаторів, як частини генерації енергії, що зі свого боку зумовлює суттєве збільшення кількості швидкоплинних подій, які мають бути ідентифіковані та класифіковані. Класифікацію є сенс проводити за типом та критичністю подій. За типом можна виділити події внаслідок комутаційних процесів, перехідні процеси внаслідок зміни стану мережі, події, пов'язані з якістю енергії, та аварійні події. За критичністю в загальному випадку достатньо розділяти події на аварійні та не критичні. За необхідності можна скористатися методологією класифікації критичності подій, запропонованою ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity – європейська мережа системних операторів передачі електроенергії), для використання системними операторами (події діляться на незначні, незначні, що потребують уваги, значні, масштабні та системні аварії).

Натомість в мережах високої та надвисокої напруг, так само як і на класичних генеруючих об'єктах, зазвичай всі необхідні параметри вже фіксуються великою кількістю встановлених МПРЗА (мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики). Звісно, у цих мережах також існують випадки перебільшення допустимих значень вищих гармонік, що пов'язано передусім із сегментом зеленої енергетики, а саме з неузгодженою роботою інверторів, але такі випадки трапляються рідко.

Наразі на теренах України для контролю якості електроенергії застосовуються прилади PQA (power quality analyzers – аналізатори якості електроенергії) із високою частотою дискретизації зазвичай таких типів: SATEC PM-175, SATEC PM-180, SATEC PM-335PQ/EM-235PQ та Linux PQ-3000. Ці прилади можна використовувати і для моніторингу короткоплин-

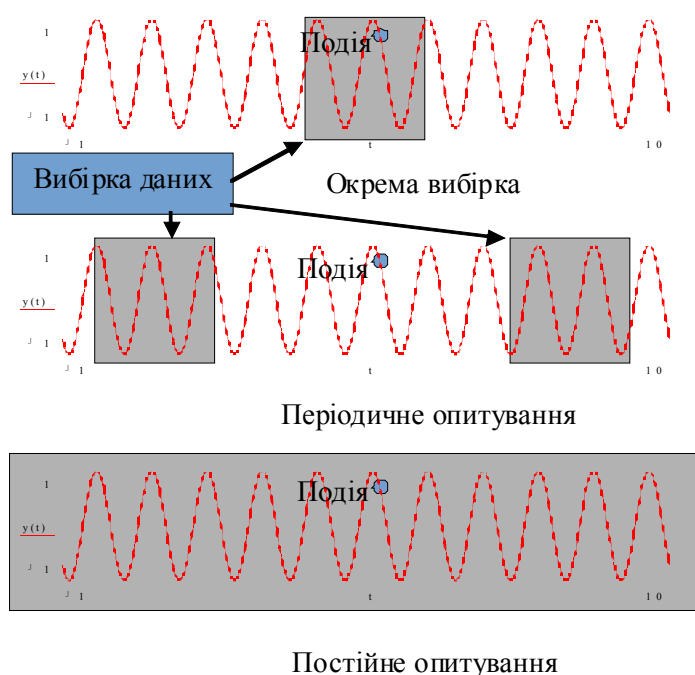


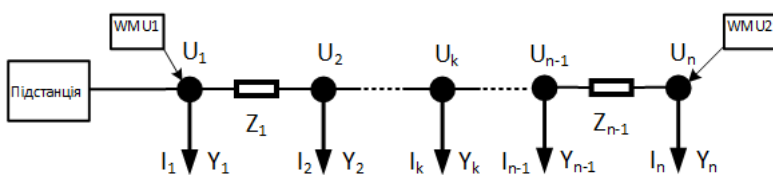
Рис. 1. Варіанти обробки синхронізованих сигналів струмів/напруг

них перехідних процесів, наприклад, самозатухаючих процесів тривалістю пів, чверть періоду або навіть менше. Зібрана інформація такого типу становить чималий інтерес, але треба відмітити, що на момент написання цієї статті немає конкретної нормативної бази для вирішення питань, що робити у випадку виявлення великої кількості цих процесів. Разом з тим, всі ці прилади не передають інформацію в реальному часі, а натомість обробляють її на місці, видаючи середні значення на певному інтервалі або інформацію за запитом. Крім того, у випадку з Linaх PQ-3000 це звісно не дешевий варіант для масового використання.

Використання PQA, PMU та WMU має як недоліки, так і позитивні риси, що коротко описані в таблиці. Рішення із застосування необхідних приладів залишається відкритим, але насамперед має враховувати конкретні задачі, що ставляться в кожному окремому випадку.

Тип приладу	Позитивні риси	Негативні риси	Типове застосування
PQA	1. Досвід використання. 2. Багато виробників. 3. Наявні стандарти. 4. Стандартні протоколи передачі даних. 5. Доволі висока частота дискретизації	1. Відсутність передачі інформації в реальному часі. 2. Передача усереднених значень. 3. Відносно невелика кількість аналогових входів.	Аналіз якості електроенергії
PMU	1. Досвід використання. 2. Багато виробників. 3. Наявні стандарти. 4. Стандартний протокол передачі даних. 5. Велика кількість аналогових входів.	1. Перетворення вхідних сигналів на фазори. 2. Відносно невисока частота дискретизації.	Моніторинг потоку потужностей в енергосистемі
WMU	1. Висока частота дискретизації. 2. Потенціал використання в майбутньому.	1. Відсутність суттєвого досвіду використання, виробників, стандартів, спеціалізованих протоколів передачі інформації. 2. Більш складна конструкція. 3. Передача даних потребує широкого каналу передачі інформації.	Визначення та аналіз подій в енергосистемі

**2. Визначення місця події в енергосистемі за допомогою даних, отриманих від WMU.** Одним з основних напрямків застосування інформації саме від WMU є локалізація та



**Рис. 2.** Модель розподільчої мережі з двома WMU, що встановлені на початку та в кінці лінії (адаптовано з праці [5])

класифікація подій в електричних мережах [4–9]. У працях [4, 5] автори розглядають використання двох WMU, розміщених на початку і в кінці лінії, між якими відбувається подія. Лінія ділиться на сегменти, на яких і здійснюється пошук місця події (рис. 2).

Розрахунок сигналів проходить спочатку в напрямку від першого WMU до другого, а потім навпаки – від другого до першого. Знаючи величини струмів та напруг в місцях розташування обох WMU ( $I_{wmu1}$  та  $U_{wmu1}$  отримано від WMU1, а  $I_{wmu2}$  та  $U_{wmu2}$  від WMU2) та розраховувавши опори з провідностями сегментів лінії, можна визначити напруги на всіх сегментах.

$$\begin{aligned}
 U_1^f &= U_{wmu1}; \\
 U_2^f &= U_1^f - (I_{wmu1})Z_1; \\
 U_n^f &= U_{n-1}^f - (I_{wmu1} - I_2^f - \dots - I_{n-1}^f)Z_{n-1};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_n^b &= U_{wmu2}; \\
 U_{n-1}^b &= U_n^b + (I_{wmu2})Z_{n-1}; \\
 U_1^b &= U_2^b + (I_2^b + \dots + I_{n-1}^b + I_{wmu2})Z_1,
 \end{aligned}$$

де індекс  $f$  показує напрямок розрахунку від першого WMU до другого, а індекс  $b$  – від другого WMU до першого. Звісно, місце події невідомо, тому невідомо і які саме значення сигналів розраховані вірно. Ідея авторів полягає в тому, що в першому випадку розрахунок синхрорформ сигналів буде вірним від початку лінії до місця події (1), а в другому випадку – від кінця лінії до місця події (2).

$$U_1^f, \dots, U_k^f, U_{k+1}^f, \dots, U_n^f; \quad (1)$$

$$U_1^b, \dots, U_{k-1}^b, U_k^b, \dots, U_n^b. \quad (2)$$

Тобто, якщо брати до уваги всі виміри в розрахунках, єдине правильне значення, або скоріше значення з найменшою відмінністю в обох випадках, буде саме у сегменті лінії, де відбулася подія (сегмент  $k$ ).

Логічне розширення цього методу наводиться у праці [6], де використовуються синхронізовані фігури Ліссажу для визначення та класифікації подій в мережі. Фігури Ліссажу в цілому відображають залежність між двома синусоїдальними функціями в графічній формі. Донедавна їх застосовували переважно для аналізу частот та фазових співвідношень між двома гармонійними сигналами. Автори цієї роботи запропонували використовувати саме синхронізовані за часом фігури Ліссажу, тобто побудовані на синхрорформах сигналів від двох WMU. Конкретніше, розглядаються 2 типи фігур Ліссажу. Перший тип будується як різниця синхрорформ сигналів напруги від різниці синхрорформ сигналів струму. Другий – як різниця синхрорформ сигналів напруги від різниці похідних синхрорформ сигналів струму.

Аналізуючи отримані фігури, автори виявили деякі закономірності. Так, зміна фігури говорить про виникнення події, кут нахилу фігури ілюструє відстань до місця події, а за формою фігури можна визначити тип події. Зібравши та обробивши достатній об'єм даних, можна визначати та класифікувати події в електричній мережі.

У роботі [7] пропонують використовувати інформацію у вигляді фігур Ліссажу, побудованих як різниця синхрорформ сигналів напруги від різниці синхрорформ сигналів струму з їхньою подальшою обробкою згортковою нейронною мережею для розгляду необхідних подій в мережі. У момент виникнення події фігура Ліссажу різко змінює форму, однозначно виділяючи початок нестандартного режиму. З цього моменту та протягом одного періоду будується синхронізована фігура Ліссажу для подальшого аналізу. Як фактори, що ускладнюють подальший розгляд подій, автори виділяють: кут події, тобто момент виникнення події на синусоїді синхрорформи сигналу; відстань від WMU до події, яка характеризується нахилом фігури; опір у місці події, що впливає на розмір фігури.

Автори роботи [7] пропонують використовувати згорткові нейронні мережі для аналізу отриманої інформації саме у вигляді зображень, наголошуючи на тому, що саме у такому вигляді проявляються помітні закономірності у фігурах Ліссажу та є значний потенціал обробки отриманих сигналів, адже цей клас нейронних мереж успішно себе зарекомендував у обробці зображень.

Цікавим варіантом практичного застосування даних від WMU є праця [8], де автори пропонують використовувати напруженості електромагнітного поля та струми як основні сигнали електричної мережі, а також розглядають ідею визначення параметрів лінії (індуктивність та опір), якщо вони не відомі заздалегідь. У цьому рішенні застосовуються пристрої, що розміщуються безпосередньо на лініях електропередач та живляться від електромагнітного поля цих ліній. Таким чином, ці прилади не потребують зовнішнього джерела живлення та вимірюють синхрорформи сигналів без використання вимірювальних трансформаторів напруги та струму, тобто на їхню точність не впливають похибки вимірювальних трансформаторів. Разом з тим треба відмітити, що пропонується застосування конкретного виробу та програмного забезпечення. У цьому разі виникає доволі багато питань до такого підходу. При змен-

шенні струму лінії нижче 10 А ці прилади не зможуть працювати, розрахунок параметрів лінії проводиться з багатьма припущеннями, заява про “дешеві” WMU сприймається скоріше як рекламний хід та залишаються питання щодо обробки та передачі достатньо великої кількості інформації (130 точок на період).

**3. Використання фігур Ліссажу у захистах енергетичних об'єктів.** Раніше фігури Ліссажу майже не застосовувалися в логіці роботи захистів. Але з популяризацією та поширенням WMU з'явилися і нові алгоритми, засновані на інформації у вигляді фігур Ліссажу [9,10]. У праці [9] пропонується осноувати логіку роботу захисту лінії на основі Евклідової відстані між фігурами Ліссажу, побудованими до та після аварії. Самі фігури будуються як відношення струмів у кожній фазі до напруги у тій самій фазі.

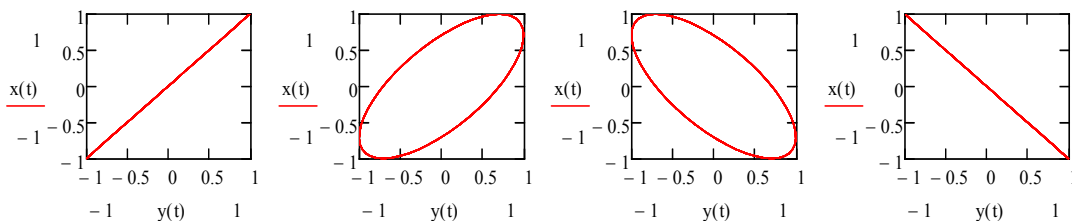
Цікавими здаються ідеї, наведені в роботі [10], де розглядається можливість використання фігур Ліссажу для захисту шин енергооб'єктів на основі орієнтації фігур Ліссажу. У цьому випадку фігури будуються пофазно як відношення накладеного струму в пошкодженій лінії до суми накладених струмів у всіх інших лініях, під'єднаних до шини. Необхідні сигнали описуються формулами (3)–(4).

$$x(t)=X_m\cos\omega t; \quad (3)$$

$$y(t)=Y_m\cos(\omega t+\theta), \quad (4)$$

де  $X_m$  та  $Y_m$  – пікові значення  $x(t)$  та  $y(t)$  відповідно, а  $\theta$  – кут між ними.

У випадку  $X_m=Y_m=1$  та  $\omega = 2\pi \cdot 50$  для  $\theta = 0, 45, 135, 180^\circ$  фігури Ліссажу наведено на рис. 3. За розрахунками авторів роботи [10], отримані фігури будуть знаходитись у відповідних квадрантах залежно від того, чи є пошкодження зовнішнім (2-й та 4-й квадранти) або внутрішнім (1-й та 3-й квадранти). Таким чином, якщо фігури Ліссажу на всіх лініях знаходяться у 1-му та 3-му квадрантах, пошкодження вважається внутрішнім і віддається команда на відключення.



**Рис. 3.** Форми фігур Ліссажу залежно від кута між сигналами, використаними для їхньої побудови в разі  $\theta = 0, 45, 135, 180^\circ$  відповідно (складено на основі [10])

Автори праці [10] окремо розглядають випадки зовнішнього і внутрішнього пошкодження, насичення вимірювальних трансформаторів струму, переходу зовнішнього пошкодження у внутрішнє за умови насичення трансформатора, внутрішнє пошкодження під час збудження силового трансформатора та вплив білого шуму. Треба також відмітити досить невелику частоту дискретизації в 1 кГц і застосування фільтра згладжування задля захисту від високочастотних шумів, а також урахування лише струмів за відсутності напруг. Заявлений час виявлення внутрішнього пошкодження – 2 мс з опором у місті пошкодження до 500 Ом.

**Висновки.** WMU знаходять своє місце в сучасній енергетиці насамперед для моніторингу вищих гармонік, аналізу перехідних процесів та більш точного контролю параметрів енергосистеми. Застосування WMU має сенс у мережах з переходом постійної напруги в змінну, розподіленій генерації та у відновлювальній генерації в цілому. Тобто в таких мережах, де є частими відпрацювання батарей конденсаторів та інверторів. Зі зростанням долі відновлювальної енергетики в загальному об'ємі генерації України таких сегментів мережі стає все більше. Отже, стає вагомішою роль пристроїв моніторингу стану електричних мереж. Застосування саме WMU не є обов'язковим, але дає змогу вирішити низку завдань, пов'язаних з об'ємами необхідної інформації щодо якості електроенергії, які до цього вирішували за допомогою PMU та PQA.

Основною задачею, що ставиться перед РМУ, є контроль потужностей енергосистеми в неаварійних режимах, а у випадку РQA – аналіз якості електроенергії нормальних режимів. Тому вхідні струмові ланцюги цих приладів розраховані умовно на 2 Іном. Водночас WMU позиціонуються як універсальне обладнання вимірювання сигналів, яке з однаковою точністю вимірює сигнали як в нормальному, так і в аварійному режимах. Але аварійне значення струму треба вимірювати за стандартом у діапазоні 40 Іном. Отже, з'являється проблема точності розрахунків сигналів у зв'язку з неможливістю калібрування вхідних ланцюгів на необхідні значення. Вирішенням цієї проблеми можуть бути додаткові вхідні модулі, розраховані на велике значення струму, але це ще більше ускладнює виконання пристрою. Інший фактор, що притаманний саме РМУ, є перетворення вхідних сигналів струму та напруги на відповідні синхрофазори. З одного боку це потребує більших обчислювальних можливостей від РМУ, але з іншого дозволяє зменшити об'єм даних, що передаються на вищі рівні. Використання даних від WMU у формі фігур Ліссажу дасть змогу аналогічним шляхом зменшити кількість інформації від WMU. Характерним для РQA є передача даних не в реальному часі, а середніх значень на деякому проміжку після обробки приладом, що цілком логічно для моніторингу якості електроенергії, але не підходить для визначення та швидкого аналізу подій в енергосистемі.

Також існує кілька проблем, характерних для будь-яких пристроїв з високою частотою дискретизації незалежно від сфери їхнього використання. Із підвищенням частоти дискретизації зростає ціна застосування приладу. Це обумовлено необхідністю високих розрахункових можливостей самих пристроїв, широкими каналами передачі даних від пристроїв, складними фільтрами для нейтралізації високочастотних шумів. Іншим джерелом похибки виступають вимірювальні трансформатори, з яких безпосередньо і надходять сигнали. Кожен з цих трансформаторів має свій клас точності і відповідно теж вносить деяку похибку. При великій частоті дискретизації приладу ці похибки суттєво впливають на загальну точність вимірів. Задовольнити необхідні критерії точності та кількості інформації при збереженні невисокої ціни приладу є практичним завданням, що необхідно розв'язати для масштабного застосування WMU.

Хоча сама ідея застосування WMU як джерел інформації є цікавою, але потребує вирішення вищеназваних проблем. Частина з цих проблем наразі намагаються розв'язати. Так, в роботі [8] відійшли від використання вимірювальних трансформаторів, у праці [10] не вимірюють напруги, а в роботі [11] пропонують стискати однофазні фігури Ліссажу у трифазні, зменшуючи як час визначення події, так і розмір пакетів переданої інформації.

1. Стогній Б.С., Ушаповский К.В., Мольков А.Н., Сопель М.Ф., Павловский В.В., Пилипенко Ю.В. Система глобального мониторинга, синхронизации и регистрации системных параметров ОЭС Украины – основа нового качества автоматизированного и оперативного управления. *Енергетика та електрифікація*. 2006. № 4. С. 8–11.
2. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф. Застосування засобів моніторингу перехідних режимів в ОЕС України при розв'язанні задач диспетчерського керування. *Праці ІЕД НАНУ*. 2009. Вип. 23. С. 147–155.
3. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Варський Г.М. Досвід створення комплексних систем моніторингу та керування електроенергетичних об'єктів. Перспективи їх розвитку. *Праці ІЕД НАНУ*. 2012. Вип. 32. С. 39–48.
4. Izadi M., Mohsenian-Rad H. Synchronous waveform measurements to locate transient events and incipient faults in power distribution networks. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2021. Vol. 12. No. 5. Pp. 4295–4107.
5. Izadi M., Mohsenian-Rad H. Event location identification in distribution networks using waveform measurement units. Proc. *IEEE PES ISGT Europe*, the Hague. 2020. Pp. 924–928.
6. Izadi M., Mohsenian-Rad H. Characterizing synchronized lissajous curves to scrutinize power distribution synchro-waveform measurements. *IEEE Trans. Power Syst*. 2021. Vol. 36. No. 5. Pp. 4880–4883.
7. Izadi M., Mohsenian-Rad H. A Synchronized Lissajous-Based Method to Detect and Classify Events in Synchro-Waveform Measurements in Power Distribution Networks. *IEEE Trans. Smart Grid*, February 2022.
8. Izadi M., Mousavi M., Lim J.M., Mohsenian-Rad H. Data-Driven Event Location Identification Without Knowing Network Parameters Using Synchronized Electric-Field and Current Waveform Data. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, July 2022.

9. Saha S., Debnath A., Pavankumar Y., Debnath S. A Lissajous Based Technique for Fault Detection and Faulty Phase Identification in Transmission Line. *Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*, 2023.
10. Sarlak M. A Lissajous Curve–Based Method for Busbar Protection. *Wiley International Transactions on Electrical Energy Systems Volume*. 2024. Article ID 8834200.
11. Sidqi F., Manaz M., Priyadi A., Chou C., Airlangga M. Synchro-Waveform Monitoring Unit Application: Lissajous DQ Curve to Improve Situational Awareness in Power Distribution Network. *International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, 2025.

## ANALYSIS OF DATA USAGE ACQUIRED FROM WAVEFORM MEASURING UNITS DESCRIBING STATE OF ENERGY NETWORK

**D.V. Voitov**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteiskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [dmytrovoitov@gmail.com](mailto:dmytrovoitov@gmail.com)

*In this work the development of energy networks' monitoring to obtain more detailed information about their main signals is examined. The focus of the article is a new type of current and voltage sensors – WMUs (waveform measuring units) and their capabilities compared to similar devices. A number of scientific and applied works on the topic of application of information received from WMUs are analyzed. Main methods for data usage obtained from WMUs to ensure greater awareness of the energy quality in the system are briefly investigated. Particular attention is paid to the application of Lissajous curves built on signals received from WMUs, both in theoretical and practical areas. The positive and negative features when using WMUs and devices used to solve similar problems in Ukraine are outlined (PMU – phasor measurement unit and PQA – power quality analyzer). Ref. 11, fig. 3, table.*

**Key words:** electric power system, monitoring, WMU, PMU, PQA, Lissajous curves, sampling frequency, energy quality.

1. Stogniy B.S., Ustchapovskii K.V., Molkov A.N., Sopel M.F., Pavlovskii V.V., Pilipenko Y.V. Global monitoring, synchronization and registration of Ukraine's Unified Energy System's parameters - the basis of new quality for automated and operational control. *Energetyka ta elektryfikatsia*. 2006. No 4. Pp. 8–11. (Rus)
2. Stogniy B.S., Kyrylenko O.V., Butkevych O.F., Sopel M.F. Implementation of means for monitoring transient processes in the Unified Energy System of Ukraine when solving dispatch control problems. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2009. Vol. 23. Pp. 147–155. (Ukr)
3. Stogniy B.S., Sopel M.F., Varskiy G.M. Experience in the development of complex monitoring and control systems for electric power facilities. Prospects for their advancement. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2012. Vol. 32. Pp. 39–48. (Ukr)
4. Izadi M., Mohsenian-Rad H. Synchronous waveform measurements to locate transient events and incipient faults in power distribution networks. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2021. Vol. 12. No 5. Pp. 4295–4107.
5. Izadi M., Mohsenian-Rad H. Event location identification in distribution networks using waveform measurement units. *Proc. IEEE PES ISGT Europe, the Hague*. 2020. Pp. 924–928.
6. Izadi M., Mohsenian-Rad H. Characterizing synchronized lissajous curves to scrutinize power distribution synchro-waveform measurements. *IEEE Trans. Power Syst*. 2021. Vol. 36. No 5. Pp. 4880–4883.
7. Izadi M., Mohsenian-Rad H. A Synchronized Lissajous-Based Method to Detect and Classify Events in Synchro-Waveform Measurements in Power Distribution Networks. *IEEE Trans. Smart Grid*, February 2022.
8. Izadi M., Mousavi M., Lim J. M., Mohsenian-Rad H. Data-Driven Event Location Identification Without Knowing Network Parameters Using Synchronized Electric-Field and Current Waveform Data. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, July 2022.
9. Saha S., Debnath A., Pavankumar Y., Debnath S. A Lissajous Based Technique for Fault Detection and Faulty Phase Identification in Transmission Line. *Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*, 2023.
10. Sarlak M. A Lissajous Curve–Based Method for Busbar Protection. *Wiley International Transactions on Electrical Energy Systems Volume*. 2024. Article ID 8834200.
11. Sidqi F., Manaz M., Priyadi A., Chou C., Airlangga M. Synchro-Waveform Monitoring Unit Application: Lissajous DQ Curve to Improve Situational Awareness in Power Distribution Network. *International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, 2025.

Надійшла: 09.02.2026  
Прийнята: 27.03.2026

Submitted: 09.02.2026  
Accepted: 27.03.2026