

УДК 621.316.7:519.863

SMART-GRID NETWORKS OPTIMIZATION ON THE BASE OF THE PHASORS USAGE

ОПТИМІЗАЦІЯ SMART-GRID МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ФАЗОРІВ

Komenda N.V./ Коменда Н.В.

Ph.D., Associate Professor/ к.т.н., доцент

ORCID: 0000-0002-5944-8665

Lutsk National Technical University, Volyn region, Lutsk, street Lviv, 75, 43000

Луцький національний технічний університет Волинська обл.,

м. Луцьк, вул. Львівська, 75, 43000

Анотація. Розвиток систем електропостачання здійснюється в напрямку їх багатостороннього управління і впровадження smart технологій. Мережі повинні вміти керувати передачею енергії та її споживанням, причому, робити це в режимі реального часу, з максимальною ефективністю та на основі використання нових вимірювальних технологій. Фазор надає набагато точнішу інформацію про форму графіка електроспоживання внаслідок більшої роздільної здатності та синхронізації з часом. Морфометричний підхід дозволяє усунути потенційні недоліки використання фазора.

Ключові слова: Smart-grid, морфометричний підхід, фазор.

Вступ.

Розподілене виробництво енергії - концепція будівництва джерел енергії та розподільчих мереж, яка складається з безлічі споживачів, які виробляють електричну енергію для власних потреб, а також спрямовують надлишки в загальну мережу, рисунок 1.

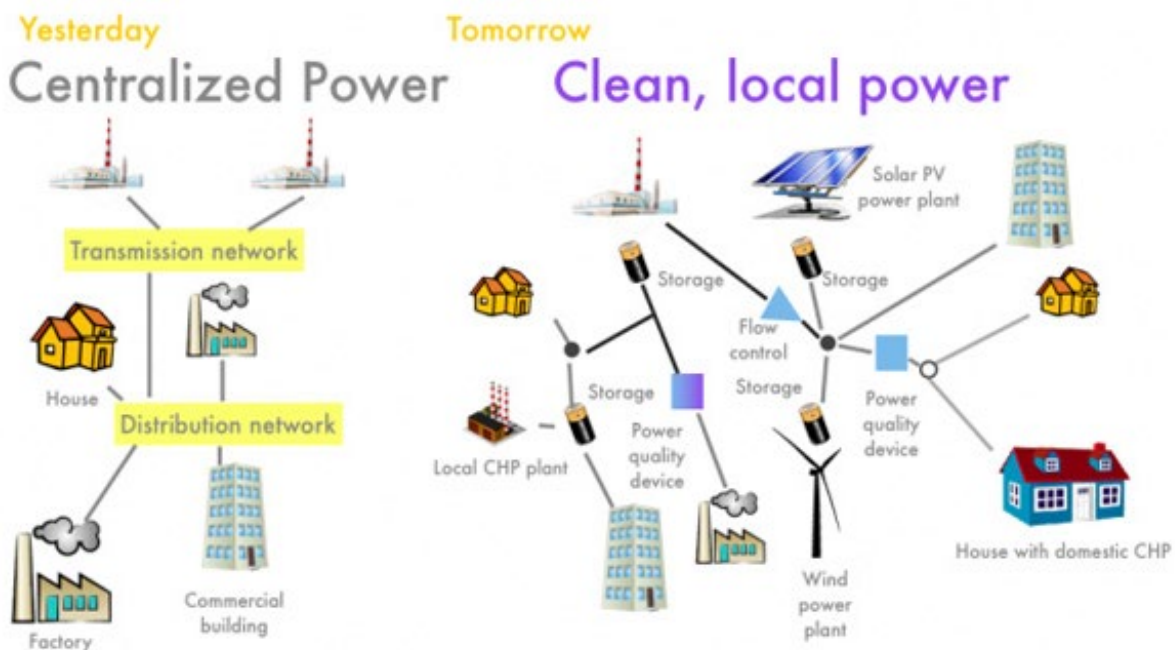
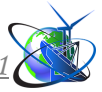


Рисунок 1 – Розподілене виробництво енергії

Даний підхід дозволяє:

- Знизити втрати електроенергії при транспортуванні через максимальне наближення електрогенераторів до споживачів, аж до розташування їх в



одній будівлі.

- Зменшити число, протяжність і необхідну пропускну здатність магістральних ліній електропередачі.
- Пом'якшити наслідки аварій на центральних електростанціях і головних лініях електропередач за рахунок наявності власних джерел енергії.
- Забезпечити взаємне багаторазове резервування електрогенеруючих потужностей.
- Знизити негативний вплив на навколишнє середовище за рахунок застосування засобів альтернативної енергетики, більш повного використання потенційної енергії викопного палива.

Як відомо, наявні базові принципи реалізації концепції smart-grid з виділенням трьох поколінь: smart-grid 1.0 (one way) – реагування на попит; advanced measurement infrastructure (AMI) мережа (на базі AMR, RTU і т.ін. пристроїв) та спеціалізованого програмного забезпечення (EMS / SCADA); розподілена автоматизація smart-grid 2.0 (two ways) - IP-протокол; електромобілі; зберігання енергії; smart-grid 3.0 – роумінг енергії; торгівля енергією peer-to-peer (N-ways), рисунок 2.

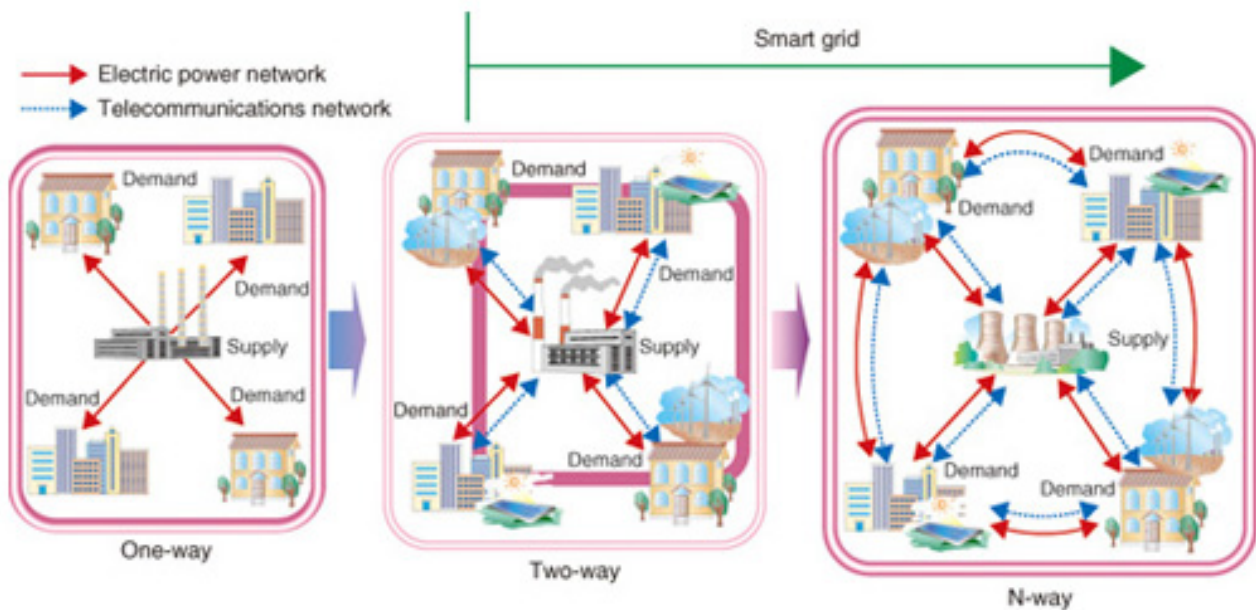


Рисунок 2 – Покоління Smart Grid

Сьогодні способи передачі електроенергії базуються на принципах «одностороннього» зв'язку, розроблених багато десятиліть тому: електростанція направляє електроенергію до виробничих і офісних споруд, житлових будинків і т.д. Більшість не замислюється про те, що настане день, коли мережа перестане бути централізованою, і повинна буде підтримувати передачу енергії від сонячних батарей, розміщених на дахах будівель, і енергії, що виробляється безліччю вітрогенераторів. Тому її інфраструктура і керування повинні ставати все більш «розумними», щоб забезпечити розподіл енергії, отриманої з різних джерел. Мережі повинні вміти керувати передачею енергії та її споживанням, причому, робити це в режимі реального часу, з максимальною ефективністю та на основі використання нових вимірювальних



технологій, рисунок 3.

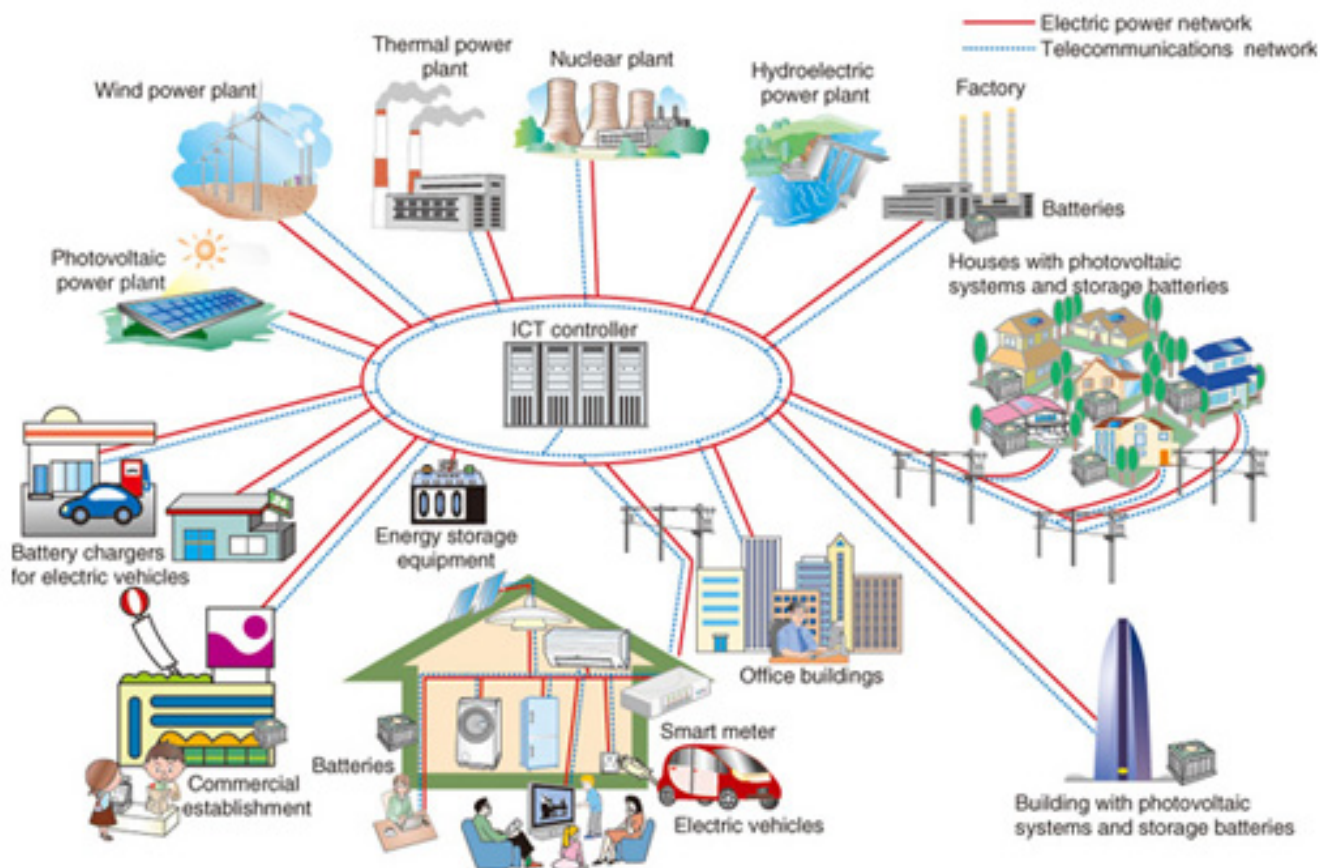


Рисунок 3 – Управління навантаженням smart-grid

Нерівномірність навантаження негативно впливає на процес виробництва, передачі та розподілу електричної енергії. Вирівнювання є операцією, що повинна бути детально обґрунтованою, виваженою та спиратись на ретельний розрахунок та аналіз нерівномірності. Актуальність даних досліджень постійно зростає внаслідок [1]:

- постійного збільшення попиту на електричну енергію;
- інтеграції та управління відновлюваними джерелами енергії;
- задач оптимального використання старіючих активів електроенергетичних систем;
- необхідності забезпечення надійності постачання електроенергії;
- необхідності енергетичної ефективності і безпеки;
- динамічної роботи систем електропостачання.

Основний текст.

В даний час все більш актуальним стає дослідження, впровадження та постійне вдосконалення ряду систем, що здійснюють моніторинг, контроль та управління режимами роботи систем електропостачання, що включають всі ланки процесу генерації-передачі та розподілу і споживання електроенергії.

Для зниження попиту в періоди високої вартості електроенергії інтелектуальні засоби зв'язку та вимірювання відслідковують режими навантажень та обмінюються інформацією з енергосистемою.



Для того щоб мотивувати їх, щоб скоротити використання і виконувати те, що називається пік секвестру або пік вирівнювання, ціни електроенергії збільшуються в періоди високого попиту, і зниження в періоди низького попиту.

Використовуючи алгоритми математичного прогнозування можна передбачити, скільки резервних генераторів необхідно використовувати, щоб досягти певної інтенсивності відмов. У традиційній сітці, інтенсивність відмов може бути зменшена тільки за рахунок більшої кількості резервних генераторів.

В smart-grid, зменшення навантаження навіть невеликої частини клієнтів може усунути цю проблему. Smart-grid може попередити всіх кінцевих приймачів електроенергії на основі використання технології internet of things (iot), про необхідність тимчасового зменшення навантаження (щоб дати час, щоб запустити додаткові генеруючі потужності) або безперервно (в разі обмежених ресурсів).

Оцінка стану smart-grid здійснюється на основі різних методів.

WLS метод:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h(x))^2}{\sigma_i^2} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)], \quad (1)$$

де $i = 1, 2, \dots, m$;

$$R = \text{diag} \{ \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \dots, \sigma_m^2 \} = \text{Cov}(e) = E \left[e \cdot e^T \right].$$

Розв'язання вищевказаного рівняння є ітеративним з використанням метода Ньютона.

Більш складні методи, що дозволяють усувати шум, та надавати пріоритет тим чи іншим вимірюванням:

- Метод ортогональної трансформації (ОТ);
- Гібридний метод (НМ);
- Нормовані рівняння з обмеженнями (Ne/C);
- Nachtel augmented matrix.

Для отримання вихідної інформації для запуску процесу оцінки стану smart-grid використовуються різні системи, зокрема Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) та Phasor Measurement Unit (PMU). Для всебічної оцінки нас цікавить вимірювання графіка електричних навантажень, як найбільш повної характеристики навантаження у вузлі системи електропостачання. Здійснимо просте порівняння даних систем.

Система SCADA контролює, оптимізує та управляє системами генерації та передачі електричної енергії. PMU (фазори) - це пристрій для вимірювання форми електричної хвилі в електричній мережі з застосуванням спеціального джерела для синхронізації за часом. Синхронізація за часом дозволяє порівнювати виміри у реальному часі з різних частин мережі. Таке вимірювання відоме як синхрофазор або синхронізовані комплексні амплітуди. Власне пристрій вимірювання комплексних амплітуд може бути як окремим пристроєм, так і додатковим функціоналом пристрою релейного захисту або інших пристроїв електричних мереж. Результати порівняння запишемо в



таблицю 1.

Таблиця 1 Результати порівняння параметрів систем

| Атрибут | SCADA | PMU |
|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Роздільна здатність вимірювань | 1 замір кожні 2-4 секунди | 10-60 замірів в секунду |
| Заміри | Величина тільки | Величина і фазовий кут |
| Синхронізація часу | Ні | Так |
| Застосування | Локальний моніторинг і контроль | Глобальний моніторинг і контроль |

Як видно з таблиці 1, PMU надає набагато точнішу інформацію про форму графіка електроспоживання внаслідок більшої роздільної здатності та синхронізації з часом. Тому, PMU (фазори) вважаються одними з найважливіших складових електричних мереж у майбутньому.

Фазори.

Сигнал змінного струму може бути математично представлений рівнянням:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi), \tag{2}$$

де X_m – амплітуда синусоїдального сигналу;

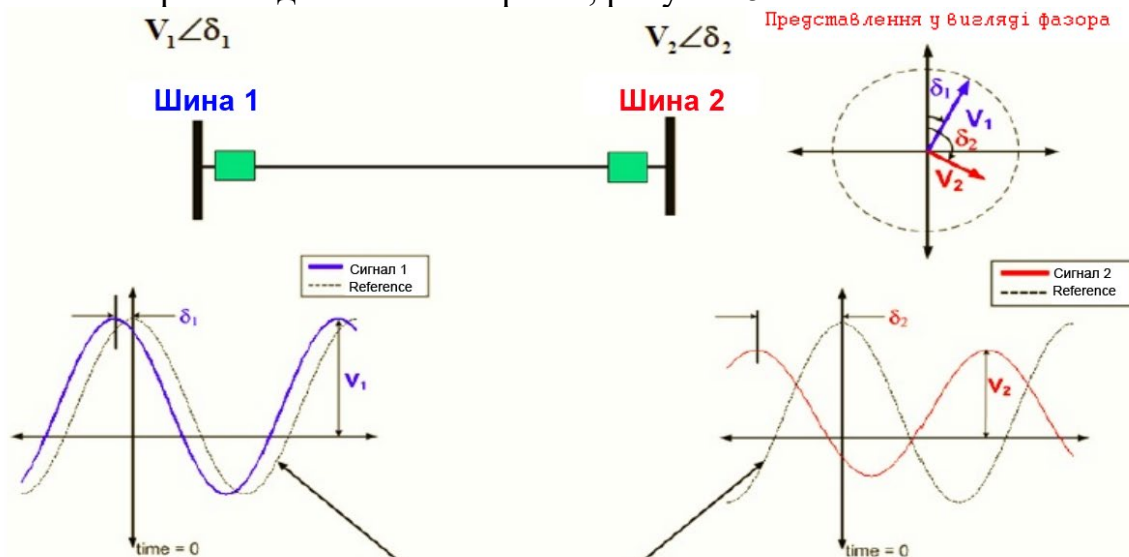
$\omega = 2\pi f$ – миттєва частота;

φ – кутова відправна точка процесу.

У фазовому позначенні ця форма сигналу зазвичай представлена як:

$$\bar{X} = X_m \angle \varphi. \tag{3}$$

Вектор обертання, який використовується для опису схем змінного струму характеризується величинами 'Величина' та 'Фаза'. За визначенням вони обертаються проти годинникової стрілки, рисунок 5.



Спільний Reference Сигнал в віддалених місцях є можливий завдяки GPS синхронізації

Рисунок 5 – Представлення сигналу у вигляді фазора



- Синхрофазор – фазор, який накладається на надзвичайно точне посилення на час (з годинником GPS).
- Синхронізовані фазори (синхрофазори) забезпечують вимірювання в реальному часі електричних величин по всій енергосистемі.
- Фазори, що містять результуючий час, можуть бути передані локальному або віддаленому приймачу з частотою до 60 зразків в секунду. Постійно вимірює напругу та інші ключові параметри і передає відмічені часом повідомлення.

Декілька PMU під'єднуються до концентраторів даних, які в свою чергу під'єднуються до концентраторів даних більш високого ієрархічного рівня, що в свою чергу під'єднуються до глобальної мережі контролю електроенергетичної системи в режимі реального часу [2].

Концентратор даних фазорів (PDC):

- Вирівнює інформацію за часом, при отриманні вхідних повідомлень PMU з декількох вимірювальних приладів і надсилає агрегований синхронізований набір даних як єдиний потік даних.
- Архівує дані та обробляє інформацію.
- Обмінюється записами з іншими PDC через захищені канали зв'язку.

Глобальна мережа контролю електроенергетичної системи (RTDMS) дозволяє підключення спеціально розробленого програмного забезпечення на основі синхрофазора для забезпечення моніторингу в режимі реального часу ситуації в регіоні для операторів, планувальників та оперативних інженерів, а також можливість контролювати та аналізувати динаміку енергосистеми на основі замірів/обчислень:

- фазових кутових відмінностей (стрес мережі);
- стабільності малих сигналів (коливання та демпфування);
- нестабільності частоти;
- дисбаланс генерації та навантаження;
- чутливість співвідношення – Потужність/кут фаз;
- чутливість співвідношення – Потужність/напруга.

При всіх перевагах використання PMU, вони мають ряд недоліків, чи, можна сказати, породжують ряд задач, що необхідно вирішити для їх ефективного використання. Серед них:

- візуалізація даних PMU – важко візуалізувати та управляти великими обсягами даних;
- передача даних PMU – вимагається дорога мережа зв'язку;
- задача оптимального розміщення PMU в мережах;
- високі інвестиції;
- різні вимоги від комунальних та інших надавачів послуг;
- затримки зв'язку.

Частковому вирішенню вказаних проблем може сприяти модифікація фазора за допомогою морфометричного підходу.



Морфометричний підхід

Морфометрія є відомим інструментом аналізу форми фігур і широко використовується для аналізу нерівномірності форми в різних науках – медицині, географії, матеріалознавстві [3-7]. Її застосування дозволяє отримати детальну оцінку форми, і, таким чином, досконально проаналізувати нерівномірність фазора, рисунок 6.

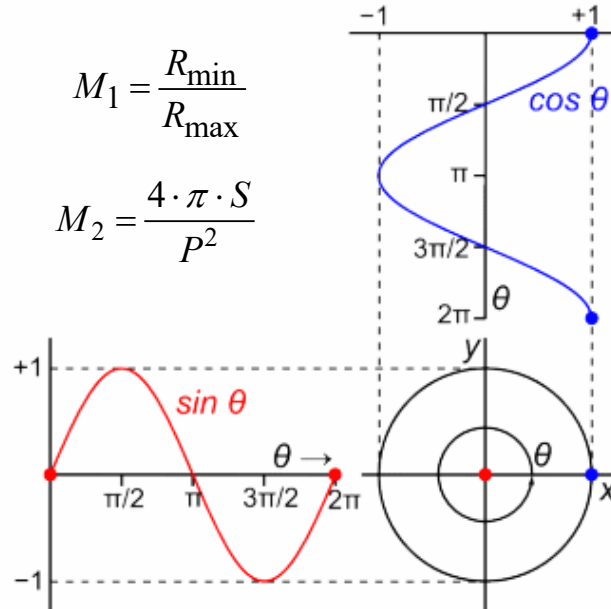


Рисунок 6 – Морфометрія фазора

Фігура фазора утворює замкнений багатокутник певної форми. Якщо сукупна форма сигналу відповідає синуса, то дана фігура є колом. Для оцінки форми фазора можливо використати морфометричні параметри (M_1, M_2, M_3) .

Округлість $(M_1 = R_{\min} / R_{\max})$ детально характеризує нерівномірність. При великій нерівномірності $(R_{\min} \ll R_{\max})$ $M_1 \rightarrow 0$. Якщо $R_{\min} \approx R_{\max}$, то $M_1 \rightarrow 1$, і фазор є рівномірним.

Компактність $(M_2 = 4 \cdot \pi \cdot S / P^2)$ визначається як відношення між площею ДРТ (S) і квадратом її периметру (P) . В умовах значної нерівномірності ДРТ величина P значно зростає при фактично незмінній величині S і, відповідно, $M_2 \rightarrow 0$. При синусоїдному сигналі фазор є колом, для якого $M_2 = 1$. Більш детальний опис та аналіз морфометричних показників наявний в роботах [3-9].

Основною перевагою морфометричного представлення фазора є те, що воно дозволяє в РМУ відповідні 10-60 замірів, що передаються на сервери для обробки одним значенням морфометричної оцінки та відповідної амплітуди синусоїдального сигналу.

$$X = (X_m; M_1) \vee (X_m; M_2) \tag{4}$$

Внаслідок застосування морфометричної оцінки ми можемо усунути потенційні недоліки РМУ, таблиця 2.



Таблиця 2

| Недолік PMU | Вплив використання морфометричної оцінки |
|--|---|
| - важко візуалізувати та управляти великими обсягами даних | - обсяг даних зменшується в 60 разів |
| - вимагається дорога мережа зв'язку та великі інвестиції | - внаслідок значного зменшення кількості даних, зменшуються вимоги до передачі інформації в режимі реального часу та параметрів синхронізації, що здешевлює схему |
| - затримки зв'язку | - обсяг передачі даних відчутно зменшується, що частково усуває дану проблему |

Висновки.

1. Розвиток систем електропостачання здійснюється в напрямку їх п-стороннього управління і впровадження smart технологій.

2. Оптимальну оцінку стану smart-grid мережі можливо здійснити на основі використання фазорів.

3. Морфометричний підхід дозволяє усунути потенційні недоліки використання фазорів.

Література:

1. Phasor Measurement Unit or Synchrophasors. [Електронний ресурс]: Режим доступу: http://best.eng.buffalo.edu/Teaching/EE611/Phasor_Measurement_Unit.pdf

2. Real Time Dynamics Monitoring System. [Електронний ресурс]: Режим доступу: https://www.electricpowergroup.net/epg_products/rtdms/default.aspx

3. Komenda T. Morphometrical analysis of daily load graphs / T. Komenda, N. Komenda // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Volume 42, Issue 1, November 2012. - P.721-727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2011.03.031>

4. Коменда Н. В. Морфометричний розрахунок навантажувальних втрат електроенергії / Н. В. Коменда, Т. І. Коменда // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №6. – С. 110–113.

5. Коменда Н. В. Морфометрична оцінка та критерій рівномірності графіка електричних навантажень / Н. В. Коменда // Вісн. нац. ун-ту „Львівська політехніка” (Електроенергетичні та електромеханічні системи). – 2010. – №666. – С. 42–46..

6. Коменда Н. В. Морфометрична класифікація графіків електричного навантаження промислових підприємств / Н. В. Коменда // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №1. – С. 67–70.

7. Коменда Н.В. Пошук споживачів-регуляторів на основі морфометричного підходу при управлінні добовим навантаженням промислового підприємства / Н.В. Коменда, Т.І. Коменда, О.Д. Демов // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2010. – № 27.



– С.22–26.

8. Демов О. Д. Морфометрична оцінка графіка електричних навантажень / О. Д. Демов, Н. В. Коменда, Т. І. Коменда // Промелектро. – 2008. – № 4. – С. 22–25.

9. Демов О. Д. Морфометрія графіка електричних навантажень / О. Д. Демов, Т. І. Коменда, Н. В. Коменда // Енергетика та електрифікація. – 2009. – № 8. – С. 59–62.

***Abstract.** The development of power supply systems is carried out in the direction of their multilateral management and the introduction of smart technologies. Networks must be able to manage the transmission of energy and its consumption and to do it in real time, with maximum efficiency and based on the use of new measurement technologies. The phasor provides much more accurate information about the shape of the power graph due to its higher resolution and time synchronization. The morphometric approach makes it possible to eliminate the potential disadvantages of using a phasor.*

***Key words:** Smart-grid, morphometric approach, phasor.*

© Коменда Н.В.