

МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНКИ СТАНУ РЕЖИМУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИСТРОЮ PMU (PHASOR MEASUREMENT UNIT)

Гащишин В.А., Кондратьєв С.С., магістранти, Банін Д.Б., к.т.н., доцент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. У світовій практиці аналіз режимів електроенергетичних систем у темпі процесів виробництва, передачі та споживання електроенергії (задача оцінки стану мережі ОСМ) [1] за останні десятиріччя отримав нове джерело вимірювання – пристрій PMU, що додав до стандартних вузлових телевимірювань (P, Q, U) вимір фази синусоїди напруги, який синхронізований по вузлам енергосистеми, де цей пристрій встановлено. Звісно, у цілях підвищення надійності, достовірності та ефективності результатів ОСМ доцільна редакція її базових математичних методів і алгоритмів, але найголовнішою є поява практичної можливості реалізації та впровадження задачі ОСМ для автономних мережевих структур з рядом балансуєчих вузлів, режими котрих тепер можуть бути синхронізовані як по модулю, так і по вектору живлячої напруги [2]. Конструктивне рішення мікропроцесорної системи PMU та фундаментальна математика для обробки «дискретної синусоїди» при визначенні параметрів змінного струму, у тому числі вузлової напруги, у теперішній час є затребуваною тематикою та знаходиться у стадії стандартизації [3]. В Україні розробка математичних моделей по системам ОСМ з застосуванням PMU є актуальною і представляє практичний інтерес.

Постановка задачі. Функціональна математика пристрою PMU у залежності від об'єму накладених на нього функцій (гармонічний аналіз спектра частот вхідного сигналу, детектування коливань у мережі, візуалізація динаміки зміни частоти та фази та інше) може використовувати методи дискретного розкладання Фур'є (DFT, SDFT), фільтри Калмана, розкладання в ряд Тейлора та інше. При цільовій направленості на задачу оцінки стану режиму, де вимагається визначити три основні поточні параметри синусоїди напруги (частота – ω , амплітуда – A , синхрофаза – φ), можна застосувати апарат найменших квадратів (Least Error Squares). Основні математичні рішення тут наступні:

1. Маємо вхідний періодичний дискретний сигнал з різним рівнем спотворення синусоїдальності. Причини спотворень у нашій задачі не представляють інтересу.

2. Необхідно визначити параметри апроксимуючої синусоїдальної функції(A_0, A, ω, φ):

$$U_t = A_0 + A \sin(\omega X_t + \varphi) \quad (1)$$

Будемо використовувати еквівалентну форму цієї функції

$$U_t = A_0 + A_1 \sin(\omega X_t) + A_2 \cos(\omega X_t), \quad (2)$$

де $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$, $\varphi = \arctg(A_2/A_1)$

3. Оскільки частота (ω) не є змінним аргументом при мінімізації середньоквадратичних відхилень апроксимуючої функції від вхідного сигналу, мінімум знаходиться у вирішенні системи:

$$[A] = ([G]_T \cdot [G])^{-1} [G]_T \cdot [U], \quad (3)$$

де $[A]$ – вектор невідомих A_0, A_1, A_2 (розмір 3×1); $[U]$ – вектор реалізацій (вимірів) дискретного сигналу $(N+1, 1)$; $[G], [G]_T$ – матриця елементарних функцій $((N+1) \times 3)$ та її транспонована форма:

$$[G] = \begin{bmatrix} 1 & \sin \omega X_0 & \cos \omega X_0 \\ 1 & \sin \omega X_1 & \cos \omega X_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \sin \omega X_n & \cos \omega X_2 \end{bmatrix}$$

4. Крок дискретності (Δt), частота (ω) та кількість вимірів в дискретнім сигналі напруги зв'язані залежністю $\Delta t = 1/N \cdot \omega$. Відмітимо, що аргумент $X_t = 2\pi \Delta t \cdot t$, де $t = 0, 1, 2 \dots N$.

5. Реальна частота може визначатися до синхронізуючого переривання від GPS (система глобального позиціонування) будь яким числовим методом, наприклад, по двом характерним точкам періоду дискретного сигналу.

6. В задачі ОСМ параметри синусоїди фазної напруги, що виміряні на НН трансформатора, мають бути перераховані до формату лінійної напруги для відповідного вузла розрахункової схеми електричної мережі.

Моделювання задачі ОСМ реалізується по розрахунковим схемам, в котрих забезпечена інформаційна надлишковість, гарантована спостережуваність режиму та реалізовані операції «відбракування аномальних вимірів», що забезпечує достовірність телевимірювань (ТІ, ТС) на рівні класу вимірювальних пристроїв. Оцінка стану відноситься до оптимізаційних задач, де, як правило, критерієм є мінімум квадратичної форми:

$$\min F = [\varepsilon]_T [V] [\varepsilon], \quad (4)$$

де $[\varepsilon], [\varepsilon]_T$ – вектор-стовпець і вектор-строка відхилень розрахункових режимних характеристик від їх вимірних значень. Перші будемо позначати з індексом «р», другі – «в»; $[V]$ – матриця вагових коефіцієнтів і кореляційних зв'язків між вимірюваннями.

Нехай конкретний зріз вимірювань містить величини по вузлам P_B, Q_B, U_B, T_B (кут комплексної напруги, перерахований за даними вимірювань пристроїв РМУ) та по гілкам $(P_{нв}, Q_{нв}, P_{кв}, Q_{кв})$. В результаті розрахунку режиму, що визначає задовольняючі усі закони електротехніки аналогічні значення величин $(P_p, Q_p, U_p, T_p$ та $P_{нр}, Q_{нр}, P_{кр}, Q_{кр})$, забезпечується обчислення поточного критерію (F). Для пошуку оптимуму у розробленій моделі ОСМ використовуються прямі методи вирішення лінеаризованих систем рівнянь з матрицями Якобі чи Гессе [4], а також метод спуску другого порядку з автоматичним вибором кроку $\Delta X_i = (\partial F / \partial X_i) / (\partial^2 F / \partial^2 X_i)$ [5], де ΔX_i - крок по координаті з заданим вимірюванням. В задачі ОСМ реалізований формальний метод опису можливих структур вимірювань, що забезпечує для

конкретної розрахункової схеми зручність управління складом та параметрами варіантного вимірювального зрізу ТВ та ТС.

Матеріали і результати досліджень. Для моделювання дискретного сигналу синусоїди фазної напруги розроблена процедура $APRO_{sin}$, котра по заданим базовій частоті (ω), коефіцієнтам кратності гармонік ($\omega_i = k_i \cdot \omega$, де k_i – ціле число), фазовому здвигу в точці синхронного виміру (φ_i) та відповідним амплітудам (A_0, A_1) створює табличну функцію (x_t, y_t) щодо загального математичного виразу (2). Отримані викривлення синусоїдальності дискретного сигналу через наявність гармонічних складових можуть бути підсилені внесенням випадкової похибки, що регулюється:

$$\bar{Y}_t = Y_t(1 + \gamma_t \cdot pr),$$

де Y_t, \bar{Y}_t – вихідна та скорегована величина поточного значення табличної функції; γ_t, pr - випадкове число у діапазоні ± 1 та коефіцієнт регулювання максимальної додаткової похибки, наприклад при $pr = 0.2$ будемо мати рівень похибки у межах $\pm 20\%$.

Одиниця дискретності в періоді синусоїди визначається згідно п.5 постановки задачі. Крім того, вираховуються параметри апроксимуючої синусоїди A_0^*, A_1^*, φ^* по методу найменших квадратів. На рис. 1, 2, 4 представлені наступні результати:

варіант А: вхідний дискретний сигнал є моделлю синусоїди основної частоти ($\omega = 49.0$ Гц з амплітудою 220 В) та двох «спотворюючих» гармонік ($\omega_8 = 392$ Гц та $\omega_{16} = 784$ Гц). Всі числові дані наведені на рис.1. Результат апроксимації відповідає параметрам основної гармоніки. Середньоквадратичне відхилення дорівнює $\sigma = 7.9$;

варіант Б: вхідний сигнал ($\omega = 50$ Гц, 220 В) «спотворюються» високочастотною гармонікою (2500 Гц) зі значною амплітудою 20 В. Результат апроксимації відповідає основній гармоніці. Відхилення $\sigma = 14.14$. Результати наведені на рис.2;

варіант В: Вхідний сигнал ($\omega = 49.80$ Гц, 220 В) має значну похибку вимірювання у межах $\pm 20\%$. Результат апроксимації «виправив» вимірювання наблизившись до параметрів вхідного сигналу. $\sigma = 12.50$. Результати наведені на рис.4. Всі варіанти розглядались при $N = 71, \Delta t = 1/50 \cdot 71 = 0.000282$.

Головною компонентою задач оцінки стану електричної мережі є програма розрахунку усталеного режиму. Використовуємо вітчизняні промислові комплекси РАО ТВ та Z_REGIM [6]. Однак з метою можливості порівняння результатів з сучасними закордонними матеріалами, наприклад [7] виберемо контрольні розрахункові схеми із фонду еталонних Bus Test System, а саме, електричні системи IEEE39 та IEEE57. Перша відноситься до рівня вітчизняних енергосистем зі складно-замкненими схемами (17 контурів), з мережами надвисокої напруги (345, 230 кВ), з генераторними напругами 22 кВ, де має забезпечуватись фіксація модулів U при врахуванні технологічних

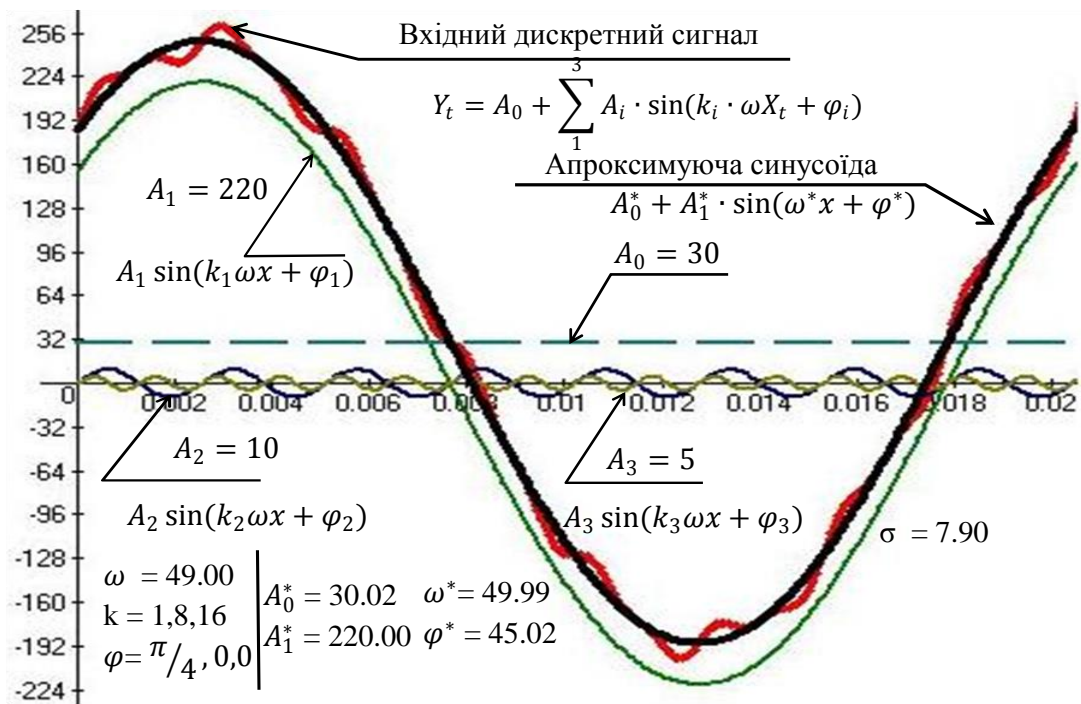


Рисунок 1 – Вхідний сигнал заданий як модель синусоїди основної частоти та двох «спотворюючих» гармонік

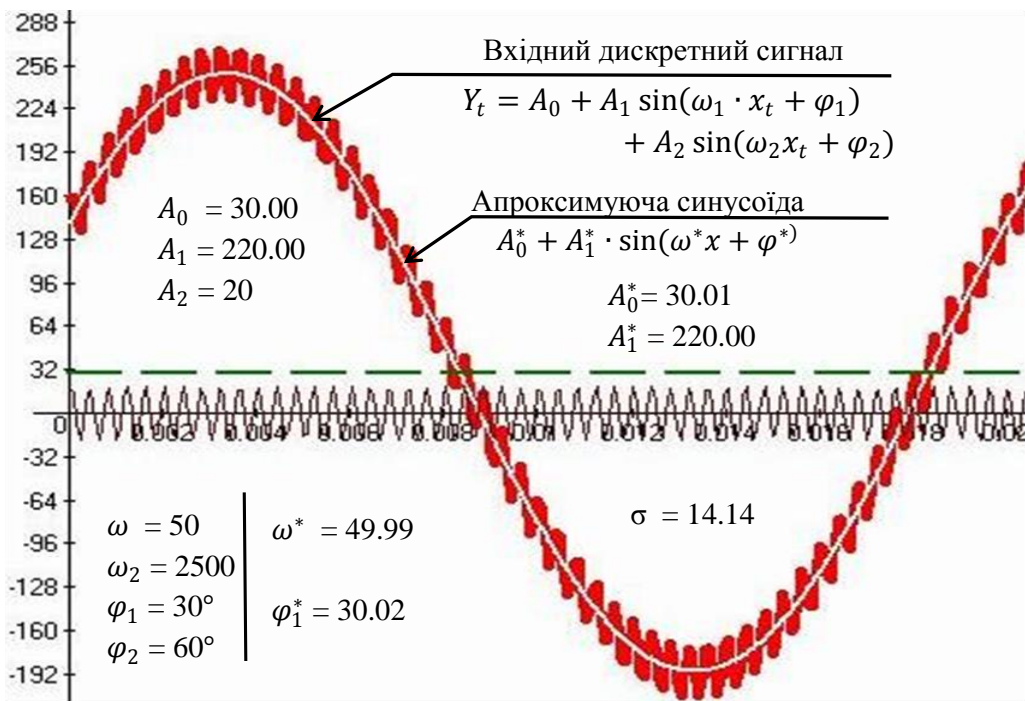
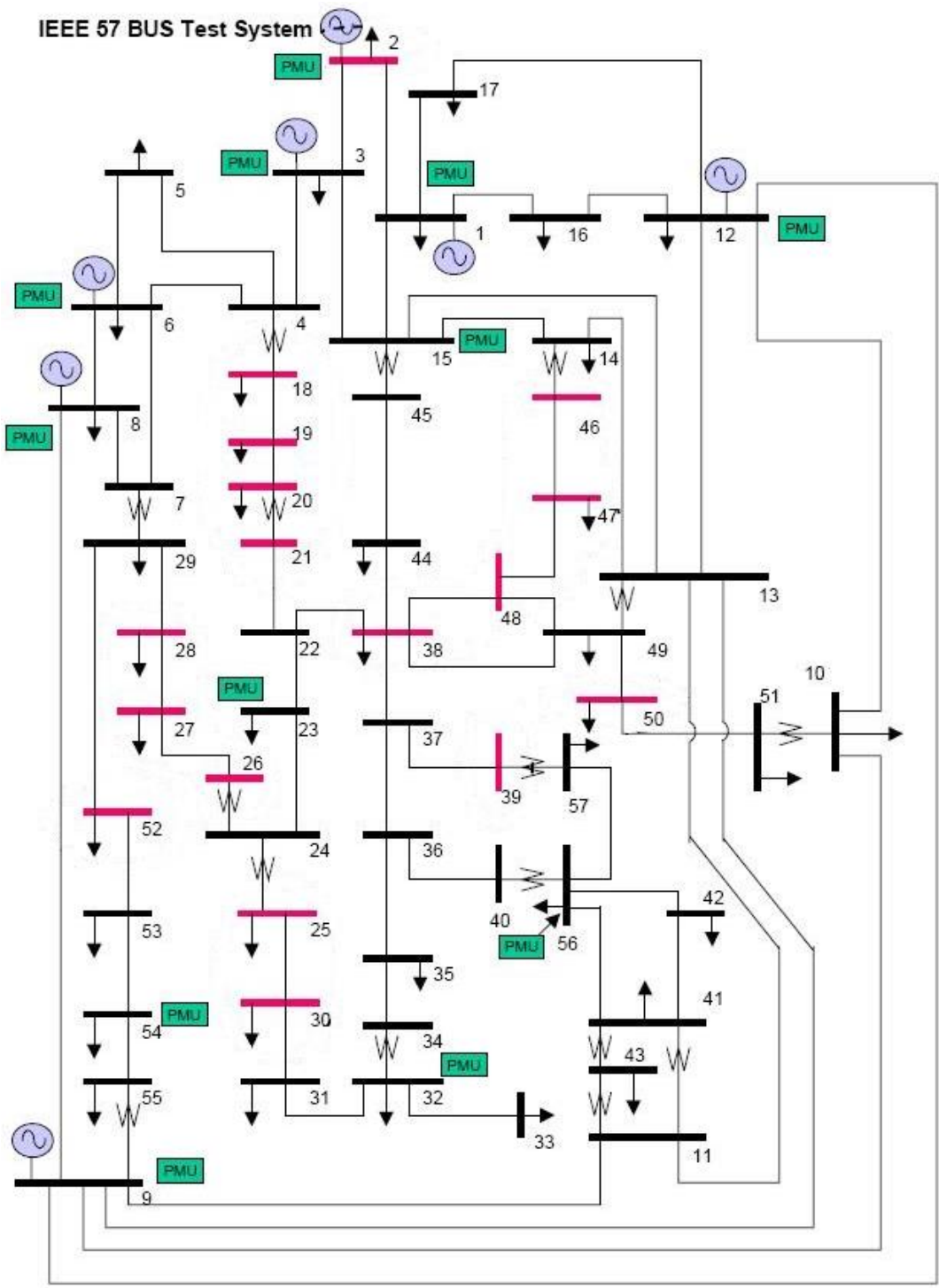


Рисунок 2 – Вхідний сигнал, що «спотворений» високочастотною гармонікою зі значною амплітудою



From Bus to Bus	R	X	B	TAP
19 33	0.0007	0.0142	0	1.007

← VET (LIN)

UZZ (PNT)

Per-Unit

BusID	Kvbase	Type	Pload	Qload	Pgen	Qgen	Qmax	Qmin	Vmag	Angle
30	22	2	1104	250.5	1000	382.85	620	-485	1.030	-9.5049

Per-Unit

Рисунок 3 – Контрольна схема IEEE 57 Bus Test System (формати даних)

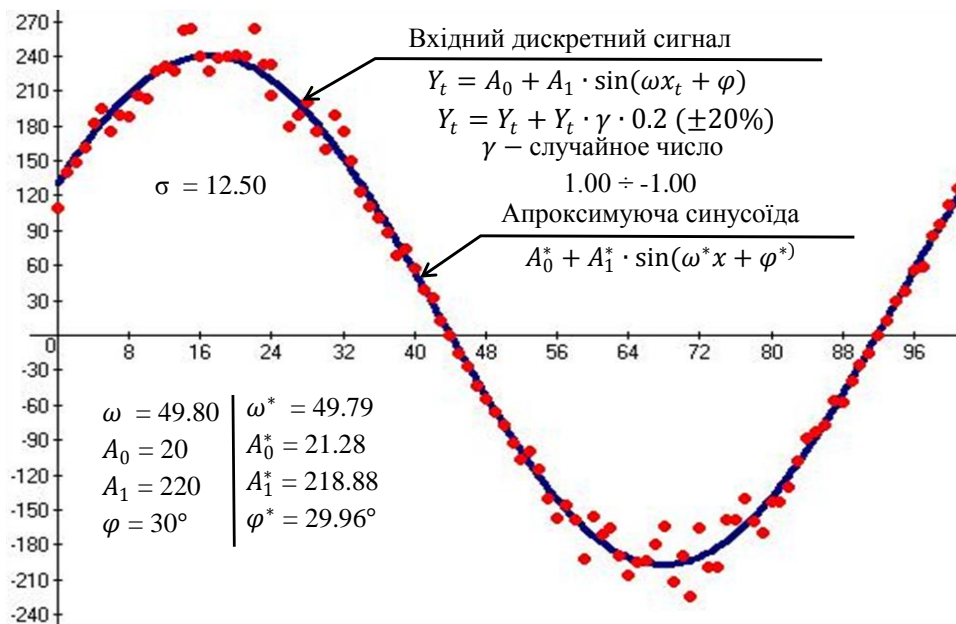


Рисунок 4 – Вхідний сигнал, що має значну похибку вимірювання

обмежень по реактивній потужності. Друга схема IEEE57 відповідає рівню електропередавальних організацій (138, 69 кВ) та має ряд системних живлячих підстанцій. Схема IEEE57 представлена на рис.3. Відмічені джерела живлення (вузли 1,2,3,6,8,9,12) та місця встановлення пристроїв РМУ у якості експериментальних розрахункових варіантів. На рис.2 також наведені формати таблиць Bus Test System. В даний час реалізований автоматичний експорт цих форматів в інформаційну базу комплексу РАО ТВ. Результати змодельованих режимів схем IEEE39, IEEE57 еквівалентні еталонним розрахункам.

Перелік посилань

1. Гамм А.З. Оценивания состояния в электроэнергетике. – М.: Издательство «Наука», 1983.
2. Reynaldo F.N. State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements : дис. ... PHD in Electrical Engineering : 02.07.01 / Reynaldo Francisco Nuqui; Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. - Blacksburg, Virginia, 2001 – 220 с.
3. IEEE Std C37.118.1-2011 «IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems».
4. Гілл Ф., Мюррей У., Райт М.Практична оптимізація:Пер. с англ.–М.:Мир,1985.– 509 с.
5. Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач. Моделі, методи, алгоритми і програми для промислових комп'ютерних комплексів. [електронне видання: навч. посіб. / Банін Д.Б., Банін М.Д., Гнатовський А.В. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 105 с.
6. Банін Д.Б., Банін М.Д., Луців П.Д. Розрахунок та пофідерний аналіз складових технологічних витрат електроенергії в мережах 10(6)/0.4 кВ ВАТ "ЕК «Хмельницькобленерго» за допомогою програмного комплексу РАОТВ // Электрические сети и системы. – 2010. Спецвыпуск "ВАТ "ЕК Хмельницькобленерго" 15 років", с.46-67.
7. Pai M.A. Energy Function Analysis for Power System Stability.– Springer, 1989, с.223-228.