

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ТА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ

Довгалоук О. М.

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"*

*Побудовано математичну модель автоматизованої системи обліку електричної енергії, яка дозволяє прогнозувати значення параметрів режиму та показників якості в електричній мережі, її застосування дозволяє оптимізувати функціонування автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем.*

**Постановка проблеми.** Сучасні автоматизовані системи обліку електричної енергії (АСОЕ) є комплексом технічних і програмних засобів, призначених для організації автоматичного обліку електроенергії та автоматизованого керування процесом електроспоживання.

Застосування АСОЕ дозволяє отримувати повну та оперативну інформацію про витрати електроенергії та потужності, що є основою для впровадження енергозберігаючих технологій. При проектуванні та експлуатації АСОЕ виникає ряд задач, з яких однією з найбільш складних і важливих є моделювання таких систем. Вирішення цього питання дає можливість прогнозувати стан об'єктів енергетики та дозволяє оцінювати результати запропонованих енергозберігаючих технологій. Таким чином, моделювання АСОЕ є актуальним і необхідним для вдосконалення та оптимізації функціонування інформаційно-вимірювальних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розвиток науки, техніки і поява нових інформаційних технологій обумовили актуальність питань розробки та впровадження АСОЕ. Питання розвитку та дослідження особливостей впровадження й експлуатації АСОЕ є важливими для енергетики будь-якої країни, і останнім часом стає частиною енергетичної політики багатьох країн світу, оскільки є одним з ефективних напрямків енергозбереження [1,2].

За більш ніж десятирічний термін функціонування Оптового ринку електричної енергії України був зроблений суттєвий прорив у вирішенні зазначеної проблеми. Так, на основі розроблених та затверджених в різних інстанціях директивних документів, основною метою яких є здійснення упорядкованого та регламентованого створення АСОЕ, розпочалось їх масове впровадження. Об'єктами впровадження виступили, в першу чергу, невеликі, середні й потужні споживачі, окремі електростанції, розподільчі та магістральні мережі. Багато уваги почало приділятися питанням автоматизації об'єктів управління електропостачанням, технологіям подальшого розвитку інформаційно-вимірювальних систем, зменшенню перешкод в процесі їх експлуатації та шляхам удосконалення роботи автоматизованих систем контролю та обліку електричної енергії [3-6].

Поступове накопичення досвіду експлуатації на вказаних об'єктах локальних АСОЕ призвело до появи ще більш складної проблеми – їх інтеграції в єдину систему в межах енергетичної компанії в цілому.

Вирішення цієї проблеми потребує застосування нових технічних рішень, а також удосконалення наявних та розробки нових перспективних методологій та створення на їх основі нормативних документів для впорядкування та підвищення ефективності процесу створення інтегрованих систем управління електроенергетичними компаніями [7,8]. Особливої уваги заслуговують питання контролю показників якості електричної енергії (ПЯЕ) в рамках функціонування АСОЕ [9].

Незважаючи на те, що дослідженню особливостей проектування і роботи АСОЕ присвячено багато робіт таких вчених як Праховник А. В., Калінчик В. П., Тесик Ю. Ф., Васильченко В. І., Лежнюк П. Д., Черемісін М. М., Титов М. М., Ожегов А. Н., Гельман Г. А. та ін., питанню моделювання даних систем не приділялося достатньої уваги.

**Мета статті.** Метою проведених досліджень є побудова математичної моделі АСОЕ, яка дозволить прогнозувати значення параметрів режиму та оцінювати значення ПЯЕ в контрольованих точках мережі.

**Основні матеріали дослідження.** Сучасні АСОЕ мають багаторівневу розподілену структуру, до складу таких систем входить велика кількість елементів та вузлів [10]. У загальному випадку в структурі АСОЕ можна виділити чотири рівня, які зображені на рис. 1:

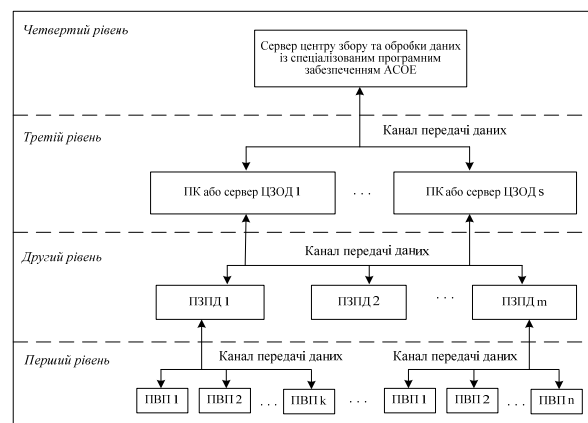


Рисунок 1 – Структурна схема АСОЕ, що моделюється

• перший рівень – первинні вимірювальні прилади (ПВП) з телеметричними або цифровими виходами, які здійснюють безперервно або з мінімальним інтер-

валом усереднення виміру параметрів режиму в контрольованих точках мережі;

- другий рівень – пристрої збору та підготовки даних (ПЗПД), спеціалізовані вимірювальні системи або багатофункціональні програмовані перетворювачі з вбудованим програмним забезпеченням обліку контрольованих параметрів, які здійснюють в заданому циклі інтервалу усереднення для цілодобового збору вимірювальних даних з територіально розподілених ПВП, накопичення, обробку та передачу цих даних на верхні рівні АСОЕ;

- третій рівень – персональний комп'ютер (ПК) або сервер центру збору і обробки даних (ЦЗОД) із спеціалізованим програмним забезпеченням АСОЕ, який здійснює збір інформації з одного або групи ПЗПД, підсумкову обробку цієї інформації як за точками обліку, так і за їх групами, документування й відображення даних обліку у вигляді, зручному для аналізу та прийняття рішень;

- четвертий рівень – сервер центру збору та обробки даних із спеціалізованим програмним забезпеченням АСОЕ, який здійснює збір інформації з ПК або групи серверів ЦЗОД третього рівня, додаткове агрегування і структурування інформації за групами об'єктів обліку, документування й відображення даних обліку у вигляді, зручному для аналізу і прийняття рішень.

Всі ці особливості роблять АСОЕ досить складним об'єктом моделювання [11], основні функції якого зводяться до наступних: контроль параметрів режиму в заданих точках електричної мережі; аналіз електроспоживання й керування процесом розподілу електричної енергії; контроль ПЯЕ; оперативне відображення інформації про аварійні й позаштатні події, спрацювання блокувань та захистів; ведення архіву інформації про роботу обладнання й режимні параметри системи електропостачання (СЕП).

Параметри АСОЕ, які представлено на рис. 2, можна розділити на вхідні  $P_{вх}$ , внутрішні  $P_{вн}$  та вихідні  $P_{вих}$ .

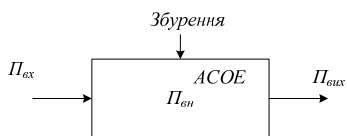


Рисунок 2 – Параметри АСОЕ

До вхідних параметрів відносяться параметри режиму електричної мережі та збурюючий вплив, який чиниться на систему із зовнішнього середовища. До внутрішніх відносяться параметри структурних елементів системи, а до вихідних параметрів – показники якості роботи АСОЕ, за якими можна судити про правильність функціонування системи та порівнювати однотипні за призначенням системи:

$$\begin{cases} P_{вх} = P_p(t), \\ P_{вн} = P_{ac}(t), \\ P_{вих} = P_{яc}(t), \end{cases} \quad (1)$$

де  $P_p(t)$  – матриця значень параметрів режиму для контрольованих точок мережі, тобто значень струму  $I(t)$ , напруги  $U(t)$  і потужності  $S(t)$ ;  $P_{ac}(t)$  – матриця передавальних функцій структурних вузлів АСОЕ  $W(s)$  і значень похибок  $\sigma_0(t)$ , що визначають точність вимірювань;  $P_{яc}(t)$  – матриця значень показників якості роботи АСОЕ  $J(t)$ , а також керуючих впливів  $v(t)$ , які формуються системою для оптимізації роботи.

Випадковий процес  $\Pi(t)$  моделює стан СЕП. Безпосередньому спостереженню даних процес недоступний, у той же час існує можливість вимірювання іншого процесу  $K(t)$ , який несе інформацію про стан системи  $\Pi(t)$ . За результатами спостережень за процесом  $K(t)$  на відрізку часу  $[t_0, T]$ , де  $T > t_0$ , необхідно побудувати оптимальну оцінку  $m(\tau)$  вектора  $\Pi(\tau)$ . Оскільки співвідношення часу для цього процесу можна виразити  $\tau = T$ , то дана задача класифікується як фільтрація. При цьому

$$\Pi(t) \in R_n, \quad K(t) \in R_m, \quad (2)$$

де  $R_n, R_m$  – області допустимих значень параметрів СЕП і спостережень за ними.

Схему управління процесом контролю для АСОЕ представлено на рис. 3.

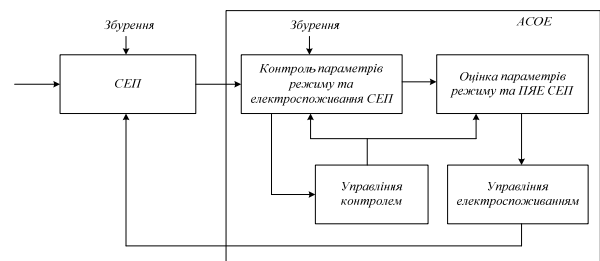


Рисунок 3 – Схема управління процесом контролю для АСОЕ

Стан СЕП і процес контролю описуються системою лінійних стохастичних рівнянь [12]:

$$\begin{cases} d\Pi(t) = P_c(t)\Pi(t)dt + \sigma(t)d\xi(t), \\ \Pi(0) = \Pi_0, 0 \leq t \leq T \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} dK(t) = P_{cp}(t)\Pi(t)dt + \sigma_0(t)d\xi_0(t), \\ K(0) = K_0, 0 \leq t \leq T \end{cases}, \quad (4)$$

де  $\Pi(t)$  – параметри СЕП;  $K(t)$  – контроль за параметрами СЕП;  $P_c(t)$  – матриця параметрів СЕП (опорів і провідностей елементів СЕП, що визначаються конфігурацією системи та особливостями її окремих елементів);  $P_{cp}(t)$  – матриця складу вимірювань, тобто значень контрольованих параметрів режиму СЕП (значень струму  $I_c(t)$ , напруги  $U_c(t)$  і потужності

$S_c(t)$ ;  $\xi(t)$ ,  $\xi_0(t)$  – вектори, що моделюють перешкоди в СЕП і в каналі вимірювання АСОЕ відповідно;  $\sigma(t)$ ,  $\sigma_0(t)$  – матриці похибок СЕП та АСОЕ, що визначають точність вимірювань.

Матриці  $P_c(t)$ ,  $\sigma(t)$ ,  $P_{cp}(t)$ ,  $\sigma_0(t)$  визначені і мають вимірні обмежені елементи,  $\xi$  і  $\xi_0$  являють собою вінеровські стандартні процеси [13],  $P_0$  – гауссовський вектор,  $MP_0 = m_0$ ,  $DP_0 = D_0$ . Випадкові величини  $P_0$ ,  $\xi$  і  $\xi_0$  взаємно незалежні. При цьому точність визначення параметрів режиму системи характеризується матрицею  $D(t)$ , а управління контролером – матрицею  $v = P'_{np}(\sigma_0\sigma'_0)^{-1}P_{np}$ , які пов'язані рівняннями фільтра Калмана:

$$\begin{aligned} \dot{D}(t) &= P_c(t)D(t) + D(t)P'_c(t) - D(t)v(t)D(t) + \sigma(t)\sigma'(t), \\ D(0) &= D_0, v = P'_{np}(\sigma_0\sigma'_0)^{-1}P_{np}, 0 \leq t \leq T. \end{aligned} \quad (5)$$

Задача фільтрації полягає у визначенні найкращої в середньоквадратичному сенсі оцінки вектора  $\Pi(T)$  за результатами спостережень  $K_T$  процесу (4) на відрізок часу  $[0, T]$ . В цьому випадку математичне очікування  $m(T)$  і матриця коваріації  $D(T)$  вектора  $\Pi(T)$  за умови  $K_T$  визначаються за виразами:

$$m(T) = \frac{M\Pi(T)}{K_T}, \quad (6)$$

$$D(T) = \frac{M(\Pi(T) - m(T))(\Pi(T) - m(T))'}{K_T}. \quad (7)$$

Оцінка значень ПЯЕ проводиться згідно [14] з урахуванням отриманої оцінки параметрів режиму СЕП для моменту часу  $T$  і формується у вигляді матриці  $P_k(T)$ .

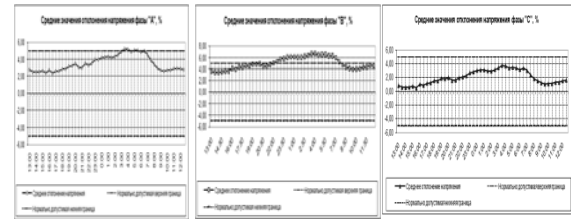
Критерій якості процесу контролю параметрів режиму та електроспоживання СЕП має вигляд [12]

$$J = q'D(T)q, \quad (8)$$

де  $D(T)$  – дисперсія величини  $q'\Pi(T)$ ;  $q$  – заданий вектор з області  $R_n$ .

Для оцінки достовірності отриманої моделі АСОЕ були проведені експериментальні дослідження в СЕП, для чого у понад 200 контрольних точках були проведені виміри значень параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання. Приклад результатів проведених досліджень показано на рис. 4 – 8.

Для порівняння експериментальних даних із значеннями параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання СЕП, отриманих за допомогою побудованої моделі, визначені похибки розрахунку даних величин, значення яких представлені в табл. 1. Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновок про достовірність моделювання АСОЕ з контролем параметрів режиму та ПЯЕ.



а) б) в)

Рисунок 4 – Середні значення усталеного відхилення напруги для фаз "А", "В", "С"

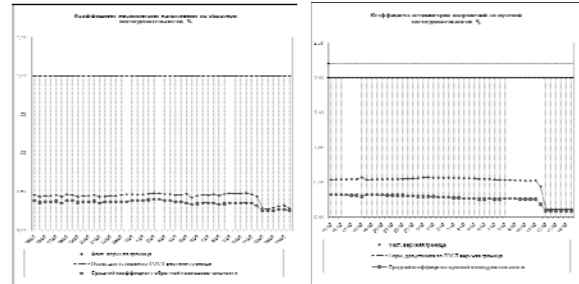
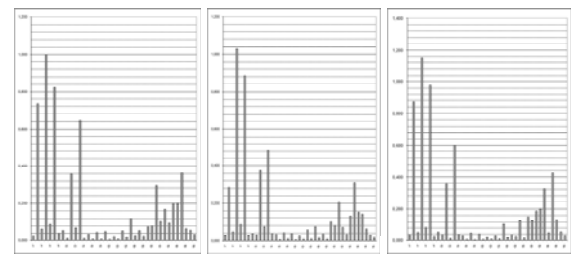


Рисунок 5 – Коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовністю

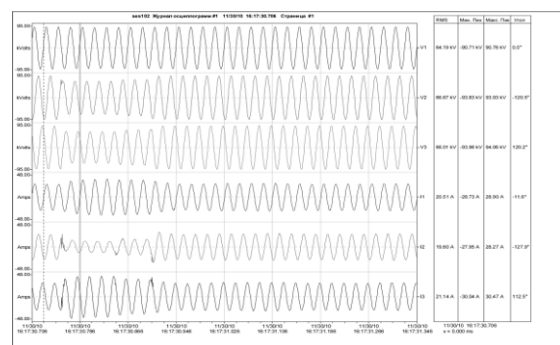


а) б) в)

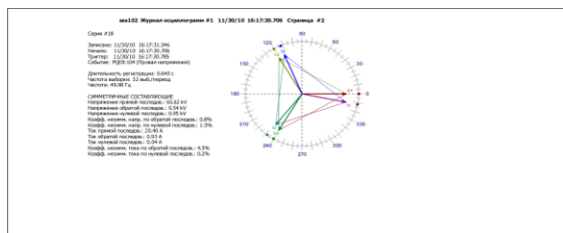
Рисунок 6 – Коефіцієнт n-ї гармонійної складової напруги: а) для фази "А"; б) для фази "В"; в) для фази "С"



Рисунок 7 – Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги



а)



б)

Рисунок 8 – Результати аналізу параметрів режиму електричної мережі: а) осцилограми; б) симетричні складові

Таблиця 1 – Значення похибки контролю параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання СЕП

Рівень АСОЕ	Кількість вимірів	Діапазон зміни значень похибки, %		
		контролю параметрів режиму $\Delta_{пр min} \div \Delta_{пр max}$	контролю ПЯЕ $\Delta_{ПЯЕ min} \div \Delta_{ПЯЕ max}$	контролю електроспоживання $\Delta_e min \div \Delta_e max$
1	більше 70	0,01 ÷ 2,4	0,01 ÷ 2,5	0,02 ÷ 2,5
2	понад 50	0,01 ÷ 2	0,01 ÷ 2,2	0,02 ÷ 2,5
3	понад 30	0,005 ÷ 1,5	0,005 ÷ 1,8	0,01 ÷ 2,2
4	понад 20	0 ÷ 1,5	0 ÷ 1,5	0,01 ÷ 2

**Висновки.** Таким чином, отримана модель АСОЕ дозволяє з необхідною точністю прогнозувати значення параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання СЕП, що є подальшим розвитком математичного моделювання автоматизованих інформаційно-керуючих систем. Застосування отриманої моделі АСОЕ в подальшому дозволить оптимізувати процес контролю параметрів і управління режимами СЕП.

### Список використаних джерел

- Єрмілов С. Ф. Энергетична стратегія України на період до 2030 року: проблемні питання змісту та реалізації / С. Ф. Єрмілов // Энергоінформ. – 2006. – № 48. – С. 3-4.
- Козленко Л. Г. Энергетична політика ЄС в контексті забезпечення енергетичної безпеки / Л.Г. Козленко // Энергоінформ. – 2006. – № 31. – С. 4-5.
- Праховник А. В. Керування режимами електроспоживання в умовах запровадження в Україні ринку двохсторонніх договорів та балансуєчого ринку / А. В. Праховник, О. В. Коцар // Энергетика та електрифікація: науково-виробничий журнал. – 2010. – № 2. – С. 42-52.
- Черемисин М. М. Автоматизація об'єктів управління електроснабження / М. М. Черемисин, В. М. Зубко. – Харьков: "Факт", 2005. – 192 с.
- Праховник А. В. Проблемы, препятствия и пути создания автоматизированных систем контроля и учета электрической энергии / А. В. Праховник, В. П. Калинин, В. И. Прокопец // Новини енергетики. – № 5. – 2007. – С. 51-55.
- Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорід-

них електричних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.

7. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку України №32/28/28/276/75/54 від 17.04.2000 р.

8. Гінайло А. В. Стандарти для створення інтегрованих систем управління електроенергетичними компаніями / А. В. Гінайло, І. М. Блощаневич, К. В. Уща-повський, П. О. Сергієнко, В. І. Васильченко, В. М. Люд-мирський, О. В. Сухомлінов. – Київ, НЕК "Укренерго", 2007. – 14 с.

9. Гриб О. Г. Контроль потребления электроэнергии с учётом её качества / Гриб О. Г., Васильченко В. И., Громадський Ю. С. и др. ; Под. ред. Гриба О. Г. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 444 с.

10. Ожегов А. Н. Системы АСКУЭ: Учебное пособие / А. Н. Ожегов. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2006. – 102 с.

11. Емельянов В.Ю. Методы моделирования стохастических систем управления: Учебное пособие / В. Ю. Емельянов. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2004. – 168 с.

12. Афанасьев В. Н. Математическая теория конструирования систем управления: Учеб. для вузов / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – 2-е изд., доп. – М. : Высш. шк., 1998. – 574 с.

### Аннотация

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Довгалюк О. Н.

*Построена математическая модель автоматизированной системы учета электрической энергии, позволяющая прогнозировать значения параметров режима и показателей качества в электрической сети, ее применение позволит оптимизировать функционирование автоматизированных информационно-измерительных систем.*

### Abstract

#### MATHEMATICAL MODELING OF AUTOMATED ACCOUNTING SYSTEM OF ELECTRIC ENERGY WITH MODE PARAMETERS AND ELECTRIC ENERGY QUALITY CONTROL

O. Dovgalyuk

*A mathematical model of automated accounting system of electrical energy, which allows to predict the value of operation parameters and electric energy quality for power network. Application of the resulting model will optimize the operation of automated information-measuring systems.*