

## КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 10(6)-0,4 КВ З ВИКОРИСТАННЯМ АСКОЕ

П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Д. С. Пискляров

Вінницький національний технічний університет

*Запропоновано новий комплексний підхід до розв'язання задачі аналізу навантажувальних втрат електроенергії в розподільних мережах 10(6) кВ, який базується на поєднанні оцінки спостережності розподільних мереж та ідентифікації, на цій підставі, коефіцієнтів форми графіків навантаження в умовах часткової невизначеності вихідної інформації про режими електроспоживання.*

**Вступ.** В результаті створення оптового ринку електроенергії звітні технологічні витрати електроенергії (ТВЕ) стали опосередкованим показником прибутковості енергопостачальних компаній України. За таких умов нормативні ТВЕ є стимулятором забезпечення ефективності функціонування розподільних електричних мереж в процесі транспортування електроенергії до її споживачів. Зважаючи на це, зменшення звітних ТВЕ (і, як наслідок, нормативних витрат) є одним з пріоритетних напрямків вітчизняної енергетики. Особливо це стосується розподільних електричних мереж (ЕМ) 10(6) кВ, де практично відсутні повноцінні автоматизовані системи комерційного та технічного обліку електроенергії. В результаті, звітні ТВЕ визначаються як різниця між надходженням електроенергії на шини 10(6) кВ живильних трансформаторних підстанцій (ТП) – 110(35)/10(6) кВ та корисним відпуском електроенергії, зафіксованим на приладах обліку (оплаченим споживачами). Враховуючи те, що реєстрація показів абонентських лічильників (особливо у міських ЕМ) не є одночасною, а проплата за спожиту електроенергію має стохастичний характер, звітні значення ТВЕ є не цілком достовірними. Нормативні значення ТВЕ в умовах невизначеності вихідної інформації визначаються за спрощеними детерміністичними моделями з використанням статистичної інформації, тобто їх достовірність також є обмеженою.

**Постановка задачі.** Вирішити проблему недостовірних розрахунків звітних та нормативних ТВЕ в розподільних ЕМ 10(6) кВ покликані автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Розвиток інформаційного забезпечення АСКОЕ дозволить не тільки підвищувати якість взаєморозрахунків за спожиту електроенергію, але і паралельно розв'язувати ряд технічних задач, серед яких аналіз окремих складових ТВЕ, та планування, на цій підставі, заходів по їх зменшенню.

Відповідно до [1] нормативні ТВЕ визначаються за таким виразом

$$\Delta W_{HTBE} = \Delta W_{TP} + \Delta W_{НВП} + \Delta W_{ПЛО}, \quad (1)$$

де  $\Delta W_{TP}$  – сумарні розрахункові втрати електроенергії в елементах ЕМ;  $\Delta W_{НВП}$  – сумарні нормативні витрати електроенергії на власні потреби підстанцій та розподільчих пунктів;  $\Delta W_{ПЛО}$  – розрахункові втрати електроенергії на плавлення ожеледі.

В свою чергу  $\Delta W_{TP}$  визначаються так

$$\Delta W_{TP} = \sum_{i=1}^k \Delta W_{ЛЗi} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{TPi} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{TPni} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{ИИi}, \quad (2)$$

де  $\Delta W_{ЛЗi}$  – сумарні змінні (навантажувальні) розрахункові втрати електроенергії в ЛЕП і-го ступеня напруги;  $\Delta W_{TPi}$  – сумарні змінні розрахункові втрати електроенергії в трансформаторах і-го ступеня напруги;  $\Delta W_{TPni}$  – сумарні умовно-постійні розрахункові втрати електроенергії в трансформаторах і-го ступеня напруги;  $\Delta W_{ИИi}$  – сумарні розрахункові (умовно-постійні) втрати електроенергії в інших елементах і-го ступеня напруги;  $k$  – кількість ступенів напруги мережі.

Структура звітних ТВЕ відрізняється від нормативних ТВЕ лише наявністю в їх складі наднормативної складової, що викликана несвоечасною сплатою за електроенергію, недообліком та несанкціонованими відборами.

З виразів (1) та (2) видно, що змінними складовими у структурі ТВЕ є лише  $\Delta W_{ЛЗi}$  та  $\Delta W_{TPi}$ . Таким чином, похибка розрахунку зазначених втрат містить як з випадкову, так і систематичну складові. Всі інші складові ТВЕ є умовно-сталими величинами і тому похибка їх розрахунку носить, великою мірою, систематичний характер і може бути врахована в процесі розрахунку введенням відповідної поправки. Отже, у даній статті розробляються нові підходи, щодо аналізу саме навантажувальних втрат електроенергії в мережах 10(6) кВ для розв'язання задач їх зменшення з урахуванням міри достовірності розрахунку останніх в умовах функціонування АСКОЕ.

**Результати дослідження.** Задача аналізу навантажувальних втрат електроенергії в мережах 10(6) кВ є комплексною задачею, а її розв'язок складається з наступних етапів:

- підготовка вихідної інформації для розрахунку навантажувальних втрат електроенергії;
- розрахунок навантажувальних втрат електроенергії;
- розрахунок інтервалу невизначеності навантажувальних втрат електроенергії;
- оцінювання похибки розрахунку навантажувальних втрат електроенергії;

– оцінювання спостережності мереж в задачах розрахунку навантажувальних втрат електроенергії.

На базі отриманих окремих розв'язків наведених вище задач формується підґрунтя для розв'язку задачі синтезу, яка полягає у безпосередньому плануванні заходів по зниженню окремих складових ТВЕ.

*Підготовка вихідної інформації для розрахунку навантажувальних втрат електроенергії.* Як відомо з [2], мінімальна систематична похибка розрахункових навантажувальних втрат електроенергії  $\Delta W_{Hj}$  за  $j$ -тий проміжок часу відповідає методу поелементних розрахунків:

$$\Delta W_H = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \sum_{j \in M_i} \frac{(S_H k_z \cos \varphi_j)}{U_j^2} \right]^2 k_{\phi P}^2 + \left[ \sum_{j \in M_i} \frac{(S_H k_z \sin \varphi_j)}{U_j^2} \right]^2 k_{\phi Q}^2 \right\} R_i t, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість елементів мережі;  $S_{Hj}$  – номінальна потужність  $i$ -того трансформатора;  $k_{zj}$  – коефіцієнт завантаження  $j$ -того трансформатора;  $\cos \varphi_j$  – коефіцієнт потужності  $j$ -того трансформатора;  $R_i$  – активний опір  $i$ -того елемента ЕМ;  $t$  – тривалість розрахункового періоду;  $U_j$  – вузлове значення напруги первинної обмотки  $j$ -го трансформатора;  $k_{\phi Pi}$ ,  $k_{\phi Qi}$  – коефіцієнти форми графіків, відповідно, активного та реактивного навантаження  $i$ -го елемента ЕМ;  $M_i$  – множина трансформаторів (або ТП), що отримують електроенергію через  $i$ -ий елемент ЕМ.

Як видно з виразу (3), вихідна інформація повинна бути представлена двома видами даних. Перший – це схема інформація, яка представлена наступною множиною

$$X_S = \{R_i, S_{Hj}\}.$$

Другий – режимна інформація:

$$X_R = \{k_{zj}, k_{\phi Pi}, k_{\phi Qi}, U_j, \cos \varphi_j\}.$$

Таким чином, використовуючи інформаційне забезпечення АСКОЕ, режимні параметри  $X_R$  можна отримати обробляючи дані з датчиків активної та реактивної електроенергії, а також датчиків напруги, автоматичне опитування яких відбувається з певною дискретністю  $\Delta t$ . Множина схемних параметрів  $X_S$  отримується за каталожними або паспортними даними та за результатами діагностування або випробувань.

*Розрахунок змінних втрат електроенергії.* Після повної підготовки вихідних даних про режимні та схемні параметри формується розрахункова модель ЕМ, яка, згідно поелементного методу розрахунку (3), складається з розрахункових моделей окремих елементів ЕМ.

Враховуючи той факт, що впровадження АСКОЕ є тривалим процесом і повинне забезпечувати певну рентабельність на кожному етапі, для елементів ЕМ, що не охоплені телеінформаційною системою, лишиться проблема отримання режимних параметрів  $X_R$  в умовах невизначеності. Найбільш невизначеними параметрами моделі навантажувальних втрат (3) є коефіцієнти форми  $k_{\phi Pi}$ ,  $k_{\phi Qi}$  графіків навантаження окремих елементів ЕМ, що визначаються впливом трансформаторів з множини  $M_i$ . Виходячи з цього в роботі пропонується використовувати математичне представлення коефіцієнтів форми графіків групового навантаження у вигляді нечітких множин.

Коефіцієнт форми графіка навантаження для більшості споживачів 10(6) кВ змінюється в інтервалі [1,0 1,15]. Задавши крок зміни коефіцієнта 0,015 було отримано ряд можливих значень коефіцієнта форми графіка окремого споживача 10(6) кВ

$$K_{\phi} = \left\{ \begin{array}{l} 1; 1,015; 1,03; 1,045; 1,06; 1,075; \\ 1,09; 1,105; 1,12; 1,135; 1,15 \end{array} \right\}.$$

Для ідентифікації коефіцієнта форми графіка навантаження елемента ЕМ використовується наступне представлення категорій споживачів 10(6) кВ в аналітичному вигляді

$$\tilde{k}_{mun\_cn} = \left( \frac{k_{\phi i}}{\mu_{k_{\phi i}}} \right), i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

де  $k_{\phi i}$  – коефіцієнт форми графіка індивідуального споживача, тобто елемент вектору  $K_{\phi}$ ;  $\mu_{k_{\phi i}}$  – значення функції належності коефіцієнта форми  $k_{\phi i}$  відповідній категорії споживачів.

Нижче, спираючись на результати обробки значної кількості реальних графіків електроспоживання, з урахуванням (4), запропоновано наступні категорії споживачів:

Таблиця 1

Категорії споживачів

№	Назва	Позн.	Зміст	Нечітка множина
1	Побутовий споживач (ПС)	$\tilde{k}_{nc}$	Споживачі з нерівномірним графіком.	$\left( \frac{1,135}{0,15}, \frac{1,15}{1} \right)$
2	Змішаний з переважним ПС	$\tilde{k}_{znc}$	Більше 80% ПС	$\left( \frac{1,105}{0,15}, \frac{1,12}{1,0}, \frac{1,135}{0,15} \right)$
3	Промисловий тип-1 (ПС_1)	$\tilde{k}_{nc\_1}$	Споживач з 2 змінами роботи.	$\left( \frac{1,075}{0,15}, \frac{1,09}{1,0}, \frac{1,105}{0,15} \right)$
4	Змішаний з переважним ПС_1	$\tilde{k}_{zcn\_1}$	Більше 80% ПС_1	$\left( \frac{1,045}{0,15}, \frac{1,06}{1,0}, \frac{1,075}{0,15} \right)$
5	Промисловий тип-2 (ПС_2)	$\tilde{k}_{nc\_2}$	Споживач з 3 змінами роботи.	$\left( \frac{1}{1,0}, \frac{1,015}{0,15} \right)$
6	Змішаний з переважним ПС_2	$\tilde{k}_{zcn\_2}$	Більше 80% ПС_2	$\left( \frac{1,015}{0,15}, \frac{1,03}{1,0}, \frac{1,045}{0,15} \right)$

В результаті розрахунку коефіцієнт форми графіка групового навантаження дорівнюватиме перетину нечітких множин (відповідно до [3] знаходження максимуму), які представляють одну з запропонованих категорій

$$\tilde{k}_{\Sigma\phi} = \tilde{k}_{\phi 1} k_{\phi 1} \cup \tilde{k}_{\phi 2} k_{\phi 2} \cup \dots \cup \tilde{k}_{\phi n} k_{\phi n}, \quad (5)$$

де  $n$  – кількість ТП-10(6)/0,4 кВ, до яких електроенергія передається по заданій ділянці ЕМ 10(6) кВ;  $k_{\phi j}$  – вагові коефіцієнти, які характеризують рівень завантаження окремого трансформатора 10(6)/0,4 кВ і визначаються як відношення його відпуску електроенергії (навантаження) до сумарного по ЕМ:

$$k_{\phi j} = W_j / W_{\Sigma}, \quad j = \overline{1, n}$$

Завершальною стадією ідентифікації коефіцієнта форми графіка групового навантаження є операція дефазифікації за методом „центра тяжіння”, який вирізняється серед інших більшою точністю:

$$k_{\Sigma\phi} = \frac{\sum_{i=1}^m k_{\Sigma\phi i} \mu_{k_{\Sigma\phi}}(k_{\Sigma\phi i})}{\sum_{i=1}^m \mu_{k_{\Sigma\phi}}(k_{\Sigma\phi i})} \quad (6)$$

*Розрахунок інтервалу невизначеності змінних втрат електроенергії.* Відповідно до [2] значення розрахункових навантажувальних втрат електроенергії, враховуючи його змінний характер, повинно мати вигляд інтервалу невизначеності  $[\Delta W_{p, \min}, \Delta W_{p, \max}]$ , в який вони потрапляють з імовірністю 99,7%. Таким чином для вирішення даної проблеми необхідно розв’язати задачу нелінійної оптимізації з обмеженнями у вигляді рівностей (балансових обмежень) і нерівностей (обмежень на параметри). Під час розв’язання вказаної задачі вимагається розв’язання систем нелінійних рівнянь великої розмірності, що ускладнює отримання розв’язку. Виходячи з цього авторами пропонується визначити коефіцієнти завантаження трансформаторів 10(6)/0,4 кВ, які відповідають мінімальному значенню навантажувальних втрат за спрощеною схемою. Остання потребує попереднього еквівалентування ЕМ до радіального вигляду та врахування обмежень на значення коефіцієнта завантаження (наприклад,  $k_3 = 0,1 \div 0,8$ ) у вигляді нерівностей. В результаті проведення зазначених перетворень коефіцієнти завантаження для мінімального значення навантажувальних втрат електроенергії  $k_{i0}$  можна визначити за наступною формулою:

$$k_{i0} = \frac{(P_{\text{надх}} - \Delta P_{\text{розр}})}{P_{Hi} \cdot \left[ \sum_{j=1}^n \frac{U_{ja}^2 \cdot r_{0j}}{r_{0j}} \right]} \cdot U_{ia}^2, \quad (7)$$

де  $P_{\text{надх}}$  – середнє значення активної потужності, яка надходить до головної ділянки фідера 10(6) кВ;  $\Delta P$  – розрахункове значення навантажувальних втрат активної потужності, яке визначається в процесі еквівалентування радіально-магістральних мереж до радіального вигляду;  $P_{Hi}$  – номінальна активна потужність і-того трансформатора;  $U_j$  – модуль напруги в  $j$ -тому вузлі, дорівнює  $U_j = 11,0 - \Delta U_{0j}$  (значення 11,0 кВ відповідає максимальному значенню напруги центра живлення, яке зумовлює мінімум навантажувальних втрат електроенергії в мережі 10 кВ без урахування статичних характеристик навантаження);  $r_{0i}$  – активний опір  $i$ -тої ділянки радіального еквіваленту ЕМ.

Значення мінімальних навантажувальних втрат електроенергії

$$\Delta W_{p, \min} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{p, \min i} \cdot k_{\phi, \min \Sigma P}^2) \cdot T,$$

де  $\Delta P_{p, \min i}$  – мінімальне значення навантажувальних втрат активної потужності на  $i$ -й ділянці, яке визначається відповідно за виразом (3) з урахуванням (7);  $k_{\phi, \min \Sigma P}$  – мінімальне значення коефіцієнта форми графіка навантаження, якому відповідає мінімальне значення даного коефіцієнта на одиничному альфарівні нечіткої множини.

*Оцінювання похибки розрахунку змінних втрат електроенергії.* Визначення середньоквадратичної похибки  $\Delta_{II}$  за розрахованими межами інтервалу невизначеності змінних втрат електроенергії, що відповідає заданій імовірності знаходження реальних втрат  $\Delta W_p$  у межах даного інтервалу [4]:

$$\Delta_{II} = (\Delta W_p - \Delta W_{p, \min}) / (3 \cdot \Delta W_p). \quad (8)$$

Вираз (8) базується на припущенні про нормальний розподіл стохастичної похибки визначення навантажувальних втрат, тобто однакову імовірність їх зміни як в бік  $\Delta W_{p, \min}$ , так і в бік  $\Delta W_{p, \max}$ .

*Оцінювання рівня спостережності ЕМ в задачах розрахунку втрат електроенергії.* Використовуючи розраховані значення  $\Delta_{II}$ , стає можливим оцінити імовірність розрахунку втрат електроенергії з необхідною, наперед заданою точністю  $\Delta_{II3}$  (наприклад  $\pm 5\%$ ). Для цього необхідно визначити розрахункове значення параметра  $t_p$ , що показує якій кількості інтервалів  $\Delta_{II}$  відповідає заданий інтервал  $\Delta_{II3}$ , і якій імовірності належності це відповідає:

$$t_p = \Delta_{II3} / \Delta_{II}$$

За розрахованими значеннями  $t_p$ , використовуючи відповідні табличні значення інтегралу Лапласа, визначається імовірність  $p_i$  визначення втрат електроенергії з

заданою точністю  $\Delta_{ЛЗ}$ . Остання характеризує придатність результатів розрахунків втрат електроенергії для розв'язання задач вищого рівня – аналізу та структурування ТВЕ та розроблення електроощадних заходів. Крім того, наведений показник імовірності  $p_i$  опосередковано характеризує міру спостережності ЕМ, що аналізується.

Отже, для формування інформаційної інфраструктури, що забезпечить задану точність розрахунку технічних втрат електроенергії, як критерій оптимальності можна використовувати інтегральну імовірність визначення втрат  $\chi_{\Delta W}$ , що характеризує імовірність  $p_i$  розрахунку навантажувальних втрат електроенергії для заданого переліку характерних режимів роботи ЕМ. Розглядаючи досягнення заданої точності визначення змінних втрат у  $m$  окремих режимах ЕМ як незалежні події

$$\chi_{\Delta W} = \prod_{i=1}^m p_i$$

Розрахований таким чином показник ефективності розстановки телевимірювальної апаратури однозначно характеризує якість інформаційної підсистеми мережі 10(6) кВ, а його чутливість може корегуватися за рахунок зміни кількості характерних режимів  $m$ , що розглядаються.

В результаті послідовного розв'язання перерахованих вище задач вирішується проблема аналізу навантажувальних втрат електроенергії в мережах 10(6) кВ з метою розроблення заходів щодо їх зменшення.

## Аннотация

### КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 10(6) КВ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСКУЭ

Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Пискляров Д.С.

Предложен новый комплексный подход к решению задачи анализа нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных сетях 10(6) кВ, который базируется на совместном использовании оценки наблюдаемости распределительных сетей и идентификации коэффициентов формы графиков нагрузки в условиях частичной неопределенности исходной информации о режимах электропотребления.

## Abstract

### THE COMPLEX ANALYSIS OF LOADING ENERGY LOSSES IN DISTRIBUTIVE NETWORKS 10 (6) KV BY MEANS OF ASCAE

P. Lezhnyuk, V. Kulik, D. Piskliarov

It is offered the new complex approach of the analysis of loading losses of the electric energy in distributive networks 10(6) kV which is based on a method of an estimation of level of observability of the distributive network and on identification of coefficient of loading graph form in the conditions of partial uncertainty of the target information about consumption modes.

## Висновки

1. Технічно необґрунтований рівень звітних ТВЕ у ЕМ 10(6) кВ зумовлює необхідність формування або вдосконалення інформаційної інфраструктури розподільних ЕМ, першим етапом якого є впровадження в них АСКОЕ. Однак останні дозволяють вирішити проблему спостережності ЕМ, лише за умови врахування даної характеристики під час формування проектних рішень.

2. Запропонований в роботі комплексний підхід щодо аналізу навантажувальних втрат електроенергії в розподільних ЕМ 10(6) кВ може використовуватися для розв'язання задач планування технічних та організаційних заходів щодо їх зменшення на рівні енергопостачальними компаніями, а також для розв'язання задачі організації вимірювального середовища АСКОЕ в ЕМ.

## Список використаних джерел

1. ГНД 34.09.104-2003 Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0.38-150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. – К., 2004. – 128 с.

2. Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження: ГНД 34.09.204-2004: Зат. Міністерством палива та енергетики України 09.06.2004: Термін дії встановлений з 09.06.2004 до 09.06.2009.–К.: 2004.– 159 с.

3. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.

4. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Железко Ю. С. – М.: Энергоатомиздат, 1989.– 172 с.