

УДК 621.311.161

В. М. Кутін, д. т. н., проф.;

В. В. Кулик, к. т. н., доц.;

Д. С. Пискляров, асп.

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ 10(6) КВ ЗАСОБАМИ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Запропоновано новий підхід до моделювання коефіцієнта форми графіка групового навантаження засобами теорії нечітких множин для задач поелементного розрахунку технічних втрат електроенергії в розподільних мережах 10(6) кВ.

### Вступ

Адекватне та точне визначення коефіцієнта форми графіка групового навантаження в розподільних електричних мережах (ЕМ) 10(6) є запорукою ефективного розв'язання задач оцінки складових технологічних витрат електроенергії (ТВЕ) та складання балансу електроенергії, прогнозування значень ТВЕ в розподільних електричних мережах та планування заходів щодо їх зменшення, а також низки інформаційних задач, серед яких оцінювання рівня спостережності розподільних електричних мереж з метою вдосконалення інформаційної інфраструктури автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ).

### Постановка задачі

Всі перераховані вище задачі об'єднані необхідністю розрахунку навантажувальної складової технічних втрат електроенергії, точному визначенню якої в елементі мережі відповідає вираз

$$\Delta W_{\text{н}} = 3R \int_0^T I^2(t) dt \approx 3R \Delta t \sum_{i=1}^{T/\Delta t} I_i^2, \quad (1)$$

де  $R$  — активний опір елемента електричної мережі,  $I_i$  — усереднене (протягом розрахункового інтервалу часу  $\Delta t$ ) значення модуля струму навантаження. При цьому правомірною буде заміна ряду значень струмів  $I_i$  на одне середньоквадратичне значення  $I_{\text{ск}}$ .

Враховуючи значну кількість трансформаторних підстанцій ТП-10(6)/0,4 у межах окремої розподільної мережі 10(6) кВ, струм навантаження визначають у вигляді середнього значення [1], що в деякій мірі спрощує розрахунковий вираз (1) до вигляду

$$\Delta W_{\text{н}} = 3R \frac{(W_P^2 + W_Q^2)}{TU_{\text{ф}}^2}, \quad (2)$$

де  $W_P$ ,  $W_Q$  — кількість електроенергії (активної та реактивної), що пропускається через заданий елемент ЕМ;  $T$  — розрахунковий проміжок часу в годинах,  $U_{\text{ф}}$  — усереднене значення фазної напруги.

Для зменшення невідповідності розрахункових втрат електроенергії реальним через неврахування в (2) графіка навантаження споживачів, використовують поправочний коефіцієнт, а саме коефіцієнт форми графіка навантаження (відношення середньоквадратичного значення потужності навантаження до відповідного середнього) [2]

$$k_{\text{ф}} = \frac{P_{\text{ск}}}{P_{\text{с}}}, \quad (3)$$

який зазвичай використовують у вигляді

$$\Delta W_{\text{н}} = 3R \frac{(W_P^2 k_{\Sigma\text{ф.р}}^2 + W_Q^2 k_{\Sigma\text{ф.О}}^2)}{TU_{\text{ф}}^2},$$

де  $k_{\Sigma\text{ф.р}}$  та  $k_{\Sigma\text{ф.О}}$  — коефіцієнти форми графіків активного та реактивного навантаження групи споживачів, що отримують електроенергію через заданий елемент ЕМ. Надалі замість коефіцієнтів  $k_{\Sigma\text{ф.р}}$ ,  $k_{\Sigma\text{ф.О}}$  вводиться узагальнене позначення  $k_{\Sigma\text{ф}}$ .

Таким чином, навіть наявність автоматизованого обліку електроенергії на низькій стороні ТП—110/35/10(6), що є джерелом електроенергії для різнотипних споживачів, не гарантує прийнятної точності визначення навантажувальних втрат електроенергії в ЕМ 10(6) кВ. Основною складністю тут є визначення коефіцієнтів форми графіка групового навантаження  $k_{\Sigma\text{ф}}$  для окремих елементів електричної мережі. В даному випадку мова йде про наявність певної невизначеності. Враховуючи обмежений об'єм статистичної інформації про графіки навантаження в розподільних електричних мережах 10(6) кВ, надалі мова піде про шляхи зменшення впливу саме нечіткої складової невизначеності.

На практиці, під час розв'язання задач проектування розподільних ЕМ або аналізу їх режимів, прийнято використовувати усереднені значення коефіцієнтів форми типових графіків навантаження споживачів з [3] або значення, які розраховуються за графіком відпуску електроенергії з головної ділянки фідера. Це призводить до спотворення реальної картини балансів електроенергії, особливо, якщо ЕМ забезпечує живлення споживачів з істотно різними графіками навантаження. Одним з шляхів підвищення адекватності визначення навантажувальної складової втрат електроенергії в ЕМ є уточнення коефіцієнтів форми графіків передачі електроенергії по окремих її ділянках з наступним інтегруванням.

### Результати досліджень

В цій статті пропонується ідентифікувати коефіцієнт форми графіка навантаження групи споживачів засобами теорії нечітких множин, а саме, використовуючи операції їх об'єднання [4].

Коефіцієнт форми графіка групового навантаження  $k_{\Sigma\text{ф}}$  в даному випадку буде представляти собою дефазифіковане значення нечіткої множини — результат об'єднання нечітких множин коефіцієнтів форми графіків, заданих для окремих ТП-10(6)/0,4, у лінгвістичній формі. Міра впливу окремих ТП—10(6)/0,4 на загальний графік навантаження враховується ваговими коефіцієнтами.

Коефіцієнт форми графіка для більшості реальних споживачів змінюється в інтервалі [1,0 1,15]. Задавши крок зміни коефіцієнта 0,015, отримано ряд можливих значень коефіцієнта форми графіка індивідуального споживача

$$K_{\text{ф}} = \{1; 1,015; 1,03; 1,045; 1,06; 1,075; 1,09; 1,105; 1,12; 1,135; 1,15\}.$$

Для ідентифікації коефіцієнта форми графіка навантаження окремої ТП-10(6)/0,4 використовується таке зображення категорій споживачів 10(6) кВ в аналітичному вигляді

$$\tilde{k}_{\text{тип-сп}} = \left( \frac{k_{\text{ф}i}}{\mu_{k_{\text{ф}i}}} \right), \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

де  $k_{\text{ф}i}$  — коефіцієнт форми графіка індивідуального споживача, тобто елемент вектора  $K_{\text{ф}}$ ;  $\mu_{k_{\text{ф}i}}$  — значення функції належності коефіцієнта форми  $k_{\text{ф}i}$  відповідній категорії споживачів.

Нижче, спираючись на результати обробки значної кількості реальних графіків електроспоживання, з урахуванням (4), запропоновано наступні категорії споживачів [2] (терми):

1. Побутовий споживач (ПС). До даної категорії належать споживачі зі значним коефіцієнтом нерівномірності графіка навантаження. До неї можна віднести ТП-10(6)/0,4 кВ, які живлять житлові будинки та будівлі спільного користування

$$\tilde{k}_{\text{пс}} = \left( \frac{1,135}{0,15}, \frac{1,15}{1} \right);$$

де чисельник — значення коефіцієнта форми графіка навантаження, знаменник — значення функції належності відповідного коефіцієнта зазначеній категорії споживачів.

2. Змішаний споживач з переважною часткою ПС (ЗПС). До вказаної категорії належать підстанції, більше 80 % електроенергії яких відпускається побутовим споживачам

$$\tilde{k}_{\text{зпс}} = \left( \frac{1,105}{0,15}, \frac{1,12}{1,0}, \frac{1,135}{0,15} \right);$$

3. Промисловий споживач типу 1 (ПС\_1). Під даною категорією будемо розуміти промислового споживача з двозмінною організацією роботи.

$$\tilde{k}_{\text{пс}_1} = \left( \frac{1,075}{0,15}, \frac{1,09}{1,0}, \frac{1,105}{0,15} \right);$$

4. Змішаний споживач з переважною часткою ПС\_1 (ЗСП\_1). Під даною категорією будемо розуміти ТП, більше 80 % споживання яких складає промислове споживання з двозмінною організацією роботи

$$\tilde{k}_{\text{зсп}_1} = \left( \frac{1,045}{0,15}, \frac{1,06}{1,0}, \frac{1,075}{0,15} \right);$$

5. Промисловий споживач типу 2 (ПС\_2). До даної категорії належать промислові споживачі з тризмінною організацією роботи

$$\tilde{k}_{\text{пс}_2} = \left( \frac{1}{1,0}, \frac{1,015}{0,15} \right);$$

6. Змішаний споживач з переважною часткою ПС\_2 (ЗСП\_2). До даної категорії належать ТП, більше 80 % споживання яких складають промислові споживачі з тризмінною організацією роботи. До таких можна віднести ТП-10(6)/0,4 кВ, до яких приєднані насосні станції, районні або міські теплоцентралі тощо

$$\tilde{k}_{\text{зсп}_2} = \left( \frac{1,015}{0,15}, \frac{1,03}{1,0}, \frac{1,045}{0,15} \right).$$

Пропонується використовувати функції належності категорій споживачів трапецієвидної форми, яка формалізується

$$\mu_{\text{тип}_\text{сп}}(k_\phi) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } k_\phi < \underline{k}_{\phi 0}; \\ \frac{k - \underline{k}_{\phi 0}}{\underline{k}_{\phi 1} - \underline{k}_{\phi 0}}, & \text{якщо } \underline{k}_{\phi 0} \leq k_\phi < \underline{k}_{\phi 1}; \\ 1, & \text{якщо } \underline{k}_{\phi 1} \leq k_\phi < \bar{k}_{\phi 1}; \\ \frac{\bar{k}_{\phi 0} - k_\phi}{\bar{k}_{\phi 0} - \bar{k}_{\phi 1}}, & \text{якщо } \bar{k}_{\phi 1} \leq k_\phi \leq \bar{k}_{\phi 0}; \\ 0, & \text{якщо } k_\phi > \bar{k}_{\phi 0}, \end{cases}$$

де  $(\underline{k}_{\phi 0}, \bar{k}_{\phi 0})$  — носій нечіткого значення коефіцієнта форми графіка активного навантаження

$\tilde{k}_\phi$ ;  $[k_{\phi 1}, \bar{k}_{\phi 1}]$  — ядро нечіткого значення коефіцієнта форми графіка навантаження  $\tilde{k}_\phi$ .

В результаті розрахунку коефіцієнт форми графіка групового навантаження дорівнюватиме перетину нечітких множин, які є одним зі запропонованих термів для кожної ТП-10(6)/0,4

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

де  $n$  — кількість ТП-10(6)/0,4 кВ, до яких електроенергія передається по заданій ділянці ЕМ 10(6) кВ. Операції об'єднання нечітких значень коефіцієнтів форм графіків окремих ТП, по Заде [4], відповідатиме операція знаходження максимуму.

Для врахування відмінності середніх навантажень окремих ТП-10(6)/0,4, пропонується використовувати в (5) вагові коефіцієнти  $k_{vi}, i = \overline{1, n}$ . Таким чином вираз (5) матиме такий вигляд

$$\tilde{k}_{\Sigma\phi} = \tilde{k}_{\phi 1} k_{v1} \cup \tilde{k}_{\phi 2} k_{v2} \cup \dots \cup \tilde{k}_{\phi n} k_{vn}. \quad (6)$$

Враховуючи відсутність інформації щодо коефіцієнтів завантаження розподільних трансформаторів окремих ТП-10(6)/0,4, вагові коефіцієнти визначаються у вигляді відношення навантаження окремої ТП до сумарного навантаження.

$$k_{vj} = \frac{W_j}{W_\Sigma}. \quad (7)$$

Завершальною стадією ідентифікації коефіцієнта форми графіка групового навантаження є операція дефазифікації нечіткого значення останнього. Пропонується використовувати метод «центру тяжіння», який вирізняється серед інших більшою точністю

$$k_{\Sigma\phi} = \frac{\sum_{i=1}^m k_{\Sigma\phi_i} \mu_{k_{\Sigma\phi}}(k_{\Sigma\phi_i})}{\sum_{i=1}^m \mu_{k_{\Sigma\phi}}(k_{\Sigma\phi_i})}. \quad (8)$$

### Аналіз точності розрахункових втрат електроенергії в залежності від методу ідентифікації коефіцієнта форми графіка навантаження

Нижче наведено порівняльний аналіз точності розрахункових значень змінних втрат електроенергії для трьох випадків наявної вихідної інформації:

1. Відомі схема розподільної ЕМ (рис. 1); пасивні параметри (табл. 1); графіки навантаження ТП-10/0,4 кВ та в головній ділянці фідера 10 кВ (табл. 2).

2. Схема розподільної ЕМ (рис. 1); пасивні параметри (табл. 1); склад споживачів по категоріях, яких приєднано до окремих ТП-10(6)/0,4 та відпуск електроенергії з шин 0,4 кВ (табл. 3); добовий графік відпуску електроенергії в головній ділянці фідера 10(6) кВ (табл. 2).

3. Схема розподільної ЕМ (рис. 1); пасивні параметри (табл. 1); добовий графік відпуску електроенергії в головній ділянці фідера 10(6) кВ (табл. 2); відпуск електроенергії з шин 0,4 кВ (табл. 3).

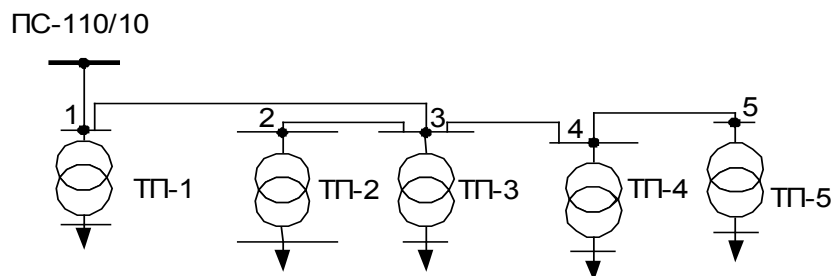


Рис. 1. Фрагмент електричної мережі 10 кВ

Таблиця 1

**Пасивні параметри елементів експериментальної розподільної ЕМ**

№ ТП	Тип трансформатора	$r_m / x_m$ , Ом	№ лінії	$r_n / x_n$ , Ом
1	ТМ-100	19,7/47	0—1	0,261/0,081
2	ТМ-250	5,92/18,8	1—3	0,154/0,05
3	ТМ-250	5,92/18,8	3—2	0,07/0,02
4	ТМ-630	1,915/8,73	3—4	0,09/0,03
5	ТМ-1000	1,22/5,5	4—5	0,086/0,026

Таблиця 2

**Графіки навантаження на ділянках**

Година	0—1		1—3		3—2		3—4		4—5	
	$P$ , кВт	$Q$ , кВар	$P$ , кВт	$Q$ , кВар	$P$ , кВт	$Q$ , кВар	$P$ , кВт	$Q$ , кВар	$P$ , кВт	$Q$ , кВар
1	910,2	668,4	891,3	659,2	42,5	26,4	796,6	599,7	467,6	352,0
9	1330,8	941,3	1288,3	920,7	187,0	115,9	895,9	674,5	522,9	393,7
12	1248,0	896,9	1191,3	869,5	106,3	65,9	973,0	732,5	571,2	430,0
20	1475,7	1037,6	1385,9	994,1	191,3	118,6	993,4	747,9	588,0	442,7

Таблиця 3

**Тип споживача**

Назва	Тип споживача	$W_a$ , кВт·год	$W_p$ , кВар·год
ТП-1	Побутовий споживач ПС	1044,0	505,8
ТП-2	Змішаний споживач ЗПС	3155,6	1956,5
ТП-3	Змішаний споживач ЗПС	3095,9	1965,7
ТП-4	Промисловий споживач ПС_2	8074,3	6078,8
ТП-5	Промисловий споживач ПС_2	12950,7	9750,0
Сумарний відпуск		29736,5	21269,6

В першому випадку коефіцієнти форми графіка навантаження на всіх ділянках визначалися за виразом (3), а результати розрахунків зведені до таблиці 4. В даному випадку вводиться допущення про тотожність коефіцієнтів форми графіків активного та реактивного навантаження.

Таблиця 4

**Результати розрахунку коефіцієнтів форми графіка навантаження**

Ділянка	Коефіцієнт форми активного навантаження				
	0—1	1—3	3—2	3—4	4—5
1 випадок	1,0086	1,0075	1,063	1,0025	1,0027
2 випадок	1,0086	1,027	1,12	1,002	1,002
3 випадок	1,0086	1,0086	1,0086	1,0086	1,0086

В другому випадку розрахунок коефіцієнтів форми графіків навантаження проводився згідно з запропонованим методом.

Коефіцієнти форми для ділянок, які безпосередньо приєднані до ТП-10/0,4, розраховані шляхом дефазифікації за виразом (8) з урахуванням категорій споживання (див. табл. 3):

$$k_{\phi(\text{ТП2})} = \frac{k_{\phi1}\mu_{k_{\phi1}} + k_{\phi2}\mu_{k_{\phi2}} + k_{\phi3}\mu_{k_{\phi3}}}{\mu_{k_{\phi1}} + \mu_{k_{\phi2}} + \mu_{k_{\phi3}}} = 1,12,$$

а коефіцієнти впливовості за виразом (7)

$$k_{\text{в}(\text{ТП1})} = \frac{W_{\text{ТП-1}}}{W_{\Sigma}} = 0,037;$$

$$k_{\text{в}(\text{ТП2})} = 0,111; k_{\text{в}(\text{ТП3})} = 0,109; k_{\text{в}(\text{ТП4})} = 0,285; k_{\text{в}(\text{ТП5})} = 0,457.$$

Нечіткі значення коефіцієнтів форми графіка групового навантаження згідно з виразом (6)

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{\Sigma\phi(1-3)} &= \tilde{k}_{\phi\text{ТП2}} k_{\text{в2}} \cup \tilde{k}_{\phi\text{ТП3}} k_{\text{в3}} \cup \tilde{k}_{\phi\text{ТП4}} k_{\text{в4}} \cup \tilde{k}_{\phi\text{ТП5}} k_{\text{в5}} = \\ &= \max_{\mu} \left\{ \left\{ \frac{k_{\phi1}}{\mu_{k_{\phi1}} k_{\text{в2}}}, \frac{k_{\phi2}}{\mu_{k_{\phi2}} k_{\text{в2}}}, \frac{k_{\phi3}}{\mu_{k_{\phi3}} k_{\text{в2}}} \right\}_{\text{ТП2}}, \left\{ \frac{k_{\phi1}}{\mu_{k_{\phi1}} k_{\text{в3}}}, \frac{k_{\phi2}}{\mu_{k_{\phi2}} k_{\text{в3}}}, \frac{k_{\phi3}}{\mu_{k_{\phi3}} k_{\text{в3}}} \right\}_{\text{ТП3}}, \right. \\ &\quad \left. \left\{ \frac{k_{\phi1}}{\mu_{k_{\phi1}} k_{\text{в4}}}, \frac{k_{\phi2}}{\mu_{k_{\phi2}} k_{\text{в4}}} \right\}_{\text{ТП4}}, \left\{ \frac{k_{\phi1}}{\mu_{k_{\phi1}} k_{\text{в5}}}, \frac{k_{\phi2}}{\mu_{k_{\phi2}} k_{\text{в5}}} \right\}_{\text{ТП5}} \right\} = \\ &= \left\{ \frac{1,00}{0,457}, \frac{1,015}{0,06855}, \frac{1,105}{0,01665}, \frac{1,12}{0,111}, \frac{1,135}{0,01665} \right\}; \\ \tilde{k}_{\Sigma\phi(3-4)} &= \left\{ \frac{1,00}{0,457}, \frac{1,015}{0,06855} \right\}. \end{aligned}$$

Дефазифікація значень коефіцієнтів форми графіків навантаження для ділянки 1—3:

$$k_{\Sigma\phi(1-3)} = \frac{\sum_{i=1}^5 (k_{\Sigma\phi(1-3)_i} \mu_{\Sigma\phi(1-3)_i})}{\sum_{i=1}^5 (\mu_{\Sigma\phi(1-3)_i})} = 1,027.$$

Результати розрахунку для інших ділянок зведені в таблицю 4.

В третьому випадку коефіцієнт форми графіка навантаження в головній ділянці фідера (ділянка 0—1) визначався за виразом (3), а для інших ділянок — приймався аналогічним (табл. 4).

Результати порівняння розрахункових втрат електроенергії  $\Delta W$  в залежності від значень коефіцієнтів форми графіків навантаження зведені в табл. 5 (втрати електроенергії визначалися методом середніх навантажень). При цьому за еталонний прийнято перший випадок зображення вихідних даних, оскільки він характеризується найбільшим обсягом інформації, що дозволяє використати для визначення втрат електроенергії метод числового інтегрування. Останній, як відомо [5], характеризується високою мірою адекватності.

Таблиця 5

Результати аналізу точності розрахункових втрат електроенергії

	1 випадок	2 випадок	3 випадок
$\Delta W$ , кВт·год	587	589	564
$\delta_{\Delta Wp}$ , %	0	0,4	3,9

Примітка:  $\delta_{\Delta Wp}$  — відносна похибка розрахунку втрат електроенергії, що вноситься невідповідністю коефіцієнту форми реальним умовам.

З результатів, наведених у табл. 5, випливає, що використання теорії нечітких множин в задачах розрахунку коефіцієнтів форми графіка групового навантаження навіть для простої схеми розподільної електричної мережі дозволяє зменшити похибку розрахунку втрат електроенергії на 3,5 %.

### Висновки

1. Належна точність визначення навантажувальних втрат електроенергії в розподільних ЕМ не забезпечується без додаткових обчислювальних заходів через недосконалість наявної інформаційної інфраструктури.

2. Метод розрахунку коефіцієнта форми графіка групового навантаження з представленням окремих складників у вигляді нечітких множин дає можливість його визначення для довільної ділянки ЕМ та встановлення відповідності між його розрахунком за виразом (3), який потребує додаткової інформації про характер споживання, та типовими усередненими значеннями.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Железко Ю. С. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. — М.: ЭНАС, 2003. — 280 с.
2. Гордеев В. И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В. И. Гордеев. — М.: Энергоатомиздат, 1986 — 182с.
3. Орлов И. Н. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 3. В 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии [7-е изд., испр. и доп.] / И. Н. Орлов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 880 с.
4. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М: Горячая линия — Телеком, 2007. — 284 с.
5. Лежнюк П. Д. Інформаційне забезпечення розрахунку втрат електроенергії в розподільних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, А. Л. Поліщук // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. — 2007. — № 57. — С. 67 — 74.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем

Надійшла до редакції 12.07.08  
Рекомендована опублікування 30.09.08

**Кутін Василь Михайлович** — професор, **Кулик Володимир Володимирович** — доцент, **Пискляров Дмитро Сергійович** — аспірант.

Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет