

## ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ У ТРАНСФОРМАТОРАХ ДВОТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

Жоров В. І., Жоров С. В.

Національний науковий центр "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства"  
(смт Глеваха Київської обл.)

Отриманий аналітичний вираз для розрахунку та визначені числові значення коефіцієнтів завантаження трансформаторів двотрансформаторних підстанцій, за яких доцільно переходити на однострансформаторну схему живлення споживачів.

**Постановка проблеми.** Один із способів зниження втрат енергії в електричній мережі полягає у вимкненні одного з трансформаторів на двотрансформаторній підстанції. Трансформатор вимикають тоді, коли максимальне навантаження на трансформатори стає нижче деякого критичного значення. Останнє віднаходиться із балансу втрат потужності у трансформаторах за живлення споживачів від двох паралельно ввімкнених та одного трансформатора. Якщо найбільше із добових навантажень дорівнює критичному, втрати енергії у трансформаторах за цього найбільшого навантаження однакові для варіантів живлення споживачів від двох та одного трансформатора. У поза піковий час, коли навантаження нижче, втрати енергії у варіанті з одним трансформатором нижчі. Звідси впливає доцільність вимкнення одного з трансформаторів при нижчому, ніж критичне, максимальному навантаженні. Але вимкнення одного з трансформаторів за дещо вищого, ніж критичне, максимального навантаження теж є доцільним. Адже, деяке збільшення втрат від вимкнення трансформатора у піковий час компенсується значним їх зниженням у години нічного спаду навантаження. Тобто, критичне навантаження слід віднаходити не із балансу втрат потужності, а із балансу добових втрат енергії. За цього буде врахована нерівномірність навантаження впродовж доби.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Із літературних джерел стає відомим, що співвідношення втрат енергії у обмотках та осерді трифазних силових трансформаторів в номінальному режимі роботи становить в середньому 6:1 [1]. Співвідношення цих же втрат енергії в експлуатаційних умовах дорівнює 1:5 [2]. Зазначені низькі експлуатаційні втрати енергії в обмотках трансформаторів пояснюються значним недовантаженням їх в сільських електромережах більшу частину доби. Трансформатори можуть бути значно недовантаженими і в години максимуму навантаження, що може пояснюватись зниженням енергоємності чи скороченням виробництва або ліквідацією підприємств-споживачів. В зв'язку з цим, розглядається питання про вимкнення одного з трансформаторів на підстанціях з двома однотипними трансформаторами [2]. При цьому, критичне навантаження визначається не із балансу добових втрат енергії, а із балансу втрат потужності. Це не дозволяє у повній мірі скористатись ефектом зниження втрат енергії від вимкнення одного із трансформаторів двотрансформаторної підстанції.

**Ціль статті.** Скласти баланс добових втрат енергії для варіантів живлення споживачів від двох та одного трансформатора і звідси визначити критичний коефіцієнт завантаження двох трансформаторів, за якого доцільно вимикати один із них.

**Основні матеріали досліджень.** Припустимо спочатку, що графік навантаження, нехай зимової доби, є абсолютно рівномірним, а його потужність дорівнює максимуму реального добового графіку. За цих умов, критичне завантаження трансформаторів двотрансформаторної підстанції визначається із балансу втрат потужності у двох та одному трансформаторі.

Втрати потужності у двох трансформаторах віднаходяться із виразу

$$\Delta P_{\Sigma} = 2 \cdot \Delta P_{x.x.} + 2 \cdot \Delta P_{k.z.} \cdot k_{z.макс}^2, \quad (1)$$

де  $\Delta P_{\Sigma}$  – сумарні втрати потужності у двох трансформаторах, кВт;

$\Delta P_{x.x.}$  – втрати холостого ходу одного трансформатора, кВт;

$\Delta P_{k.z.}$  – втрати короткого замикання одного трансформатора, кВт;

$k_{z.макс}$  – коефіцієнт завантаження трансформатора в режимі живлення споживачів за двотрансформаторною схемою в максимум добового графіку навантаження споживачів,

$$k_{z.макс} = \frac{S_{макс}}{S_n}; \quad (2)$$

$S_{макс}$  – максимальна потужність навантаження у розрахунку на один трансформатор в режимі живлення споживачів за двотрансформаторною схемою, кВА;

$$S_{макс} = \frac{S_{max}}{2}, \quad (3)$$

$S_{max}$  – максимум добового графіку навантаження, кВА;

$S_n$  – номінальна потужність одного трансформатора, кВА.

Втрати потужності у трансформаторі за живлення споживачів за однострансформаторною схемою дорівнюють

$$\Delta P = \Delta P_{x.x.} + \Delta P_{к.з.} \cdot (2 \cdot k_{з.макс})^2 \quad (4)$$

Прирівняємо праві частини формул (1) та (4) та визначимо критичне завантаження кожного із трансформаторів у двотрансформаторній схемі живлення споживачів за умови рівномірного добового графіку

$$k_{з.макс.кр.} = \sqrt{\frac{\Delta P_{x.x.}}{2 \cdot \Delta P_{к.з.}}} \quad (5)$$

Враховуючи, що записане під знаком кореня відношення втрат у трансформаторах 10/0,4 кВ лежить у межах 0,145-0,188 [1], із (5) знаходяться критичні значення їх коефіцієнтів завантаження – 0,27-0,30.

Покажемо, що критичні значення, віднайдені з балансу втрат енергії, є значно вищими ніж попередні. Для цього складемо баланс втрат енергії для варіантів живлення споживачів за двох та однострансформаторною схемою.

Втрати енергії за добу у двох увімкнених трансформаторах дорівнюють

$$\Delta W_{доб.} = 2 \cdot \left[ 24 \cdot \Delta P_{x.x.} + \Delta P_{к.з.} \cdot \left( \frac{k_{з.макс}}{k_{si\ макс}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} k_{si}^2 \right] \quad (6)$$

де  $k_{si\ макс}$  – найбільший із погодинних коефіцієнтів повного навантаження із добових графіків,  $k_{si\ макс} = 1,25$  (див. таблицю);  
 $k_{si}$  – погодинний коефіцієнт повного навантаження у  $i$ -тій годині доби,

$$k_{si} = \sqrt{k_{pi}^2 + k_{qi}^2} \quad (7)$$

де  $k_{pi}$  та  $k_{qi}$  – відповідно погодинні коефіцієнти активного та реактивного навантажень добового графіку [ 3 ] ( див. таблицю).

Добові втрати енергії за одного увімкненого трансформатора становлять

$$\Delta W_{доб.} = 24 \cdot \Delta P_{x.x.} + 4 \cdot \Delta P_{к.з.} \cdot \left( \frac{k_{з.макс}}{k_{si\ макс}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} k_{si}^2 \quad (8)$$

Прирівняємо праві частини виразів (6) та (8) і звідси визначимо критичне завантаження трансформаторів у двотрансформаторній схемі

$$k_{з.макс.кр.} = \sqrt{\frac{12 \cdot \Delta P_{x.x.} \cdot k_{si\ макс}^2}{\Delta P_{к.з.} \cdot \sum_{i=1}^{24} k_{si}^2}} \quad (9)$$

Таблиця – Розрахункові коефіцієнти погодинних навантажень та похідних від них величин для типових добових графіків змішаного навантаження сільських споживачів:

а) зимової доби

Години доби	Коефіцієнти навантаження			
	$k_{pi}$	$k_{qi}$	$k_{si}$	$k_{si}^2$
1	0,35	0,225	0,416	0,1731
2	0,35	0,225	0,416	0,1731
3	0,35	0,225	0,416	0,1731
4	0,35	0,225	0,416	0,1731
5	0,45	0,3	0,541	0,2925
6	0,5	0,375	0,625	0,3906
7	0,65	0,488	0,813	0,6606
8	0,8	0,6	1	1
9	0,7	0,525	0,875	0,7656
10	0,75	0,562	0,937	0,8783
11	0,8	0,6	1	1
12	0,75	0,562	0,937	0,8783
13	0,65	0,488	0,813	0,6606
14	0,6	0,45	0,75	0,5625
15	0,6	0,45	0,75	0,5625
16	0,6	0,45	0,75	0,5625
17	0,7	0,525	0,875	0,7656
18	0,85	0,638	1,063	1,1295
19	1	0,75	1,25	1,5625
20	0,95	0,712	1,187	1,4094
21	0,8	0,638	1,023	1,047
22	0,6	0,525	0,797	0,6356
23	0,5	0,375	0,625	0,3906
24	0,4	0,225	0,459	0,2106

б) літньої доби

Години доби	Коефіцієнти навантаження			
	$k_{pi}$	$k_{qi}$	$k_{si}$	$k_{si}^2$
1	0,21	0,138	0,251	0,0631
2	0,21	0,138	0,251	0,0631
3	0,21	0,138	0,251	0,0631
4	0,21	0,138	0,251	0,0631
5	0,315	0,22	0,384	0,1476
6	0,315	0,275	0,418	0,1748
7	0,35	0,358	0,501	0,2506
8	0,49	0,385	0,623	0,3883
9	0,525	0,412	0,667	0,4453
10	0,525	0,412	0,667	0,4453
11	0,56	0,44	0,712	0,5072
12	0,49	0,385	0,623	0,3883
13	0,42	0,33	0,534	0,2853
14	0,385	0,33	0,507	0,2571
15	0,35	0,302	0,462	0,2137
16	0,42	0,33	0,534	0,2853
17	0,42	0,33	0,534	0,2853
18	0,42	0,33	0,534	0,2853
19	0,455	0,358	0,579	0,3351
20	0,525	0,385	0,651	0,4238
21	0,56	0,412	0,695	0,4833
22	0,7	0,550	0,89	0,7925
23	0,42	0,358	0,552	0,3045
24	0,28	0,22	0,356	0,1268

За нижчих (від критичного) завантаження мас місце зниження добових втрат енергії від переходу на однотрансформаторну схему живлення споживачів. Чисельне значення добового зниження втрат енергії дорівнює різниці правих частин формул (6) та (8)

$$E_{\text{доб.}} = 24 \cdot \Delta P_{\text{х.х.}} - 2 \cdot \Delta P_{\text{к.з.}} \cdot \left( \frac{k_{\text{з.макс}}}{k_{\text{зімакс}}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} k_{\text{зі}}^2 \quad (10)$$

В якості  $k_{\text{зімакс}}$  із добових графіків береться більший із зимового та літнього максимумів, а  $\sum_{i=1}^{24} k_{\text{зі}}^2$  визначається відповідно до розглядуваного періоду – зимового чи літнього (див. табл.).

Річне зниження втрат енергії у трансформаторах віднаходиться за [1]

$$E_{\text{річн.}} = 185 \cdot E_{\text{доб.зим.}} + 180 \cdot E_{\text{доб.літ.}} \quad (11)$$

де 185 і 180 – тривалість зимового та літнього періоду в середніх широтах, діб;

$E_{\text{доб.зим.}}$  та  $E_{\text{доб.літ.}}$  – зниження втрат енергії у трансформаторах відповідно зимової та літньої доби, кВт·год/добу.

Річні втрати енергії у трансформаторах за двотрансформаторної схеми дорівнюють

$$\Delta W_{\text{річн.}} = 185 \cdot \Delta W_{\text{доб.зим.}} + 180 \cdot \Delta W_{\text{доб.літ.}} \quad (12)$$

Зниження втрат енергії у трансформаторах в процентах дорівнює

$$E_{\text{річн.}} \% = \frac{E_{\text{річн.}}}{\Delta W_{\text{річн.}}} \cdot 100 \quad (13)$$

Визначивши  $k_{\text{зімакс}} = 1,25$  (див. таблицю) та  $\sum_{i=1}^{24} k_{\text{зі}}^2$

для зимового періоду – 16,06, віднаходимо з (9) критичні значення коефіцієнтів максимального завантаження трансформаторів двотрансформаторних ТП-10/0,4 кВ за типового добового графіка змішаного навантаження: 0,41-0,47. Аналогічним чином, за типового виробничого навантаження маємо  $k_{\text{з.макс.кр}} = 0,44-0,50$ . Тобто, отримані з балансу втрат енергії критичні значення коефіцієнтів максимального завантаження значно вищі, ніж із балансу втрат потужності (0,27-0,30). Отже, на практиці доцільно вимикати один із трансформаторів, коли добовий максимум навантаження стає нижчим від номінальної потужності одного трансформатора.

В результаті вимикання одного із трансформаторів досягається зниження втрат енергії, яке тим вище, чим нижче від критичного максимальне завантаження. Так, якщо критичне завантаження становить 0,5 від сумарної номінальної потужності трансформаторів і таким же є максимум завантаження трансформаторів ТМ-630/10 [1], зниження втрат енергії дорівнює 9,34 %, а за вдвічі нижчого завантаження 0,25 – 37,3 %.

Розроблену методику визначення критичного завантаження трансформаторів можна застосовувати не лише для типових графіків, а й стосовно будь якого конкретного графіку. За цього своєрідність конфігурації добового графіка віднаходить своє відображення у відповідній таблиці коефіцієнтів погодинного активного, реактивного та повного навантаження споживачів.

Перевід споживачів на однотрансформаторну схему живлення виконується вимиканням головного контактора одного із трансформаторів на стороні 0,4 кВ при ввімкненому контакторі секцій шин. Необхідно також вимкнути оливковий вимикач цього ж трансформатора на стороні 10 кВ.

**Висновок.** Таким чином, розроблена методика визначення критичного завантаження трансформаторів двотрансформаторних ТП-10/0,4 кВ, за допомогою якої встановлено, що за типових добових графіків змішаного і виробничого навантаження сільських споживачів доцільно вимикати один із трансформаторів, коли максимум навантаження на підстанцію стає нижчим від номінальної потужності одного трансформатора.

#### Список використаних джерел

1. Будзко И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль. – М.: Агропромиздат, 1990. – 496 с.
2. Бебко В. Г. Зниження втрат електроенергії у сільському господарстві / [В. Г. Бебко, С. Я. Меженний, В. Г. Стафійчук, В. Ф. Юрчук]. Вид. 2-е, перероб. і доп. – К.: Урожай, 1987. – 128 с.
3. Жоров В. І. Вплив нерівномірності добових графіків навантаження на втрати енергії в електричних мережах / В. І. Жоров В зб.: Праці Таврійського держ. агротехн-го унів-тету. Вип. 9. Т. 2. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – С. 154-160.

#### Аннотація

#### СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Жоров В. И., Жоров С. В.

*Получено аналитическое выражение для расчета и определены численные значения коэффициентов загрузки трансформаторов двухтрансформаторных подстанций, при которых целесообразно переходить на однотрансформаторную схему питания потребителей.*

#### Abstract

#### REDUCTION OF ENERGY LOSS IN TRANSFORMERS OF TWO-TRANSFORMER SUBSTATIONS

V. Zhorov, S. Zhorov

*An equation for calculation is deduced and load factors of transformers of two-transformers substations are evaluated for expedient transition to one-transformer power supply of consumers.*