

УДК 621.316.1

## ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ШЛЯХОМ ЗАМІНИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Жоров В.І., к.т.н., провідний науковий співробітник,  
Жоров С.В., завідувач лабораторії,  
ННЦ "Інститут механізації сільського господарства"  
Тел. (04571) 3-27-32

Жарков В.Я., к.т.н.  
Таврійський державний агротехнологічний університет

**Анотація** – отримані аналітичні вирази та числові значення коефіцієнтів завантаження трансформаторів 10/0,4 кВ, при яких доцільно проводити взаємну заміну трансформаторів.

**Ключові слова** – трансформатори, втрати енергії, коефіцієнт завантаження, розрахунок, заміна, зниження втрат.

*Постановка проблеми.* На кожному із районних підприємств електричних мереж (РЕМ) знаходиться в експлуатації кілька сотень трансформаторів напругою 10/0,4 кВ, що дозволяє робити взаємну заміну трансформаторів без додаткових витрат коштів на купівлю нових. Важливо лиш, щоб в результаті взаємної заміни досягалося зниження втрат енергії на обох трансформаторних підстанціях. Для виконання цієї умови, навантаження більш потужного трансформатора повинно бути не вищим, а менш потужного – не нижчим деякого критичного значення. При односторонній заміні одного трансформатора іншим, критичне навантаження визначається із балансу втрат потужності у обох трансформаторах. Стосовно взаємної заміни трансформаторів, подібний методичний підхід є некоректним, оскільки не враховує конфігурації добових графіків навантаження (ДГН), які у більшого і меншого трансформаторів у загальному випадку різні. Отже, критичне навантаження необхідно визначати не з балансу втрат потужності, а із балансу добових втрат енергії, де добові втрати енергії у трансформаторі, яким замінюють, визначаються за ДГН трансформатора, який замінюють.

*Аналіз останніх досліджень.* Зазвичай, з метою зниження втрат енергії, розглядається одностороння заміна недовантаженого більшого трансформатора меншим [1]. При цьому критичний коефіцієнт завантаження більшого трансформатора визначається із балансу втрат потужності у більшому та меншому трансформаторах. Такий підхід не дозволяє у повній мірі скористатись ефектом від заміни більшого транс-

форматора меншим.

*Формулювання мети статті.* Визначити критичні завантаження трансформаторів, при яких доцільно проводити їхню взаємну заміну, із балансу добових втрат енергії в обох трансформаторах.

*Основна частина.* Припустимо, що ДГН більшого та меншого трансформаторів рівномірні і сталі упродовж року. Тоді критичні значення коефіцієнтів завантаження трансформаторів визначаються із балансу втрат потужності, які для більшого та меншого трансформатора відповідно становлять:

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

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

де  $\Delta P_{x.x.\delta}$  та  $\Delta P_{x.x.\mu}$ ,  $\Delta P_{k.z.\delta}$  та  $\Delta P_{k.z.\mu}$ ,  $k_{z.\delta}$  та  $k_{z.\mu}$  - відповідно втрати холостого ходу, короткого замикання (Вт) і коефіцієнт завантаження більшого та меншого трансформаторів.

Щоб знайти критичний коефіцієнт завантаження більшого трансформатора необхідно у формулі (2) подати коефіцієнт завантаження меншого трансформатора через коефіцієнт завантаження більшого, а саме

$$k_{z.\mu} = k_{z.\delta} \cdot \frac{S_{n.\delta}}{S_{n.\mu}}, \quad (3)$$

де  $S_{n.\delta}$  та  $S_{n.\mu}$  - номінальна потужність відповідно більшого та меншого трансформатора, кВА.

Прирівнявши праві частини формул (1) та (2), розв'язуємо одержану рівність відносно коефіцієнта завантаження більшого трансформатора. В результаті отримаємо критичне значення коефіцієнта завантаження більшого трансформатора у вигляді

$$k_{z.kp.\delta} = \sqrt{\frac{\Delta P_{x.x.\delta} - \Delta P_{x.x.\mu}}{\Delta P_{k.z.\mu} \cdot \left(\frac{S_{n.\delta}}{S_{n.\mu}}\right)^2 - \Delta P_{k.z.\delta}}} \quad (4)$$

Аналогічно, критичне значення коефіцієнта завантаження меншого трансформатора матиме вигляд

$$k_{z.kp.\mu} = \sqrt{\frac{\Delta P_{x.x.\delta} - \Delta P_{x.x.\mu}}{\Delta P_{k.z.\mu} - \Delta P_{k.z.\delta} \cdot \left(\frac{S_{n.\mu}}{S_{n.\delta}}\right)^2}} \quad (5)$$

Помножимо та розділимо праву частину виразу (5) на  $\frac{S_{н.м}}{S_{н.б}}$ . Після перетворень, одержимо критичне значення коефіцієнту завантаження меншого трансформатора

$$k_{з.кр.м} = k_{з.кр.б} \cdot \frac{S_{н.б}}{S_{н.м}} \quad (6)$$

Скориставшись каталожними даними [2], знаходимо, що заміна більшого трансформатора меншим доцільна при значенні коефіцієнта завантаження більшого трансформатора нижче 0,24...0,30 (залежно від типу трансформатора); а зворотна заміна – при коефіцієнті завантаження меншого трансформатора вище 0,38...0,48.

Фактичні ДГН сільських споживачів характеризуються значною нерівномірністю. Вони мають різко виражені денний та вечірній максимуми і нічний спад навантаження. Тому доцільніше критичні коефіцієнти завантаження визначати із балансу добових втрат енергії.

Добові втрати енергії у більшому та меншому трансформаторах, які працюють за ДГН більшого трансформатора, становлять:

$$\Delta W_{доб.б} = 24 \cdot \Delta P_{х.х.б} + \Delta P_{к.з.б} \cdot k_{з.макс.б}^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{k_{siб}}{k_{siмакс.б}} \right)^2 \quad (7)$$

та

$$\Delta W_{доб.м} = 24 \cdot \Delta P_{х.х.м} + \Delta P_{к.з.м} \cdot k_{з.макс.б}^2 \cdot \left( \frac{S_{н.б}}{S_{н.м}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{k_{siб}}{k_{siмакс.б}} \right)^2, \quad (8)$$

де  $k_{з.макс.б}$  – коефіцієнт завантаження більшого трансформатора в найбільшій із зимового та літнього максимумів навантаження;  $k_{siмакс.б}$  – найбільший із погодинних коефіцієнтів повного навантаження із ДГН більшого трансформатора,  $k_{siмакс.б} = 1,28$  (таблиця 1);  $k_{siб}$  – погодинний коефіцієнт повного навантаження більшого трансформатора об  $i$ -тій годині доби

$$k_{siб} = \sqrt{k_{pi}^2 + k_{qi}^2}, \quad (9)$$

де  $k_{pi}$  та  $k_{qi}$  – відповідно погодинні коефіцієнти активного та реактивного навантажень ДГН:

$$k_{pi} = \frac{P_i}{P_{\max}}, \quad (10)$$

$$k_{qi} = \frac{Q_i}{P_{\max}}, \quad (11)$$

де  $P_i$  і  $Q_i$  – відповідно активне і реактивне поточне погодинне навантаження, визначене з врахуванням коефіцієнта сезонності [2], %;  $P_{\max}$  – річний максимум активного навантаження,  $P_{\max} = 100$  %;  $i$  – порядковий номер години доби.

В розрахунках за формулами (7) та (8), в якості  $k_{si \max.б}$  із графіків береться більший із зимового та літнього максимумів, а  $\sum_{i=1}^{24} k_{si}^2$  визначається для розглядуваного періоду – зимового чи літнього (таблиця 1).

Таблиця 1 – Розрахункові коефіцієнти погодинних навантажень та похідних від них величин для типових ДГН сільських виробничих споживачів [2].

Години доби	Пора року							
	Зима				Літо			
	Коефіцієнти навантаження				Коефіцієнти навантаження			
	$k_{pi}$	$k_{qi}$	$k_{si}$	$k_{si}^2$	$k_{pi}$	$k_{qi}$	$k_{si}$	$k_{si}^2$
1	0,35	0,20	0,40	0,1600	0,21	0,14	0,25	0,0625
2	0,35	0,20	0,40	0,1600	0,21	0,14	0,25	0,0625
3	0,35	0,20	0,40	0,1600	0,21	0,14	0,25	0,0625
4	0,35	0,24	0,42	0,1764	0,21	0,14	0,25	0,0625
5	0,45	0,32	0,55	0,3025	0,28	0,19	0,34	0,1156
6	0,50	0,36	0,62	0,3844	0,32	0,22	0,39	0,1521
7	0,60	0,44	0,74	0,5476	0,35	0,30	0,46	0,2116
8	0,65	0,48	0,81	0,6561	0,49	0,38	0,62	0,3844
9	0,75	0,56	0,94	0,8836	0,60	0,50	0,78	0,6084
10	0,90	0,72	1,15	1,3225	0,63	0,52	0,82	0,6724
11	1,00	0,80	1,28	1,6384	0,70	0,55	0,89	0,7921
12	0,85	0,68	1,09	1,1881	0,56	0,47	0,73	0,5329
13	0,60	0,52	0,79	0,6241	0,38	0,33	0,50	0,2500
14	0,70	0,60	0,92	0,8464	0,38	0,33	0,50	0,2500
15	0,75	0,64	0,98	0,9604	0,46	0,38	0,60	0,3600
16	0,75	0,60	0,96	0,9216	0,49	0,41	0,64	0,4096
17	0,70	0,56	0,90	0,8100	0,49	0,41	0,64	0,4096
18	0,65	0,48	0,80	0,6400	0,46	0,36	0,58	0,3364
19	0,60	0,44	0,74	0,5476	0,46	0,36	0,58	0,3364
20	0,60	0,44	0,74	0,5476	0,46	0,33	0,57	0,3249
21	0,55	0,40	0,64	0,4096	0,38	0,28	0,47	0,2209
22	0,50	0,28	0,57	0,3249	0,38	0,28	0,47	0,2209
23	0,45	0,24	0,51	0,2601	0,28	0,16	0,32	0,1024
24	0,35	0,20	0,40	0,1600	0,24	0,16	0,29	0,0841

Прирівнявши праві частини виразів (7) та (8), знайдемо критичний коефіцієнт завантаження більшого трансформатора, при якому його доцільно замінити на менший

$$k_{з. макс. кр. б} = \sqrt{\frac{24(\Delta P_{x.x.б} - \Delta P_{x.x.м}) \cdot k_{si макс. б}^2}{\sum_{i=1}^{24} k_{si б}^2 \cdot \left[ \Delta P_{к.з.м} \cdot \left( \frac{S_{н.б}}{S_{н.м}} \right)^2 - \Delta P_{к.з.б} \right]}} \quad (12)$$

Аналогічно, добові втрати енергії у меншому та більшому трансформаторах, які працюють за ДГН меншого трансформатора, відповідно становлять:

$$\Delta W_{доб. м} = 24 \cdot \Delta P_{x.x.м} + \Delta P_{к.з.м} \cdot k_{з. макс. м}^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{k_{si м}}{k_{si макс. м}} \right)^2 \quad (13)$$

та

$$\Delta W_{доб. б} = 24 \cdot \Delta P_{x.x.б} + \Delta P_{к.з.б} \cdot k_{з. макс. м}^2 \cdot \left( \frac{S_{н.м}}{S_{н.б}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{k_{si м}}{k_{si макс. м}} \right)^2, \quad (14)$$

де  $k_{з. макс. м}$  – коефіцієнт завантаження меншого трансформатора в менший із зимового та літнього максимумів навантаження;  $k_{si макс. м}$  – менший (зазвичай літній) максимум навантаження із ДГН меншого трансформатора,  $k_{si макс. м} = 0,89$  (таблиця 1);  $k_{si м}$  – погодинний коефіцієнт повного навантаження меншого трансформатора об  $i$ -тій годині доби.

В розрахунках за формулами (13) та (14), в якості  $k_{si макс. м}$  із графіків береться менший із зимового та літнього максимумів, а  $\sum_{i=1}^{24} k_{si м}^2$  визначається відповідно до розглядуваного періоду – зимового чи літнього (таблиця 1).

Прирівнявши праві частини виразів (13) та (14), знайдемо критичний коефіцієнт завантаження меншого трансформатора, при якому його доцільно замінити на більший

$$k_{з. макс. кр. м} = \sqrt{\frac{24(\Delta P_{x.x.б} - \Delta P_{x.x.м}) \cdot k_{si макс. м}^2}{\sum_{i=1}^{24} k_{si м}^2 \cdot \left[ \Delta P_{к.з.м} - \Delta P_{к.з.б} \cdot \left( \frac{S_{н.м}}{S_{н.б}} \right)^2 \right]}} \quad (15)$$

Добове зниження втрат енергії від взаємозаміни трансформато-

рів відповідно становить:

$$E_{\text{доб. б-м}} = 24(\Delta P_{\text{х.х.б}} - \Delta P_{\text{х.х.м}}) + k_{\text{з.макс.б}}^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{k_{\text{сіб}}}{k_{\text{сімакс.б}}} \right)^2 \cdot \left[ \Delta P_{\text{к.з.б}} - \Delta P_{\text{к.з.м}} \left( \frac{S_{\text{н.б}}}{S_{\text{н.м}}} \right)^2 \right] \quad (16)$$

та

$$E_{\text{доб.літ. м-б}} = 24(\Delta P_{\text{х.х.м}} - \Delta P_{\text{х.х.б}}) + k_{\text{з.макс.м}}^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{k_{\text{сім}}}{k_{\text{сімакс.м}}} \right)^2 \cdot \left[ \Delta P_{\text{к.з.м}} - \Delta P_{\text{к.з.б}} \left( \frac{S_{\text{н.м}}}{S_{\text{н.б}}} \right)^2 \right] \quad (17)$$

Річне зниження втрат енергії від заміни більшого трансформатора меншим та меншого більшим знаходять за виразом

$$E_{\text{річн.}} = 185 \cdot E_{\text{доб.зим.}} + 180 \cdot E_{\text{доб.літ.}} \quad (18)$$

де 185 і 180 – відповідно 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 [2].

Сумарне річне зниження втрат енергії від взаємної заміни трансформаторів становить

$$E_{\text{річн.}\Sigma} = E_{\text{річн. б-м}} + E_{\text{річн. м-б}} \quad (19)$$

де  $E_{\text{річн. б-м}}$  та  $E_{\text{річн. м-б}}$  – річне зниження втрат енергії від заміни більшого трансформатора на менший та навпаки.

Річні втрати енергії в більшому та меншому трансформаторі [2]

$$\Delta W_{\text{річн.}} = 185 \cdot \Delta W_{\text{доб.зим.}} + 180 \cdot \Delta W_{\text{доб.літ.}} \quad (20)$$

Зниження втрат енергії у відсотках становить

$$E_{\text{річн.}} \% = \frac{E_{\text{річн.}\Sigma}}{\Delta W_{\text{річн.б}} + \Delta W_{\text{річн.м}}} \cdot 100 \quad (21)$$

В табл. 2 наведені розраховані за даними [2] критичні значення коефіцієнтів завантаження трансформаторів, усереднені показники яких відрізняються від розрахункових не більш ніж на 6%. При цьому припускалося, що ДГН обох трансформаторів однакові.

Таблиця 2 – Критичні значення коефіцієнтів завантаження тран-

сформаторів типу ТМ напругою 10/0,4 кВ для взаємної заміни.

Номінальна потужність трансформатора, кВА	Навантаження:							
	типове виробниче				типове змішане			
	Схема з'єднання вторинної обмотки трансформатора:							
	більшої потужності/меншої потужності							
	Y-0		Z-0		Y-0		Z-0	
Y-0	Z-0	Y-0	Z-0	Y-0	Z-0	Y-0	Z-0	
40-250, 630, 400	0,46	0,39	0,52	0,42	0,43	0,37	0,48	0,40
	0,39	0,36	-	-	0,36	0,31	-	-
25-160, 400, 250	0,79	0,67	0,90	0,73	0,74	0,64	0,83	0,70
	0,67	0,62	-	-	0,62	0,53	-	-

Примітка: „Y-0” – зірка з нулем; „Z-0” – „зигзаг” з нулем.

В результаті взаємної заміни трансформаторів досягається зниження втрат енергії, яке тим вище, чим нижче від критичного максимальне завантаження більшого трансформатора та, чим вище від свого критичного значення максимальне завантаження меншого (рисунок 1). Так, для трансформатора типу ТМ-160/10 - при критичному завантаженні більшого трансформатора (0,43) зниження втрат енергії в ньому становить 7,6 %, а при 0,20 відповідно 28,1 %.

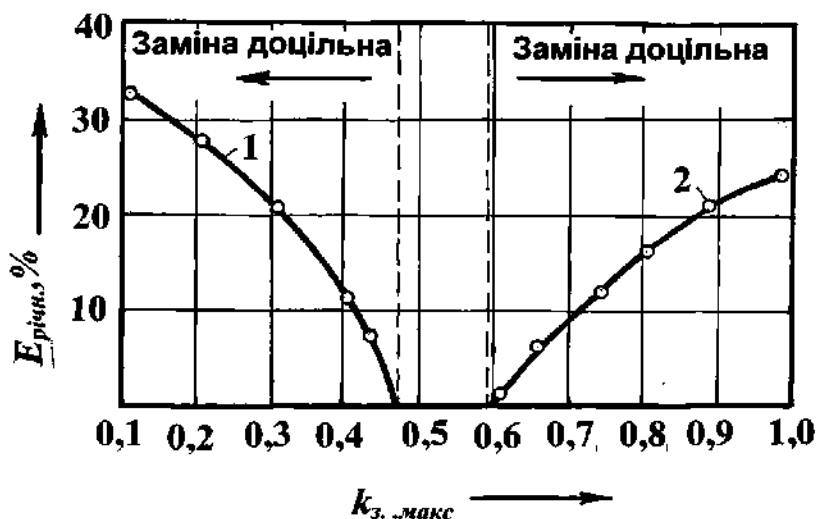


Рис. 1. Залежність річного зниження втрат енергії у трансформаторах ТМ-160/10 (1) та ТМ-100/10 (2) в результаті їх взаємної заміни від коефіцієнту максимального завантаження кожного.

*Висновки.* Розроблена методика дозволяє більш об'єктивно визначати момент доцільності взаємної заміни недовантажених та перевантажених трансформаторів сільських електромереж.

Література

1. *Бибко В.Г.* Зниження втрат електроенергії у сільському господарстві / *В. Г. Бибко, С.Я. Меженний, В.Г Стафійчук, В.Ф. Юрчук* . Вид. 2-е, перероб. і доп. – К. : Урожай, 1987. – 128 с.

2. *Будзко И.А.* Электроснабжение сельского хозяйства / *И.А. Будзко, Н.М. Зуль*. – М. : Агропромиздат, 1990. – 496 с.

3. *Жоров В.І.* Вплив нерівномірності добових графіків навантаження на втрати енергії в електричних мережах / *В.І. Жоров* // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. - Мелітополь : ТДАТУ, 2009. – Вип. 9, т. 2. – С. 154-160.

## **СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

*Жоров В.И., Жоров С.В., Жарков В.Я.*

**Аннотация** – получены аналитические выражения и численные значения коэффициентов загрузки трансформаторов 10/0,4 кВ, при которых целесообразно производить взаимную замену недогруженных и перегруженных трансформаторов.

## **ENERGY LOSS REDUCTION BY REPLACEMENT OF TRANSFORMERS**

*V. Zhorov, S. Zhorov, V. Zharkov*

### ***Summary***

**Equations for calculation are deduced and load factors of 10/0,4 kV transformers are evaluated for expedient mutual change of underloaded and overloaded transformers.**