УДК 621.314

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИБОРУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ

І.М. Луценко, Є.В. Кошеленко, П.С. Циган
Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»
просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000, Україна. E-mail: lutsenkoin@gmail.com

У роботі проаналізовано проблему низької ефективності використання навантажувальної здатності силових трансформаторів розподільчих мереж та розроблено заходи щодо її підвищення, що дозволить забезпечити ефективний режим роботи даного устаткування. Встановлено значення граничного коефіцієнту завантаження, при якому доцільно виконувати заміну трансформаторів, залежно від їх початкового завантаження та числа годин використання максимального навантаження, вимог щодо резервування споживачів. Запропоновано вирази з визначення доцільних коефіцієнтів завантаження трансформаторів для багатотрансформаторних підстанцій та щодо визначення мінімального рівня компенсації реактивних навантажень для реалізації ефективного режиму навантаження трансформаторів. Результати роботи можуть бути використані для обґрунтованого підвищення ефективності використання силових трансформаторів в електричних мережах всіх рівнів розподілу електричної енергії підприємств електроенергетики.

Ключові слова: силовий трансформатор, коефіцієнт завантаження, навантажувальна здатність, втрати електричної енергії.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫБОРА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

И.Н. Луценко, Е.В. Кошеленко, П.С. Цыган
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»
просп. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, 49000, Украина. E-mail: lutsenkoin@gmail.com

В работе проанализирована проблема низкой эффективности использования нагрузочной способности силовых трансформаторов распределительных сетей и разработаны мероприятия по ее повышению, что позволит обеспечить эффективный режим работы данного оборудования. Установлено значение предельного коэффициента загрузки, при котором целесообразно выполнять замену трансформаторов в зависимости от их начальной загрузки и числа часов использования максимальной нагрузки, требований по резервированию потребителей. Предложено выражения по определению целесообразных коэффициентов загрузки трансформаторов для многотрансформаторных подстанций и по определению минимального уровня компенсации реактивных нагрузок для реализации эффективного режима нагрузки трансформаторов. Результаты работы могут быть использованы для обоснованного повышения эффективности использования силовых трансформаторов в электрических сетях всех уровней распределения электрической энергии предприятий электроэнергетики.

Ключевые слова: силовой трансформатор, коэффициент загрузки, нагрузочная способность, потери электрической энергии.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Проблема низької ефективності роботи електричних мереж енергосистеми України є відомою. Проте, з різних причин впровадження заходів щодо її вирішення майже не відбувається. Наукові розробки і здобутки дослідників, що займаються задачами підвищення енергетичної ефективності функціонування електричних систем та мереж дуже часто залишаються лише в теорії. Така ситуація пояснюється в деяких випадках складністю впровадження певних наукових результатів і рішень, необхідністю здійснення значних капіталовкладень на реконструкцію та модернізацію обладнання, строком окупності прогресивних рішень. Дуже часто це суперечить інтересам вітчизняного бізнесу у прагненні отримання практично миттєвого прибутку.

У загальному комплексі проблем електроенергетики України питання підвищення ефективності експлуатації силових трансформаторів є досить важливим та є однією зі складових глобального вирішення проблеми. Так, у попередніх дослідженнях за даним напрямом було проаналізовано ефективність експлуатації трансформаторів районних підстанцій високовольтних електричних мереж напругою 110-220 кВ [1], розподільчих трансформаторів 6(10)/0,4 кВ [2]. Було доведено, що за навантажувальною здатністю трансформатори розподільчих мереж використовуються неефективно та є суттєво недовантаженими, що негативно впливає на ефективність використання капіталовкладень у відповідне устаткування. Фактичне співвідношення між встановленою потужністю трансформаторів і споживачів становить 7:1, переважна більшість силових трансформаторів працюють з навантаженням на рівні 20% від номінального.

Тому доцільним є розробка зрозумілого для широкого кола спеціалістів порядку аналізу ефективності роботи будь-якого трансформатора, що знаходиться в експлуатації, в основу якого мають бути покладені доступні вихідні дані, співвідношення, допущення і обмеження. Дана

вимога ставиться внаслідок того, що досить часто отримувані наукові результати в змозі впровадити лише їх розробники, а для інженера-експлуатаційника вони є надто складними або потребують важкодоступних даних.

Визначення загальних факторів впливу та розробка конкретних заходів щодо підвищення ефективності використання трансформаторів розподільчих мереж, ефективне використання навантажувальної здатності та перехід до експлуатації електрообладнання у відповідності до паспортних параметрів і регламентованого строку служби [3] є актуальною науковою задачею, яка потребує вирішення.

Мета роботи – розробка і обґрунтування заходів щодо підвищення точності вибору та ефективності використання навантажувальної здатності силових трансформаторів розподільчих мереж.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Показником ефективності роботи трансформаторного обладнання є фактичний режим роботи силових трансформаторів за навантаженням, при якому досягається найвищий коефіцієнт корисної дії. Такий режим встановлюється при завантаженні трансформатора вище 60% від номінального. Для адекватної оцінки реального використання трансформаторів розподільних мереж виконаємо аналіз їх завантаження за даними режимних добових замірів.

У порівнянні з системоутворюючими магістральними електричними мережами розподільні мережі більшою мірою потребують реконструкції, модернізації та оптимізації розвитку у зв'язку з великим фізичним і моральним зносом. До одного з інноваційних заходів підвищення енергетичної ефективності в розподільних електричних мережах 0,4-220 кВ слід віднести впровадження нового, більш економічного, електрообладнання, зокрема, силових трансформаторів зі зменшеними активними і реактивними втратами холостого ходу, заміну перевантажених і недовантажених силових трансформаторів, відключення трансформаторів на двотрансформаторних підстанціях в режимі малих навантажень [4-6].

Вибір оптимальної потужності силових трансформаторів. Відзначимо також, що при виборі і встановленні нових трансформаторів відповідно до Норм технологічного проектування підстанцій 6-750 кВ та ГОСТ 14209-97, для масляних трансформаторів необхідно враховувати їх перевантажувальну здатність, що дозволить підвищити ефективність використання даного обладнання.

З технічної точки зору обґрунтування прийняття адекватних реальним навантаженням трансформаторів є важливим завданням, тому заміна обладнання на аналогічне, із завищеними параметрами не вирішує задачу оптимізації використання силових трансформаторів. Обмежуючими факторами при вирішенні задачі та впровадженні відповідних заходів на кожній підстанції є забезпечення договірної потужності споживачів, які отримують живлення від ПС, так як номінальна потужність трансформаторів повинна забезпечувати договірну потужність приєднаного навантаження споживачів. Таким чином, обґрунтоване встановлення трансформаторів меншої потужності є можливим при перегляді та узгодженні зі споживачем договірної потужності, або з урахуванням реальних факторів сьогодення, коли потужні виробництва зупиняються або суттєво скорочують відповідні потужності, тобто задекларовані у договорі на користування електричною енергію значення потужності спостерігатися не буде.

Врахування фактичного ГЕН споживачів дозволить більш ефективно виконувати вибір номінальної потужності силових трансформаторів. Причому такий вибір доцільно виконувати не лише при реконструкції підстанції із заміною трансформаторів, коли відомі фактичні електричні навантаження та режим роботи, але і при проектуванні – за типовими ГЕН споживачів, для яких призначається підстанція. На сьогодні ж переважно вибір потужності трансформаторів виконується за розрахунковим 30-хвилинним максимумом навантаження, хоча постійна часу нагріву трансформаторів складає більше $\tau > 10$ хвилин, тому доцільний інтервал осереднення повинен бути навіть більшим за 3τ, тобто >30 хвилин, а спостерігається він один або декілька разів на добовому проміжку (ранковий та вечірній піки навантажень). Врахування нерівномірності ГЕН споживачів при виборі силових трансформаторів також може мати економічний ефект, який доцільно дослідити. Ще одним фактором завищення номінальної потужності трансформаторів є неврахування можливості уникнення завищення їх типорозмірів шляхом визначення доцільного рівня компенсації реактивної потужності на етапі проектування електричної мережі. Такий підхід реалізується для цехових електричних мереж, де вибір трансформаторів виконується за розрахунковою активною, а не повною потужністю з оглядом на покриття реактивного навантаження засобами його компенсації.

Визначення доцільного коефіцієнту завантаження трансформаторів на багатотрансформаторних ПС. Номінальна потужність силових трансформаторів може бути знайдена за розрахунковою (методи розрахунку електричних навантажень), або, виходячи з максимальної за ГЕН за наступною відомою формулою:

$$S_{нт} \geq S_{розр} = \frac{S_{М.ГЕН}}{(n-1)\kappa_{2ав}}; \qquad (1)$$

де n – кількість трансформаторів на підстанції; шт, $\kappa_{2ав}$ – коефіцієнт допустимого аварійного перевантаження, який приймається для силових масляних трансформаторів на рівні 1,4.

З приведеної формули можна зробити висновок, що для багатотрансформаторних підстанцій ($n > 2$)

можна збільшити їх завантаження у вихідному режимі, оскільки навантаження післяаварійного режиму будуть забезпечувати два і більше трансформатори.

Тоді доцільні коефіцієнти завантаження трансформаторів для багатотрансформаторних підстанцій за умови збереження живлення споживачів всіх категорій надійності в післяаварійному режимі можна знайти з наступного виразу:

$$K_{з.доц} \le \frac{(n-1)\kappa_{2ав}}{n} \qquad (2)$$

n = 2:

$$K_{з.доц.2} \le \frac{(n-1)\kappa_{2ав}}{n} = \frac{(2-1)\cdot 1,4}{2} = 0,7\,; \qquad (3)$$

n = 3:

$$K_{з.доц.3} \le \frac{(n-1)\kappa_{2ав}}{n} = \frac{(3-1)\cdot 1,4}{3} = 0,93\,; \qquad (4)$$

n = 4:

$$K_{з.доц.4} \le \frac{(n-1)\kappa_{2ав}}{n} = \frac{(4-1)\cdot 1,4}{4} = 1\,. \qquad (5)$$

Слід зауважити, що вибір трансформаторів за максимальним розрахунковим навантаженням, навіть реальним (за ГЕН), вносить деяке завищення потужності, яке доцільно додатково враховувати коефіцієнтом запасу $K_{зап}$, який можна представити як відношення «гріючої» потужності до максимальної. Під «гріючою» потужністю розуміється середньоквадратичне значення повної потужності:

$$K_{зап.S} \le \frac{K_{ф.S}}{K_{м.S}} = \frac{S_{ср.кв}}{S_{макс.ГЕН}} < 1 \qquad (6)$$

де $K_{ф.S}$, $K_{м.S}$ – відповідно коефіцієнти форми та максимуму графіка електричних навантажень за повною потужністю; $S_{ср.кв}$, $S_{макс.ГЕН}$ – відповідно середньоквадратичне та максимальне значення графіка електричних навантажень за повною потужністю

Коефіцієнт запасу знаходиться за показниками фактичних графіків електричних навантажень, які є доступними для аналізу на підприємствах електроенергетики за даними режимних замірів.

Уникнення завищення типорозміру та підвищення завантаження трансформаторів шляхом компенсації реактивної потужності. Додатково уникнути завищення потужності трансформаторів і одночасно підвищити їх завантаження до $K_{з.доц}$ можливо шляхом компенсації реактивних навантажень споживачів на шинах 6-10 кВ підстанцій. Це є особливо важливим фактором у випадках деякого перевищення розрахункової або фактичної за ГЕН максимальної потужності над номінальною потужністю стандартного номенклатурного ряду трансформаторів.

Для цього повинна виконуватись умова:

$$\frac{P_{м.факт}K_{зап.P}}{n} \le S'_{рек}K_{з.доц} \qquad (7)$$

$$S'_{рек} \ge \frac{P_{м.факт}K_{зап.P}}{nK_{з.доц}} \qquad (8)$$

Останній вираз характерний для повної компенсації реактивних навантажень і є граничною умовою. Якщо він виконується, то мінімальний рівень компенсації реактивних навантажень (квар) знайдеться за формулою:

$$Q_{БК.\min} = Q_{\max} - \sqrt{(K_{з.доц}nS'_{нт.рек})^2 - (P_{\max}K_{зап.P})^2} \qquad (9)$$

Коефіцієнт $K_{зап}$ можна прийняти рівним одиниці з тих позицій, що на сьогодні спостерігається тенденція зростання частки побутових та юридичних споживачів з використанням електроопалення, що матиме відповідний приріст навантаження та може викликати перевантаження трансформаторів, якщо їх вибрати з урахуванням повністю всіх поправок.

Організаційні заходи щодо підвищення навантаження силових трансформаторів. Для підстанцій, на яких кошти на придбання нового обладнання (трансформаторів) є значними доцільно виконати перевірку можливості роботи по схемам післяаварійного режиму з відключенням одного трансформатора, тобто реалізувати організаційні заходи без додаткових капіталовкладень або залишити поточний режим роботи без заміни існуючих трансформаторів. При цьому доцільність такого режиму за втратами електричної енергії буде спостерігатися лише у випадку значення коефіцієнту завантаження трансформаторів, які залишаються в роботі:

а) $K_з$ < 0,6 – для двотрансформаторних підстанцій;

б) будь-який $K_з$ < 1 – для три- та чотиритрансформаторних підстанцій

$$K_{з.ПА.існ} = \frac{S_{макс.ГЕН}}{S_{ном.т}(n_T - 1)} \qquad (10)$$

Дослідження впливу показників ГЕН на ефективність використання навантажувальної здатності силових трансформаторів. При обґрунтуванні встановлення трансформаторів на ступінь меншого типорозміру, ніж існуючий, економічний ефект може бути отриманий шляхом зіставлення вартості втрат електричної енергії в конструктивних елементах трансформаторів суміжних типорозмірів, а також різниці вартості самих трансформаторів.

Ефективність використання навантажувальної здатності доцільно аналізувати в залежності від коефіцієнту завантаження трансформатора та враховувати вимоги щодо забезпечення живлення споживачів у післяаварійному режимі.

Для прикладу виконано розрахунки для типорозмірів масляних трансформаторів з вищою напругою 35 кВ. У табл. 1 приведено необхідні технічні характеристики відповідних трансформаторів.

Таблиця 1 – Технічні характеристики трансформаторів типу ТМН

Серія	Позначення типорозміру	Номінальна потужність трансформатора $S_{ном.т}$, кВ·А	Втрати, Вт	
			$\Delta P_{хх}$	$\Delta P_{кз}$
ТМН 35 кВ	Т1	630	1300	7600
	Т2	1000	2100	11600
	Т3	1600	2900	16500
	Т4	2500	3900	23500
	Т5	4000	5600	33500
	Т6	6300	8000	46500
	Т7	10000	12000	60000

Різниця втрат потужності для *суміжних* типорозмірів за умови $S_{ном.Т2} > S_{ном.Т1}$ становитиме:

- холостого ходу

$$\Delta P_{хх.2\text{-}1} = \Delta P_{хх.Т2} - \Delta P_{хх.Т1}\text{, Вт} \qquad (11)$$

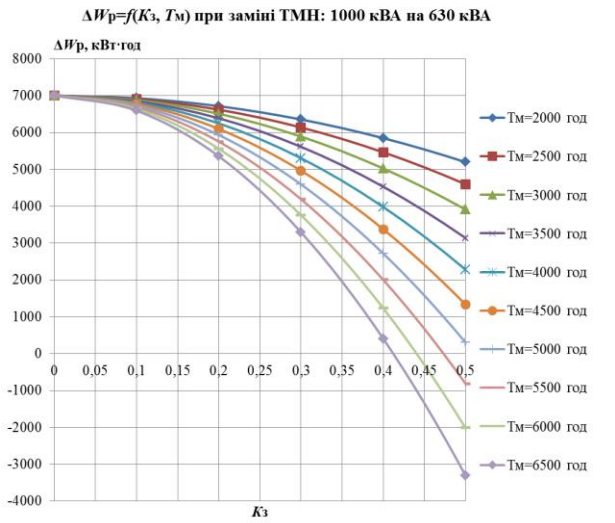
- короткого замикання

$$\Delta P_{кз.2\text{-}1} = (\Delta P_{кз.2} \cdot K_{з2}^2 - \Delta P_{кз.1} \cdot K_{з1}^2)\text{, Вт} \qquad (12)$$

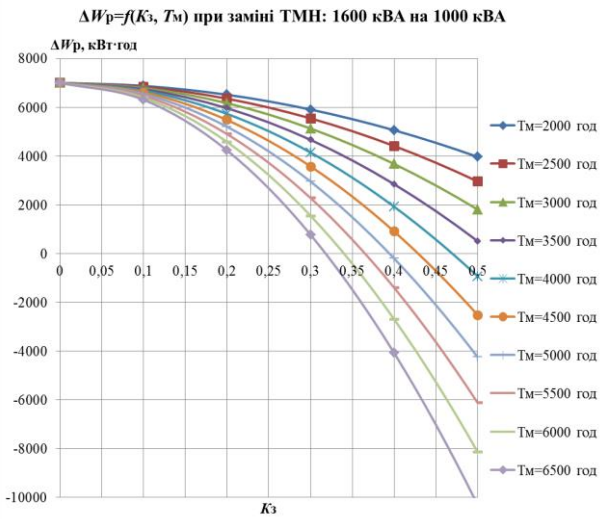
Зниження річного споживання електричної енергії за рахунок зменшення втрат потужності в конструктивних елементах трансформатора:

$$\Delta W_{р.2\text{-}1} = (\Delta P_{хх.2\text{-}1} T_р + \Delta P_{кз.2\text{-}1} \tau_{нб}) \cdot 10^{-3}\text{, кВт·год,} \qquad (13)$$

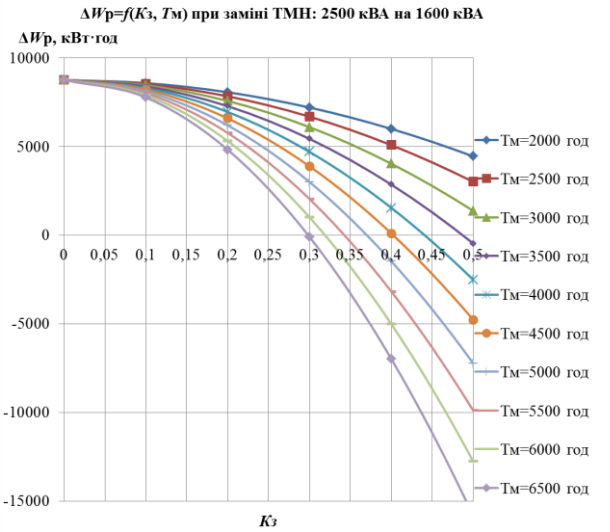
Слід додатково враховувати, що «навантажувальні» втрати електричної енергії залежать від двох параметрів – $K_з$ і $T_м$ ($\tau_{нб}$). Розглянемо діапазон значень $T_м$ = 2000...6500 год з кроком 500 год та визначимо граничний коефіцієнт завантаження для існуючого трансформатора $K_{з.гр.}$, при якому різниця втрат електричної енергії в трансформаторах суміжних типорозмірів буде додатною.



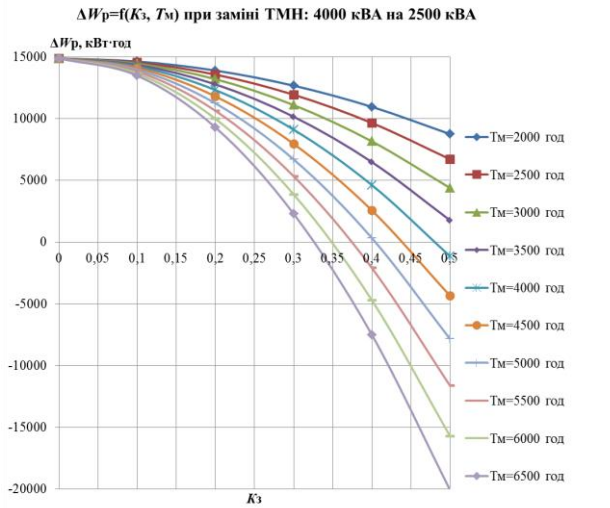
а)



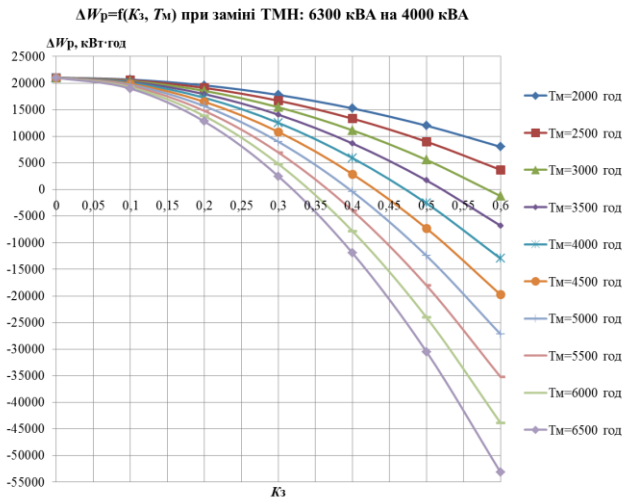
б)



в)



г)



д)

Рисунок 1 – Криві залежностей різниці втрат електричної енергії в трансформаторах суміжних типорозмірів від початкового коефіцієнту завантаження та показників ГЕН

З наведених графіків для суміжних типорозмірів трансформаторів можна попередньо визначити доцільність їх заміни та відповідну ефективність такого заходу за річними втратами електричної енергії. Від'ємні значення втрат електричної енергії свідчать про недоцільність такого заходу, але розглядати їх слід, порівнюючи з різницею у вартості трансформаторів суміжних типорозмірів. Різниця втрат електричної енергії спадає зі зростанням числа годин використання максимального навантаження, тобто при вирівнюванні графіка електричних навантажень. Для об'єктивної оцінки слід враховувати тариф на електроенергію (поточний і перспективний прогноз), вартість трансформаторів, що розглядаються при оптимізації, а також регламентований строк служби обладнання.

Враховуючи тенденції постійного зростання тарифів, зменшення плати за електроенергію доцільно оцінювати з урахуванням зміни тарифу за відповідний період. Аналіз тарифів на електроенергію для першого класу напруги за останні 5 років дозволив встановити, що в середньому за рік вартість електричної енергії зростала приблизно на 10%. Тобто зміну тарифу можна розглядати як геометричну прогресію з першим членом b_1, що дорівнює значенню поточного тарифу на електроенергію C_0, і знаменником q = 1,1 (враховує щорічне збільшення тарифу на 10 %). У такому випадку тариф у поточному році (n) розрахункового періоду можна записати наступним чином [7]:

$$C_n = (C_0 \cdot q^n - C_0)/(q - 1), \text{ грн} \qquad (14)$$

Враховуючи вище викладене, відповідний критерій оптимізації можна записати наступним чином:

$$\Delta W_t\, C_n + \Delta K_{1\text{-}2} > 0, \text{ грн} \qquad (15)$$

де ΔW_t – сумарна різниця втрат електричної енергії в трансформаторах за період, що розглядається, кВт·год.

Наступною задачею є знаходження коефіцієнта завантаження трансформатора, при якому буде доцільно виконати його заміну на менш потужний за втратами електричної енергії та при якому буде відбуватися нормальне відпрацювання ресурсу ізоляційної системи за навантаженням та температурою найбільш нагрітої точки з урахуванням недовантажень та допустимих перевантажень [8-10].

Значення коефіцієнта граничного завантаження встановленого трансформатора, при якому буде спостерігатися рівність втрат електричної енергії для трансформаторів суміжних типорозмірів, можна знайти з виразу:

$$K_{з.гр.} = \sqrt{\frac{\Delta P_{хх1} - \Delta P_{хх2}}{\left(\Delta P_{кз2} - \Delta P_{кз1}\left(\frac{S_{ном.T1}}{S_{ном.T2}}\right)^2\right)\tau_{нб}}}. \qquad (16)$$

Розраховані за приведеною залежністю значення $K_{з.гр.}$ для можливих варіантів заміни трансформаторів представимо графічно (рис. 2).

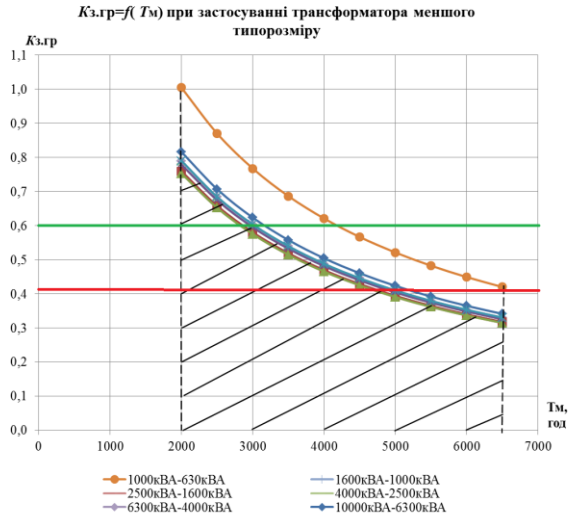


Рисунок 2 – Залежності граничного коефіцієнту завантаження від значень $T_м$ при застосуванні трансформаторів типу ТМН-35/10 суміжних типорозмірів

За кривими, приведеними на рисунку 1, можна попередньо визначити доцільність заміни трансформатора суміжним типорозміром на ступінь меншим за потужністю. Для цього за графіком електричних навантажень (даними режимних замірів) необхідно розрахувати середньоквадратичне значення $K_{з.ср1}$ встановленого трансформатора і час $T_м$. Далі за відповідною кривою для типорозмірів, що розглядаються, визначається $K_{з.гр.}$ За умовою $K_{з.ср1} \le K_{з.гр}$ встановлюється доцільність заміни трансформатора за критерієм втрат електричної енергії в умовах вихідного режиму роботи. Проте, на даному етапі

додатково слід враховувати обмеження стосовно режиму роботи трансформатора меншого типорозміру за навантаженням, так як його коефіцієнт завантаження зросте пропорційно відношенню номінальних потужностей трансформаторів, тобто:

$$K_{з.ср2} = K_{з.ср1}(S_{ном1}/S_{ном2}). \quad (17)$$

У такому випадку доцільність заміни трансформатора у загальному випадку слід розглядати при значенні $K_{з.ср1} \leq 0{,}6$, так як крок дискретизації потужностей даного номенклатурного ряду становить близько 1,6. Наведені положення справедливі для однотрансформаторних ПС.

Застосування двотрансформаторних підстанцій передбачає резервування споживачів I, II-ї категорій надійності у післяаварійному режимі. Це слід додатково враховувати при обґрунтуванні встановлення трансформаторів меншої потужності, щоб зберегти живлення відповідних споживачів та уникнути надмірного перевантаження трансформатора. Для забезпечення необхідного рівня резервування необхідно, щоб перевантаження трансформатора у післяаварійному режимі не перевищувало 40 %. За умови забезпечення резервування споживачів всіх категорій надійності середньоквадратичне значення коефіцієнту завантаження рекомендованого трансформатора $K_{з.ср2}$ у нормальному режимі не повинно перевищувати 0,7. Тоді, доцільність заміни трансформатора слід розглядати при значенні $K_{з.ср1} \leq 0{,}42$. У випадку резервування лише споживачів I, II-ї категорій надійності та відключення III-ї значення $K_{з.ср2}$ можна збільшити до 0,8-0,9 залежно від частки споживачів I, II-ї категорій надійності.

Значення $T_м$ накладає додаткові обмеження за умовою додатного значення втрат електричної енергії для порівнюваних типорозмірів трансформаторів. Так, при його зростанні значення $K_{з.гр}$ існуючого трансформатора зменшується.

Врахування обмежень за допустимим навантаженням і $T_м$ дозволяє остаточно визначити доцільний коефіцієнт завантаження існуючого трансформатора для виконання обґрунтованої заміни на менший типорозмір.

Додатне значення втрат електричної енергії ΔW_p свідчить про наявність економічного ефекту від заміни трансформаторів, який у грошовому еквіваленті може бути розрахований за наведеними вище співвідношеннями в залежності від поточного закупівельного тарифу на електричну енергію – для ПС, які перебувають на балансі електропостачальної організації або від поточного роздрібного тарифу відповідного класу напруги – у випадку знаходження ПС на балансі споживача. Додатковий ефект складатиме різниця у вартості самих типорозмірів трансформаторів.

Техніко-економічне обґрунтування ефекту від запропонованих заходів.

Зважаючи на те, що потужності трансформаторів завищені [9], то вартість експлуатації та проведення капітального ремонту ($C_{кр}$) встановленого застарілого обладнання є в деяких випадках співрозмірною з вартістю нового обладнання ($K_{об}$), що є доцільним до врахування, оскільки:

$$\Delta C_{кр} = (0{,}25\text{-}0{,}4)\ K_{об} \quad (18)$$

До того ж вартість встановлення 1 кВА трансформаторної потужності на сьогодні складає орієнтовно 1 тис. грн. Враховуючи це, можна оцінити економічний ефект, що може бути досягнуто при підвищенні фактичного завантаження трансформаторів шляхом застосування оптимальних типорозмірів та компенсації реактивної потужності у порівнянні з існуючим станом використання навантажувальної здатності. Вартість встановлення 1 квар реактивної потужності складає орієнтовно 0,4 тис. грн, що на 60 % нижче, ніж вартість трансформаторної потужності.

ВИСНОВКИ. Режим роботи трансформаторів з суттєвим недовантаженням є небажаним, оскільки це призводить до неефективного використання капіталовкладень в електрообладнання електричних мереж. Також, після відпрацювання устаткуванням свого номінального терміну служби воно стає морально і фізично застарілим, потребує більше коштів на ремонт, значно зменшується його надійність у порівнянні з новими розробками.

Виконання запропонованих заходів щодо підвищення ефективності експлуатації трансформаторів на підстанціях розподільчих мереж дозволить обґрунтовано наблизити режим роботи даного устаткування до номінального.

Доведено, що експлуатація силових трансформаторів більш регламентованого строку служби є недоцільною внаслідок істотного недовантаження і підвищених втрат електричної енергії. Тобто необхідно виконувати своєчасне оновлення парку трансформаторів, для чого слід максимально ефективно використовувати їх навантажувальну здатність у процесі експлуатації.

Встановлено значення граничного коефіцієнту завантаження, при якому доцільно виконувати заміну трансформаторів, залежно від початкового їх завантаження та числа годин використання максимального навантаження, вимог щодо резервування споживачів.

Встановлено, що вибір трансформаторів за класичною методикою викликає суттєву похибку і завищення номінальної потужності на етапі проектування. Для зниження цієї похибки рекомендовано вносити поправки, що враховують очікувані параметри режимів роботи або фактичний графік електричних навантажень.

Встановлено, що для багатотрансформаторних підстанцій ($n > 2$) можна збільшити їх завантаження у вихідному режимі, оскільки навантаження післяаварійного режиму будуть забезпечувати два і більше трансформатори. Запропоновано вирази з визначення доцільних коефіцієнтів завантаження трансформаторів для багатотрансформаторних підстанцій у нормальному режимі за умови збереження живлення споживачів всіх категорій надійності в післяаварійному режимі.

Уникнути завищення потужності трансформаторів і одночасно підвищити їх

завантаження до доцільного можливо шляхом компенсації реактивних навантажень споживачів на шинах 6-10 кВ. Це є особливо важливим фактором у випадках деякого перевищення розрахункової потужності над номінальною потужністю стандартного номенклатурного ряду трансформаторів. Заропоновано вираз щодо визначення мінімального рівня компенсації реактивних навантажень для реалізації ефективного режиму навантаження трансформаторів.

Результати роботи можуть бути використані для аналізу ефективності використання та обґрунтованого підвищення ефективності використання силових трансформаторів в електричних мережах всіх рівнів розподілу електричної енергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Луценко І.М., Калінніков В.Б. Обґрунтування доцільності переходу до системи обслуговування силових трансформаторів за поточним технічним станом // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2011» – 2011. – Т. 4. – С. 75–79.

2. Навантажувальна здатність трансформаторів розподільних мереж селищ міського типу / В.Т. Заїка, С.С. Котенко, І.М. Луценко // Науковий вісник Національного гірничого університету – 2010. – Вип. №6. – С. 86–91.

3. Русов В.А. Системы диагностического мониторинга силовых трансформаторов // Электро. – 2008. – Вып.6. – С. 35-37.

4. Мероприятия по повышению эффективности режимов действующих распределительных электрических сетей / В.В.Зорин, Р.А.Буйный, Д.О.Иванько // Енергетика: економіка, технології, екологія. Наук. журнал. ─ 2011.─ №2 ─ С.70–77.

5. Повышение эффективности мероприятий по энергосбережению в электрических сетях / С.О. Хомутов, В.А. Рыбаков, В.Д. Горшенина // Ползуновский Вестник. ─ 2013.─ №4 ─ С.187–193.

6. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций [Электронный ресурс] / В. Э. Воротницкий, М.А. Калинкина, В.Н. Апряткин // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2003. – № 7 (19). – Режим доступа: http://esco-ecosys.narod.ru/2003_7/art52.htm. – Загл. с экрана.

7. Луценко І.М. Ефективне використання вибухобезпечних підстанцій вугільних шахт. Монографія. – Д.: НГУ, 2015. – 97 с.

8. Godina R., Rodrigues E., Matias, J., Catalão, J. Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges // Energies – 2013. – no. 8 – pp. 12147-12186, available at: http://www.mdpi.com/1996-1073/8/10/ 12147/pdf/.

9. Nordman H., Rafsback N., Susa D. Temperature responses to step changes in the load // IEEE Trans. Power Deliv. – 2003. – no. 18 – pp. 1110–1117.

10. Fedirchuk D., Rebizant C. Managing transformer overload – Smart relays // IEEE Can. Rev. – 2000. – no. 35 – pp. 25–28.

INCREASE OF SELECTION ACCURACY AND EFFICIENCY USE OF POWER TRANSFORMERS IN DISTRIBUTION NETWORKS

I.M. Lutsenko, E.V. Koshelenko, P.S. Tsyhan
State Higher Educational Institution “National Mining University”
pr. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49000, Ukraine. E-mail: lutsenkoin@gmail.com

Purpose. Development and justification of measures to improve selection accuracy and efficiency use of power transformers loading ability in distribution networks. **Methodology.** Standard methods for the nominal power of transformers selecting and the operating modes of electrical networks calculating. **Findings.** Measures to increase the efficiency of transformers exploitation in distribution networks have been developed, which will ensure an efficient operation mode of this equipment. **Originality.** The value of the critic load factor, at which it is expedient to perform the replacement of transformers depending on their initial load and the number of hours of maximum load use, is established. Expressions for determination of suitable load factors for multi-transformer substations were proposed. Expressions for determining the minimum level of reactive loads compensation for the effective load mode of transformers realization are proposed. **Practical value.** The results can be used for substantially increase the efficiency of power transformers use in electrical networks at all levels of distribution of electric energy in power industry enterprises conditions. References 10, tables 1, figures 2.

Key words: power transformer, loading factor, loading ability, power losses.

REFERENCES

1. Lutsenko, I.M. and Kalinnikov, V.B. (2011), “Justification of the transition expediency to the system of power transformers service under the current technical condition”, *Materialy mizhnarodnoyi konferentsiyi «Forum hirnykiv - 2011»* [Proc. Int. Conf. “Forum of miners – 2011”], Dnipropetrovsk, NMU, October 12-15, 2011, Vol. 4, pp. 12–15.

2. Zaika, V.T., Kotenko, S.S. and Lutsenko, I.M. (2010), “Loading ability of power transformers of distributing electric networks of the town type villages”, *Journal Scientific Bulletin of National Mining University*, Dnipropetrovsk, no. 6., pp. 86–91.

3. Rusov, V.A. (2008) “Systems for diagnostic monitoring of power transformers”, *Elektro*, no. 6, pp. 35-37.

4. Zorin, V.V., Buynyiy, R.A. and Ivanko, D.O. (2011), “Measures to improve the regimes of existing electricity distribution networks”, *Power engineering: economics, technology, ecology. Sci. Journal*, no. 2, pp. 70–77.

5. Homutov, S.O., Rybakov, V.D. and Gorshenina, V.D. (2013), “Increasing the effectiveness of energy saving measures in electrical networks”, *Polzunovskiy Vestnik*, Barnaul, no. 4, pp. 187–193.

6. Vorotnitskiy, V. E., Kalinkina, V.N. and Apryatkin, V.N. (2003), “Measures for reduction of electric power losses in electric networks of power supplying organizations”, *Electronic Journal of Energy Services Company "Ecological Systems"*, no. 7 (19), available at: http://esco-ecosys.narod.ru/2003_7/art52.htm.

7. Lutsenko, I.M. (2015), “Efficient use of explosion-proof coal mine substations”, monograph, Dnipropetrovsk, *NMU*, 2015, 97 p.

8. Godina, R., Rodrigues, E., Matias, J. and Catalão, J. “Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges”, Energies, 2003, no. 8, pp. 12147-12186, available at: http://www.mdpi.com/1996-1073/8/10/12147/pdf/ (accessed December 3, 2016).

9. Nordman, H. Rafsback, N. Susa, D. Temperature responses to step changes in the load. IEEE Trans. Power Deliv, 2003, no. 18, pp. 1110–1117.

10. Fedirchuk, D.; Rebizant, C. Managing transformer overload – Smart relays. IEEE Can. Rev., 2000, no. 35, pp. 25–28.