

УДК 621.314.2

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВИДУ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ ДВООБМОТКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА РОЗРАХУНОК ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Г. Лисяк, В. Коновал, А. Трембецький

*Національний університет "Львівська політехніка"
вул. С. Бандери, 12, Львів 79013, Україна*

Зроблено якісну та кількісну порівняльну оцінку схем заміщення двообмоткових трансформаторів з концентричними обмотками та з феромагнітним осердям за розрахунками втрат потужності в ustalених симетричних режимах. Підтверджено доцільність використання несиметричної Т-подібної зведеної електричної схеми заміщення.

Ключові слова: трансформатор, енергетичні характеристики, схема заміщення, ustalений режим.

Розрахунок симетричних ustalених режимів (УР) трифазних електричних мереж (ЕМ) є головним для вирішення важливих завдань, зокрема визначення втрат активної потужності в ЕМ з метою їхнього зменшення. Для таких розрахунків звичайно використовують електричні схеми заміщення (ЕСЗ) трансформаторів та автотрансформаторів. ЕСЗ трансформатора складається зі зведеної електричної схеми заміщення (ЗЕСЗ) та ідеальних трансформаторів, що забезпечує розрахунки з реальними (не зведеними) значеннями напруг і струмів. ЗЕСЗ трансформатора містить зосереджені індуктивні та активні опори і провідності, значення яких зведені до прийнятої за базову номінальної напруги однієї з обмоток трансформатора.

У багатьох працях, наприклад [1–3, 7–9, 13], найточнішою для розрахунку симетричних УР трифазних ЕМ традиційно вважають Т-подібну ЗЕСЗ (надалі Т-схема) трифазного двообмоткового тристрижневого трансформатора чи трифазної групи однофазних двообмоткових трансформаторів з феромагнітними осердями (магнітопроводами), показану на рис. 1, а в однолінійному виконанні. На рис. 1, а і надалі величини зі штрихом зведені до номінальної напруги $U_{1ном}$ базової обмотки 1. У цьому разі $\dot{U}_1, \dot{U}'_2, \dot{I}_1, \dot{I}'_2$ – лінійні напруги і струми обмоток 1, 2, відповідно; \dot{I}_0 – струм поперечної гілки, повна провідність якої $\underline{Y}_T = g_T - jb_T$ зумовлена втратами активної потужності в магнітопроводі на перемагнічування й вихрові струми та намагнічувальною реактивною потужністю; $\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1$, $\underline{Z}'_2 = r'_2 + jx'_2$ – повні опори обмоток 1, 2, відповідно (надалі – опори поздовжніх гілок), які зумовлені втратами активної потужності в обмотках та втратами реактивної потужності на магнітні потоки розсіювання обмоток.

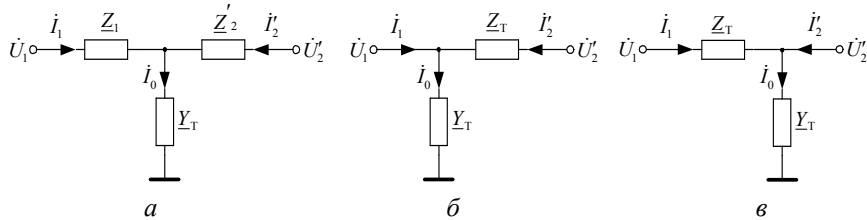


Рис. 1. Зведені електричні схеми заміщення двообмоткового трансформатора з феромагнітним осердям: *a* – Т-подібна (Т- або СТ-схема); *б* – пряма Г-подібна (ПГ-схема); *в* – обернена Г-подібна (ОГ-схема).

Для практичних розрахунків рекомендують користуватись Г-подібними ЗЕСЗ (надалі Г-схема) двообмоткового трансформатора, мотивуючи це незручністю Т-схеми [7, 13] або спрощенням обчислень [8] з меншою [7, 8], хоча й достатньою [13] точністю. У цьому випадку поперечну гілку з провідністю \underline{Y}_T звичайно [7, 9, 13] або завжди [4, 8, 12] треба приєднувати під'єднують з боку первинної обмотки. В інших працях, наприклад [5], провідність \underline{Y}_T рекомендують приєднувати з боку обмотки вищої напруги або не дають конкретних рекомендацій. Однак зараз незручність Т-схеми для практичних розрахунків є суттєвим аргументом хіба-що для “ручних” розрахунків.

У переважній більшості двообмоткових трансформаторів з концентричними обмотками обмотка нижчої напруги розміщена ближче до стрижня магнітопроводу, тобто є внутрішньою, а обмотка вищої напруги є зовнішньою. Нехай для трансформатора, Т-схема якого показана на рис. 1, *a*, обмотка 1 є внутрішньою, тобто нижчої напруги, обмотка 2 – зовнішньою, тобто вищої напруги. Тоді, згідно з рекомендаціями [4, 7–9, 12, 13], напрям пересилання потужності через трансформатор зумовлює вибір виду ЗЕСЗ. А саме, якщо первинною є обмотка 1, то рекомендують користуватися прямою Г-схемою (ПГ-схема) на рис. 1, *б*, і навпаки, якщо первинною є обмотка 2, то рекомендують користуватися оберненою Г-схемою (ОГ-схема) на рис. 1, *в*. У цьому разі в обох Г-схемах маємо $\underline{Z}_T = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2'$. Тобто вид ЗЕСЗ трансформатора, як статичного елемента, визначається не взаємним розміщенням його обмоток 1 і 2, а напрямом пересилання потужності. На нашу думку, такі рекомендації не є чітко обґрунтованими як теоретично, так і методологічно. Тому оцінимо вплив зведених електричних схем заміщення двообмоткових трифазних тристрижневих трансформаторів з концентричними обмотками та з феромагнітним осердям на їх енергетичні характеристики.

Задачу спрощують для доступності її математичного опрацювання за адекватності розв'язку [6, 11]. Математичні спрощення повинні відповідати фізичним умовам, а значення параметрів характерних елементів схеми заміщення трансформатора треба визначати або методом фізичного експерименту, або методом математичних розрахунків, або комбінуванням обох згаданих методів.

У праці [1] для однофазного двообмоткового трансформатора без феромагнітного осердя, як двох індуктивно зв'язаних лінійних електричних кіл без розсіяння магнітного потоку, теоретично обґрунтована Т-схема, показана на

рис. 2, *а*. Для таких електричних кіл розподіл магнітних потоків обмоток не залежить від струмів цих обмоток [1]. Особливість Т-схеми такого трансформатора – індуктивні опори розсіювання x_1 та x'_2 окремих обмоток, що має фізичний сенс лише за однакової кількості витків цих обмоток [1]. Оскільки для трансформатора без феромагнітного осердя значення коефіцієнта зв'язку значно менше від одиниці [1], визначення параметрів елементів Т-схеми не складне.

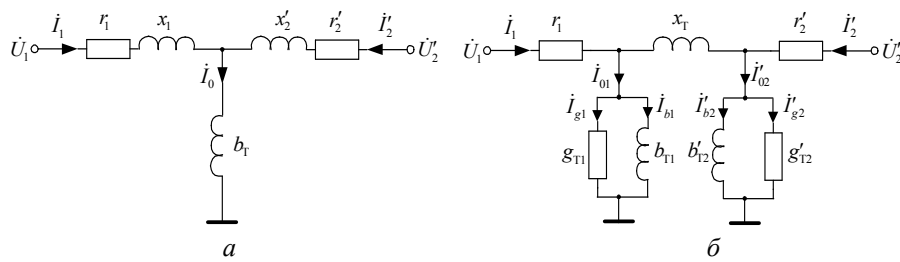


Рис. 2. Зведені електричні схеми заміщення двообмоткового трансформатора: *а* – без феромагнітного осердя; *б* – з концентричними обмотками та феромагнітним осердям.

Зовсім інша ситуація виникає, якщо використати наведені на рис. 1, *а* та 2, *а* Т-схеми для двообмоткового трансформатора з концентричними обмотками та феромагнітним осердям, для якого значення коефіцієнта зв'язку обмоток близьке до одиниці [3]. Відомо [6], що для визначення параметрів трьох елементів такої несиметричної Т-подібної схеми потрібні три досліди: або два досліди короткого замикання (к.з.) й один дослід неробочого ходу (н.х.), або один дослід к.з. й два досліди н.х. Однак для трансформаторів з феромагнітним осердям практично неможливо виокремити магнітні потоки розсіювання кожної з обмоток, а отже, визначити їхні індуктивні опори розсіювання x_1 та x'_2 . Тому необхідно припускати $x'_2 = x_1$ та $\underline{Z}'_2 = \underline{Z}'_1 = \underline{Z}_T/2$ [2, 3, 8, 13], а отже немає підстав вважати найточнішою таку, вже симетричну, Т-подібну ЗЕСЗ на рис. 1, *а* (надалі – СТ-схема). У праці [6] детально викладені причини цього і зазначено таке: хоча величини x_1 та x'_2 відрізняються між собою і можуть суттєво змінюватися зі зміною режиму трансформатора, їхня сума $x_T = x_1 + x'_2$ незмінна. Саме тому каталожні дані силових трансформаторів містять параметри лише одного досліду к.з. й одного досліду н.х., за якими, з огляду на $|\underline{Z}_T| \ll |1/\underline{Y}_T|$, досить точно визначають \underline{Z}_T без урахування \underline{Y}_T та \underline{Y}_T без урахування \underline{Z}_T , відповідно [3]. Саме тому визначені таким способом \underline{Z}_T та \underline{Y}_T однакові для всіх показаних на рис. 1 схем заміщення [4, 5, 7–9, 12, 13].

У праці [6] за прийнятих припущень теоретично і методологічно чітко обґрунтована ЗЕСЗ (надалі – еталонна ЗЕСЗ) двообмоткового трансформатора з концентричними обмотками та феромагнітним осердям, зображена на рис. 2, *б*. Ця схема найліпше враховує реальні магнітні потоки у каналі між обмотками (індуктивний опір x_T) і в ділянках простору всередині внутрішньої та ззовні зовнішньої обмоток (індуктивні провідності b_{T1}, b'_{T2} , відповідно), а також втрати

активної потужності в обмотках (активні опори r_1, r_2' , відповідно) та в металевих елементах ділянок простору всередині внутрішньої та ззовні зовнішньої обмоток (активні провідності g_{T1}, g_{T2}' , відповідно). Отже, еталонна ЗЕСЗ на рис. 2, б придатна для розрахунку як УР однофазних трансформаторів, так і в загальному випадку несиметричних УР трифазних тристрижневих трансформаторів за методом симетричних складових [6]. Структура такої еталонної ЗЕСЗ визначена лише взаємним розміщенням його обмоток і не залежить від напрямку пересилання потужності, тобто від того, яка з обмоток є первинною, а яка – вторинною.

Як відомо, для симетричних УР трифазних ЕМ струми та напруги не містять складових оберненої і нульової послідовностей, тобто є системою напруг і струмів прямої послідовності. Для таких режимів провідність $\underline{Y}'_{T2} = g'_{T2} - jb'_{T2}$ ЗЕСЗ на рис. 2, б враховує лише ділянки ярем магнітопроводу тристрижневого трансформатора за межами зовнішньої обмотки й за значенням набагато менша від провідності $\underline{Y}_{T1} = g_{T1} - jb_{T1}$, а тому, здебільшого [4, 5, 7–9, 12, 13], нею можна знехтувати, тобто прийняти $\underline{Y}'_{T2} = 0$ [6]. З урахуванням наведеного для двообмоткового трифазного тристрижневого трансформатора з концентричними обмотками та феромагнітним осердям одержимо несиметричну Т-подібну ЗЕСЗ (надалі НТ-схема). Саме таку НТ-схему на рис. 3, а або на рис. 3, б й вважатимемо еталонною стосовно СТ-, ПГ- і ОГ-схем на рис. 1 під час розрахунку симетричних УР. Для НТ-схем на рис. 3 маємо $\underline{Z}_1 = r_1$, $\underline{Z}_2 = r_2' + jx_T$, $\underline{Y}_T = \underline{Y}_{T1}$ та $\dot{I}_0 = \dot{I}_{01}$.

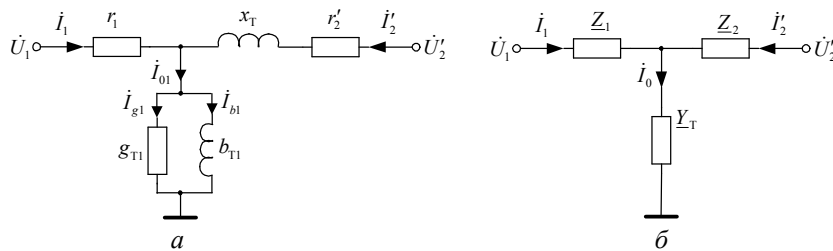


Рис. 3. Несиметричні Т-подібні зведені електричні схеми заміщення (НТ-схеми) двообмоткового трифазного тристрижневого трансформатора з концентричними обмотками та феромагнітним осердям для розрахунку симетричних усталених режимів: а – розгорнена; б – з комплексними опором та провідностями.

Силкові високовольтні трансформатори виготовляють підвищувальними, або знижувальними. Тому для однозначної оцінки впливу ЗЕСЗ трансформаторів на розрахунок енергетичних характеристик припустимо, що вибрані для досліджень трансформатори незалежно від їх типу є підвищувальні (режим Р1, у якому внутрішня обмотка 1 нижчої напруги – первинна, а зовнішня обмотка 2 вищої напруги – вторинна) або знижувальні (режим Р2, у якому зовнішня обмотка 2 вищої напруги – первинна, а внутрішня обмотка 1 нижчої напруги – вторинна).

В усіх режимах прийнято, що первинна обмотка живиться від джерела ЕРС з напругою $U_{1ном}$ або $U'_{2ном}$. Навантаження враховували повним опором $\underline{Z}_{нав}$,

приєднаним до вторинної обмотки трансформатора. Значення $Z_{\text{наб}}$ обчислювали за номінальними потужністю й напругою трансформатора.

Розрахунки виконано для трьох типів трансформаторів, каталожні дані яких, згідно з [10], наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Каталожні дані трансформаторів

Тип трансформатора	$S_{\text{ТНОМ}}$, МВ·А	$U_{\text{ВНОМ}}$, кВ	$U_{\text{ННОМ}}$, кВ	u_k , %	ΔP_k , кВт	I_x , %	ΔP_x , кВт
ТМН-2500/35	2,5	35	11	6,5	26	1,1	5,1
ТДЦ-250000/220	250	242	15,75	11	650	0,45	240
ТДЦ-250000/500	250	525	15,75	13	600	0,45	250

Нижче, для прикладу, наведені повні результати розрахунку параметрів схеми заміщення і координат симетричних УР навантаження трансформатора типу ТДЦ-250000/220.

Для прийнятої за базову номінальної напруги обмотки I , тобто для $U_{\text{ІНОМ}} = U_{\text{ННОМ}} = 15,75$ кВ, маємо $U'_{2\text{НОМ}} = U_{\text{ІНОМ}} = 15,75$ кВ і такі значення параметрів ПЕСЗ трансформатора:

- на рис. 1:

$$Z_T = \frac{u_k \cdot U_{\text{ІНОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{ТНОМ}}} = 1,09148 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}; \quad r_T = \frac{\Delta P_k \cdot U_{\text{ІНОМ}}^2}{1000 \cdot S_{\text{ТНОМ}}^2} = 2,57985 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$x_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2} = 1,09117 \cdot 10^{-1} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_T = r_T + jx_T = 2,57985 \cdot 10^{-3} + j1,09117 \cdot 10^{-1} \text{ Ом};$$

$$Y_T = \frac{I_x \cdot S_{\text{ТНОМ}}}{100 \cdot U_{\text{ІНОМ}}^2} = 4,53515 \cdot 10^{-3} \text{ см}; \quad g_T = \frac{\Delta P_x}{1000 \cdot U_{\text{ІНОМ}}^2} = 9,67498 \cdot 10^{-4} \text{ см};$$

$$b_T = \sqrt{Y_T^2 - g_T^2} = 4,43075 \cdot 10^{-3} \text{ см};$$

$$\underline{Y}_T = g_T - jb_T = 9,67498 \cdot 10^{-4} - j4,43075 \cdot 10^{-3} \text{ см};$$

$$r_1 = r_2' = r_T/2 = 1,28993 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad x_1 = x_2' = x_T/2 = 5,45585 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1 = \underline{Z}_2 = r_2' + jx_2' = \underline{Z}_T/2 = 1,28993 \cdot 10^{-3} + j5,45585 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

- на рис. 3, б:

$$\underline{Z}_1 = r_1 = 1,28993 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_2 = r_2' + jx_T = 1,28993 \cdot 10^{-3} + j1,09117 \cdot 10^{-1} \text{ Ом};$$

$$\underline{Y}_T = g_T - jb_T = 9,67498 \cdot 10^{-4} - j4,43075 \cdot 10^{-3} \text{ см}.$$

За прийнятого для навантаження коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{\text{наб}} = 0,9$ одержимо:

$$S_{\text{наб}} = S_{\text{ТНОМ}} = 250 \text{ МВ} \times \text{А}; \quad U_{\text{наб}} = U_{\text{ІНОМ}} = 15,75 \text{ кВ};$$

$$Z_{\text{наб}} = \frac{U_{\text{наб}}^2}{S_{\text{наб}}} = 9,9225 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}; \quad r_{\text{наб}} = Z_{\text{наб}} \cdot \cos \varphi_{\text{наб}} = 8,93025 \cdot 10^{-1} \text{ Ом};$$

$$x_{\text{нав}} = \sqrt{Z_{\text{нав}}^2 - r_{\text{нав}}^2} = 4,32512 \cdot 10^{-1} \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{нав}} = r_{\text{нав}} + jx_{\text{нав}} = 8,93025 \cdot 10^{-1} + j4,32512 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}.$$

Форма запису повних потужностей прийнята такою:

$$\dot{S} = P + jQ = \sqrt{3}\dot{U}\dot{I}^*.$$

Розрахунки симетричних УР для схем на рис. 1 і 3, б виконані за точними формулами як для лінійних електричних кіл з послідовно-паралельною структурою. У табл. 2 наведені результати розрахунку режимів Р1 і Р2 навантаження трансформатора типу ТДЦ-250000/220 для НТ- (див. рис. 3, б), СТ- (див. рис. 1, а), ПГ- (див. рис. 1, б) та ОГ-схеми (див. рис. 1, в).

Таблиця 2

Режими навантаження трансформатора ТДЦ-250000/220

Різновид схеми	Величина	Первинна – обмотка 1 (режим Р1)		Первинна – обмотка 2 (режим Р2)	
		модуль	аргумент, ел. град.	модуль	аргумент, ел. град.
1	2	3	4	5	6
НТ	\dot{U}_1 , кВ	15,75	0	14,9245	-5,3250
	\dot{U}_2 , кВ	14,9314	-5,3217	15,75	0
	\dot{U}_N , кВ	15,7334	0,0369	14,9419	-5,3574
	\dot{I}_1 , А	8716,41	-31,3600	8683,94	148,8331
	\dot{I}'_2 , А	8687,99	148,8363	8708,15	-31,3694
	\dot{I}_0 , А	41,20	-77,6453	39,12	-83,0397
	* \dot{S}_1 , кВ·А	203045,20	123745,03	-202031,41	-97848,28
	* \dot{S}_2 , кВ·А	-202219,60	-97939,42	202832,69	123661,15
	* $\Delta\dot{S}_Z$, кВ·А	586,10	24708,82	585,28	24823,66
	* $\Delta\dot{S}_Y$, кВ·А	239,49	1096,78	216,00	989,21
	* $\Delta\dot{S}_T$, кВ·А	825,60	25805,61	801,28	25812,88
СТ	\dot{U}_1 , кВ	15,75	0	14,9279	-5,3241
	\dot{U}_2 , кВ	14,9279	-5,3241	15,75	0
	\dot{U}_N , кВ	15,3205	-2,5920	15,3205	-2,5920
	\dot{I}_1 , А	8712,24	-31,3654	8685,93	148,8340
	\dot{I}'_2 , А	8658,93	148,8340	8712,24	-31,3654
	\dot{I}_0 , А	40,11	-80,2742	40,11	-80,2742
	* \dot{S}_1 , кВ·А	202936,56	123705,05	-202123,79	-97893,02
	* \dot{S}_2 , кВ·А	-202123,79	-97893,02	202936,56	123705,05
	* $\Delta\dot{S}_Z$, кВ·А	585,68	24772,05	585,68	24772,05

*	$\Delta\dot{S}_Y, \text{кВ}\cdot\text{А}$	227,09	1039,98	227,09	1039,98
*	$\Delta\dot{S}_T, \text{кВ}\cdot\text{А}$	812,77	25812,03	812,77	25812,03

1	2	3	4	5	6	
ПГ	$\dot{U}_1, \text{кВ}$	15,75	0	14,9245	-5,3247	
	$\dot{U}_2, \text{кВ}$	14,9314	-5,3221	15,75	0	
	$\dot{U}_N, \text{кВ}$	15,75	0	14,9245	-5,3247	
	$\dot{I}_1, \text{А}$	8716,43	-31,3607	8683,94	148,8334	
	$\dot{I}_2, \text{А}$	8688,00	148,8360	8708,14	-31,3688	
	$\dot{I}_0, \text{А}$	41,24	-77,6822	39,08	-83,0069	
*	$\dot{S}_1, \text{кВ}\cdot\text{А}$	203044,30	123747,66	-202031,37	-97848,26	
*	$\dot{S}_2, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-202220,11	-97939,67	202833,77	123658,75	
*	$\Delta\dot{S}_Z, \text{кВ}\cdot\text{А}$	584,19	24708,89	586,90	24823,59	
*	$\Delta\dot{S}_Y, \text{кВ}\cdot\text{А}$	240,00	1099,10	215,50	986,90	
*	$\Delta\dot{S}_T, \text{кВ}\cdot\text{А}$	824,19	25807,99	802,40	25810,50	
ОГ	$\dot{U}_1, \text{кВ}$	15,75	0	14,9314	-5,3221	
	$\dot{U}_2, \text{кВ}$	14,9245	-5,3247	15,75	0	
	$\dot{U}_N, \text{кВ}$	14,9245	-5,3247	15,75	0	
	$\dot{I}_1, \text{А}$	8708,14	-31,3688	8688,00	148,8360	
	$\dot{I}'_2, \text{А}$	8683,94	148,8334	8716,43	-31,3607	
	$\dot{I}_0, \text{А}$	39,08	-83,0069	41,24	-77,6822	
	*	$\dot{S}_1, \text{кВ}\cdot\text{А}$	202833,77	123658,75	-202220,11	-97939,67
	*	$\dot{S}_2, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-202031,37	-97848,26	203044,30	123747,66
	*	$\Delta\dot{S}_Z, \text{кВ}\cdot\text{А}$	586,90	24823,59	584,19	24708,89
	*	$\Delta\dot{S}_Y, \text{кВ}\cdot\text{А}$	215,50	986,90	240,00	1099,10
	*	$\Delta\dot{S}_T, \text{кВ}\cdot\text{А}$	802,40	25810,50	824,19	25807,99

* У колонках “модуль” – активні, а в колонках “аргумент” – реактивні потужності.

Аналіз даних табл. 1 та 2 засвідчує таке. Як очікувалось, результати розрахунку режимів P1 і P2 для СТ-схеми, P1 для ПГ-схеми і P2 для ОГ-схеми та P2 для ПГ-схеми і P1 для ОГ-схеми є, відповідно, однаковими. Водночас результати розрахунку режимів P1 і P2 для НТ-схеми відрізняються. Це означає, що лише НТ-схема забезпечує врахування несиметрії розміщення обмоток відносно стрижня магнітопровода трансформатора. Тому НТ-схему ми прийняли за еталонну, що узгоджується з рекомендаціями в [12]. Впливу інших різновидів ЗЕСЗ (див. рис. 1) на розрахунок енергетичних характеристик оцінювали стосовно значень величин у НТ-схемі, прийнятих за точні для режимів P1 і P2, відповідно.

Похибки модуля (δA , %) та аргументу ($\Delta\varphi_A$ ел. град.) комплексної величини \dot{A} обчислювали за формулами:

$$\delta A = \frac{A - A_{HT}}{A_{HT}} \cdot 100 \% ; \Delta\varphi_A = \varphi_A - \varphi_{A,HT}, \text{ ел. град. ,}$$

де A, φ_A та $A_{HT}, \varphi_{A,HT}$ – значення модулів і аргументів \dot{A} для СТ-, ПГ-, ОГ- чи НТ-схеми в режимах Р1 або Р2, відповідно.

У табл. 3 наведені межі зміни абсолютних значень похибок модулів і аргументів струмів та напруг обмоток трансформаторів, де праві (найбільші) межі відповідають трансформатору типу ТМН-2500/35.

Таблиця 3

Межі абсолютних значень похибок модулів та аргументів струмів і напруг обмоток трансформатора для СТ-, ПГ- і ОГ-схем

Величина	Різновид зведеної електричної схеми заміщення		
	СТ-схема	ПГ-схема	ОГ-схема
$\delta I, \delta U$, %	0,023–0,068	0,0000038–0,0022	0,047–0,138
$\Delta\varphi_I, \Delta\varphi_U$, ел. град.	0,00084–0,0071	0,00012–0,0064	0,002–0,011

Дані табл. 3 свідчать, як це зазначено в [3–5, 7–9, 12, 13], про малі абсолютні значення похибок. Їхній аналіз показує, що зі зменшенням номінальних напруги і потужності рівень похибок (праві межі) зростає і є найбільшим для ОГ-схеми.

Саме малими похибками можна пояснити неоднозначність рекомендацій у [3–5, 7–9, 12, 13] щодо вибору різновиду ПЕСЗ двообмоткових трансформаторів для розрахунку симетричних УР. Тому доцільно оцінити похибки обчислення сумарних втрат активної ΔP_T і реактивної ΔQ_T потужностей у ЗЕСЗ трансформаторів та їхніх складових $\Delta P_Z, \Delta Q_Z$ в опорах поздовжніх гілок (надалі – втрати потужності в обмотках) і $\Delta P_Y, \Delta Q_Y$ в провідностях поперечних гілок (надалі – втрати потужності в магнітопроводі) для різних ЗЕСЗ на рис. 1. Результати обчислень наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Похибки визначення втрат потужності в режимах навантаження трансформаторів для СТ-, ПГ- і ОГ-схем стосовно НТ-схеми

Тип	Похибка втрат потужності, %	Різновид зведеної електричної схеми заміщення					
		СТ-схема		ПГ-схема		ОГ-схема	
		Р1	Р2	Р1	Р2	Р1	Р2
1	2	3	4	5	6	7	8
ТМН-2500/35	$\delta\Delta P_Z$	-0,1026	0,1013	-0,7242	0,6545	0,4495	-
	$\delta\Delta P_Y$	-2,9699	2,9413	0,8850	-0,9308	-6,6196	7,031
	$\delta\Delta P_T$	-0,5967	0,5681	-0,4469	0,3940	-0,7689	0,719
	$\delta\Delta Q_Z$	0,6283	-0,5527	0,0021	-0,0030	1,1845	-
	$\delta\Delta Q_Y$	-2,9699	2,9413	0,8850	-0,9308	-6,6196	7,031
	$\delta\Delta Q_T$	0,0790	-0,0505	0,1369	-0,1364	-0,0069	0,007

Закінчення табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8
ТДЦ-250000/220	$\delta\Delta P_Z$	-0,0715	0,0699	-0,3263	0,2781	0,1364	-
	$\delta\Delta P_Y$	-5,1791	5,1319	0,2115	-0,2336	-10,0184	11,10
	$\delta\Delta P_T$	-1,5531	1,4345	-0,1703	0,1402	-2,8093	2,859
	$\delta\Delta Q_Z$	0,2559	-0,2079	0,0003	-0,0003	0,4645	-
	$\delta\Delta Q_Y$	-5,1791	5,1319	0,2115	-0,2336	-10,0184	11,10
	$\delta\Delta Q_T$	0,0249	-0,0033	0,0092	-0,0092	0,0189	0,018
ТДЦ-250000/500	$\delta\Delta P_Z$	-0,0842	0,0819	-0,3381	0,2813	0,1150	-
	$\delta\Delta P_Y$	-6,1746	6,1314	0,1914	-0,2157	-11,7857	13,33
	$\delta\Delta P_T$	-2,032	1,8603	-0,1688	0,1352	-3,6912	3,797
	$\delta\Delta Q_Z$	0,2551	-0,1991	0,0002	-0,0002	0,4549	-
	$\delta\Delta Q_Y$	-6,1746	6,1314	0,1914	-0,2157	-11,7857	13,33
	$\delta\Delta Q_T$	0,0184	0,0069	0,0073	-0,0072	0,0042	-

Для зручності подальшого аналізу у табл. 5 за даними табл. 4 наведені межі абсолютних значень похибок втрат активної та реактивної потужностей і їхніх складових для СТ-, ПГ- і ОГ-схем щодо НТ-схеми. З'ясовано, що межі відповідають таким типам трансформаторів: ліві та праві (крім позначених зірочкою) – ТМН-2500/35 та ТДЦ-250000/500, відповідно; позначені зірочкою – ТДЦ-250000/220.

Таблиця 5

Межі абсолютних значень похибок втрат активної та реактивної потужностей і їхніх складових для СТ-, ПГ- і ОГ-схем щодо НТ-схеми, %

Величина	Різновид зведеної електричної схеми заміщення		
	СТ-схема	ПГ-схема	ОГ-схема
$\delta\Delta P_Z$	0,11–0,069*	0,73–0,27*	0,53–0,11
$\delta\Delta Q_Z$	0,63–0,19	0,003–0,0002	1,2–0,45
$\delta\Delta P_Y, \delta\Delta Q_Y$	2,9–6,2	0,94–0,19	6,6–13,4
$\delta\Delta P_T$	0,56–2,1	0,45–0,13	0,71–3,8
$\delta\Delta Q_T$	0,08–0,003*	0,14–0,007	0,019*–0,004

Аналіз даних табл. 4, 5 засвідчує, що є певні закономірності як у знаках, так і в межах похибок втрат активної та реактивної потужностей і їхніх складових.

Знаки похибок складових втрат активної та реактивної потужності (див. табл. 4) залежать від типу схеми заміщення, а не від типу трансформатора:

- для СТ-схеми знаки похибок втрат активної потужності в обмотках і магнітопроводі однакові, а реактивної – протилежні;
- для ПГ-схеми знаки похибок втрат активної потужності в обмотках і магнітопроводі протилежні, а реактивної – однакові;

- для ОГ-схеми знаки похибок втрат як активної, так і реактивної потужності в обмотках і магнітопроводі, відповідно, протилежні.

Зі зростанням номінальних напруги і потужності трансформатора маємо таке (див. табл. 5):

- абсолютні похибки втрат активної та реактивної потужностей в обмотках і сумарних втрат реактивної потужності зменшуються для всіх схем заміщення;

- абсолютні похибки втрат активної та реактивної потужностей у магнітопроводі та сумарних втрат активної потужності для ПГ-схеми зменшуються, а для СТ- і ОГ-схем зростають.

Отже, на похибки впливають як різновид схеми заміщення, так і тип трансформатора, оскільки трансформатори різних номінальних напруг і потужностей мають різні співвідношення каталожних параметрів (див. табл. 1). Наприклад, за великих похибок втрат реактивної потужності в обмотках і магнітопроводі для СТ- і ОГ-схем похибки сумарних втрат реактивної потужності є на декілька порядків меншими, бо похибки складових сумарних втрат мають протилежні знаки. В усіх випадках, за винятком втрат активної потужності для ПГ-схеми, абсолютні похибки втрат потужності в магнітопроводі значно більші за абсолютні похибки втрат потужності в обмотках, що зумовлено місцем приєднання поперечної гілки з провідністю \underline{Y}_T . Згаданий виняток пояснюють тим, що активний опір r_1 обмотки 1 у ПГ-схемі віднесений до гілки зі струмом обмотки 2, але через протилежні знаки похибок втрат активної потужності в магнітопроводі та в обмотках абсолютні похибки сумарних втрат активної потужності для ПГ-схеми є менші за абсолютні похибки складових.

Розрахунки симетричних УР та аналіз результатів засвідчили таке:

- абсолютні похибки сумарних втрат активної потужності значно більші за абсолютні похибки сумарних втрат реактивної потужності для всіх видів схем заміщення на рис. 1;

- найбільші абсолютні похибки втрат активної потужності в магнітопроводі та сумарних втрат активної потужності в трансформаторі є для ОГ-схеми, а найменші – для ПГ-схеми.

З даних табл. 4 також випливає, що розрахунок симетричних УР за всіма схемами заміщення на рис. 1 дає для підвищувальних трансформаторів (режими Р1) занижені, а для знижувальних (режими Р2) – завищені сумарні втрати активної потужності. Відомо, що в електричних мережах електроенергетичних систем визначена потужність знижувальних трансформаторів у декілька разів більша від встановленої потужності підвищувальних трансформаторів. Отже, розрахункові сумарні втрати активної потужності та електроенергії за ЗЕСЗ на рис. 1 у цілому будуть більшими від реального рівня цих втрат у трансформаторах ЕМ.

Тому критерій мінімального рівня абсолютних значень похибок втрат активної потужності треба враховувати під час вибору ЗЕСЗ трансформатора.

Отже, для розрахунку симетричних УР найбільш обґрунтованою можна вважати несиметричну Т-подібну ЗЕСЗ, зображену на рис. 3. За бажання чи потреби її спрощення доцільно користуватися прямою Г-подібною ЗЕСЗ на рис. 1, б, хіба що крім розрахунку режимів к.з. з боку внутрішньої обмотки 1 для знижувальних трансформаторів. Це пояснюють тим, що за режиму к.з. у ПГ-схемі, на відміну від НТ-схеми, провідність \underline{Y}_T шунтує гілка з нульовим опором. Тому

струм у провідності \underline{Y}_T дорівнює нулю, що не відповідає дійсності, але практично не впливає на струми к.з. в обмотках трансформатора.

Отже, аналіз рекомендацій у відомих нам працях та виконані дослідження різновидів зведених електричних схем заміщення трифазних тристрижневих двообмоткових трансформаторів з концентричними обмотками і феромагнітним осердям для розрахунку симетричних усталених режимів виявили таке.

Різновид схеми заміщення мало впливає на результати обчислення струмів, напруг і втрат потужності в обмотках, однак для симетричної Т-подібної та оберненої Г-подібної схем суттєво впливає, порівняно з несиметричною Т-подібною та прямою Г-подібною схемами заміщення, на обчислення втрат активної та реактивної потужностей у магнітопроводі.

Обчислення сумарних втрат реактивної потужності за симетричною Т-подібною та оберненою Г-подібною схемами практично не відрізняються від обчислень за несиметричною Т-подібною та прямою Г-подібною схемами заміщення, що зумовлено різними знаками похибок втрат реактивної потужності в реактивних опорах і провідностях.

Немає підстав вважати симетричну Т-подібну схему заміщення найточнішою, оскільки індуктивні опори розсіювання окремих обмоток відрізняються між собою і зі зміною режиму трансформатора можуть суттєво змінюватися за незмінного значення їхньої суми.

Рекомендації щодо зміни у Г-подібних схемах місця приєднання поперечної гілки з провідністю \underline{Y}_T залежно від напрямку пересилання потужності (пряма або обернена Г-схеми) не обґрунтовані, оскільки не враховують незмінності взаємного несиметричного щодо стрижня магнітопроводу розміщення обмоток незалежно від того, яка з обмоток є первинною, а яка вторинною.

Рекомендація щодо приєднання у Г-схемі заміщення поперечної гілки з провідністю \underline{Y}_T з боку обмотки вищої напруги, яка, зазвичай, є зовнішньою, не обґрунтована, бо не враховує реального розподілу магнітних потоків обмоток.

Найобґрунтованішою є несиметрична Т-подібна схема з загальним індуктивним опором розсіювання обмоток x_T , поперечною гілкою з провідністю \underline{Y}_T , приєднаною з боку внутрішньої обмотки, та з активними опорами обмоток r_1, r_2' у гілках зі струмами цих обмоток. Ця схема заміщення найточніше враховує фізичні явища в трансформаторі в усіх симетричних усталених режимах.

Найближчою до несиметричної Т-подібної схеми заміщення за результатами розрахунку усталених режимів незалежно від напрямку пересилання потужності є пряма Г-подібна схема заміщення, у якій поперечна гілка з провідністю \underline{Y}_T приєднана безпосередньо до виводу внутрішньої обмотки.

Отже, є підстави рекомендувати приєднувати поперечну гілку з провідністю \underline{Y}_T з боку внутрішньої обмотки у схемах заміщення багатообмоткових трансформаторів з концентричними обмотками.

Порівняно з несиметричною Т-подібною іншій схемі заміщення дають для підвищувальних трансформаторів занижені, а для знижувальних – завищені втрати активної потужності. В електричних мережах електроенергетичних систем визначена потужність знижувальних трансформаторів у декілька разів більша від визначеної потужності підвищувальних трансформаторів. Тому розраховані за симетричною Т-подібною, прямою чи оберненою Г-подібними схемами заміщення сумарні втрати активної потужності в трансформаторах будуть вищими від реальних втрат.

1. *Атабеков Г.И.* Основы теории цепей: Учеб. для вузов. М.: Энергия, 1969. 424 с.
2. *Васютинский С.Б.* Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. 432 с.
3. *Вольдек А.И.* Электрические машины: Учеб. для студентов ВТУЗов: 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
4. *Глазунов А.А., Глазунов А.А.* Электрические сети и системы: Учеб. пособие для вузов: 4-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 368 с.
5. *Карпов Ф.Ф.* Расчет городских распределительных электрических сетей. М.: Энергия, 1968. 224 с.
6. *Лейтес Л.В., Пинцов А.М.* Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. М.: Энергия, 1974. 192 с.
7. *Рябков А.Я.* Электрические сети и системы: Учеб. для энергетических техникумов: 4-е изд., перераб. и доп. Боровиковым В.А., Косаревым В.К., Ходотом Г.А. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 511 с.
8. *Сегеда М.С.* Електричні мережі та системи: Навч. посібн. Львів: НМК ВО, Каменяр, 1999. 296 с.
9. *Солдаткина Л.А.* Электрические сети и системы: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1978. 216 с.
10. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро: 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
11. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964.
12. Электрические системы. Т. 2: Электрические сети / Под. ред. В.А. Веникова. Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1971. 440 с.
13. Электрические системы и сети / Н.В. Буслова, В.Н. Винославский, Г.И. Денисенко, В.С. Перхач: Под ред. Г.И. Денисенко. К.: Вища шк., 1986. 584 с.

INFLUENCING ESTIMATION OF SUBSTITUTION CHART TYPES TWO-WINDING TRANSFORMERS ON CALCULATION OF THEIR POWER DESCRIPTIONS

G. Lysiak, V. Konoval, A. Trembeckyi

*Lviv Polytechnic National University
Bandera Str., 28a, Lviv 79013, Ukraine*

Conducted high-quality and quantitative comparative influencing estimation of substitution chart types two-winding transformers with concentric puttees and ferromagnetic core on the results of calculation losses power for different types of transformers in the set symmetric modes. Confirmed expedience of the use of the asymmetrical T-visible taken electric chart of substitution.

Key words: transformer, power descriptions, chart of substitution, set mode.

Стаття надійшла до редколегії 20.06.2005

Прийнята до друку 01.09.2005