

З ДОСВІДУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

УДК 537.8

Л.А. Білий¹, Я.В. Ковівчак²

¹ Львівський інститут банківської справи Університету банківської справи НБУ

² Національний університет “Львівська політехніка”

НОВІ НАПРЯМКИ КОНСТРУЮВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ

© Білий Л.А., Ковівчак Я.В., 2014

Запропоновано нові принципи побудови конструкції магнітних систем трансформаторів. Вибором співвідношень основних геометричних розмірів магнітної системи, що забезпечують максимальне охоплення обмоток у просторі, а також об'ємно-симетричним їх розміщенням досягається покращення умов перебігу електромагнітних процесів у трансформаторі. У результаті досягнуто значного покращення технічних характеристик і отримано нові властивості трансформаторів: автоматичне регулювання симетрування напруг під час несиметричного навантаження.

Ключові слова: трансформатор, магнітна система, симетрування напруг.

New principles of construction of magnetic systems of transformer are proposed. Selects the basic geometric dimensions of the magnetic system, which provides maximum coverage of the windings in the space as well as space-symmetric placement is achieved by improving their conditions for the occurrence of electromagnetic processes in the transformer. The result is a significant improvement in performance and new properties of transformers: automatic control of balancing stress with unbalanced load.

Key words: transformer, magnetic system, voltage balancing.

Вступ

Основним видом енергії, який використовує людина, є електрична енергія. Питома вага електроенергії по відношенню до інших видів енергії постійно зростає. У мережі електропостачання трансформатор – основна передаточна ланка. Сумарна потужність трансформаторів у 5–7 разів перевищує встановлену потужність генераторів, тобто під час передавання електроенергії від генератора до споживачів необхідно використовувати 5–7 силових трансформаторів.

Параметри і властивості трансформаторів визначально впливають на їх поведінку в складних експлуатаційних режимах. Від цього залежить надійність систем постачання електроенергії та ефективність промислового виробництва.

Яскравим прикладом порушення надійності електропостачання є випадки автоматичного відімкнення великої кількості споживачів в США і Росії, що спричинили багатомільярдні фінансові втрати, створивши передумови до техногенних катастроф. Попередити такі явища можливо використанням трансформаторної техніки, спроможної витримувати значну асиметрію напруг трифазної мережі, що унеможливило б перевантаження системи електропостачання і масове спрацювання захисту. Таких властивостей позбавлені трансформатори, що використовуються сьогодні на практиці.

Сучасні напрямки створення трансформаторної техніки повинні ґрунтуватися на глибинному розумінні фізики процесів, що відбуваються в них, і максимально повно впроваджувати ці знання в конструктивні рішення. Тільки такий шлях зумовить успішне виконання складних практичних завдань і допоможе запобігти у майбутньому виникненню різних аварійних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень

Сьогодні трансформатори набули широкого застосування в різноманітних галузях електротехніки. Їх використовують в енергетичних установках для перетворення напруг, для зв'язку мереж і систем з різним параметрами, знаходять використання в електроприводі, електротязі, електротермії та інших галузях.

Потреба у збільшенні потужності енергетичних блоків спричинила для трансформаторобудівників та енергетиків складні завдання. Особливо актуальною для розробників блочних трансформаторів є проблема вироблення наукових основ їх проектування, оскільки зі збільшенням потужності трансформаторів збільшуються струми обмоток, і, відповідно, зростає інтенсивність полів розсіяння. Це зумовлює виникнення значних вихрових струмів у всіх провідних елементах, а також додаткових втрат енергії та підвищення нагрівання [1, 2]. У неправильно спроектованих трансформаторах втрати від полів розсіяння можуть перевищувати активні втрати в обмотках. Ці втрати не тільки приводять до зменшення ККД, але також і до локальних порушень температурних режимів у конструктивних елементах. Для зменшення втрат від полів розсіяння застосовують магнітні екрани з міді або алюмінію, або шунти з листової трансформаторної сталі [3]. З полями розсіяння тісно пов'язані механічні зусилля в трансформаторах, які зі зростанням потужності стають щораз шкідливішими.

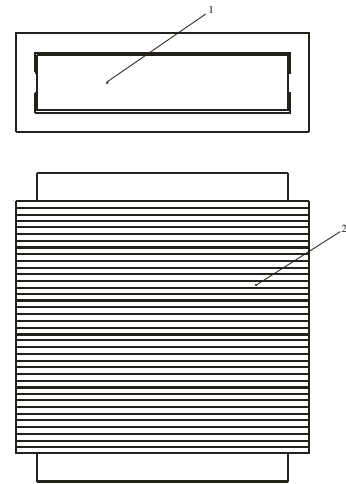


Рис. 1. Загальний вигляд однофазного трансформатора

Постановка проблеми

Для усунення втрат значної частини електромагнітної енергії, яка передається через поля розсіяння, необхідно ефективніше і більшою мірою використовувати магнітні матеріали (сталь магнітної системи трансформаторів). Іншого способу вирішення цієї проблеми не існує, хоча такий підхід суперечить загальноприйнятій тенденції до економії магнітних матеріалів будь-якою ціною. Така практика вигідна підприємствам-виробникам трансформаторів, але вона ускладнює експлуатацію пристроїв через великі втрати потужності на поля розсіяння, а це зумовлює збільшення активних втрат і, як наслідок, необхідність примусового охолодження, складність експлуатації і ремонту, зменшення надійності та ресурсу роботи.

Проведені дослідження показали, що додаткові витрати сталі повною мірою компенсуються покращенням енергетичних характеристик трансформаторів, зумовлених конструкцією магнітних систем. Нетрадиційний підхід до конструювання трансформаторів автори захистили патентами України [4–7].

Задачі і цілі дослідження

Метою проведеного дослідження є експериментальне підтвердження переваг трансформаторів із просторовою магнітною системою, з відповідними співвідношеннями геометричних розмірів, над сучасними трансформаторами за основними енергетичними характеристиками.

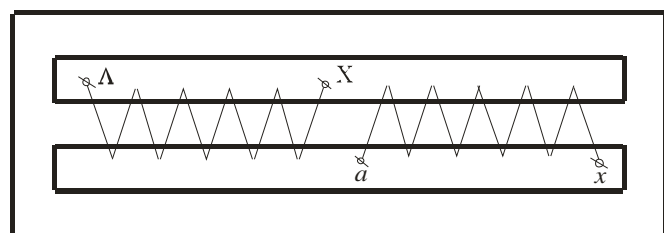


Рис. 2. Схематичне розміщення обмоток на магнітній системі

Напрямки удосконалення конструкцій трансформаторів

Найпростішим в конструктивному виконанні і найвдалішим з погляду енергетичних властивостей сьогодні є броньовий однофазний трансформатор. Це єдиний трансформатор, обмотки якого найбільшою мірою охоплені в просторі магнітною системою.

Математичні розрахунки і результати комп'ютерного симулювання свідчать про значне покращення параметрів і властивостей трансформатора за збільшення охоплення обмоток магнітною системою.

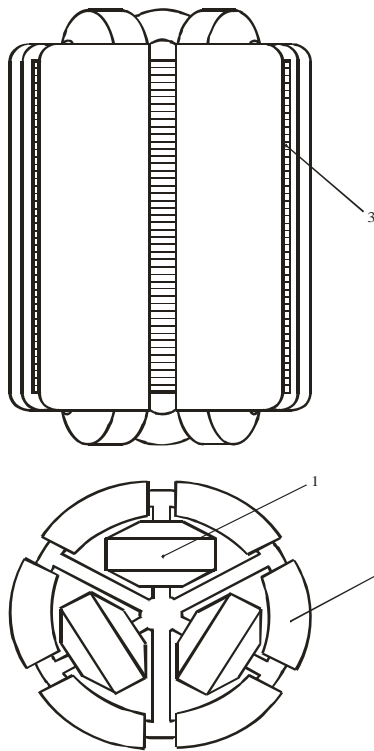


Рис. 3. Загальний вигляд трифазного трансформатора з просторово-симетричною магнітною системою

Найкращі характеристики і властивості броньового однофазного трансформатора за однакового перерізу стрижнів магнітної системи досягаються вибором таких максимальних співвідношень її геометричних розмірів:

- довжини стрижнів до ширини вікон;
- ширини магнітної системи до ширини стрижня, на якому розміщено робочі обмотки (тобто використання максимально можливої кількості листів електротехнічної сталі для формування магнітопроводу трансформатора).

На рис. 1 наведено загальний вигляд однофазного броньового трансформатора, виготовленого з урахуванням викладених вище співвідношень геометричних розмірів у конструкції магнітної системи.

Як видно з рисунка, обмотки трансформатора 1 максимально розподілені вздовж стрижня і максимально охоплені в просторі магнітною системою. Такою конструкцією досягається максимальне співвідношення довжини витків, охоплених магнітною системою (назвемо її робочою частиною витків) до частини довжини витків зовні магнітопроводу (назвемо її лобовою частиною). В ідеальному випадку довжина стрижнів повинна бути такою, щоб первинна і вторинні обмотки були концентричними і розміщувалися вздовж стрижня в один ряд, а магнітопровід був зібраний із великої кількості листів електротехнічної сталі 2 (максимально-можлива ширина магнітної системи), що зведе до мінімуму лобові частини обмоток.

На рис. 2 наведена схема розміщення первинної і вторинної обмоток на магнітопроводі броньового трансформатора.

Отже, з практичного погляду досягається покращення такого техніко-економічного показника броньового трансформатора, як зменшення об'єму трансформатора до одиниці потужності в 1,5 рази і значне збільшення надійності його роботи.

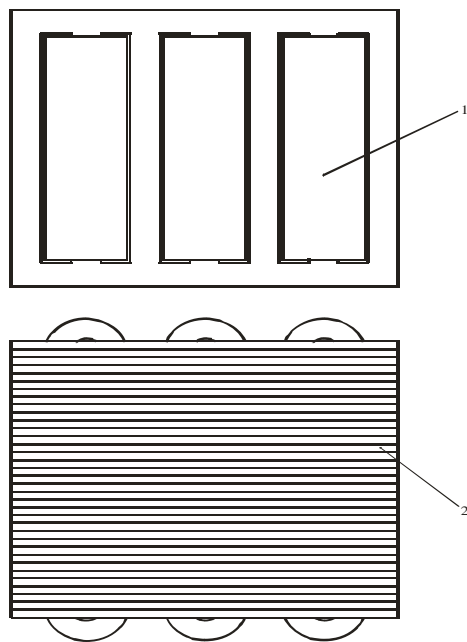


Рис. 4. Загальний вигляд трифазного трансформатора з об'ємною магнітною системою

З метою досягнення покращених характеристик трифазного трансформатора, крім згаданих вище співвідношень розмірів магнітної системи, необхідне забезпечення однакових електромагнітних умов роботи для кожної із фаз. Це досягнуто у трифазному трансформаторі з просторово-симетричною магнітною системою, загальний вигляд якого наведено на рис. 3 (для стислості позначимо його Т1).

Трансформатор Т1 складається з фазних обмоток 1, додаткових обмоток 2 і магнітопроводу 3. Конструкція магнітної системи Т1 складається з двох циліндрів (зовнішнього – пустотілого і внутрішнього – суцільного), з'єднаних між собою шістьма магнітними стрижнями, розміщеними по колу під кутом 60° . На трьох стрижнях, взаємне розміщення яких становить кут 120° , знаходяться фазні обмотки. Три інших стрижні вільні від обмоток і призначені для внутрішнього охоплення фазних обмоток магнітною системою.

Конструкція магнітної системи трансформатора Т1 також може складатися з двох шестикутних призм, вершини яких з'єднані стрижнями.

Максимальне охоплення фазних обмоток магнітною системою (лобова частина обмоток при цьому зводиться до мінімуму) досягається максимально можливим співвідношенням ширини магнітної системи до ширини стрижнів, на яких розміщені фазні обмотки.

Запропонована конструкція магнітопроводу обумовлює появу нових властивостей трансформатора Т1: автоматичне симетрування напруг у разі несиметричного фазного навантаження за рахунок перерозподілу магнітних потоків фаз у всіх контурах магнітної системи і можливість плавного регулювання напруг у разі зміни навантаження за рахунок додаткових обмоток.

Схема розміщення фазних і додаткових обмоток на магнітній системі трансформатора Т1 наведена на рис. 5.

Вдосконалення існуючих броньових трифазних трансформаторів здійснюється аналогічно до броньових однофазних трансформаторів, тобто шляхом переходу до об'ємної магнітної системи.

Загальний вигляд такого броньового трифазного трансформатора наведено на рис. 4 (надалі вказаний трансформатор позначатимемо Т2).

Трансформатор Т2 складається з фазних обмоток 1 і магнітної системи 2. До складу магнітної системи входять 7 паралельних стрижнів, з'єднаних двома ярами.

Для досягнення максимального охоплення магнітною системою фазних обмоток і зменшення лобових її частин, довжина стрижнів повинна бути такою, щоб первинна і вторинна обмотки, в ідеальному випадку, розміщувалися на стрижні концентрично в один ряд, а також необхідно, щоб співвідношення ширини магнітної системи до ширини вікон між стрижнями при цьому було максимальним.

Схема розміщення фазних обмоток на магнітній конструкції трансформатора Т2 наведена на рис. 6.

На трансформатори, що зображені на рис. 1, 3, 4, і їхні модифікації отримано патенти на винахід України і патенти на корисну модель США.

Було проведено фізичні експерименти з використанням двох виготовлених трифазних трансформаторів конструкції Т1 і Т2 і їх прототипом – промисловим трифазним трансформатором (надалі його позначатимемо Т3). Трансформатор Т1 виконаний без 6 додаткових обмоток. Результати експериментів наведені в табл. 2–5, а їхні основні геометричні розміри – в табл. 1.

Прототипом було обрано промисловий трифазний трансформатор (Т3) чеської компанії ELEKTROV типу 3EI 3×4066 W(R) потужності 1,6 кВА з такими параметрами:

- поперечний переріз стрижнів магнітної системи – 3000 мм²;
- робоча напруга – 220 В;
- кількість витків первинної обмотки – 400;
- кількість витків вторинної обмотки – 230.

Враховуючи параметри трансформатора Т3, було виготовлено трансформатори конструкції Т1 і Т2 з такими самими значеннями вказаних величин.

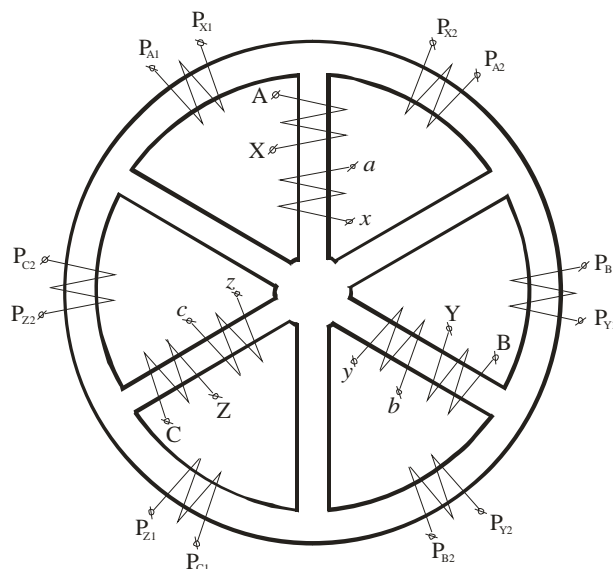


Рис. 5. Схематичне розміщення обмоток фаз і додаткових підмагнічувальних обмоток на магнітній системі

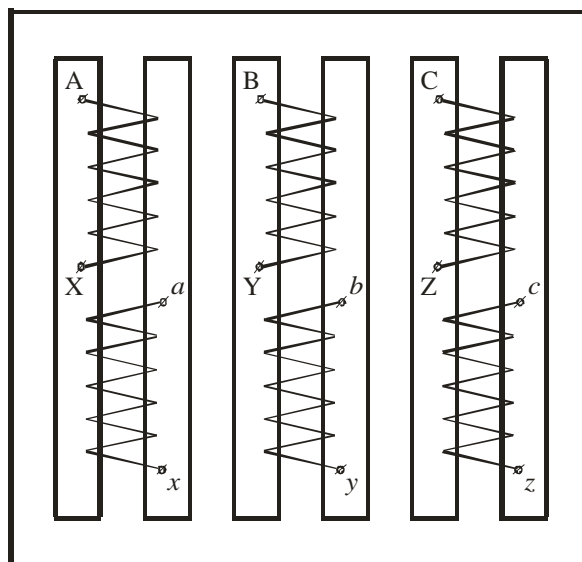


Рис. 6. Схематичне розміщення обмоток фаз на магнітній системі

Загальні характеристики трансформаторів Т1, Т2 і Т3 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри трансформаторів

Тип Трансформатора	Габаритні розміри			Вага		
	Довжина L , мм	Ширина B , мм	Висота H , мм	Мідь кг	Маг. сис. кг	Загальний кг
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	240	125	180	10	22	32
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	240	150	240	12	33	45
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	300	140	140	12	30	42

Всі фізичні експерименти з трифазними трансформаторами проводили, враховуючи таку схему з'єднання обмоток: джерело живлення, первинна і вторинна обмотки трансформатора, а також трифазне навантаження були з'єднані в зірку.

Проведено експеримент ввімкнення трансформаторів на номінальну напругу без навантаження (дослід холостого ходу). Результати експериментів наведені в табл. 2.1–2.2. Як видно з таблиць, струми намагнічування трансформаторів Т1 і Т2 менші за значенням струмів Т3, що свідчить про покращені властивості магнітних систем вказаних трансформаторів. Крім того, однакові струми намагнічування окремих фаз в Т1 підтверджують наявність однакових умов роботи для кожної із фаз.

Таблиця 2

Режим холостого ходу

Тип Трансформатора	Фазні напруги первинної обмотки трансформатора			Фазні напруги вторинної обмотки трансформатора		
	U_{U1} , В	U_{V1} , В	U_{W1} , В	U_{U2} , В	U_{V2} , В	U_{W2} , В
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	220	220	220	127	127	127
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	220	220	220	131	131	131
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	220	220	220	125	125	125

Таблиця 3

Режим холостого ходу

Тип Трансформатора	Фазні струми первинної обмотки трансформатора			Активні потужності фаз первинної обмотки трансформатора		
	I_{U1} , А	I_{V1} , А	I_{W1} , А	P_{U1} , Вт	P_{V1} , Вт	P_{W1} , Вт
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	0,065	0,05	0,065	7	6	7
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	0,05	0,05	0,05	6	6	6
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	0,05	0,03	0,05	3	3	3

Було здійснено експеримент увімкнення трансформаторів під напругу з коротко замкнутими обмотками на виході (дослід трифазного короткого замикання). Результати експериментів наведені в табл. 3–4. Отримані результати свідчать про те, що завдяки покращеним властивостям магнітних систем трансформаторів T1 і T2 їх напруги струмів короткого замикання більші, ніж в T3. Температура обмоток всіх трьох трансформаторів у цьому режимі становила приблизно 80–85 °С.

Таблиця 4

Режим трифазного короткого замикання

Тип Трансформатора	Фазні напруги первинної обмотки трансформатора			Фазні напруги вторинної обмотки трансформатора			Фазні струми первинної обмотки трансформатора		
	U_{U1} , В	U_{V1} , В	U_{W1} , В	U_{U2} , В	U_{V2} , В	U_{W2} , В	I_{U1} , А	I_{V1} , А	I_{W1} , А
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	22	22	22	00	00	00	3,55	3,55	3,55
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	45	45	45	00	00	00	6	6	6
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	36	36	36	00	00	00	6	6	6

Таблиця 5

Режим трифазного короткого замикання

Тип Трансформатора	Фазні струми первинної обмотки трансформатора			Активні потужності фаз первинної обмотки трансформатора		
	I_{U2} , А	I_{V2} , А	I_{W2} , А	P_{U1} , Вт	P_{V1} , Вт	P_{W1} , Вт
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	6	6	6	76	76	76
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	10	10	10	230	230	230
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	10	10	10	205	205	205

Таблиця 6

Режим трифазного симетричного активного навантаження

Тип Трансформатора	Фазні напруги первинної обмотки трансформатора			Фазні напруги вторинної обмотки трансформатора			Фазні струми первинної обмотки трансформатора		
	U_{U1} , В	U_{V1} , В	U_{W1} , В	U_{U2} , В	U_{V2} , В	U_{W2} , В	I_{U1} , А	I_{V1} , А	I_{W1} , А
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	220	220	220	116	116	116	3,2	3,2	3,2
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	220	220	220	108	108	108	6	6	6
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	220	220	220	107	107	107	5,6	5,6	5,6

Наступним експериментом було увімкнення трифазного трансформатора на симетричне активне навантаження (дослід трифазного симетричного активного навантаження). Для всіх трьох трансформаторів у цьому експерименті використовувались однакові активні опори. Результати експериментів наведені в табл. 6–7. Температурний режим трансформаторів знаходився в межах 80–85 °С.

Результати дослідів (табл. 7) з трансформаторами, які мають однаковий поперечний переріз магнітних систем, свідчать про те, що корисна активна потужність становила в Т3 1,89 кВА, в Т1 – 3,21 кВА, і в Т2 – 3,15 кВА. Відповідно, використання просторових конструкцій магнітних систем Т1 і Т2 приводить до значного збільшення потужності трансформаторів.

Таблиця 7

Режим трифазного симетричного активного навантаження

Тип Трансформатора	Фазні струми вторинної обмотки трансформатора			Активні потужності фаз первинної обмотки трансформатора			Активні потужності фаз вторинної обмотки трансформатора			Напруга зміщення нейтралі $U_{N-N'}$, В
	I_{U2} , А	I_{V2} , А	I_{W2} , А	P_{U1} , Вт	P_{V1} , Вт	P_{W1} , Вт	P_{U2} , Вт	P_{V2} , Вт	P_{W2} , Вт	
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	5,5	5,5	5,5	700	700	700	630	630	630	00
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	10	10	10	1300	1300	1300	1070	1070	1070	00
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	9,7	9,7	9,7	1250	1250	1250	1050	1050	1050	00

Таблиця 8

Режим трифазного несиметричного активного навантаження

Тип трансформатора	Фазні напруги первинної обмотки трансформатора			Фазні напруги вторинної обмотки трансформатора			Фазні струми первинної обмотки трансформатора		
	U_{U1} , В	U_{V1} , В	U_{W1} , В	U_{U2} , В	U_{V2} , В	U_{W2} , В	I_{U1} , А	I_{V1} , А	I_{W1} , А
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	82	86	88	42	43	45	2,325	1,86	1,65
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	88	87	89	43	43	46	2,375	1,88	1,7
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	86	88	88	40	43	43	2,3	1,95	1,6

Таблиця 9

Режим трифазного несиметричного активного навантаження

Тип Трансформатора	Фазні струми вторинної обмотки трансформатора			Активні потужності фаз первинної обмотки трансформатора			Активні потужності фаз вторинної обмотки трансформатора			Напруга зміщення нейтралі $U_{N-N'}$, В
	I_{U2} , А	I_{V2} , А	I_{W2} , А	P_{U1} , Вт	P_{V1} , Вт	P_{W1} , Вт	P_{U2} , Вт	P_{V2} , Вт	P_{W2} , Вт	
Промисловий трифазний трансформатор (Т3)	4	3,2	2,8	205	153	145	170	130	127	13
Трифазний трансформатор з просторово-симетричною магнітною системою (Т1)	4	3,175	2,85	210	155	153	173	132	130	1,00
Трифазний трансформатор з об'ємною магнітною системою (Т2)	4	3,4	2,78	190	170	133	160	145	116	0,00

Також здійснено експеримент увімкнення трифазних трансформаторів на вхідну напругу 88 В з під'єднанням різних за значенням активних опорів до вихідних обмоток кожної із фаз (дослід трифазного несиметричного активного навантаження). Умови проведення експериментів однакові для всіх трансформаторів Т1, Т2 і Т3. Результати експериментів наведені в табл. 8–9. Вони показують, що промисловий трансформатор Т3 не в змозі автоматично симетрувати напругу, про це свідчить величина напруги зміщення нейтралі, що дорівнює 13 В, у той же час, як трансформатори Т1 і Т2 ефективно протидіють несиметрії напруг, оскільки напруга зміщення нейтралі в них становить відповідно 1,00 В і 0,00 В.

Висновки

1. Перетворення електричної енергії за допомогою трансформаторів повинно здійснюватися без зміни її якості, основним показником якої є симетрія фазних напруг і відсутність вищих гармонік. Таке перетворення є можливим в пристрої, що не спотворює просторово-часові характеристики електромагнітного процесу, чого не можна досягнути за допомогою трансформаторів, які використовуються сьогодні із-за несиметричності конструкції їх магнітних систем. У такому разі постановка питання про можливість симетрування напруг існуючими трансформаторами є беззмістовною.

2. Перетворення електричної енергії без її спотворення, автоматичного чи регульованого симетрування напруг фаз у разі несиметричного навантаження є можливим за допомогою трансформаторів з об'ємно-просторовою магнітною системою і симетричним розміщенням фазних обмоток на ній.

4. Новий підхід до створення трансформаторів ґрунтується на використанні оптимального перебігу електромагнітних процесів у конструкціях магнітних систем. Під час практичної реалізації це зводиться до максимально можливого охоплення електричних обмоток трансформатора магнітною системою. Запропоноване технічне рішення привело до покращення експлуатаційних характеристик (низьке значення відносного струму холостого ходу, зменшення втрат на вихрові струми в магнітопроводі) і до зменшення геометричних розмірів на одиницю потужності.

5. Запропоновані нові конструкції трансформаторів найефективніші в промисловому використанні в мережах передачі і розподілення електричної енергії.

1. Шидловський А. К. Трансформаторы для мощных энергетических блоков / А. К. Шидловський, И. Д. Воеводин, А. В. Гриценк., О. Ц. Сисуненко. // *Техническая электродинамика*. – 1986. – № 3. – С. 3–7. 2. Кравченко А. Н. Электродинамические расчеты в электроэнергетике / Кравченко А. Н., Нижник Л. П. – К.: Техніка, 1977. – 184 с. 3. Васютинський С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинський. – Л.: Энергия. – 1970. – 432 с. 4. Пат. 84746 Україна, МПК⁷ Н 01 F 27/00, Н 01 F 33/00. Трифазний трансформатор / Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В.; Заявник і патентовласник Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В. – № a200611328; Зареєстровано 25.11.08; Оуб. Бюлетень “Промислова Власність” 25.11.08, № 22. стр. 3.124. 5. Пат. 84747 Україна, МПК⁷ Н 01 F 27/00, Н 01 F 33/00. Трифазний трансформатор / Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В.; Заявник і патентовласник Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В. – № a200611329; Зареєстровано 25.11.08; Оуб. Бюлетень “Промислова Власність” 25.11.08, № 22. стр. 3.124. 6. Пат. № 87310 Україна, МПК⁷ Н 01 F 27/00, Н 01 F 33/00. Трифазний трансформатор / Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В.; Заявник і патентовласник Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В. – № a200612633; Зареєстровано 10.07.09; Оуб. Бюлетень “Промислова Власність” 10.07.09, № 13. стр. 3.100. 7. Пат. № 87309 Україна, МПК⁷ Н 01 F 27/00, Н 01 F 33/00. Однофазний трансформатор / Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В.; Заявник і патентовласник Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В. – № a200612632; Зареєстровано 10.07.09; Оуб. Бюлетень “Промислова Власність” 10.07.09, № 13. стр. 3.100.