

# Нова концепція конструювання трансформаторів

\*Л. Білий, д.т.н., проф., \*\*Я. Ковівчак, к.т.н., доц.

\*Львівський банковий університет, просп. Шевченка, 9, Львів -13, 79013

\*Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 22/806, Львів-13,79013

**Abstract.** Laid new concept of designing transformers, based on mirror phenomena of electromagnetism in their design. We give a comparative description of the main energy performance of transformers with flat and spatial magnetic systems.

**Key words:** transformer, electromagnetism essence, a form of electromagnetism, flat magnetic system, spatial magnetic system.

У світі немає жодної галузі виробництва, яка б не використовувала електроенергію. Широке застосування системи змінного струму стало можливе лише після винаходу трансформатора. Завдяки йому з'явилась можливість виробляти електроенергію при напрузі, зручній для її генерування, передавати її з напругою, яка відповідає мінімальним втратам, і споживати при напрузі, розрахованій на параметри електроприймачів. Трансформатор не лише змінює напругу до рівня, зручного для усіх ланок електричного кола, але і зв'язує їх в єдину електричну систему.

Не дивлячись на свою відносну простоту, трансформатор висуває ряд проблем, достатньо складних, щоб привернути до себе увагу великої кількості спеціалістів, зайнятих як в експлуатації енергетичних систем, так і у виробництві трансформаторів. Причини виникнення цих проблем і шляхи їх усунення стають зрозумілі, якщо процес створення пристрою, що базується на явищі електромагнетизму, розглянути керуючись концепцією, сформульованою в минулому столітті фізиками Девісом А. Р. і Роулсом В., які стверджують, що «у природі існує дзеркальний зв'язок між матеріальним образом (схемою) і фізичною картиною електромагнетизму» [1]. Розкриємо детальніше цю надзвичайно важливу концепцію, дотримання якої є обов'язковим при створенні будь-яких електротехнічних пристроїв. У відповідності з цією концепцією при використанні фізичного явища в технічному об'єкті необхідне строге збереження, по-перше, його суті, по-друге, його форми. Суть електромагнетизму полягає в тому, що електричний струм породжує електромагнітне поле, яке завжди охоплює цей струм. Дзеркальність відображення суті електромагнетизму означає, що в матеріальному образі або об'єкті сталь повинна охоплювати мідь (або алюміній). Форма явища електромагнетизму полягає в тому, що воно є об'ємне, тобто в просторі має три виміри. Дзеркальність відображення форми означає, що матеріальний об'єкт також мусить бути тривимірним.

Викладену концепцію використаємо для порівняння основних техніко-економічних показників сучасних трансформаторів з плоскою розгалуженою магнітною системою і трансформаторів нової конструкції з просторовою магнітною системою. В якості останніх візьмемо трансформатор, збудований у ПАТ

«Хмельницькобленерго» ( $P_H = 100$  кВА,  $U_H = 10/0,4$  кВ) і ( $P_H = 25$  кВА,  $U_H = 10/0,4$  кВ) на основі патентів авторів даної публікації [2, 3].

Проектування сучасних трансформаторів здійснюється з багатолітньою і неослабною тенденцією до максимально високого використання активних матеріалів, спрощення технологічності, зниження ваги і зменшення габаритів. Такі прагнення унеможливили виконання концепції дзеркальності явища електромагнетизму при створенні його матеріального образу у вигляді трансформатора. Спотворення суті полягає в тому, що сталь охоплюється обмотками, тобто струм оточує магнітне поле, а форма спотворена заміною об'ємного поля плоским, яке мусить замикатись по плоскому магнітопроводу. Наслідком спотворення суті є випромінювання енергії в оточуючий простір, так звані поля розсіяння, а недотримання об'ємної форми призвело до магнітної несиметрії фаз, тобто трансформатор став джерелом несиметрії енергосистеми. Таким чином, відхід від концепції дзеркальності природи електромагнетизму і матеріального об'єкту обернувся втратами електроенергії і погіршенням її якості. Проілюструємо сказане простими розрахунками. Потужність трансформаторів, установлених в енергетичній системі, перевищує генераторну потужність у 4-5 разів. Тому, хоча К.К.Д. трансформатора достатньо високий (в одиницях великої потужності він досягає 99,5%), вартість втрат енергії в трансформаторах виходить достатньо значною. У цьому можна переконатись з наступного елементарного розрахунку. Якщо встановлена потужність трансформаторів складає, наприклад, 200 млн. кВА, то при рівні витрат у трансформаторах 0,5% і кількості годин використання максимуму потужності 4000 в рік та ціні втраченої енергії 1 цент за 1 кВт-год вартість втрат енергії в трансформаторах складе 400 млн. доларів США в рік.

З ростом потужності трансформатора і його розмірів ростуть поля розсіяння і обумовлені ними втрати в обмотках трансформатора, у зовнішніх листах магнітопроводу та інших металевих елементах конструкції трансформатора. В існуючих сьогодні трансформаторах втрати від полів розсіяння можуть перевищувати омичні втрати в обмотках. Втрати від полів розсіяння неприємні не лише фактором зниження К.К.Д., але також тим, що вони спричиняють місцеві перегріву. У деяких випадках для зменшення втрат від полів розсіяння застосовують магнітні екрани з міді або алюмінію, або шунти з листової сталі.

Питання, пов'язані з полями розсіяння, досить складні і дотепер не можуть рахуватись розв'язаними. В літературних джерелах не існує єдиної методології обчислення таких полів. Прийнято вважати, що величина і конфігурація цих полів визначає індуктивні опори обмоток трансформатора, додаткові втрати (по-

над омичні) в них, а також втрати в металевих елементах конструкції трансформатора. Поля розсіяння визначають електромагнітні сили, які діють на обмотки трансформатора в нормальних і аварійних режимах, а також у значній мірі нагрів обмоток і інших конструктивних частин трансформатора. З цього видно, який великий вплив чинять поля розсіяння на характеристики і параметри трансформатора.

Питання розрахунку втрат від полів розсіяння у стінках бака і інших елементах конструкції до цього часу недостатньо розроблені.

Прослідкуємо далі, до яких негативних наслідків, крім втрати потужності, привело нехтування дзеркального зв'язку між матеріальним об'єктом (трансформатором) і фізичною природою електромагнетизму, а лише формальне використання закону електромагнітної індукції при побудові такого об'єкту.

Так як значна частина поля втрачена, розсіяна у просторі, а сконцентрована в магнітопроводі (основне або робоче поле) недостатньо для рівномірної передачі потужності, відповідно, активною і реактивною складовими, іншого вибору, крім збільшення активної складової, тобто струмів обмоток, немає. Наслідком цього є, по-перше, зростання струму збудження або намагнічування – важливого техніко-економічного показника, по-друге, збільшення омичних втрат, які прискорюють старіння ізоляції, по-третє, з'являється нагальна потреба в примусовому охолодженні обмоток. Остання породжує ще низку проблем, найбільшими серед яких є шуми, вібрації, ускладнення і дорожчання виготовлення, експлуатації і ремонту та інше.

У свою чергу, втрати потужності від полів розсіяння і значні омичні втрати, необхідність використання примусового охолодження обумовлюють зниження надійності трансформатора, скорочення ресурсу його роботи. Прийнято вважати, що несиметричні явища в трансформаторах викликаються несиметрією підведених напруг і несиметрією навантаження, а сам трансформатор на симетрію електромагнітного процесу не впливає. Насправді різні умови роботи обмоток, що знаходяться на середньому і бокових стрижнях, обумовлені конструкцією магнітної системи сучасних трансформаторів, а також наявність напруги зміщення нейтралі, у випадку несиметричних навантажень, роблять трифазний трансформатор джерелом вищих гармонік у лініях електропередач.

Несиметрія напруги негативно впливає на роботу споживачів. Трифазний асинхронний двигун, який є найбільш поширеним приймачем електричної енергії, при будь-якій несиметрії підведених напруг понижує електромагнітний (обертовий) момент. Однофазні споживачі при несиметрії трифазних напруг можуть опинитися або під підвищеною, або під пониженою напругою, причому обидві умови є небажані. Для самого трансформатора несиметрична робота може бути небезпечною у відношенні перевантажень окремих обмоток, а також надмірних підвищень фазних напруг і насичення осердя. Сказаного достатньо, щоб бачити, що несиметричні режими трансформаторів становлять складну теоретичну і практичну проблему.

Для симетрування напруг в електромережах використовують симетруючі пристрої з електричними та електромагнітними зв'язками. Такі пристрої не усувають проблему в повній мірі, складні у виконанні і вимагають значних витрат.

Запропоновані нами принципово нові підходи до конструювання трансформаторів практично повністю усувають вказані недоліки і проблеми сучасних трансформаторів завдяки тому, що просторова магнітна система практично повністю охопила обмотки сталлю і тому цілком відповідає суті явища електромагнетизму, а її об'ємна форма тотожна його формі.

Необхідно зауважити, що для повного відтворення природи електромагнетизму в трансформаторі необхідна більша кількість сталі. Іншого способу усунення втрати значної частини поля не існує, хоча це суперечить загальноприйнятій тенденції економії активних матеріалів будь-якою ціною. Така практика вигідна заводам – виробникам трансформаторів, але вона надто дорого обходиться підприємствам, які їх експлуатують, через великі втрати потужності, обумовлені полями розсіяння, омичними втратами, втратами на примусове охолодження і ін., а також погіршення якості електроенергії із-за несиметрії магнітної системи.

Покажемо, що додаткові затрати сталі в повній мірі компенсуються енергетичними характеристиками трансформаторів, обумовлені конструкцією магнітної системи.

Просторова магнітна система концентрує на собі поля розсіяння, перетворюючи їх у робоче поле, яке значно зростає, що адекватно зростанню реактивної потужності трансформатора.

Разом з полями розсіяння зникають втрати від них, які вираховувались з активної потужності, тобто вона також зростає.

Збільшення робочого поля викликало ріст взаємного індуктивного опору, що, в свою чергу, зумовило суттєве (до 25%) зменшення струму збудження або струму намагнічування – важливого техніко-економічного показника трансформатора.

Зменшення струму збудження призвело до зниження омичних втрат в обмотках або ще одного фактора росту активної потужності.

Адекватне використання явища електромагнетизму при побудові пристроїв, принцип дії яких ґрунтується на цьому явищі, є визначальним при розгляді такої проблеми як насичення магнітопроводів. В класичних літературних джерелах стверджується, що в однофазних електромагнітних перетворювачах енергії при синусоїдальному потоці крива струму холостого ходу є несинусоїдальною. При цьому несинусоїдальність кривої проявляється тим гостріше, чим більше насичення магнітопроводу.

У трифазних трансформаторах ефекти, пов'язані з нелінійністю характеристики намагнічування, ускладнюються, а характер їх виявлення залежить від схеми з'єднання обмоток і конструкції магнітопроводу [4].

Несинусоїдальність потоків, а значить напруг, спричиняє непросту конструкція магнітопроводу, а його плоска конструкція, яка спотворює об'ємне елек-

тромагнітне поле, заганяючи його в площину і оточуючи струмами. Це й є основна причина різкого зниження якості електроенергії і появи джерел різних втрат. У трансформаторах з просторовою магнітною системою насичення сталі не впливає на синусоїдальну форму потоків та напруг.

Важливий ще один момент. Трансформатор, виготовлений у відповідності [2], має монолітну просторову магнітну систему. Така конструкція магнітопроводу є прозорою для розуміння фізичного процесу самосиметрування фазних напруг як наслідку перерозподілу магнітних потоків фаз. Проте вона має ваду, яка стоується практичного використання пристрою, так як при виході з ладу однієї фази заміні підлягає трансформатор в цілому. Тому нами запропонований варіант групового трифазного трансформатора, кожною фазою якого є однофазний трансформатор з просторовою магнітною системою [3]. Не дивлячись на відсутність магнітних зв'язків між фазами, симетрування напруг тут здійснюється за рахунок електричних зв'язків. Така конструкція розв'язує також проблему транспортування трансформатора від заводу – виробника до місця експлуатації, усуваючи потребу в спеціальних платформах, виготовлення трансформатора з окремих частин і т.д.

Повне відтворення явища електромагнетизму в конструкції трансформатора знімає ще одну проблему, якою є охолодження його активної частини. В новій конструкції магнітної системи обмотки не потрібно перевантажувати струмами для компенсації втраченого поля, створюючи при цьому переки між активною і реактивними складовими потужності. Тут передача повної потужності рівномірно розподіляється між її складовими, відсутня необхідність перегріву обмоток струмами і штучним їх охолодженням. Трансформатори з просторовою магнітною системою будь-якої потужності виготовляються в сухому виконанні.

Підсумуємо викладене. Лише переваги трансформаторів з просторовою магнітною системою у порівнянні з існуючими в таких показниках, як зростання одиничної потужності, зменшення струму намагнічування, відсутності примусової системи охолодження з надлишком компенсують затрати на більшу кількість сталі, необхідну для їх виготовлення.

Крім того, вказані переваги стають основою для значного зростання надійності, збільшення ресурсу роботи трансформаторів.

Накінець, дзеркальність відображення фізики в об'єкті спричинила появу нових властивостей, які відсутні в трансформаторах з плоскою магнітною системою будь-якого типу, а саме:

- не спотворюється якість електроенергії (форма напруги) при глибокому насиченні сталі, чого не можна уникнути в сучасних трансформаторах;

- зберігається рівність фазних напруг на вторинній обмотці при роботі на несиметричне навантаження.

Ці властивості важко переоцінити в умовах експлуатації.

## Висновки

1. Запропонована нова концепція конструювання трансформаторів, яка базується на основі дзеркального відображення явища електромагнетизму в їх конструкції. Дотримання концепції вимагає заміни розгалуженої плоскої магнітної системи, яку мають сучасні трансформатори, просторовою з відповідною їй формою обмоток.

2. Конструкція плоскої магнітної системи повністю спотворює явище електромагнетизму, як по суті (мідь охоплює сталь), так і по формі. Спотворення суті спричиняє розсіяння значної частини енергії в оточуючий простір, а форми – сам трансформатор стає джерелом несиметрії в електромережах.

3. Виготовлення просторової магнітної системи вимагає більшої кількості сталі порівняно з плоскою, що протирічить багатолітній тенденції до максимальної економії активних матеріалів, не зважаючи на значне зниження енергетичних характеристик виробу.

4. Зведення просторовою магнітною системою до мінімуму полів розсіяння привело до:

- значного зростання робочого поля і реактивної потужності трансформатора;
- зменшення втрат від цих полів і струму збудження;
- збільшення одиничної активної потужності.

5. Передача потужності при рівномірній участі в ній активної і реактивної складових усуває потребу в перевантаженні струмами обмоток, створенні перекоосу між складовими і необхідності примусового охолодження активної частини.

Збільшення одиничної потужності та усунення потреби в примусовій системі охолодження обумовили підвищення надійності й зростання ресурсу роботи трансформатора.

Лише перевага у наведених вище показниках багаторазово перекривають затрати на додаткову сталь просторової магнітної системи.

Адекватне відображення явища електромагнетизму в просторовій магнітній системі, яка повністю охоплює обмотки, породило нові властивості, відсутні в будь-якій конструкції сучасних трансформаторів, а саме:

- збереження рівності вторинних фазних напруг при роботі трансформатора на несиметричне навантаження;
- збереження синусоїдальності напруг при глибокому насиченні сталі магнітної системи.

[1] Davis A.R., Raws W.C. The Rainbow in Your Hands. Smithtown: Exposition Press, - 1976.

[2] Патент № 87310 Україна, МПЛ<sup>7</sup> Н 01 F 27/00, Н 01 F 33/00. Трифазний трансформатор/ Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Чернишук В. П., Арсенюк В. В. - № а2006 12633; Зареєстровано 10.07.2009; опуб. Бюлетень "Промислова власність" 10.07.2009, № 13, стр 3.100.

[3] Патент № 104527 Україна, МПК Н 01 F 27/06, Н 01 F 30/12. Трифазний трансформатор/ Білий Л. А., Ковівчак Я. В., Шпак О. Л. - № а2012 13993; Зареєстровано 10.12.2012; опуб. Бюлетень "Промислова власність" 10.02.2014, № 3, стр 3.100.

[4] Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов// М.: Энергия. – 1980 – 928 с.