

УДК 621.314

Кулагін Д.О., к.т.н., професор,  
Волков М.А., магістрант,  
Запорізький національний технічний університет

## СУЧАСНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ

В останнє десятиріччя українське суспільство остаточно усвідомило важливість енергозбереження та енергетичного менеджменту як у промисловій так і у непромисловій сферах. Було запропоновано величезну кількість заходів з енергозбереження та підвищення енергоефективності промисловості та енергетики. Одним з актуальних питань, рішення якого дозволить отримати суттєву економію грошових ресурсів є підвищення ефективності електричних мереж. А саме – оптимізація режимів передавання електроенергії та зниження втрат у елементах мережі.

Одним з енергозберігаючих заходів на промисловості та у енергетиці є заміна застарілого обладнання на нове, з меншими втратами та більш високим коефіцієнтом корисної дії. Тому розробка нових, енергоефективних типів трансформаторів має велике значення для України.

Якщо втрати потужності в елементах конструкції трансформатора не обчислювати та не обмежувати належним чином, вони можуть складати велику частину (більше 20%) від загальних втрат короткого замикання  $\Delta P_k$ . Велика частина додаткових втрат припадає на конструкційні частини з великою площею поверхні. (наприклад Бак). Варто зазначити, що додаткові втрати в деяких елементах з меншою площею, таких як пресувальні кільця, хоча й є меншими, але магнітний потік, який в них замикається, може бути досить високим, що може призвести до неприйнятних місцевих перегрівів, які можуть серйозно вплинути на тривалість життя трансформатора та його енергоефективність [1,2]

До 1980 року, було проведено значну роботу на тлі визначення додаткових втрат аналітичними методами [3-5]. Ці методи мають певні обмеження і не можуть бути використані для складних геометричних форм. Завдяки швидкому розвитку чисельних методів таких як кінцево-елементний метод (КЕМ), розрахунок втрат від вихрових струмів у різноманітних металевих частинах трансформатора значно полегшився. Розвиток комерційних пакетів 3D КЕМ з 1990 року дозволив інженерам моделювати комплексну електромагнітну структуру трансформатора заради контролю додаткових витрат та визначення місцевих перегрівань. [6]

Основою для розрахунків втрат у елементах конструкції є розрахунок електромагнітного поля. Існуюча література з електромагнітних розрахунків пропонує щонайменше 15 основних методів для розрахунку полів, та набагато більше комбінованих та гібридних. Всі вони є схожими в теоретичному сенсі, але між ними є велика різниця у плані практичної ефективності при їх повсякденному використанні для проектування.

Найбільш популярними методами які використовуються для швидкої розробки електромагнітних систем відносяться до польових методів, які у свою чергу підрозділяються на чисельні методи (метод кінцевих елементів та метод кінцевих різниць) та інтегральні методи (метод граничних елементів та метод еквівалентних магнітних сіток).

### **Метод еквівалентних магнітних сіток**

Метод еквівалентних магнітних сіток, відомий у світі як «Equivalent Reluctance Method» (RNM) є одним з найпростіших та найшвидших методів моделювання та обчислення. Він заснований на простих та зрозумілих законах Ома та Кіргофа для магнітних кіл.

### **Метод граничних елементів та метод інтегральних рівнянь**

Метод граничних елементів більше підходить для проблем з відкритими границями, пов'язаними з конструкційними частинами з немагнітної нержавіючої сталі, де є складним визначення граничних умов. Для таких проблем з відкритими границями, деякі дослідники

використовували метод інтегральних рівнянь (МІР). Для того щоб полегшити генерацію сітки, було запропоновано МІР з моделюванням поверхневого опору. [6]

**Кінцево-елементний метод**

Зараз цей метод є одним з самих прогресивних та привабливих для науковців, дослідників та інженерів. Існує велика кількість програм, заснованих на чисельному методі кінцевих елементів. Для електромагнітних розрахунків та калькуляції втрат у елементах конструкції трансформатора можуть бути використані такі програмні пакети як : Ansys Emag, Comsol Multiphysics, Infolytica Magnet, OPERA 3D та інші. Серед безкоштовних пакетів можна виділити такі як FEMM та MaxFEM.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз розглянутих методів

Назва методу	Аналітичні методи	Метод граничних елементів	Метод кінцевих елементів	Метод еквівалентних магнітних сіток	Метод інтегральних рівнянь
Швидкість розрахунків	декілька годин	2-300 годин	2-300 годин	Від 30 хвилин до кількох годин	декілька годин
Обладнання	домашній ПК	Потужні комп'ютери	Потужні комп'ютери	домашній ПК	домашній ПК
Вартість програмного забезпечення	невисока	середня-висока	висока	невисока	невисока
Рівень складності	легкий-середній	високий	високий	легкий	середній
Похибки	До 10%	до 5%	До 5%	До 10%	До 10%
Застосування	інженерні розрахунки, наукові дослідження	наукові дослідження	наукові дослідження	інженерні розрахунки	інженерні розрахунки

**Висновок.** У статті представлені найбільш актуальні та дієві методи розрахунку втрат у елементах конструкції трансформаторів. Показані сфери використання тих чи інших методів, дана оцінка програмному забезпеченню та окреслені потенціальні напрями розвитку у галузі визначення додаткових втрат у елементах конструкції трансформаторів.

**Список використаних джерел:**

- 1.Xose M.Lopez Fernandez Non linear heating hazard assessment on transformer covers and tank walls / Xose M.Lopez Fernandez, Patricia Penabad-Duran, Janusz Turowski, Pedro M.Ribeiro. – Przegląd elektrotechniczny (Electrical review). – 2012. – vol.88, no. 7b. - pp. 28-31
- 2.A.M. Milagre 3D calculation and modeling of eddy current losses in a large power transformer / A.M. Milagre, M.V. Ferreira da Luz, G.M. Cangane, A. Komar, and P.A. Avelino // Proc. XX ICEM. – 2012. – pp.2282-2286.
- 3.Turowski J. Electromagnetic field and power losses in covers of transformers. PhD thesis. /Technical University of Lods., – 1957.- pp. 1-142.
- 4.Kazmierski M (1970) Estimating approximate methods in the analysis of electromagnetic fields in transformers (in Polish)/ Rozprawy Electrotechniczne.- № 16(1). – pp. 3-26.
- 5.Z.Valkovic, Calculation of the losses in the three-phase transformer tanks/ Proceedings IEE. – 1980. – Vol.127, Pt.C. №1. - pp. 20-25.
- 6.Kulkarni S.V. Transformer Engineering. Design and Practice/ S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde. – Marcel Dekker, Inc., New York – Basel. - 2004. – 477p.