



УДК 621.314

СПОСОБИ ОЦІНКИ ВТРАТ НА ВИХРОВІ СТРУМИ У ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Кулагін Д.О., к.т.н.,

Волков М.А.

Запорізький національний технічний університет

Тел.: 0939833777

Анотація - розглянуто практичні прийоми розрахунку втрат на вихрові струми у елементах конструкції трансформаторів. Проаналізовано особливості застосування програмного комплексу FEMM для розрахунку втрат на вихрові струми у феромагнітних тілах.

Ключові слова: трансформатор, втрати на вихрові струми, чисельні методи, FEMM

Постановка проблеми.

У феромагнітних тілах під дією змінного у часі магнітного поля наводяться вихрові струми, які ще називаються струмами Фуко. Вихрові струми, у свою чергу, призводять до втрат енергії. Ці втрати залежать від інтенсивності поля розсіювання, від розташування, форми та розмірів феромагнітних деталей та нестабільних магнітних властивостей сучасних конструкційних сталей. Втрати від вихрових струмів не тільки знижують коефіцієнт корисної дії трансформаторів, але й створюють небезпеку нагрівання окремих конструкційних частин до неприпустимих температур. Тому проблема визначення цих втрат має велике значення при створенні енергоефективного та надійного електротехнічного обладнання [1].

Аналіз останніх досліджень.

Вітчизняними науковцями у минулому столітті була проведена велика робота на тлі розрахунку втрат в елементах конструкції трансформаторів аналітичними методами [2, 3] та за допомогою фізичного моделювання [4]. Створення фізичних моделей є справою затратною у грошовому сенсі, а аналітичні методи, зазвичай, мають вузькі межі застосування, тому в наш час все більше уваги отримують чисельні методи розрахунку. У статтях [5, 6] проводиться ретельний аналіз розрахунку втрат у елементах конструкції трансформатора: аналітичних, аналітико-емпіричних та комбінованих з чисельними методами. Але більшість авторів розглядають розрахунок втрат з позиції оптимізації



[7,8], зосереджуючи увагу не на самих розрахунках, а на тому, як з їх допомогою можна зменшити втрати. Варто зазначити, що у сучасній науковій літературі у якості інструментів для розрахунку електромагнітного поля та втрат на вихрові струми використовуються програмні комплекси такі як Ansys Maxwell та Infolytica Magnet, вартість яких простягається далеко за межі купівельної спроможності українських інженерів та науковців. Увага концентрується на розрахунках електромагнітного поля у тривимірній постановці та супутній їй теорії, уникаючи двовимірної постановки та аспектів її практичного застосування.

Формулювання цілей статті.

Основною метою статті є аналіз способів оцінки втрат на вихрові струми у елементах конструкції трансформаторів за допомогою сучасних методів та загальнодоступних програмних комплексів.

Це вимагає постановки таких основних завдань як:

- вибір методів розрахунку електромагнітного поля;
- розробка практичних прийомів розрахунку втрат від вихрових струмів у конструкційних елементах трансформаторів;
- пошук та аналіз математичних та фізичних моделей для перевірки точності методів розрахунку втрат;
- розробка методів корегування отриманих результатів для наближення моделі до реального об'єкту.

Основні матеріали дослідження.

Основою для визначення втрат в елементах конструкції є розрахунок електромагнітного поля, яке у машинах та пристроях змінного струму можна вважати квазістаціонарним. Найбільш популярні та надійні методи розрахунку електромагнітних полів належать до польових, які, у свою чергу, підрозділяються на чисельні методи (метод скінченних елементів та метод кінцевих різниць) та інтегральні методи (метод граничних елементів та метод еквівалентних магнітних сіток) [9].

Як було зазначено вище, вхідними даними для розрахунку втрат від струмів Фуко у елементах конструкції силових трансформаторів є результати розрахунку електромагнітного поля. Електромагнітне поле може бути розраховане за допомогою аналітичних та чисельних методів, змодельоване на електропровідному папері, або за допомогою масштабних фізичних моделей [4]. Звісно, для простих випадків аналітичні методи дозволяють досягти необхідної точності, але для комплексних конструкцій аналітичні викладки приймають складний вигляд, також зростає і кількість припущень. На відміну від аналітичних, чисельні методи не мають цих обмежень Вони дозволяють провести розрахунки електромагнітного поля практично для будь-якого випадку, для джерел та конструкцій будь-якої конфігурації. До того ж зараз

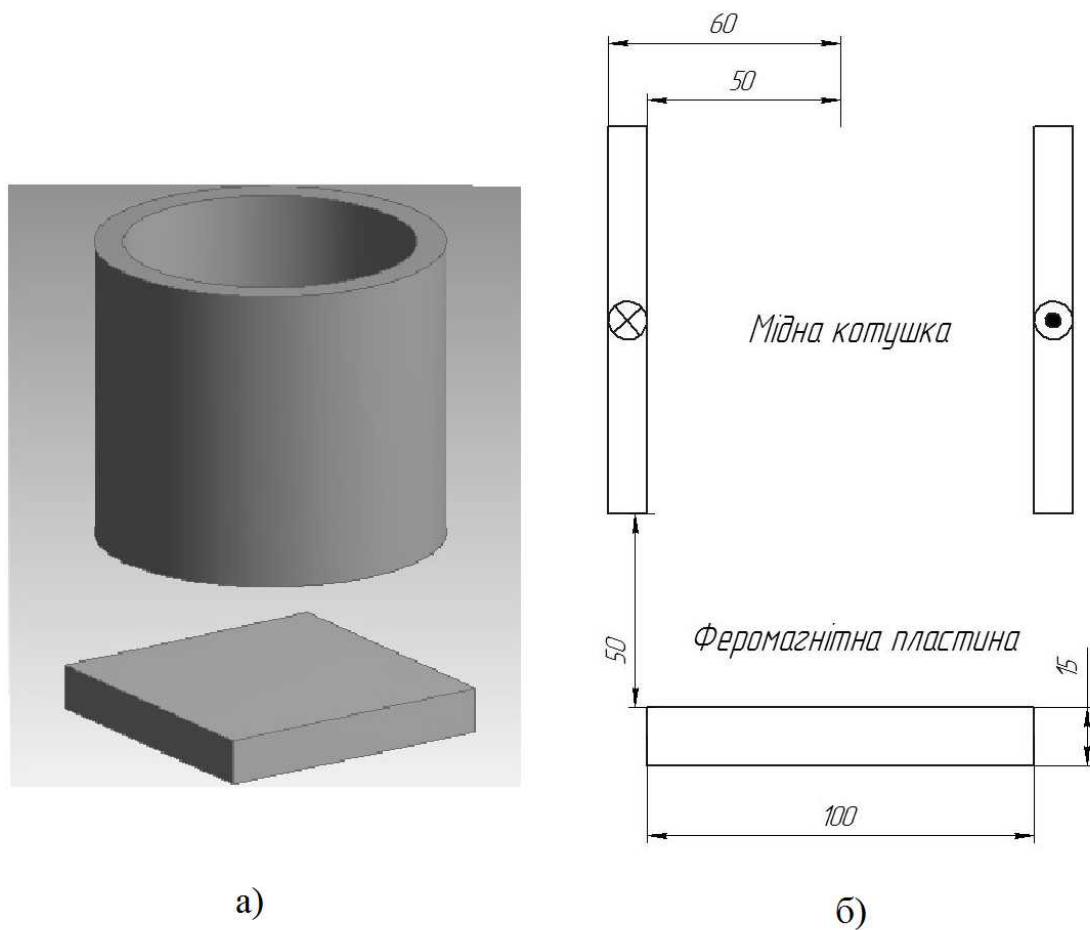


існує велика кількість програм з чисельного аналізу електромагнітного поля, таких як Magnet Infolytica, Ansys, FEMM, MaxFEMM та інші. Вище зазначене робить чисельний аналіз електромагнітного поля привабливим для інженерів-проектувальників інженерного обладнання.

Трансформатори є комплексними пристроями, які складаються з великої кількості конструкційних деталей, таких як бак, ярмові балки, пресувальні кільця, пресувальні пластини та ін. Чисельне моделювання трансформаторів вимагає досить великих затрат часу, більша частина якого витрачається на створення чисельної моделі. Тому валідацію методик розрахунку вихрових струмів у елементах конструкції трансформаторів варто проводити на моделях окремих вузлів (наприклад модель сильнострумового вводу трансформатора), або значно спрощених моделях, які у широкому сенсі відтворюють фізику зазначеного явища та можуть бути з легкістю та без зайвих грошових затрат відтворені у якості фізичної моделі. У якості прикладу таких моделей можна навести сімейство фізичних моделей «Team problem 21» [10]. Сімейство цих моделей постійно поповнюється. На даний час моделі «Team problem 21» дозволяють проводити дослідження втрат у конструкційних елементах різноманітної конфігурації виготовлених з магнітних та немагнітних сталей, визначення ефекту від впровадження електромагнітних екранів.

У якості інструменту аналізу у даній статті використовується програма для розрахунку двовірних електромагнітних полів «FEMM» [11]. Вибір пояснюється безкоштовністю, гнучкістю та точністю розрахунків електромагнітного поля цим програмним комплексом, що буде доведено наступними розрахунками. Варто зазначити, що для широкого спектру інженерних проблем двовірний розрахунок електромагнітного поля є найкращим вибором, який дає задовільну точність та оптимізаційний потенціал.

Через те, що більшість моделей сімейства «Team Problem 21» потребують розрахунку електромагнітного поля у тривимірній постановці, прийоми та методики розрахунку втрат було вирішено відпрацювати на спрощеній моделі [12]. Модель складається з мідної котушки, з провідністю $\sigma_m=50$ МСм/м та відносною магнітною проникністю $\mu_p=1$ та феромагнітної пластини з відносною магнітною проникністю яка дорівнює $\mu_p=200$, та питомою провідністю $\sigma_p=6.66$ МСм/м. Тривимірна та аналогічна їй планарна модель з нанесеними у мм розмірами зображені на рис. 1.



а)

б)

а) 3D репрезентація моделі

б) планарна модель з нанесеними розмірами

Рис. 1. Спрощена модель для відпрацювання методик розрахунку втрат на вихрові струми у елементах конструкції

У даному випадку котушка приймається одновитковою і живиться змінним струмом частотою 50 Гц та діючим значенням в $I=10000\text{A}$.

Практичні прийоми розрахунку втрат на вихрові струми у елементах конструкції:

Для розрахунку втрат в елементах конструкції трансформаторів існує велика кількість аналітичних та емпіричних формулювань, які не є універсальними, так як мають певні умови, які окреслюють межі їх застосування [9].

Розрахунок втрат, викликаних струмами Фуко у елементах конструкції виготовлених з феромагнітної сталі, слід виконувати дотримуючись таких принципів:

- основна частина втрат на вихрові струми у масивних феромагнітних тілах виділяється у тонкому поверхневому шарі. Це треба враховувати під час побудови моделі при електромагнітних розрахунках;
- розрахунок електромагнітного поля у феромагнітних тілах є затратним за часом, тому там, де це можливо, повинні застосовуватися

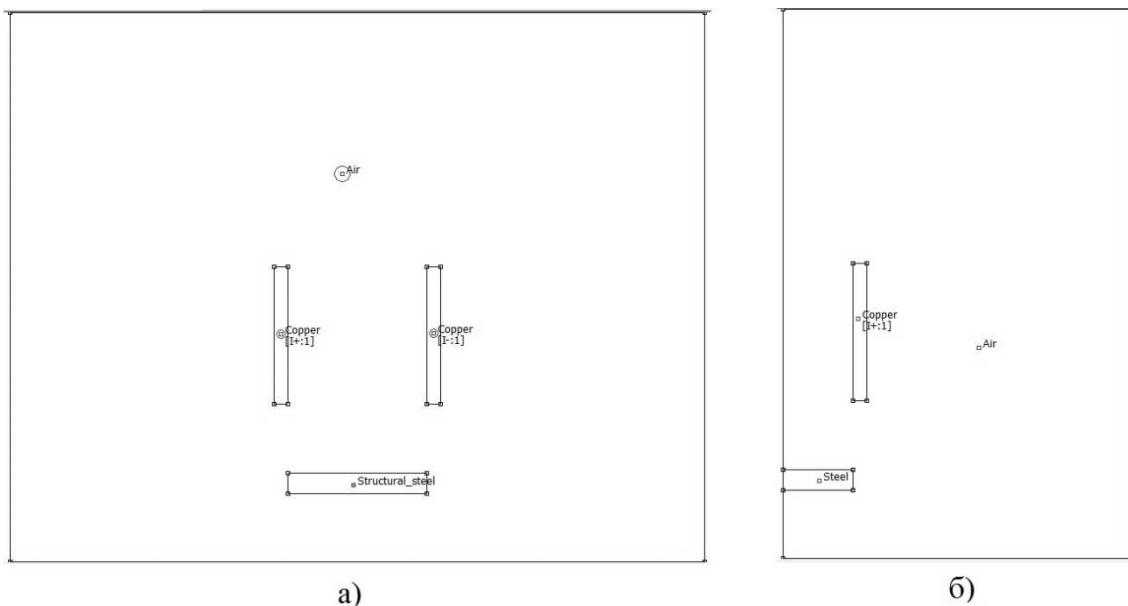
умови симетрії (тобто моделювання половини, чверті або навіть восьмої частини реального об'єкту);

- геометрія реальних об'єктів обов'язково повинна спрощуватися (позбавлення від невеликих отворів та нерівностей), тому що це не сильно впливає на загальний рівень втрат, але вносить похибку у розрахунки та збільшує їх час.

- процес розрахунку втрат повинен бути ітераційним, при цьому втрати повинні уточнюватися відповідно до зміни температури.

Особливості розрахунку втрат на вихрові струми у феромагнітних тілах із застосуванням програми FEMM.

Окрім вищезазначених принципів не слід забувати про особливості використовуваних методів та програмного забезпечення. Так як у даній статті для аналізу електромагнітного поля використовується FEMM, який передбачає двомірну постановку проблеми, є дуже важливим правильно конвертувати модель з 3D у 2D. Для ілюстрації цієї проблеми розглянемо два варіанти: модель симетрична навколо вісі Z (axisymmetric) та плоска (planar). Геометрія моделей разом з оточуючим їх повітрям зображена на рис. 2.



а) плоска постановка; б) постановка симетрична навколо вісі Z
Рис. 2. Геометрія досліджуваної моделі у плоскій та симетричній навколо вісі постановках

Вже з першого погляду зрозуміло, що симетрична навколо вісі Z модель є більш економічною у плані розрахунку часу та кількості кінцевих елементів. Програма FEMM має потужну математичну базу та широкий функціонал. Окрім розрахунку основних параметрів електромагнітного поля, FEMM має вбудований калькулятор, який дозволяє розрахувати велику кількість величин, у тому числі й втрати на

вихрові струми. Тому для розрахунку втрат, за допомогою калькулятора проінтегруємо втрати за площею їх виділення.

Після проведення розрахунків виявилося, що постановка симетрична навколо вісі Z більш точно відбиває фізику реального об'єкту (рис. 3). Втрати у ній виявилися рівними 102,5 Вт проти реальних 131,9 Вт.

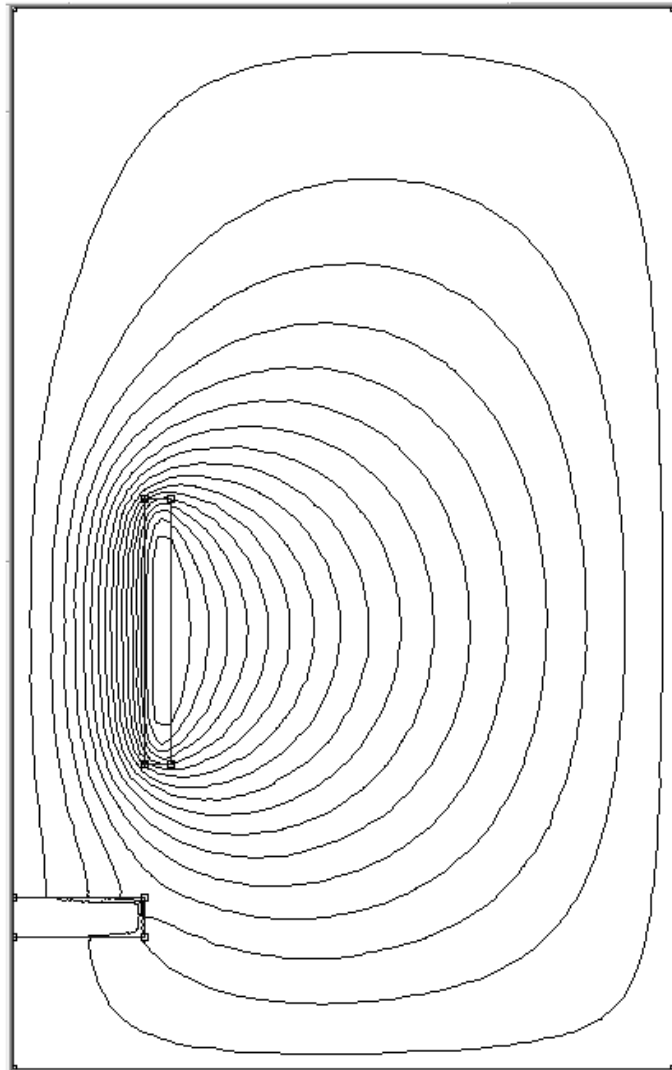


Рис. 3. Картина розподілу силових ліній індукції магнітного поля у симетричній навколо вісі Z постановці

Втрати ж у плоскій постановці (рис.4) (при глибині моделі у 100 мм) склали 272,3 Вт, що більш ніж у 2 рази вище за реальне значення.

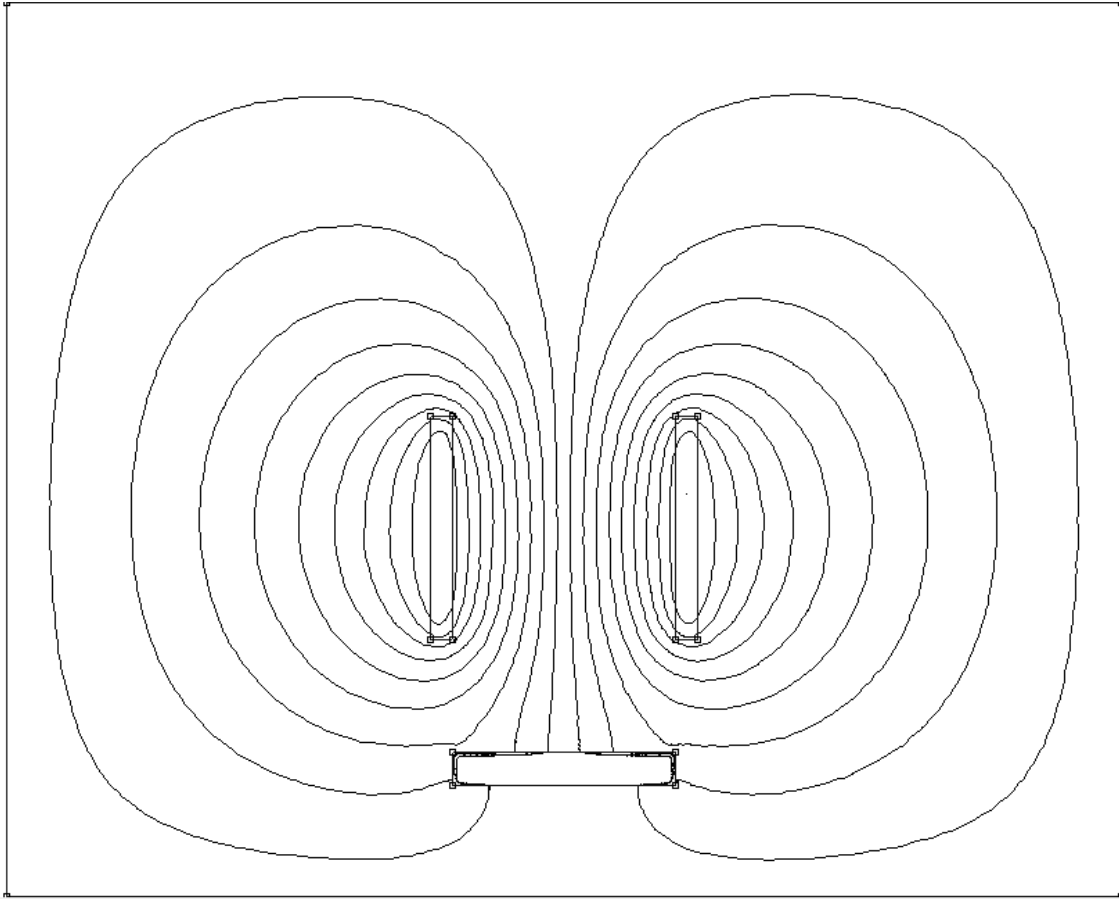


Рис. 4. Картина розподілу силових ліній індукції магнітного поля плоскій постановці

Повернемося до постановки симетричної навколо вісі Z. Взагалі-то ця постановка не зовсім вірно відбиває реальний об'єкт. Феромагнітна пластинка 100x100x15 мм у даному випадку представлена у вигляді циліндру з діаметром 100 мм та висотою 15 мм, тому введемо коефіцієнт корекції втрат через геометричну відмінність від реального об'єкту

$$K = \frac{V_n}{V_u}, \quad (1)$$

де V_n - об'єм прямокутної пластини $V_n = 150000 \text{ мм}^3$;

V_u - об'єм «циліндричної» пластини $V_u = 117809 \text{ мм}^3$.

$$K = \frac{150000}{117809} = 1,273.$$



Звідки зкорегована потужність втрат від вихрових струмів у феромагнітній пластині

$$P_{\delta} = P_{\text{розн.}} \cdot K, \quad (2)$$

де $P_{\text{розн.}}$ - втрати розраховані за допомогою вбудованого калькулятора програми FEMM.

$$P_{\delta} = 102,5 \cdot 1,273 = 130,48 \text{ Вт.}$$

Отримане значення втрат відрізняється від відомих даних лише 1%. Це свідчить про доцільність зроблених припущень і можливість застосування програми FEMM для валідації розроблених методик розрахунку, та для розрахунків втрат від вихрових струмів у таких елементах конструкції трансформатора як :

- бокові стінки бака;
- кришка бака;
- дно бака ;
- кожухи введів низької напруги;

З рис. (3-4) видно, що силові лінії індукції магнітного поля замикаються через поверхневі шари феромагнітної пластини, що узгоджується з попередніми твердженнями. Для правильного розрахунку втрат від вихрових струмів у такому випадку можна обрати два шляхи:

- зменшити розмір кінцевих елементів у феромагнітному тілі;
- розбити феромагнітне тіло на шари (товщина перших 2-3 шарів потрібна дорівнювати глибині проникнення електромагнітної хвилі);

Але краще поєднати ці два методи. Спочатку феромагнітне тіло розбивається на шари. А потім кожному шару присвоюється свій розмір скінченних елементів. Найменші елементи у поверхні феромагнетика, і чим далі від поверхні – тим більше повинен бути розмір елемента. Даний підхід дозволяє одночасно мінімізувати кількість скінченних елементів, що зменшує час розрахунку, та підвищити точність розрахунку (через урахування поверхневого ефекту).

Розраховані таким чином значення втрат повинні ітеграційно уточнюватися відповідно до температури на даному кроці розрахунку. Це викликано тим, що провідність металів змінюються разом зі зміною температури.

Висновок. У статті розглянуто практичні прийоми розрахунку втрат на вихрові струми у феромагнітних тілах та елементах конструкції трансформаторів за допомогою програмного комплексу FEMM. Показані сфери використання тих чи інших методів та особливості ро-



зрахунків у двовимірній постановці. Наведена чисельна модель може бути використана для валідації методик розрахунку додаткових втрат у силових трансформаторах. Матеріали викладені у статті можуть бути корисними інженерам-проектувальникам електротехнічного обладнання.

Список використаних джерел :

1. *Olivares-Galvan J. C.* Reduction of stray losses in flange-bolt regions of large power transformer tanks / *J. C. Olivares-Galvan, S. Magdaleno-Adame, R. Escarela-Perez, R. Ocon-Valdez et.al.* // *IEEE transactions on industrial electronics.* – 2014. – vol. 61. – pp. 4455-4463.

2. *Березовский А. А.* Расчёт добавочных потерь в баке трансформаторов / *А. А. Березовский, А. Н. Кравченко, Л. П. Нижник* // *Электричество.* – 1966. – №9. – С. 2-7.

3. *Морозов Д. Н.* Расчёт местных нагревов стержня трансформатора от добавочных потерь / *Д. Н. Морозов* // *Электричество.* – 1968. – №3. – С. 32-37.

4. *Кравченко А. Н.* Исследование общих потерь в баке силовых трансформаторов на физических моделях / *А. Н. Кравченко, Г. И. Калайда, В. В. Зиновкин* // *Проблемы технической электродинамики.* – 1971. – выпуск 51. – С. 29-34.

5. *Иванков В. Ф.* Электротепловые расчётные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования / *В. Ф. Иванков, А. В. Басова, Н. В. Шульга* // *Электротехніка та електроенергетика.* – 2014. – №2. – С. 41-53.

6. *Basova A. V.* Losses, heating in tank covers of transformers / *A. V. Basova, V. F. Ivankov, I. V. Khimjuk* // *Технічна електродинаміка.* – 2013. – № 4. – С. 74-80.

7. *V Dave K.* Use of FEM for reduction of transformer stray loss / *K. V Dave, S. M. Kanani* // *International journal of science, engineering and technology research.* – 2016. – volume 5. – issue 2, – pp. 2278-7798.

8. *Valkovic Z.* Stray losses in transformer clamping plate / *Z. Valkovic, Z. Stih* // *XVII International conference on electrical machines : September 2006 : proceedings.* – At Chania, Greece. – 2006.

9. *Кулагін Д. О.* Сучасні методи розрахунку та визначення втрат потужності в елементах конструкції трансформаторів / *Д. О. Кулагін, М. А. Волков* // *Енергетичний менеджмент : стан та перспективи розвитку – PEMS'16 : міжнар. науково-техн. та навчально-метод. конф., 30 червня – 01 липня 2016 р. – К., 2016 – С.41–42.*

10. *Cheng Z.* Team problem 21 Family (v.2009) / *Z. Cheng, N Takahashi, B. Forghani* // *17th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields 2009 : 22-26 November 2009: proceedings.* – Florianopolis, Brazil. – 2009.

11. FEMM software : <http://www.femm.info/wiki/Download>.



12. *Granganu-Cretu B.* Challenges of magnetic quasi-stationary field computations in industrial power devices/ *B. Granganu-Cretu, J. Smajic, H. Nordborg* // International symposium on numerical field calculation in electrical engineering : Proceedings of 12th international symposium., 2006., Graz, Austria, 2006 – pp. 313-317.

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ НА ВИХРЕВЫЕ ТОКИ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Кулагин Д. А., Волков М. А.

Аннотация - рассмотрены практические приёмы расчёта потерь на вихревые токи в элементах конструкции трансформаторов. Проанализированы особенности применения программного комплекса FEMM для расчёта потерь на вихревые токи в ферромагнитных телах.

METHODS OF EDDY CURRENT LOSSES ESTIMATION IN CONSTRUCTIONAL PARTS OF POWER TRANSFORMERS

D. Kulagin, M. Volkov

Summary

The article provides practical methods of eddy current losses calculation in transformer constructional parts. Features of FEMM software package use for eddy current losses calculation in ferromagnetic bodies were analysed.