

РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В БАГАТОШАРОВИХ ОБМОТКАХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ІНДУКТОРІВ

А.О. Березюк, аспірант*

І.П. Кондратенко, доктор технічних наук

На основі чисельного методу скінченних елементів розроблено методику розрахунку додаткових втрат потужності в багат шарових обмотках індукторів з урахуванням нерівномірного розподілу компонент електромагнітного поля вздовж намотки індуктора.

Циліндричний індуктор, додаткові втрати потужності, багат шарова обмотка.

Ефективність роботи пристроїв індукційного нагріву, в основному, визначається величиною його коефіцієнта корисної дії (ККД). ККД пристроїв індукційного нагріву визначається електрофізичними властивостями та геометричними розмірами завантаження та індуктора, а саме: довжиною намотки, числом шарів, кількістю витків у шарі, зазором між витками, конфігурацією індукуючого проводу. ККД розраховується як відношення потужності, що передано в завантаження (корисної потужності) до повної потужності, яка складається з корисної потужності та потужності втрат в обмотках.

Останнє стосується лише електричного ККД. Повний ККД пристроїв індукційного нагріву також повинен включати втрати, що пов'язані з теплопередачею тепла від нагрітого завантаження на елементи конструкції індуктора та навколишнє середовище. Тут буде розглядатися лише електричний ККД, проте автори добре усвідомлюють, що повний ККД індукуючого пристрою залишається пріоритетною величиною і вибір геометричних розмірів індуктора є також оптимізаційною задачею відносно вибору товщини теплоізоляційного шару.

Тим не менше, досвід створення пристроїв індукційного нагріву, особливо таких, що передбачають нагрів до температури, за якої промисла складова теплообміну не є визначальною, показує, що ККД, перш за все, визначається втратами в обмотці індуктора.

Таким чином, зниження електричних втрат в обмотці індуктора є найдоцільнішим способом підвищення ефективності роботи пристроїв індукційного нагріву.

Мета досліджень – розробка чисельної методики розрахунку додаткових втрат потужності в багат шарових обмотках індукторів з урахуванням нерівномірного розподілу електромагнітного поля вздовж намотки індуктора.

*Науковий керівник – доктор технічних наук І.П. Кондратенко

© А.О. Березюк, І.П. Кондратенко, 2013

Матеріали та методика досліджень. Відомо, що в багатошарових обмотках індукційних установок окремі шари піддаються дії різного за величиною електромагнітного поля, що призводить до збільшення електричних втрат у внутрішніх шарах обмотки (за рахунок виникнення в них вихрових струмів) [4]. Тому, до визначення додаткових втрат потужності, як в окремих витках, так і в обмотці в цілому, необхідно підходити з урахуванням особливостей розподілу електромагнітного поля в навколишньому середовищі і, звідси, конструктивних особливостей індуктора. Зрозуміло, що ці особливості стосуються взаємної просторової орієнтації векторів напруженості змінного магнітного поля і характерних розмірів провідників обмотки індуктора.

Нижче розглянемо застосування чисельного методу скінченних елементів для обчислення додаткових втрат потужності в обмотці, який враховує особливості просторового розподілу електромагнітного поля достатньо довгого багатошарового індуктора.

Розглянемо багатошаровий циліндричний індуктор (рис. 1), довжина якого втричі перевищує його діаметр. За таких умов поле в середині індуктора розподілено рівномірно [1], що дозволяє забезпечити рівномірний нагрів завантаження. Завантаженням індуктора є феромагнітна труба.

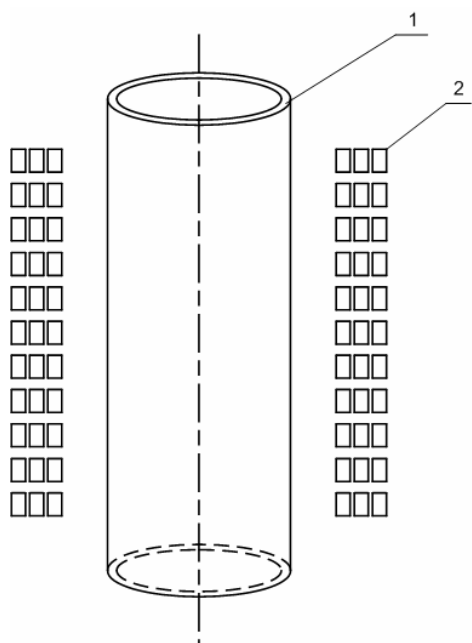


Рис. 1. Схема досліджуваної індукційної установки:

1 – завантаження індуктора;
2 – багатошарова обмотка

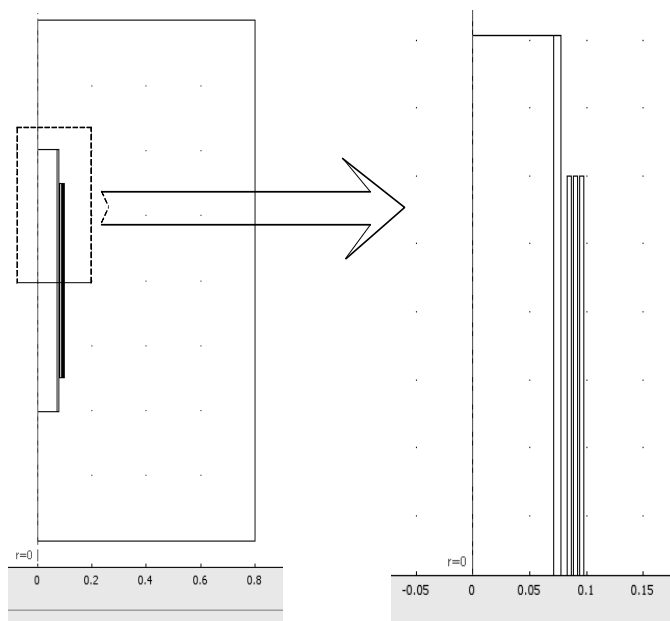


Рис. 2. Розрахункова модель багатошарового циліндричного індуктора з завантаженням у вигляді феромагнітної труби

Виконаємо моделювання електромагнітного поля для такої електромагнітної системи при збереженні рівномірного розподілу електромагнітного поля в середині індуктора. Таким чином, моделювання проводити-

меться для індуктора з такими геометричними розмірами: довжина індуктора (струмової області) $a = 0,6 \text{ м}$; висота кожного шару обмотки (витка) $h = 0,0035 \text{ м}$; кількість шарів обмотки $n = 3$; внутрішній діаметр індуктора $d = 0,165 \text{ м}$; зовнішній діаметр труби $d = 0,155 \text{ м}$, внутрішній діаметр труби $d = 0,143 \text{ м}$. Електрофізичні параметри завантаження: питома електропровідність $\sigma = 9,15 \cdot 10^6 \text{ См/м}$; магнітна проникність феромагнітного завантаження описувалася залежністю:

$$\mu = \frac{830}{1 + 0,025 B_z^9}. \quad (1)$$

Густина струму в обмотках визначалася за рекомендованою для електричних машин величиною струму в провідниках. Нехай густина струму в провіднику становитиме $2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Багатошарова (тришарова) обмотка індуктора в програмному середовищі Comsol задавалася окремими струмовими областями з нульовою електропровідністю. Густина струму в кожній області є однаковою, а області відокремлені одна від одної електроізоляційними шарами. Розрахункова модель такого індуктора наведена на рис. 2.

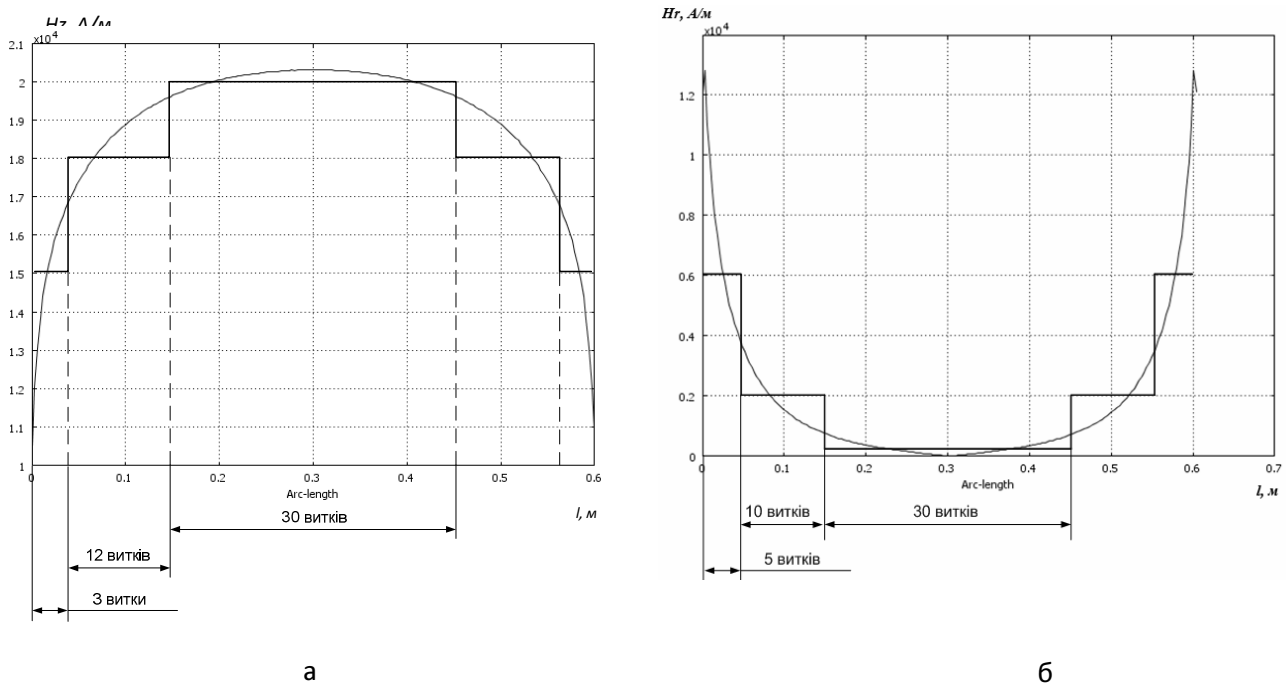


Рис. 3. Поділ струмової області на зони з постійною величиною напруженості магнітного поля у внутрішньому шарі:
а – z-складової; б – r-складової

Для коректного розв'язку електромагнітної задачі на границях розподілення областей задавалися такі умови:

- умова азимутальної симетрії відносно осі, $r = 0$;
- умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях, $A_\varphi = 0$;

– на всіх інших границях автоматично присвоюється умова неперервності (на границях обмотки і стержня), $n(H_1 - H_2) = 0$, де H – напруженість магнітного поля, A/m ; n – вектор зовнішньої нормалі.

Таким чином, для кожного з шарів обмотки в осьовій зоні був визначений розподіл r - та z -складових напруженості магнітного поля H . За результатами розподілу складових напруженості магнітного поля струмова область кожного шару обмотки була поділена на зони, в яких величини напруженості магнітного поля приймалися сталими (рис.3). Тому подальший розв'язок задачі зводиться до знаходження втрат потужності в одиничному витку та подальшим поширенням розв'язку на інші витки відповідних зон.

Таким чином, виокремивши в кожній зоні одиничний виток (рис. 4) з відповідними електрофізичними властивостями (питома електропровідність $\sigma = 5 \cdot 10^7 \text{ См/м}$), під дією попередньо визначеної величини r - та z -складових напруженості магнітного поля в кожній зоні (див. рис. 3), за допомогою засобів інтегрування за радіусом у осесиметричній постановці (вбудованих у пакеті Comsol), можна знайти втрати потужності в ньому.

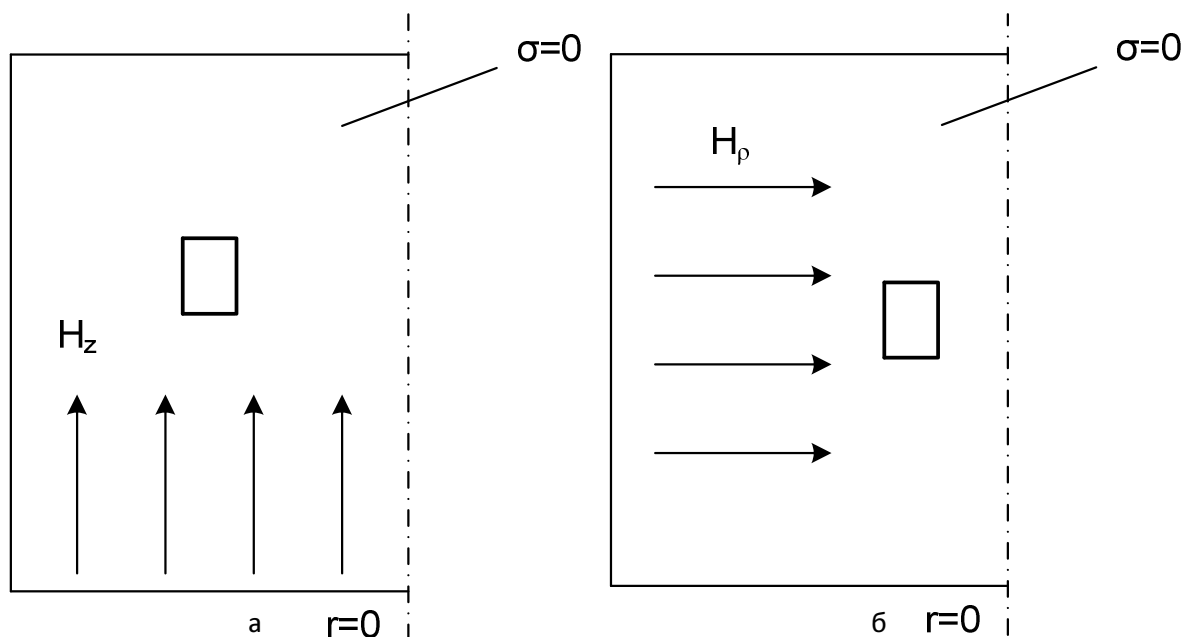


Рис.4. Виділення одиничного витка індуктора в сторонньому магнітному полі:

а – при дії на виток r -складової напруженості магнітного поля;
б – при дії на виток z -складової напруженості магнітного поля

Для цієї задачі на межах розподілення областей задавались такі граничні умови:

- умова азимутальної симетрії відносно осі, $r = 0$;
- умова магнітної ізоляції на бокових границях, $A_\phi = 0$;
- на зовнішній границі розрахункової області задавалась умова $H_\phi = H$, де H – напруженість магнітного поля відповідної зони;

– на границях провідника автоматично присвоюється умова неперервності $n(H_1 - H_2) = 0$.

Отже, знаючи кількість витків у кожній зоні, можна знайти додаткові втрати потужності як у кожному шарі, так і в обмотці у цілому.

Результати досліджень. Таким чином, вирішивши таку комбіновану задачу, можна розрахувати додаткові втрати потужності в обмотках циліндричного індуктора з врахуванням неоднорідності розподілу ρ - та z -складових напруженості магнітного поля вздовж намотки індуктора.

Також були проведені дослідження для інших геометричних параметрів завантаження (змінювався діаметр труби та товщина стінки труби) при незмінній величині густини струму в обмотках. Встановлено, що втрати в обмотках багат шарового індуктора (в нашому випадку тришарового) не залежать від геометрії завантаження.

При порівнянні результатів чисельного моделювання з відомими виразами розрахунку додаткових втрат потужності в обмотках, наприклад трансформаторів [3] чи електричних двигунів [2], які характеризуються досить великим значенням магнітної проникності (завдяки феромагнітному осерддю), значення коефіцієнта додаткових втрат у багат шаровій обмотці індуктора, розрахованого чисельним методом, значно відрізнялося. Так, при розрахунку втрат в обмотці запропонованим чисельним методом коефіцієнт додаткових втрат становив 1,028, а коефіцієнт додаткових втрат, розрахований за виразом для трансформаторів:

$$k_d = 1 + g\beta^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (n^2 - 0,2), \quad (2)$$

становив 1,0045. У формулі (2) $g = 1,73$ – емпіричний коефіцієнт; a – розмір провідника, перпендикулярний напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання, см; n – число провідників обмотки в напрямку, перпендикулярному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання; ρ – питома густина матеріалу проводу, кг/м³.

Таку розбіжність результатів можна пояснити більш нерівномірним розподілом магнітного поля вздовж намотки індуктора у порівнянні з трансформатором, для якого характерна наявність феромагнітного осердя.

Для багат шарового циліндричного індуктора, геометричні параметри якого наведено вище, за допомогою вимірювального приладу RLC-метр серії BR2876 було проведено експериментальне дослідження щодо визначення електричного опору обмотки на частоті 50 Гц.

Встановлено, що експериментальна величина активного опору обмотки індуктора, визначена на частоті 50 Гц, становить 0,102 Ом, значення якої збігається з розрахованим за розробленою методикою визначення додаткових втрат.

Висновки

1. Запропоновано методику розрахунку додаткових втрат потужності в багат шарових обмотках циліндричних індукторів, в основу якої покладено чисельне моделювання процесу індукційного нагріву в об'ємі всієї установки та визначення розподілу складових електромагнітного по-

ля вздовж намотки багат шарового індуктора, що дозволяє визначити електрофізичні умови, в яких знаходяться витки обмотки;

2. Запропонований підхід дозволяє визначити додаткові втрати потужності в окремих групах провідників та в багат шаровій обмотці в цілому, і тим самим підвищити точність розрахунку енергетичних характеристик циліндричних індукторів.

Список літератури

1. Кондратенко І.П. Дослідження розподілу температури в завантаженні циліндричного індуктора / І.П. Кондратенко, В.П. Лисенко, Д.С. Комарчук // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК» – К., 2012. – Вип. 184, ч.1. – С.74 – 82.

2. Постников И.М. Проектирование электрических машин / И.М. Постников. – К.: Госэнергоиздат, 1960. – 910 с.

3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: [учеб. пособие для вузов.] / П.М. Тихомиров. – [4-е изд., перераб. и доп.] – М.: Энергия, 1976. – 544 с.

4. Установки индукционного нагрева: [учеб. пособие для вузов; под ред. А.Е.Слухоцкого] / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.Б. Бамунэр. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

На основе численного метода конечных элементов разработана методика расчета дополнительных потерь мощности в многослойных обмотках индукторов с учетом неравномерного распределения компонент электромагнитного поля вдоль намотки индуктора.

Цилиндрический индуктор, дополнительные потери мощности, многослойная обмотка.

On the basis of the numerical finite element method the method of calculation of additional power losses in the windings of the multilayer inductors with the uneven distribution of components of the electromagnetic field along the winding inductor has been developed.

Cylindrical inductor, additional power losses, multilayer winding.

УДК 631.22

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛИЦЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАКУУМНИХ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ

В.О. Лазоренко, кандидат технічних наук

Викладено результати вдосконалення системи теплопостачання теплиць з використанням традиційних джерел енергії та вакуумних геліоколекторів, а також результати дослідження її енергоефективності з використанням теплозахисних екранів і штори. Визначено коефіцієнт заміщення теплового навантаження.

© В.О. Лазоренко, 2013