

# Осердя з порошкових матеріалів

Артем Терейковський, директор, ТОВ «НВП АСТЕРА»

E-mail: ferrite@ukr.net

У DC/DC-перетворювачах резонансного типу з топологією LLC зменшення розмірів дроселя можливе завдяки підвищенню робочої частоти та збільшенню індукції в осерді. Для роботи на високих частотах матеріал осердя повинен мати низькі динамічні втрати. З іншого боку, висока відносна проникність осердя дає змогу знизити втрати в обмотці. Найважливішою характеристикою дроселя є стабільність його параметрів у широкому діапазоні значень коефіцієнта потужності перетворювача.

Зниження динамічних втрат і підвищення проникності МПМ, як і раніше, є складним завданням (див. CHIP NEWS, № 2–3 (227–228), 2024). Односкладове осердя, тобто виготовлене з одного матеріалу, не завжди забезпечує необхідне поєднання параметрів. Застосування композитних МПМ або гібридних осердь з різних МПМ дає змогу знизити сумарні втрати в дроселі та покращити його  $L-I$  характеристику (залежність індуктивності від струму). У CHIP NEWS, № 9 (234), 2024 описано приклад гібридного осердя, зібраного із двох однакових за розміром вихідних осердь із різних матеріалів. Недоліком такої конструкції є нерівномірний розподіл магнітного потоку [199] як усередині кожного з осердь, так і між ними, що зменшує питому енергоємність дроселя.

Для оптимізації розподілу магнітного потоку придумано безліч способів, більшість яких вимагають застосування осердь нестандартних конфігурацій [200, 201] або спеціальних методів намотування [202]. Такі дроселі значно дорожчі та складніші у виробництві, тому не набули широкого поширення. Економним рішенням може стати комбінація осердь з матеріалів, характеристики яких істотно відрізняються. Непогані результати досягаються за поєднання, наприклад, порошкового і феритового осердь, або феритового та стрічкового осердя з аморфного чи нанокристалічного сплаву [203]. Правильне взаємне розташування осердь дозволяє ефективно використовувати властивості обох матеріалів [204, 205].

Порівняно з МПМ, ферити мають вищу проникність і менші динамічні втрати на високих частотах. Ці властивості сприяють збільшенню питомої енергоємності дроселя, але низька індукція насичення робить осердя з фериту неефективними для застосування в дроселях із сильним підмагнічуванням. Для запобігання насичення у феритове осердя вводиться дискретний зазор, зі збільшенням якого знижується ефективна проникність осердя та зростають втрати.

DCB-характеристики всіх комерційних МПМ описуються простими формулами (13), (19) з мінімальним набором коефіцієнтів. Таким чином,  $L-I$  характеристика дроселя з порошковим осердям визначається параметрами матеріалу, що використовується, і не може бути змінена. На відміну від МПМ,  $B-H$  характеристика феритових осердь залежить як від розмірів зазора, так і від його форми. Для керування  $L-I$

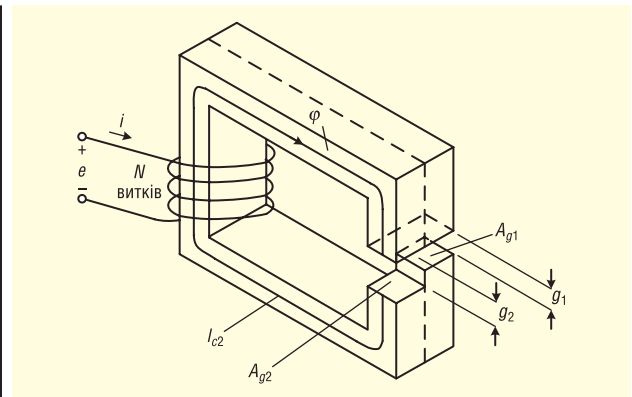


Рис. 54. Схематичне зображення осердя зі східчастим зазором [206]

характеристикою необхідно створити умови, за яких різні ділянки осердя насичуються за різних значень індукції. Такий ефект досягається при змінній величині зазора. Найпростіший випадок змінного зазора зображено на рисунку 54.

Осердя зі східчастим зазором можна умовно вважати таким, що складається з двох частин, кожна з яких має свій розмір зазора. При зростанні індукції першою насичується частина осердя з меншим зазором, завдяки чому загальна індуктивність дроселя стрибкоподібно зменшується. Цей метод дає змогу керувати  $L-I$  характеристикою на певній вузькій ділянці. Такі дроселі зі змінною індуктивністю (swinging inductor) знайшли застосування, наприклад, у колах регулювання напруги випрямлячів.

Більш точно  $L-I$  характеристика може бути задана за допомогою похилого зазора, величина якого змінюється від мінімального ( $g$ ) до максимального ( $G$ ) значення (рис. 55). Похилий зазор можна розглядати як нескінченну кількість

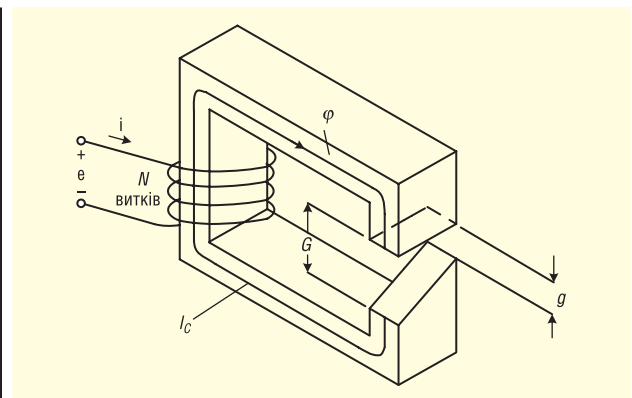
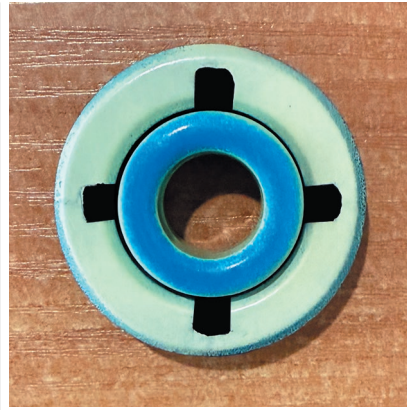


Рис. 55. Схематичне зображення осердя з похилим зазором [206]

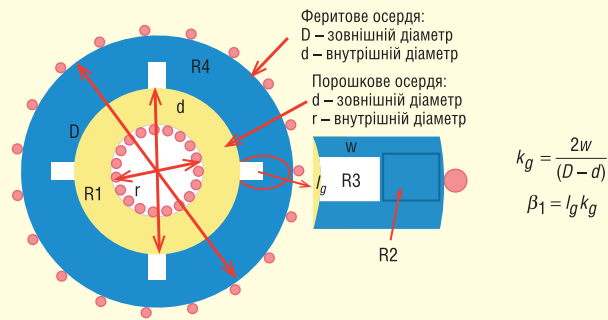


**Рис. 56. Гібридне осердя з порошкового та феритового осердь**

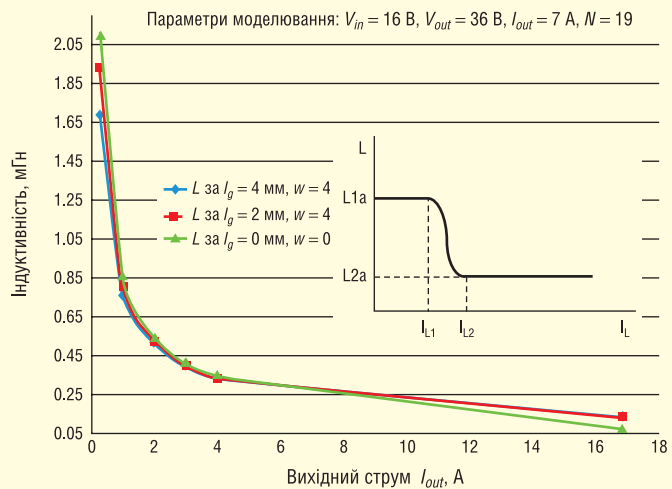
малих сідчастих зазорів, що забезпечує плавну  $L-I$  характеристику в ширшому діапазоні значень струму. На відміну від МГПМ з «фіксованою»  $B-H$  характеристикою, похилий зазор у феритовому осерді дає змогу оптимізувати  $L-I$  характеристику дроселя для конкретного завдання, наприклад, накопичувального дроселя коректора коефіцієнта потужності (ККП).

Поєднання порошкового та феритового осердь може бути виконано кількома способами. Наприклад, при концентричному розташуванні порошкове осердя розміщується всередині феритового. Необхідні зазори у феритовому осерді збільшують крижість такої конструкції, тому замість сідчастого або похилого зазора роблять кілька часткових зазорів, спрямованих від внутрішнього радіуса до зовнішнього. Такий спосіб дає змогу зберегти достатню міцність гібридного осердя (Рис. 56), полегшує намотування та зменшує втрати завдяки витісненню магнітного поля, що випирає, з зони зазора у внутрішнє осердя з високою індукцією насичення  $B_{sat}$ . За слабкої індукції феритове осердя зберігає високу ефективну проникність  $\mu_{eff}$ , що дає змогу зменшити кількість витків обмотки. У разі насичення феритового осердя його магнітний опір зростає, внаслідок чого частина магнітного потоку перетікає у внутрішнє осердя. Потрібна  $L-I$  характеристика дроселя досягається ретельним вибором розмірів зазора.

Wai Keung Mo і співавтори [204, 205] досліджували параметри дроселя підвищувального перетворювача (boost converter) з гібридним осердям, яке було зібрано з порошкового T94-52 [207] та феритового TX42/26/13-3C90 [208], у якому попередньо прорізували чотири рівновіддалені часткові зазори (рис. 56). У роботах вивчено залежність  $L-I$  характеристики дроселя від розмірів зазора



**Рис. 57. Фізична модель гібридного осердя з концентричним розташуванням**



**Рис. 58. Вплив розміру зазора на індуктивність дроселя [204]**

у феритовому осерді, також проведено порівняння з еквівалентними дроселями з осердями з односкладових МГПМ.

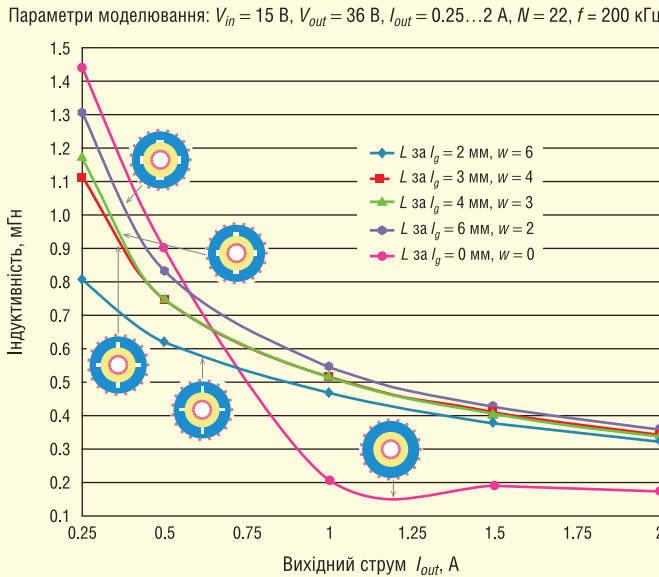
**Дисклеймер.** У процесі аналізу робіт [204, 205] було виявлено помилки, яких припустилися автори під час виведення кількох формул. Використовуючи неправильні формули, автори запропонували некоректну методику визначення оптимальних розмірів зазора у феритовому осерді. Це ставить під сумнів вірогідність представлених ними результатів моделювання параметрів дроселів за допомогою програми ANSYS 2D Maxwell [209]. Попри вказані помилки, запропонована авторами гібридна технологія дозволяє проектувати ефективніші дроселі у порівнянні з дроселями на осердях із традиційних порошкових матеріалів (за умови, що задані параметри — однакові). Наведені нижче формули (25–35) верифіковані.

Комплементарну до зазора частину феритового осердя називатимемо перемичкою. Фізична модель гібридного осердя зображена на рисунку 57.

Моделювання характеристик дроселів проводилося за допомогою симулятора ANSYS 2D Maxwell [209]. На рисунку 58 відображена залежність індуктивності

дроселя від вхідного струму за різного розміру зазора у феритовому осерді. За слабого струму в обмотці індуктивність дроселя ( $L1a$ ) визначається високою проникністю феритового осердя завдяки малому магнітному опору перемички ( $R2$ ). Після того, як струм в обмотці перевищить певне значення  $I_{L1}$ , перемичка швидко насичується, що призводить до зниження індуктивності до значення ( $L2a < L1a$ ), яке визначається розмірами зазора ( $l_g, k_g$ ). Насичення перемички еквівалентно збільшенню зазора у феритовому осерді. Ефект крайового поля, що виникає на краях зазора, сприяє витісненню магнітного потоку з феритового осердя в порошок. Чим вища напруженість поля, тим більша частина магнітного потоку протікає через порошкове осердя, й навпаки.

На рисунку 59 наведено результати моделювання індуктивності дроселя залежно від значення вихідного струму. Бузкова лінія відображає індуктивність дроселя без зазора у феритовому осерді, тоді як інші лінії відповідають індуктивності дроселя з чотирма рівновіддаленими зазорами  $2 \times 6$  мм,  $3 \times 4$  мм,  $4 \times 3$  мм,  $6 \times 2$  мм. За рівних добуток ширини та глибини зазорів, індуктивності дроселів помітно відрізняються.



**Рис. 59. Ефективна індуктивність дроселя залежно від вихідного струму за різних розмірів зазора [204, 205]**

Початкова індуктивність дроселя з феритовим осердям без зазора вища, ніж у варіанта з будь-яким значенням зазора, проте вона різко знижується і досягає мінімуму при струмі 1.2 А, оскільки зовнішнє кільце насичується. Зазор у феритовому осерді запобігає насиченню, тому  $L-I$  характеристика дроселя стає більш пологою.

На рисунку 60 показано розподіл індукції в обох частинах гібридного осердя за розміром зазора 3 × 4 мм. Вочевидь, індукція в будь-якій із зон феритового осердя не перевищує  $B_{SAT} = 0.41$  Т.

Для функціонального аналізу гібридного осердя, фізична модель якого наведена на рисунку 56, використовуємо магнітну модель, зображену на рисунку 61. Оскільки магнітний опір порошкового осердя набагато перевищує магнітний опір ненасиченого феритового осердя, значення  $R1$  у подальших розрахунках можна вважати константою. Таким чи-

ном, індуктивність дроселя може бути визначена за допомогою рівнянь (25–28):

$$L = N^2 \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R4 + R23} \right), \quad (25)$$

$$R23 = \frac{l_g}{\mu_0 A2 (k_g + \mu_2 (1 - k_g))}, \quad (26)$$

$$R1 = \frac{l_1}{\mu_1 A1}, \quad (27)$$

$$R4 = \frac{l_2 - l_g}{\mu_0 \mu_2 A2}, \quad (28)$$

де

$$A2 = \frac{h_2(D - d)}{2}, \quad A1 = \frac{h_1(d - r)}{2},$$

$$l_2 = \frac{\pi(D + d)}{2}, \quad l_1 = \frac{\pi(r + d)}{2},$$

$$R23 = R2 \cdot R3 / (R2 + R3), \quad 0 < k_g < 1.$$

У розглянутому прикладі у феритовому осерді зроблено чотири зазори, тому у формулах (26) і (28) бере участь сумарне значення  $l_g$  усіх чотирьох зазорів.

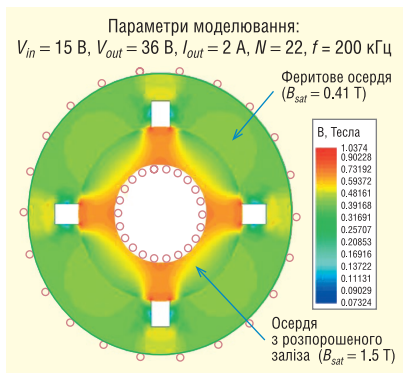
**УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ**

- $B1$  — пікова індукція в порошковому осерді
- $B2$  — пікова індукція у феритовому осерді
- $B_{sat}$  — індукція насичення феритового осердя
- $I_{pk}$  — піковий вхідний струм
- $I_{in}$  — середній вхідний струм
- $I_{out}$  — вихідний струм
- $\mu_o$  — початкова магнітна проникність вакууму
- $\mu_1$  — проникність порошкового осердя
- $\mu_2$  — проникність феритового осердя
- $\mu_{eff}$  — ефективна проникність феритового осердя із зазором
- $L_i$  — ефективна індуктивність гібридного осердя
- $L1$  — окрема індуктивність порошкового осердя
- $L2$  — окрема індуктивність феритового осердя
- $k_g$  — відносна глибина зазора у феритовому осерді
- $l_g$  — ширина зазора
- $w$  — глибина зазора
- $l_1$  — середня довжина магнітної лінії порошкового осердя
- $l_2$  — середня довжина магнітної лінії феритового осердя
- $A1$  — ефективна площа поперечного перерізу порошкового осердя
- $A2$  — ефективна площа поперечного перерізу феритового осердя
- $N$  — кількість витків обмотки дроселя
- $R1$  — магнітний опір порошкового осердя
- $R2$  — магнітний опір перемички феритового осердя
- $R3$  — магнітний опір зазора феритового осердя
- $R4$  — магнітний опір феритового осердя (за винятком  $R2$ )

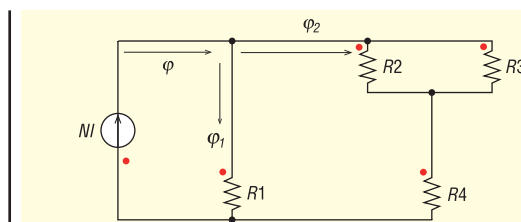
Підставляючи (26), (27) і (28) у (25), отримуємо:

$$L_i = \mu_0 N^2 \left( \frac{\mu_1 A1}{l_1} + \frac{\mu_{eff} A2}{l_2} \right). \quad (29)$$

$L_i$  є сумою окремих індуктивностей  $L1$  і  $L2$ , що створюються порошковим



**Рис. 60. Розподіл індукції в гібридному осерді [205]**



**Рис. 61. Магнітна модель гібридного осердя з частковим зазором [204]**

- $NI$  — магнітуруйша сила
- $R1$  — опір порошкового осердя
- $R2$  — опір перемички
- $R3$  — опір зазору
- $R4$  — опір феритового осердя за винятком перемички

і феритовим осердями відповідно, при цьому ефективна проникність феритового осердя визначається як:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_2}{\left(1 + \frac{k_g \frac{l_g}{l_2} \left(1 - \frac{1}{\mu_2}\right)}{\frac{k_g}{\mu_2} + (1 - k_g)}\right)} \quad (30)$$

Для зручності розрахунків введемо такі коефіцієнти:

$$\alpha_1 = 1 - 1/\mu_2, \beta_1 = l_g k_g \quad (31)$$

Оскільки  $\mu_2 \gg 1$ , значення  $k_g/\mu_2$  нехтувано мале. Це дає змогу подати формулу (30) у вигляді:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_2}{\left(1 + \frac{l_g k_g \alpha_1}{l_2 (1 - k_g)}\right)} \quad (32)$$

Підставляючи (31) у (32) і скорочуючи  $l_2$ , отримуємо:

$$\mu_{eff} = \mu_2 \frac{1 - k_g}{\left(1 - k_g + \frac{\beta_1 \alpha_1}{l_2}\right)} \quad (33)$$

Площу поперечного перерізу гібридного осердя можна виразити через площу перерізу феритового осердя і співвідношення між відповідними параметрами осердь у вигляді:

$$A_2 \left(1 + \frac{k_2 k_3}{k_1}\right),$$

де  $k_1 = l_1/l_2$ ,  $k_2 = A_1/A_2$ ,  $k_3 = \mu_1/\mu_{eff}$ .

Рівняння (29) набуває вигляду:

$$L_t = \frac{\mu_0 \mu_{eff} N^2 A_2}{l_2} \left(1 + \frac{k_2 k_3}{k_1}\right) \quad (34)$$

З (34) можемо визначити кількість витків обмотки  $N$ :

$$N = \sqrt{\frac{L_t}{\frac{\mu_0 \mu_{eff} A_2}{l_2} \left(1 + \frac{k_2 k_3}{k_1}\right)}} \quad (35)$$

Пікова індукція у феритовому осерді визначається як:

$$B_2 = \frac{\mu_0 \mu_2 N I_{pk}}{l_2} \quad (36)$$

З одного боку, для зменшення числа витків бажано отримати максимальну ефективну проникність  $\mu_{eff}$  феритового осердя за помірного підмагнічування. З іншого боку, індукція у феритовому осерді має бути нижчою за індукцію насичення ( $B_2 < B_{sat}$ ). Ключовими параметрами, які обмежують індукцію у феритовому осерді, є розмір зазора ( $l_g, k_g$ ) і кількість витків  $N$ .

Формули (33–36) дають змогу визначити, чи виконується умова  $B_2 < B_{sat}$  для обраних складників гібридного осердя. Спрощена методика визначення оптимальних розмірів зазора та кількості витків буде розглянута пізніше.

На наступному етапі необхідно оцінити втрати в осерді [210, 211] та обмотці дроселя. Якщо розрахункові значення перевищують допустимі, слід провести повторний розрахунок з іншою парою осердь. Для зниження втрат в обмотці бажано збільшити діаметр дроту або використувати літцендрат [167], [212–214].

З практичної точки зору, виконання зазорів на внутрішньому радіусі феритового кільця може виявитися складним. При розташуванні осердь одне поверх іншого радіально орієнтовані зазори у феритовому осерді робляться на площині, що прилягає до порошкового осердя. Як і описаному раніше прикладі (CHIP NEWS, № 9 (234), 2024)), така конструкція потребує близьких значень зовнішнього і внутрішнього діаметрів обох осердь. За необхідності можна застосувати два феритових осердя, розташованих по обидва боки порошкового.

У наступній частині буде розглянуто найпоширеніший спосіб поєднання порошкового і феритового осердь.

## Далі буде

**Більш детальну інформацію щодо застосування осердь із МПМ та їх придбання можна отримати, звернувшись до компанії ТОВ «НВП АСТЕРА»:**

**61072, Україна, м. Харків, вул. Тобольська, 42, оф. 222, факс: (+38) 057-728-1808, тел.: (+38) 057-757-2859, (+38) 050-323-3763, (+38) 067-575-4440, (+38) 068-616-7777, e-mail: ferrite@ukr.net, www.ferrite.com.ua**

## Література:

199. M. Kaçki, M. S. Rylko, J. G. Hayes and C. R. Sullivan. *Magnetic material selection for EMI filters. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, pp. 2350–2356.*
200. J. Seshadri, D. Xu, K. Ngo. *Inductor structure with improved space. Electronic Lett., vol. 48, p. 164–165, 2012.*
201. L. Wang, Z. Hu, Y.-F. Liu, Y. Pei and X. Yang. *Multipermeability Inductors for Increasing the Inductance and Improving the Efficiency of High-Frequency DC/DC Converters. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 9, pp. 4402–4413, 2013.*
202. Y. Yan, J. Moss, K. D. T. Ngo, Y. Mei, G. Lu. *Additive Manufacturing of Toroid Inductor for Power Electronics Applications. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, pp. 5709–5714, 2017.*
203. S. Avala, N. Yalla, P. Agarwal. *Hybrid Magnetic Core for Downsizing the Inductor in LLC Converter. IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 2022*
204. W. K. Mo, K. M. Passch. *Hybrid magnetics and power Applications. 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPEPOWERENG), 2017. pp. 235–240.*
205. W. K. Mo, K. M. Paasch, E. Krenz. *Hybrid magnetics and power converter applications. 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017, pp. 1–6.*
206. W. G. Hurley, W. H. Wölflle. *Transformers and Inductors for Power Electronics. John Wiley and Sons Ltd., 2013, pp. 301–314.*
207. <https://datasheets.micrometals.com/T94-52-DataSheet.pdf>
208. [https://www.ferroxcube.com/upload/media/product/file/Pr\\_ds/T\\_42\\_26\\_13.pdf](https://www.ferroxcube.com/upload/media/product/file/Pr_ds/T_42_26_13.pdf)
209. <https://www.ansys.com>
210. Dr. Ray Ridley, A. Nace. *Modeling Ferrite Core Losses. Switching Power Magazine, 2006.*
211. P. Mukherjee, переклад О. Гнеушев. *Оптимальная эффективность: расчет потерь ферритовых сердечников. Силовая Электроника, № 4, 2009.*
212. G. Slama. *Litz wire — When is it an Advantage? APEC 2018, San Antonio, TX, USA.*
213. Phan-Tan, Chi-Thang & Ngo, Thuong & Nguyen-Quang, Nam. *Design Procedure and Implementation of Inductor Using Litz Wires for Induction Heating. 2023, pp. 370–374.*
214. S. Ramesh, K. Karunanithi, G. Thirumurugan, S. P. Raja. *A Litz Wire-Based Inductor Model for a DC-DC Converter-Fed Single-Phase Inverter. Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering, 2024, pp. 1–9.*