

ОЦІНКА ВТРАТ В ДРОСЕЛЯХ УЗГОДЖУЮЧИХ ФІЛЬТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Мовчанюк А. В., к.т.н., доц.; Середін А. П.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

Складовою частиною майже усіх ультразвукових генераторів, що керують ультразвуковими перетворювачами, є узгоджуючий фільтр. Це пов'язано з тим, що транзистори ультразвукового генератора працюють в ключовому режимі, а для живлення ультразвукового перетворювача бажано використовувати гармонійну напругу. Невиконання цієї умови веде до зниження к.к.д. ультразвукової апаратури. Невід'ємною складовою частиною узгоджуючого фільтра є один або декілька дроселів [1,2]. В зв'язку з тим, що дроселі узгоджуючого фільтра встановлюються між ключовим каскадом і ультразвуковим перетворювачем, можна стверджувати, що втрати в дроселях будуть суттєво впливати на енергетичну ефективність ультразвукової апаратури. Слід відмітити, що в літературі відсутні рекомендації, щодо проектування та конструювання дроселів узгоджуючих фільтрів, що працюють на ультразвукових частотах. Тому питання, пов'язані з особливостями проектування таких дроселів є актуальними. Отже, розглядають омичні втрати, втрати на скін-ефект та втрати від ефекту близькості. Втрати від скін-ефекту залежать від робочої частоти, а втрати від ефекту близькості від відстані між витками та кількістю шарів обмотки. Збільшення опору враховують за допомогою коефіцієнта, на який множать опір провода обмотки на постійному струмі [3] (збережено позначення першоджерела):

$$K_f = (1 + F) + \left(\frac{K \cdot n \cdot d}{2 \cdot D} \right)^2 \cdot G,$$

де: $(1 + F)$ — коефіцієнт, що враховує збільшення опору від поверхневого ефекту (скін-ефекту), K - коефіцієнт, що враховує вплив на ефект близькості основних розмірів котушки, n -число витків котушки, d - діаметр проводу без ізоляції, D - зовнішній діаметр котушки, G - коефіцієнт, що враховує вплив частоти та діаметра провода на ефект близькості.

Для визначення коефіцієнтів $(1 + F)$ и G , розраховують для робочої частоти f допоміжну величину, що дорівнює відношенню товщини провода без ізоляції до товщини скін-шару на робочій частоті:

$$\Delta = \frac{d\sqrt{f}}{92.8} \cdot 10^3.$$

Після розрахунку допоміжної величини Δ по таблицям визначають значення коефіцієнтів $(1 + F)$ та G . Коефіцієнт K в залежності від відношення

довжини обмотки до зовнішнього діаметру та багатошаровій намотці знаходиться графічним методом. При використанні такого підходу дуже важко оптимізувати вибір діаметру проводу та конструкції дроселя. Перспективними є використання формули Доуела [4], уточненої в [5, 6]. Вона не тільки дозволяє оптимізувати конструкцію дроселя, а й врахувати вплив вищих гармонік струму [7].

Відношення еквівалентної товщини проводу обмотки до товщини скін-шару складе:

$$\xi_{\eta} = \frac{\pi \cdot d}{2} \sqrt{\frac{f_P \cdot \mu_0 \cdot \eta}{\rho_M}}, \quad \eta = \frac{d_M}{D_M},$$

де: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна стала; $\rho_M \approx 1,72 \cdot 10^{-8}$ – питомий опір міді (Ом/м).

Опір змінному струму мідного дроту в обмотці дроселя складе:

$$R_{\Sigma} = R_M \cdot \left(\xi_{\eta} \cdot \frac{\sinh(2 \cdot \xi_{\eta}) + \sin(2 \cdot \xi_{\eta})}{\cosh(2 \cdot \xi_{\eta}) - \cos(2 \cdot \xi_{\eta})} + \left(\frac{3}{2} \right) \cdot \xi_{\eta}^2 \cdot \eta^2 \cdot \left((2 \cdot m_{СП})^2 - 1 \right) \frac{\sinh(\xi_{\eta}) - \sin(\xi_{\eta})}{\cosh(\xi_{\eta}) + \cos(\xi_{\eta})} \right),$$

де: $m_{СП}$ — кількість шарів обмотки дроселя.

Як бачимо, формула Доуела подібна до формули, що використовується при графоаналітичних розрахунках. Але слід зазначити, що при співставленні результатів, зробленими за різними методиками показує їх суттєву розбіжність з експериментальними даними. На жаль, для графоаналітичного методу розрахунку авторами не було наведено спосіб виконання обмотки, але можна припустити, що мова іде про намотку «універсаль». Тому дані отримані графоаналітичним методом відображують найменші втрати. Формула Доуела та її похідні виконана на основі одномірної

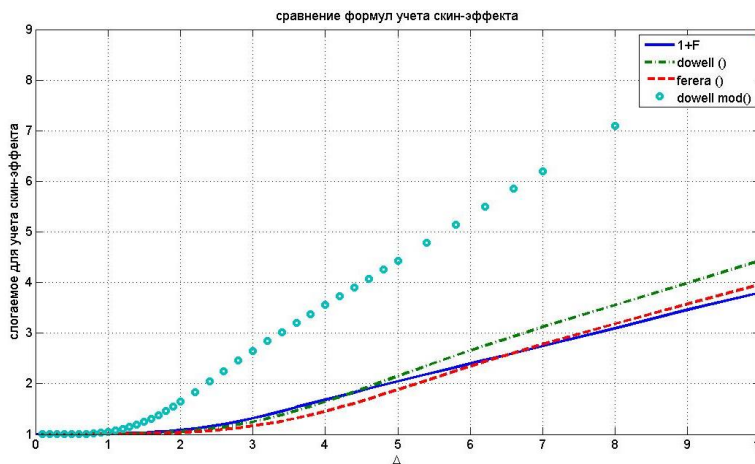


Рисунок 1а. Порівняння формул для розрахунків втрат від скін-ефекту

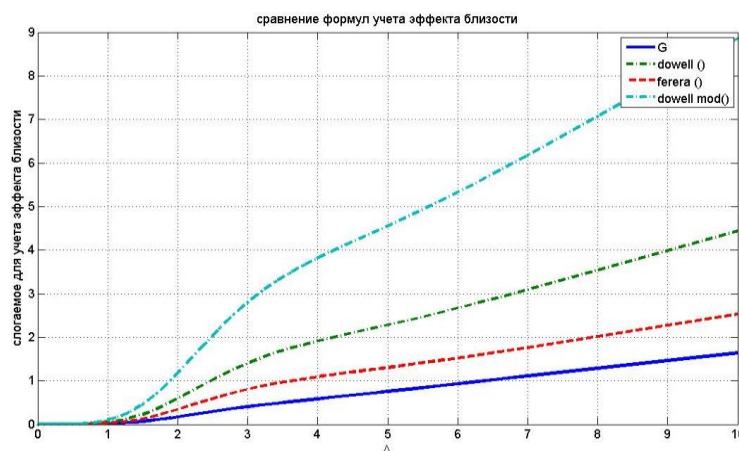


Рисунок 1б. Порівняння формул для розрахунків втрат від ефекту близькості

моделі. Тому результати розрахунків можуть суттєво відрізнятися від експериментальних даних (рис. 1).

Як бачимо, з зростом частоти відбувається суттєва розбіжність в розрахунках, що пов'язані з впливом ефекту близькості. Тому можна стверджувати, що отримання більш точних аналітичних виразів є перспективною задачею. Як показали експериментальні дослідження, втрати від ефекту близькості можна зменшити обранням проводу з різним відношенням η .

Перелік посилань

1. Movchanyuk, A., Fesich, V., Sushko, I. and Vistyzenko, Y., 2016, September. The research of L-type matching filter parameters. In Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), 2016 International Conference (pp. 1-5). IEEE.
2. Vistyzenko, Y., Movchanyuk, A., Sushko, I. and Novosad, A., 2017, September. LL-type filter for piezoelectric transducer. In Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 2017 International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
3. Волгов, В.А., 1977. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры.
4. Dowell, P.L., 1966, August. Effects of eddy currents in transformer windings. In Proceedings of the Institution of Electrical Engineers (Vol. 113, No. 8, pp. 1387-1394). IET Digital Library.
5. Ferreira, J.A., 1994. Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components. IEEE transactions on Power Electronics, 9(1), pp.127-131.
6. Nan, X. and Sullivan, C.R., 2004, June. Simplified high-accuracy calculation of eddy-current loss in round-wire windings. In Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual (Vol. 2, pp. 873-879). IEEE.
7. Hurley, W.G., Gath, E. and Breslin, J.G., 2000. Optimizing the ac resistance of multilayer transformer windings with arbitrary current waveforms. IEEE transactions on power electronics, 15(2), pp.369-376.

Анотація

Представлені результати порівняння результатів розрахунків втрат в проводі обмотки узгоджувачів дроселів ультразвукових генераторів. В результаті порівняльного аналізу доведено, що результати розрахунків за різними моделями потенційно мають велику розбіжність. Окреслено перспективний метод впливу на втрати в дроселях за рахунок вибору різних за конструкцією проводів.

Ключові слова: узгоджувач дросель, шкін-ефект, ефект близькості.

Аннотация

Представлены результаты сравнения методик расчета потерь в проводе обмотки согласующих дроселей ультразвуковых генераторов. В результате сравнительного анализа доказано, что результаты расчетов потенциально имеют большое расхождение. Предложен перспективный метод воздействия на потери в дроселях за счет выбора различных по конструкции проводов.

Ключевые слова: согласующий фильтр, скин-эффект, эффект близости.

Abstract

The results of a comparison of the methods for calculating losses in the winding wire of the matching chokes of ultrasonic generators are presented. As a result of the comparative analysis, it is proved that the results of calculations potentially have a large discrepancy. A perspective method of influencing the losses in throttles is proposed due to the choice of wires different in design.

Keywords: matching filter, skin depth, eddy current.