

АНАЛІЗ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ІНДУКТИВНОСТІ ОДИНОЧНОГО ПРЯМОГО ПРОВІДНИКА ТА КРУГОВОГО ВИТКА ЗІ СТРУМОМ

Середін А. П., аспірант, м.н.с.; Мовчанюк А. В., к.т.н., доцент;

Каращук Я. Ф., студент

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

До складу ряду радіоелектронних пристроїв входять індуктивні елементи, наприклад, дроселі, трансформатори, контурні котушки і т.д. Їх можна охарактеризувати двома основними величинами – індуктивністю та добротністю, яка в свою чергу пов'язана з опором втрат [1]. Зазвичай область робочих частот індуктивного компонента можна поділити на область низьких частот, коли можна нехтувати впливом розподілу струму в перерізі провідників обмотки, та область високих частот, коли цей вплив враховується. Розглянемо відомі підходи до розрахунку індуктивності провідників. Попередньо визначимо, що аналізу піддаватимуться методики розрахунку індуктивності провідників круглого перерізу (як найбільш поширених на практиці) в області низьких частот.

Зазвичай, пропонується розділяти власну індуктивність провідника на дві складові – зовнішню (L_z) та внутрішню ($L_{вн}$) індуктивності провідника [2]. Це зумовлено тим, що області магнітного поля всередині та зовні провідника утворюють, відповідно, внутрішнє та зовнішнє потокозчеплення. Таким чином, кінцевий вираз для розрахунку індуктивності прямого провідника:

$$L = L_z + L_{вн} = \frac{\mu\mu_0 l_{np}}{8\pi} + \frac{\mu_0 l_{np}}{2\pi} \left(\ln \frac{4l_{np}}{d_0} - 1 \right) = \frac{\mu_0 l_{np}}{2\pi} \left(\ln \frac{4l_{np}}{d_0} - 0.75 \right) \quad (1)$$

де: μ – магнітна проникність матеріалу провідника (для міді $\mu = 1$); μ_0 – магнітна стала; l_{np} – довжина провідника; d_0 – діаметр провідника.

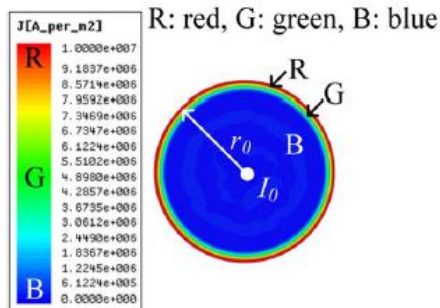


Рисунок 1. Розподіл струму у поперечному перерізі для одиночного прямого провідника [3]

Аналіз виразу показує, що розподіл струму в перерізі провідника не впливає на індуктивність. Однак, з ростом частоти за рахунок скін-ефекту струм в перерізі провідника буде витіснятись на поверхню [3] (рис. 1). Відповідно, можна припустити, що це призведе до зміни величини індуктивності, при чому з ростом частоти цей вплив зростатиме. Тобто, струмопровідна область матиме кільцеву форму по

усій довжині провідника. Розрахунок за (1) даватиме похибку, яка буде зростати з ростом частоти. Розглянемо одиночний прямий провідник згорнутий у кільце, що дасть змогу змоделювати поведінку обмоток реальних індуктивних елементів. Розрахунки індуктивності кільця зі струмом [2,4,5] різняться допущеннями та спрощеннями при вирішенні задачі розрахунку індуктивності.

Для виведення виразу індуктивності кільця з круглого проводу в [4] круглий провідник замінюють еквівалентною тонкою фольгою. Потім від фольги здійснюється перехід до прямокутних провідників, а потім вже до круглих провідників еквівалентного перерізу. Кінцевий вираз для індуктивності обмотки має вигляд:

$$L = \frac{\mu_0(m + 0.5)^3 \cdot N_l^2 \cdot h \cdot l_T}{3b} \quad (2)$$

де: μ_0 – магнітна стала; m – кількість шарів; N_l – кількість витків в шарі; h – висота провідника (для квадратного перерізу); l_T – довжина намотки; b – ширина намотки.

Аналіз виразу (2) показує, що не враховано вплив товщини ізоляції провідника та діаметр кільця. Обидва ці параметри будуть впливати на ефект близькості, а відповідно на розподіл струму в перерізі провідника. Як зазначалося, це може потенційно впливати на величину кінцевої індуктивності.

У [2] взагалі пропонується враховувати вплив геометрії обмотки та нехтувати розподілом струму:

$$L = \mu_0 R \left[\ln \frac{8R}{r} - \frac{7}{4} + \frac{r^2}{8R^2} \left(\ln \frac{8R}{r} + \frac{1}{3} \right) \right] \quad (3)$$

де: μ_0 – магнітна стала; R – радіус витка; r – радіус провідника.

Даний підхід, як і попередній, не враховує вплив товщини ізоляції провідника. Також обидва підходи не враховують спотворення провідної області при згортанні прямого провідника у кільце.

Розглянемо, яким чином зміниться форма провідної області при кільцевій формі провідника шляхом моделювання методом кінцевих елементів (рис. 2). Як бачимо, максимальна густина струму зосереджена у внутрішній частині (т.з. «кільцевий ефект»), що не враховувалося у виразах (1-3) для розрахунку індуктивності. Дана нерівномірність розподілу струму у поперечному перерізі провідника впливає і на кінцеву індуктивність витка в цілому. Вищеназвані особливості розподілу струму у кільцевому провіднику були враховані у [5], де аналітично було встановлено, що у провіднику, згорнутому у кільце найбільша густина струму буде спостерігатися у внутрішній частині витка, що цілком узгоджується з результатами моделювання. Однак в [5] задача була вирішена для одного витка, відповідно ефект близь

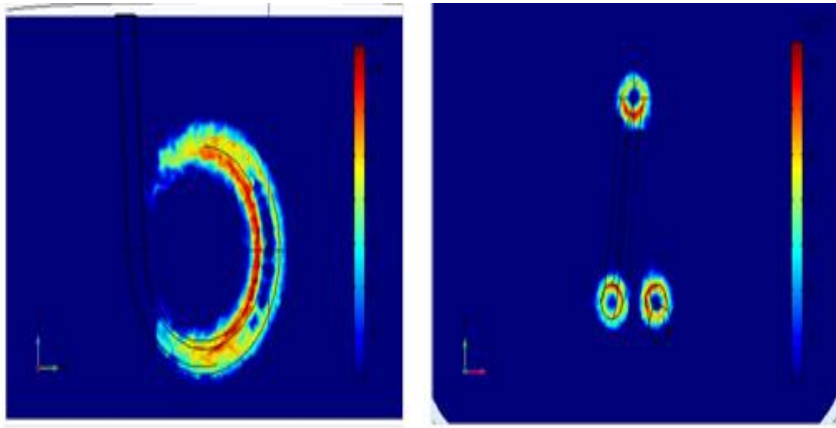


Рисунок 2. Розподіл струму в одиночному круговому витку

кості взагалі не враховується при спробі розширити рішення на декілька витків.

Аналіз показує, що всі відомі методики розрахунку індуктивності мають свої недоліки. Зазвичай в інженерній

практиці точності розрахунків індуктивності по вищезгаданим методикам достатньо. Але при зростанні величини струмів, коли потужність, що розсіюється індуктивним елементом є суттєвою, використання відомих підходів не дозволяє дати коректну оцінку втратам в обмотках. В свою чергу це призводить до збільшення витрат на виробництво індуктивних елементів. Тому вдосконалення відомих методів розрахунку, як індуктивності, так і закону розподілу струму в перерізі провідника індуктивного елемента є актуальною задачею.

Перелік посилань

1. Коваль А.В. Радиодетали, радиокомпоненты и их расчет/В.И. Возненко, В.М. Кронкевич; ред. А.В. Коваль. – М.: Советское радио, 1977. – 368 с.
2. Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей/Л.А. Возненко, П.Л. Калантаров; – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
3. Jinwook Kim and Young-Jin Park, "Approximate Closed-Form Formula for Calculating Ohmic Resistance in Coils of Parallel Round Wires With Unequal Pitches", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.62, no.6, pp.3482-3489, June 2019.
4. Dowell P.L., Effects of eddy currents in transformer winding, Proc. IEE., vol. 113, no.8, pp.1387-1394, August 1966.
5. Фок В.А. Скин-эффект в кольце круглого сечения. Журнал русского физико-химического общества. Часть физическая. 1930. Том LXII. Вып.3. С.281-297.

Анотація

Представлено короткий аналіз відомих методик розрахунку індуктивності прямого провідника та круглого витка на основі досліджень Доуела, Цейтліна та Фока, за результатами якого визначено, що методика Фока є найбільш точною у плані врахування особливостей протікання струму у кільцевому провіднику, окреслено перспективи подальших досліджень.

Ключові слова: індуктивність, кільцевий ефект, круговий виток.

Abstract

The brief analysis of the known calculation methods for the inductance of straight conductor and round winding based on the studies of Dowell, Zeitlin and Fock is presented. It is determined that the Fock method is the most accurate in terms of current flow in the ring conductor. The prospects for further research are outlined.

Keywords: inductance, ring effect, circular turn.