

В.А. АНДРІЙЧУК, М.С. НАКОНЕЧНИЙ
Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

ВПЛИВ ФОРМИ ПЛАНАРНИХ ІНДУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЇХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ

Анотація. В роботі проведено розрахунок індуктивності та добротності планарних індуктивних елементів, круглої, квадратної та трикутної конфігурацій, з різною кількістю витків. Зроблено аналіз впливу форми індуктивних елементів на їх електромагнітні параметри. Показано, що при однакових розмірах індуктивність та добротність котушок круглої форми є кращими у порівнянні з котушками інших конфігурацій.

Ключові слова: індуктивний елемент, індуктивність, опір, добротність

V.A. ANDRIYCHUK, M.S. NAKONECHNY
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

EFFECT FORM OF PLANAR INDUCTIVE ELEMENT ON THEIR ELECTROMAGNETIC PARAMETERS

Abstract – The work of modern electronic ballasts devices at high frequencies enables them to reduce overall dimensions for planar structures. Aim of the paper is to calculate the electromagnetic parameters of planar coils.

For the calculation of coil inductance it turns are replaced corresponding closed contours. Inductance planar coils defined as the sum of their own and mutual inductances. Was calculated dependence planar inductor coils from their shape, and shown a inductance of triangular coil is greater compared to other coil's form. It is shown that the same area of a triangle planar inductor more than the round to 32 %.

Since of the increase in the area of the coil, increases the length of wire, was calculated according inductance coil and its resistance. In the case of multilayer inductors, circular coil delivers 17-14% less resistance compared to other configurations with the same inductance. Reducing ohmic resistance leads to an increase quality factor and reduce heat losses. So that shown round form is better compared to the square and triangular.

Keywords: inductive element, inductance, resistance, quality factor.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Тенденції в розвитку сучасних компонентів радіоелектронної апаратури спрямовані на зменшення їх габаритних розмірів та покращення електротехнічних параметрів. Великий інтерес в цьому представляють індуктивні елементи (ІЕ), які широко використовуються в схемах живлення енергоощадних джерел світла.

Сучасна пускорегулювальна апаратура для енергозберігаючих ламп КЛЛ та СД працює на високих частотах 30–100 кГц, що дозволяє зменшити їх конфігурацію та габарити до плоских конструкцій. Такі конструкції впроваджуються як елементи інтегральних схем, а також у вигляді друкованих плат для трансформаторів силової електроніки[1].

Планарні котушки індуктивності дозволяють виготовляти різного роду мініатюрні пристрої, які по своїй формі можна розділити на меандри і спіральні [2].

ІЕ типу меандр використовуються для одержання низьких значень індуктивності, зазвичай менше 10 нГн, і використовуються в основному в мікросхемах що працюють на частотах порядку 1–10 МГц [3]. На відміну від котушок такого типу спіральні (кругові і прямокутні) володіють більш високою індуктивністю.

Якщо електричні контури виготовлені з немагнітного матеріалу, та розміщені в повітрі, то магнітну проникність оточуючого середовища можна вважати рівною $\mu = 1$. В такому випадку власна та взаємна індуктивність контурів залежить від форми, розмірів та їх взаємного розміщення, а також від характеру розподілу струмів в провіднику [4]. Поряд з цим ставиться вимога зниження як маси так і габаритів ІЕ, при забезпеченні необхідних значень індуктивності та добротності. Тому є **актуальним** дослідження залежності цих параметрів від конфігурації котушки.

Мета і завдання дослідження.

Розрахувати вплив конфігурації планарних ІЕ на їх індуктивність та добротність, та визначити найбільш оптимальну форму котушки.

Виклад основного матеріалу та методика досліджень.

Індуктивність планарного ІЕ який складається з n витків може бути представлена як сума їх власної та взаємної індуктивностей:

$$L = \sum_{k=1}^n L_k + \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n M_{km}, \quad k \neq m, \quad (1)$$

де L_k – власна індуктивність n -го витка;

M_{km} – взаємна індуктивність k -го і m -го витка.

Взаємна індуктивність двох окремих витків визначається як

$$M_{km} = \frac{m_0}{4p} \int_{l_k} \int_{l_m} \frac{dl_k dl_m}{a}, \quad (2)$$

де m_0 – магнітна стала яка дорівнює $4p \times 10^{-7}$ Гн/м,

a – найкоротша відстань від елемента dl_k k -го витка до елемента dl_m m -го витка.

З (2) можна зробити висновок що як взаємна індуктивність витків, так і індуктивність планарного ІЕ буде залежати від їх взаємного розміщення тобто від форми котушки.

Для розрахунку індуктивності окремого витка котушки замінено її відповідними замкнутими витками рис. 1.

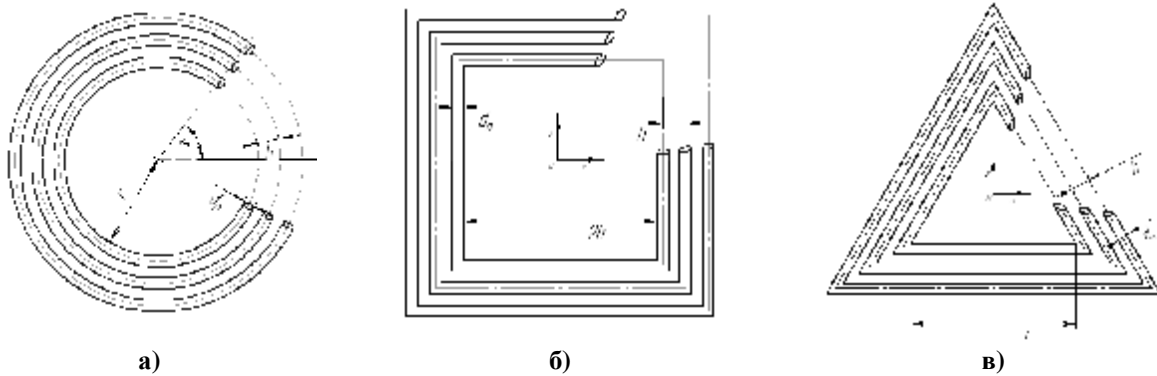


Рис. 1. Схематичне представлення планарних котушок різної форми: а) – кругла, б) – квадратна, в) – трикутна

Згідно з виразами, наведеними в [4], власна індуктивність одношарової кругової котушки – $L_{кр.}$, квадратної – $L_{кв.}$, та у вигляді рівностороннього трикутника – $L_{тр.}$, може бути визначена з рівнянь:

$$L_{кр} = m_0 \sum_{k=0}^{w-1} \sum_{m=0}^{w-1} \int_0^p \frac{C_{1кр} C_{2кр} \cos j \, dj}{\sqrt{C_{1кр}^2 + C_{2кр}^2 - 2C_{1кр} C_{2кр} \cos j}} \quad (3)$$

$$C_{1кр} = r + \frac{d_n}{2} + hm, \quad C_{2кр} = r + hk;$$

$$L_{кв} = \frac{2m_0}{p} \sum_{k=0}^{w-1} \sum_{m=0}^{w-1} \int_{x_1=0}^{b+\frac{d_n}{2}+kh} \int_{x_2=-b-mh}^{b+mh} \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_1-x_2)^2 + C_{1кв}^2}} - \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_1-x_2)^2 + C_{2кв}^2}}$$

$$C_{1кв} = (m-k)h - \frac{d_n}{2}, \quad C_{2кв} = 2b + (m+k)h + \frac{d_n}{2}; \quad (4)$$

$$L_{тр} = \frac{3m_0}{2p} \sum_{k=0}^{w-1} \sum_{m=0}^{w-1} \int_{x_1=0}^{\frac{c+d_n\sqrt{3}}{2} + \frac{c+hm\sqrt{3}}{2}} \int_{x_2=-\frac{c}{2}-hk\sqrt{3}}^{\frac{c}{2}+hk\sqrt{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{(x_1-x_2)^2 + C_{1тр}^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x_1-x_2)^2 + ((\frac{c}{2}-|x_2|)\sqrt{3}) + C_{2тр}^2}} \right) dx_1 dx_2 \quad (5)$$

$$C_{1тр} = \frac{d_n}{2} + h(m-k), \quad C_{2тр} = \frac{d_n}{2} + h(m+2k)$$

де m та k – порядковий номер витка котушки (внутрішній виток прийнято за нульовий);
 w – кількість витків;
 d_n – діаметр провідника;
 h – відстань між витками.

Якщо геометричні розміри котушки задано в мм то її індуктивність визначатиметься в мГн.

Згідно ГОСТ 23.751-86 встановлено допустиме струмове навантаження для провідних доріжок друкованих плат, виготовлених з мідної фольги, що становить 100-250 А/мм². Зазвичай нижня межа приймається для внутрішніх провідників багатошарових друкованих плат, а верхня – для зовнішніх шарів. Вважається, що теплообмін провідників на зовнішніх шарах кращий і що вони здатні пропускати більші

струмові навантаження без небезпечного перегріву.

Враховуючи що струм ЛЛ не перевищує 1 А, можна визначити площу поперечного перерізу провідника $s_n = 0,01 \text{ мм}^2$

На рис 2 показано залежність індуктивності плоских одношарових котушок з різною кількістю витків. Відстань між витками $h = 0,1 \text{ мм}$ та діаметр $d_n = 0,11 \text{ мм}$ провідника для всіх типів котушок однакові. Розмір сторони квадратної котушки $2b$, та сторона трикутної c підібрані таким чином, щоб каркаси витків кругової котушки були вписані у відповідні каркаси квадратної та трикутної котушки:

$$r = b = \frac{\sqrt{3}}{6} c. \quad (6)$$

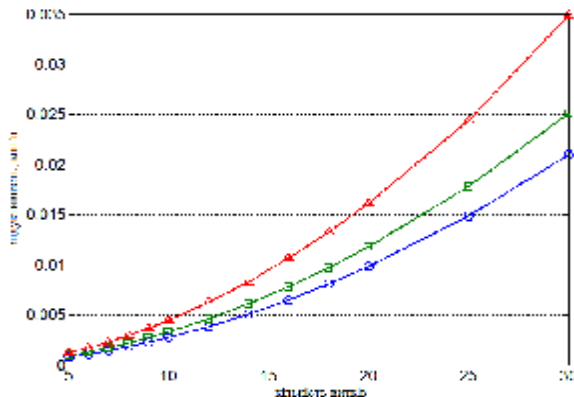


Рис. 2. Залежність індуктивності від кількості витків для різного типу плоских котушок

З рис. 2 видно що індуктивність для трикутної котушки зростає із збільшенням кількості витків сильніше у порівнянні з котушками інших форм. Це пояснюється більшою площею внутрішнього витка, а також більшим приростом загальної площі зі збільшенням кількості витків.

Оскільки котушка повинна забезпечити потрібну індуктивність при малих габаритних розмірах, тому є доцільним розрахувати залежність індуктивності від її площі. Площі квадратної та трикутної котушок можна, згідно умови (6), виразити через площу круглої за такими рівняннями:

$$S_{кр} = p(r + wd_n + (w-1)h)^2; \quad (7)$$

$$S_{кв} = 4(r + wd_n + (w-1)h)^2; \quad (8)$$

$$S_{тр} = 3\sqrt{3}(r + wd_n + (w-1)h)^2. \quad (9)$$

На рис. 3 показано відношення індуктивності котушок (мГн) від їх площі (мм^2). Маркери на графіках відповідають кількості витків, $w = [5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30]$.

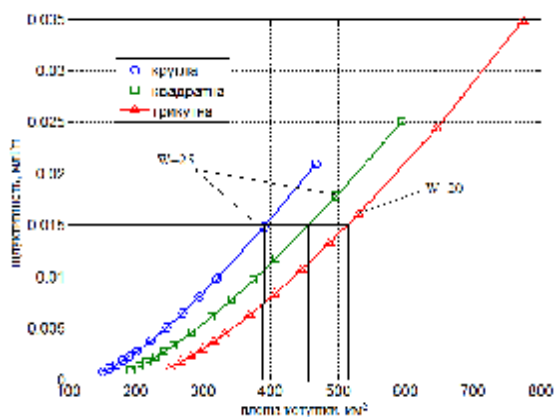


Рис. 3. Залежність індуктивності котушок різної форми від їх площі

З рисунка видно, що для забезпечення індуктивності (наприклад 0,015 мГн), котушка круглої форми матиме 25 витків, квадратної приблизно 23, а трикутної 19. З рівнянь (7-9) видно що площі котушок різної форми матимуть різний приріст зі збільшенням кількості витків, що в свою чергу призведе до збільшення загальної площі котушок. На рис. 3 показано, що при вказаній індуктивності площі котушок будуть суттєво відрізнятися. Найменшу площу (390 мм^2) матиме котушка круглої форми, а найбільшу – трикутної (515 мм^2).

Збільшення кількості витків супроводжується збільшенням довжини провідника, що призводить до зростання омичного опору котушки, та збільшення витрат матеріалу на

її виготовлення. Загальну довжину провідника котушки з w витків можна розрахувати як суму периметрів її каркасів. В такому випадку вирази для довжини провідників досліджуваних конфігурацій котушок матимуть вигляд:

$$l_{кр} = \sum_{m=1}^w 2p(r + wd_n + (w-1)h), \quad (10)$$

$$l_{кв} = \sum_{m=1}^w 8(r + wd_n + (w-1)h), \quad (11)$$

$$l_{тр} = \sum_{m=1}^w 6\sqrt{3}(r + wd_n + (w-1)h). \quad (12)$$

Опір провідника визначається з рівняння:

$$R = r \frac{l_{\text{кот}}}{S_n} \quad (13)$$

де r - питомий опір матеріалу (у випадку котушки виготовленої з мідного провідника $r = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом/м}$);

$l_{\text{кот}}$ - довжина провідника котушки відповідної форми в метрах.

Для визначення добротності індуктивних елементів важливим є його активний опір. Тому було проведено визначення зв'язку між L та R . На рис. 4 наведені відповідність значення опору котушки і її індуктивності.

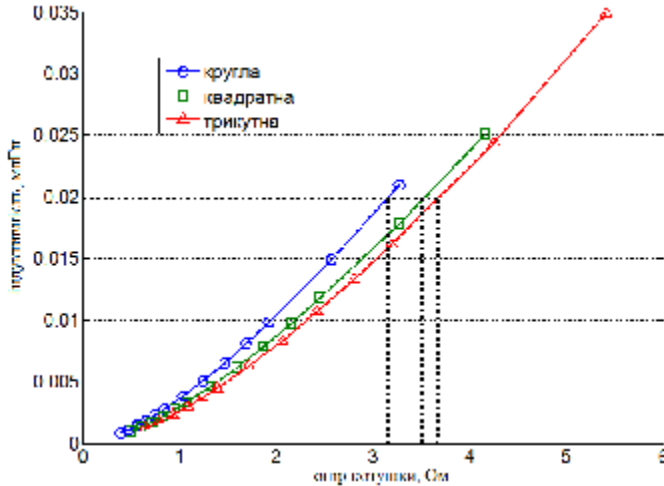


Рис. 4. Відповідність індуктивності котушок різної форми та їх опору

котушок при збереженні площі їх можна виготовляти у вигляді багатшарових конструкцій.

$$L_{kp} = m_0 \sum_{k=0}^{w-1} \sum_{m=0}^{w-1} \sum_{n=0}^{q-1} \sum_{f=0}^{q-1} \int_0^p \frac{B_{1kp} B_{2kp} \cos j \, dj}{\sqrt{A + B_{1kp}^2 + B_{2kp}^2 - 2B_{1kp} B_{2kp} \cos j}} \quad (14)$$

$$B_{1kp} = r + \frac{d_n}{2} + h_2 m, B_{2kp} = r + h_2 k; A = h^2 (m - k)^2;$$

$$L_{k\kappa} = \frac{2m_0}{p} \sum_{n=0}^{q-1} \sum_{f=0}^{q-1} \sum_{k=0}^{w-1} \sum_{m=0}^{w-1} \int_{x_1=0}^{b+\frac{d_n}{2}+fh_2} \int_{x_2=-b-mh_2}^{b+mh_2} \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + B_{1k\kappa}^2 + A}} - \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + B_{2k\kappa}^2 + A}} \quad (15)$$

$$B_{1k\kappa} = (n - f)h_2 - \frac{d_n}{2}, B_{2k\kappa} = 2b + (n + f)h_2 + \frac{d_n}{2};$$

$$L_{mp} = \frac{3m_0}{2p} \sum_{n=0}^{q-1} \sum_{f=0}^{q-1} \sum_{k=0}^{w-1} \sum_{m=0}^{w-1} \int_{x_1=0}^{\frac{c+d_n\sqrt{3}}{2}+h_2n\sqrt{3}} \int_{x_2=-\frac{c}{2}-h_2f\sqrt{3}}^{\frac{c}{2}+h_2f\sqrt{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + B_{1mp}^2 + A}} - \frac{1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + ((\frac{c}{2} - |x_2|)\sqrt{3}) + B_{2mp}^2 + A}} \right) dx_1 dx_2 \quad (16)$$

$$B_{1mp} = \frac{d_n}{2} + h_2 (n - f), C_{2mp} = \frac{d_n}{2} + h_2 (n + 2f),$$

де h_2 - відстань між шарами котушки;

n, f - порядковий номер шару.

Розрахувавши індуктивність котушок різної конфігурації за вище наведеними формулами та врахувавши, що їх опір прямо пропорційний кількості шарів, можна побудувати відповідності між індуктивністю котушки та її опором для мідної плівки. Дані графіки наведені на рис. 5.

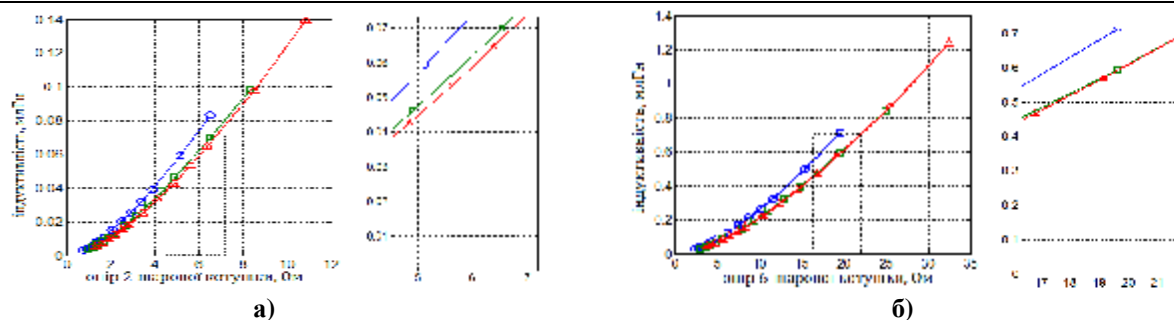


Рис. 5. Зв'язок між індуктивністю котушок різної форми та їх активним опором;
а - двошарових, б - шестишарових

З рис. 5 випливає, що зі збільшенням кількості шарів опори квадратної та трикутної котушок дуже близькі, а для шестишарової співпадають. Опір двошарової трикутної котушки при її індуктивності 0,06 мГн на 17% більший у порівнянні із круглою (рис. 5а). Збільшення кількості шарів ІЕ призводить як до зростання індуктивності та і опору. З рис. 5б видно, що опір круглої шестишарової котушки індуктивністю 0,6 мГн становить 17,5 Ом, а трикутної та квадратної 20 Ом, що на 14% більше. Таким чином при конструюванні планарних ІЕ для забезпечення меншого власного опору доцільно використовувати круглу конфігурацію витків котушки.

Висновки

При використанні планарних ІЕ круглої форми можна отримати більшу індуктивність при менших розмірах у порівнянні із котушками трикутної та квадратної конфігурації. Показано що при однаковій індуктивності площа ІЕ трикутної форми на 32% більша у порівнянні з круглою. При використанні одношарових котушок за умови раціонального розміщення компонентів на друкованій платі та забезпечення високої добротності доцільно використовувати квадратну конфігурацію в порівнянні із трикутною. У випадку багатошарових котушок, кругла форма забезпечує на 14-17% кращу добротність у порівнянні з іншими конфігураціями, при однаковій індуктивності.

Література

1. Клестова Н. Применение планарных трансформаторов на основе многослойных печатных плат / Н. Клестова // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 4. – С. 37–38.
2. Ефименко А. А. Печатные индуктивные элементы и перспективы их использования / А. А. Ефименко, П. П. Карлангач // МНПК «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса, 26–30 мая 2014. – С. 52–53.
3. С.-Н. Ahn, Y.-J. Kim, and M.-G. Allen, Proceedings of 6th International conference on Solid State Sensors and Actuators, p. 70 (1993).
4. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П.Л. Калантаров, Цейтлин Л. А. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с
5. Немцов М. В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности / М. В. Немцов, Ю. М. Шамаев. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.

Рецензія/Peer review : 22.11.2015 р.

Надрукована/Printed : 19.2.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією