

УДК 621.318.434.1

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА ПЛАНАРНОЇ СИСТЕМИ**

**В.А.Андрійчук, докт.техн.наук, М.С.Наконечний**

**Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя,**

**вул. Руська, 56, Тернопіль, 46000, Україна.**

**E-mail: [nakmiron@ukr.net](mailto:nakmiron@ukr.net)**

*Проведено комп'ютерне моделювання індуктивного елемента планарної системи з використанням магнітного середовища нікель-цинкового фериту. На основі розв'язаної осесиметричної задачі отримано залежності зміни індуктивності та добротності планарного елемента від частоти та показано вплив геометричних розмірів моделі на ці параметри. Доведено, що запропонована конструкція магнітопроводу дозволяє отримувати необхідну індуктивність та добротність планарного елемента при заданих геометричних розмірах.*

Библ. 8, табл. 1, рис. 6.

**Ключові слова:** планарна система, індуктивний баласт, індуктивність, добротність.

**Вступ.** Для свічення газорозрядних ламп необхідна спеціальна пускорегулювальна апаратура (ПРА), що забезпечує запалювання розряду і стабілізацію струму. У сучасних люмінесцентних лампах (ЛЛ) використовуються електронні ПРА (ЕПРА), що забезпечують живлення на високих частотах і мають ряд переваг перед електромагнітними: швидке запалювання розряду, стабільність роботи незалежно від коливань напруги мережі, збільшення строку служби лампи на 50% завдяки плавному запалюванню лампи, зростання світлового потоку на 15–20 % за рахунок підвищення частоти живлення ЛЛ (35–60 кГц). Вихідний каскад живлення в сучасних ЕПРА реалізовано як на дискретних електронних компонентах, так і на основі спеціальних мікросхем. Такі ЕПРА суттєво зменшують габаритні розміри плат живлення розрядних ламп та дають можливість ручного або автоматичного регулювання світлового потоку лампи [3,5].

Обов'язковою складовою ЕПРА є індуктивні елементи (ІЕ) переважно з осердям Ш-типу, що характеризуються великими габаритними розмірами у порівнянні з іншими електронними компонентами.

Типові значення індуктивностей баластного дроселя, отриманих в програмі IR Ballast Designer, для різних типів ламп зведено в таблицю. Схема ЕПРА розраховувалася для мікросхеми IRS21571D.

Характеристика лампи	Тип лампи						
	U			T5		спіраль	
Потужність лампи, Вт	18	26	32	20	39	15	20
Індуктивність баластного дроселя мГн	1,9	1,5	1,5	2,4	2,9	4,2	3,7
Робоча частота перезапалювання, кГц	43	50	48	30	36	30	30

Для прикладу, щоб забезпечити стабільну роботу ЛЛ U-типу потужністю 18 Вт індуктивність баластного дроселя повинна бути близькою до 1,9 мГн. Програмою рекомендовано виконати дросель на фериті Ш-типу E25/13/7 марки

Siemens N27 із зазором 2,1 мм, обмотка якого складатиме 248 витків проводом діаметром 0,2 мм, об'єм магнітопроводу 3020 мм<sup>3</sup>.

З метою покращення масогабаритних показників і спрощення інтегрування ЕПРА в конструкції ламп було запропоновано використати ІЕ планарної системи. Завдяки плоскій формі такі ІЕ дали б можливість зменшити висоту дроселя, що є актуальним для компактних люмінесцентних ламп, оскільки ЕПРА інтегровано у цоколь ламп.

Планарні котушки індуктивності можуть бути використані як для виготовлення дроселів, так і трансформаторів. Перевагами індуктивних елементів такої системи є: високе значення магнітного зв'язку між витками обмотки внаслідок зменшення габаритних розмірів елемента; невеликі габаритні розміри; незначний розкид параметрів при серійному виробництві пристроїв; низький рівень електромагнітних перешкод.

До недоліків належать: низьке значення добротності та індуктивності, що пояснюється відсутністю феромагнітного матеріалу в їхній конструкції. В даний час виготовлення таких елементів відбу-

вається методом фотолітографії (як елемента гібридних мікросхем) або травленням доріжок у формі спіралі на друкованій платі [6]. Для підвищення індуктивності планарних котушок вони можуть укладатися шарами та розміщуватися між феритовими осерддями малих розмірів [4,8]. Така конструкція дозволяє підвищити індуктивність, не збільшуючи кількості витків. У розглянутих конструкціях ІЕ простір між витками котушки заповнювався ізоляційним матеріалом або ж залишався незаповненим. Нами було запропоновано заповнити цей простір нікель-цинковим феритом з магнітною проникністю 450 та питомим опором  $10^6$  Ом·м, який би дав змогу підвищити індуктивність ІЕ, а також виконував роль ізолятора [7]. Такі ферити отримують поєднанням твердого розчину фериту нікелю ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) та фериту цинку ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ) та використовуються в широкому діапазоні магнітних елементів, де немає особливих вимог до температурної стабільності.

**Метою роботи** є розрахунок та визначення оптимальних параметрів зазначених планарних індуктивних елементів за допомогою комп'ютерного моделювання і формування рекомендацій для їхньої практичної реалізації.

**Виклад основного матеріалу та методика досліджень.** Загальний вигляд моделі індуктивного елемента планарної системи показано на рис. 1, а. Шари котушки 1 розділяються ізолятором 2 та розміщуються між верхньою 3 та нижньою 4 феритовими плівками. Шари котушки мають вигляд спіралі, закручені в напрямку за годинниковою стрілкою (рис. 1, б): I, III, V – до середини, II, IV, VI – назовні. Така конфігурація шарів котушки забезпечує проходження електричного струму в одному напрямку. Простір між витками заповнено нікель-цинковим феритом б.

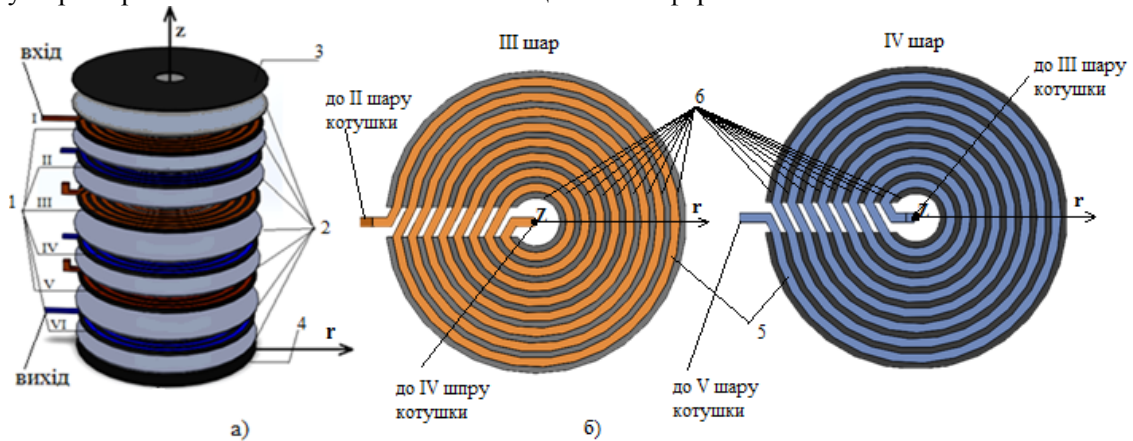


Рис. 1

Процес моделювання можна розділити на два етапи: перший – розрахунок індуктивності котушки без магнітного середовища, другий – із магнітним середовищем.

Власна індуктивність замкненого витка визначалася співвідношенням власного поточкозчеплення до сили струму в витку

$$L = \Psi / i. \quad (1)$$

Виток з поперечним перерізом  $S$  розбивався на сукупність елементарних витків з поперечним перерізом  $\Delta s$ . Повний магнітний потік елементарного витка визначався струмами як самого елементарного витка, так і множиною струмів решти елементарних витків [2]. Магнітний потік елементарного  $k$ -го витка довжиною  $l_k$  і струмом  $\Delta i_k$  дорівнює

$$\Phi_k = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_i \oint_{l_k} \oint_{j_m} \frac{dl_k dl_m}{a} \Delta i_m = \sum_i M_{km} \Delta i_m, \quad (2)$$

де  $M_{km}$  – взаємна індуктивність  $k$ -го і  $m$ -го елементарних витків. Врахувавши зв'язок повного потоку та магнітозчеплення

$$\Psi = \frac{1}{i} \sum_i \Phi_k \Delta i_k, \quad (3)$$

підставимо вираз (2) у (3) та, враховуючи співвідношення (1), отримаємо індуктивність замкненого контуру

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{1}{i^2} \sum_i \Delta i_k \sum_i M_{km} \Delta i_m. \quad (4)$$

Розподіл магнітного потоку двох кругових витків з внутрішнім радіусом  $r_1$  та зовнішнім  $r_2$ , розміщених на висоті  $h$  один відносно одного, дорівнює

$$\Phi(h) = \mu_0 i \int_0^\pi \frac{r_1 r_2 \cos \varphi d\varphi}{\sqrt{h^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \varphi}}. \quad (5)$$

Скориставшись виразами (4) та (5), де додавання по потоку замінюється на додавання по витках, та, врахувавши що  $r_1 = R$ , а  $r_2 = R + a$  де  $a$  – ширина провідника, отримаємо вираз для власної індуктивності спіральної котушки

$$L = \sum_{k=0}^{w-1} \sum_{m=0}^{w-1} \sum_{n=1}^q \sum_{p=1}^q \int_0^\pi \frac{\mu_0 (R + bp) \times (R + a + bn) \cdot \cos \varphi d\varphi}{\sqrt{h^2 (m-k)^2 + (R + bp)^2 + (R + a + bn)^2 - 2(R + bp) \cdot (R + a + bn) \cdot \cos \varphi}}, \quad (6)$$

де  $R$  – радіус внутрішнього витка,  $h$  – відстань між шарами,  $b$  – відстань між витками,  $q$  – кількість шарів,  $k, m$  – порядковий номер витка у шарі,  $w$  – кількість витків в одному шарі,  $n, p$  – номер витка одного шару (початковий виток прийнято за нульовий),  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму.

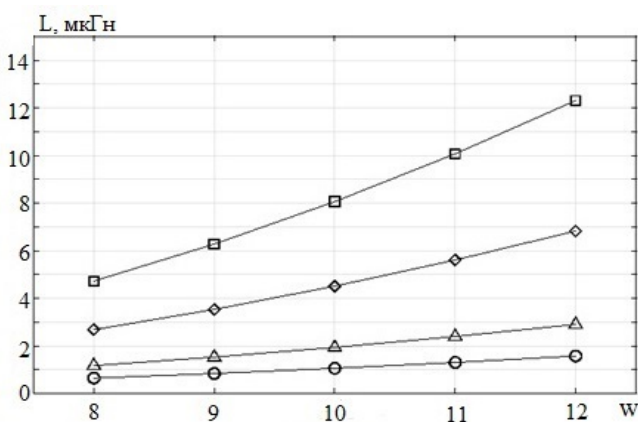


Рис. 2

До основних параметрів, що характеризують технічний рівень та якісні показники індуктивних елементів, належать: індуктивність, діапазон робочих частот, добротність.

Як впливає з рівняння (6), індуктивність котушки залежить як від кількості витків, так і від кількості шарів. На рис. 2 наведено результати розрахунку індуктивності котушки від кількості витків в одному шарі  $w$  для наступних геометричних розмірів: ширина провідника  $a=0,3$  мм, висота  $h_n=0,1$  мм, відстані між шарами  $h_i=0,05$  мм, внутрішній радіус  $R=0,3$  мм та відстань між витками  $b=0,1$  мм. Розрахунки проводилися для: ○ – одно-, △ – дво-, ◇ – трьох та □ – чотиришарової котушки.

З рисунка видно, що для отримання високих значень індуктивності більш доцільним з точки зору технології виготовлення є збільшення кількості витків в одному шарі (з врахуванням обмеженої величини зовнішнього радіусу ІД).

Розрахунок параметрів дроселя ІЕ планарної системи з магнітним середовищем, що дав би можливість забезпечити вибрану нами індуктивність, проводився в програмному комплексі Comsol Multiphysics. Обвитка моделі з внутрішнім радіусом 1 мм містить 6 шарів по 26 витків у кожному. В силу симетрії конструкції дроселя було розглянуто осесиметричну задачу (рис. 3). Система диференціальних рівнянь у циліндричній системі координат для вектора магнітного потенціалу  $A = (0, A_\varphi, 0)$  матиме вигляд

$$(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) A + \nabla \times (\mu_0 \mu_r B) = J_e, \quad B = \nabla \times A, \quad (7)$$

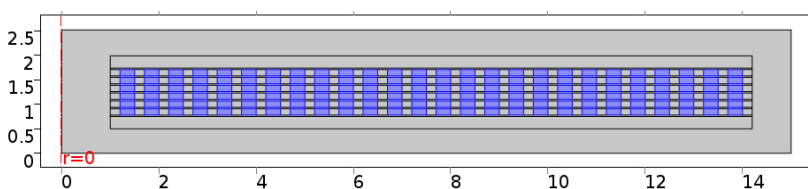


Рис. 3

де  $j$  – уявна одиниця,  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота,  $\varepsilon_r$ ,  $\mu_r$  – відносна електрична та магнітна проникність.

Вектор миттєвого значення густини струму в обмотці дроселя визначався як  $J_e = \sigma(2\pi r)^{-1} \sum_i V_i$ . Значення потенціалу  $V_i$  для  $i$ -го витка

вирішується за допомогою додаткового рівняння, що обмежує повне значення сили струму в котушці,

$$\int J dS = I_k, \quad (8)$$

де  $I_k$  – струм в котушці.

Нелінійність магнітних властивостей магнітопроводу враховувалася за допомогою кривої намагнічування, що вводилася в програму у вигляді табличних даних [7]. За граничні умови приймалися:

на границі симетрії – нормальна компонента магнітного поля, що дорівнює нулю; на верхній, правій та нижній – умова магнітної ізоляції.

Моделювання проводилося для двох конструкцій магнітопроводу. В першому випадку магнітопровід складався з верхньої та нижньої феритової плівок та фериту між витками котушки. В другому випадку простір між витками заповнювався повітрям. Котушка збуджувалася синусоїдним струмом з амплітудою 0,25 А.

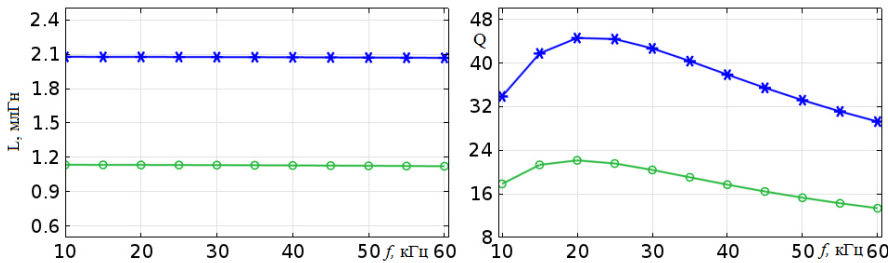


Рис. 4

Заповнення феритом області між витками дає можливість збільшити індуктивність планарного ІЕ більш ніж вдвічі – від 1,13 мГн до 2,1 мГн, при збереженні габаритних розмірів дрроселя.

Однією з основних характеристик дрроселя є його добротність  $Q$  – відношення індуктивного опору до активного [1]

$$Q = 2\pi fL / R, \quad (9)$$

де  $f$  – частота стуму,  $R$  – активний опір котушки.

Як видно з рис. 4, б, максимальне значення добротності дрроселя знаходиться в межах 15–20 кГц і не залежить від конструкції магнітопроводу. Зменшення добротності на частотах більше 20 кГц можна пояснити малими геометричними розмірами ІЕ (діаметр 23 мм, висота 1,5 мм) та збільшенням опору котушки внаслідок скін-ефекту (рис. 5).

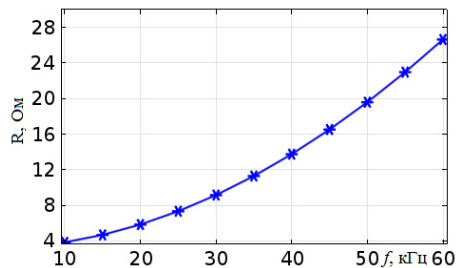


Рис. 5

ного матеріалу, то в цьому випадку він виконує роль розподіленого немагнітного зазору. Розроблена модель дозволяє розрахувати величину немагнітного зазору таким чином, щоб уникнути стану магнітного насичення магнітопроводу.

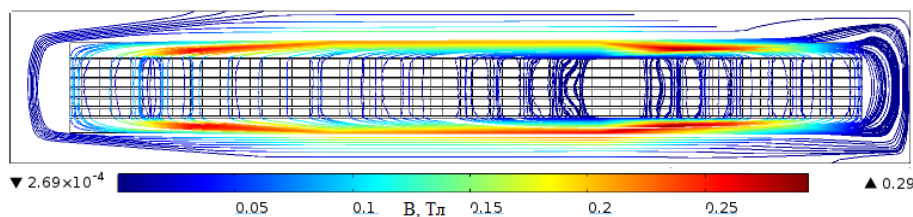


Рис. 6

Завдяки високому значенню магнітної проникності на високих частотах нікель-цинковий ферит забезпечує незначне зменшення індуктивності при зростанні частоти рис. 4, а (\* – залежність індуктивності від частоти з використанням фериту між витками котушки, о – без нього).

Об'єм запропонованого нами баластного дрроселя становить 1890 мм<sup>3</sup>, що значно нижче, ніж у згаданого раніше стандартного дрроселя E25/13/7. Окрім цього котушка даного дрроселя складається із 156 витків, що дає можливість зменшити як її активний опір, так і витрати матеріалу.

Розподіл магнітного потоку зображено на рис. 6. Видно, що лінії індукції магнітного поля циркулюють в площині Zr магнітопроводу та розподілені майже рівномірно по всій площині котушки. Оскільки шари котушки розділені ізолятором з немагнітного матеріалу, то в цьому випадку він виконує роль розподіленого немагнітного зазору.

Таким чином, на основі результатів комп'ютерної моделі планарного індуктивного елемента можна зробити наступні висновки.

1. Використання методів вакуумного наповнення в поєднанні з сучасними феромагнітними матеріалами дає можливість отримувати індуктивні елементи з малими геометричними розмірами та високими значеннями магнітних та електричних параметрів.

2. Використання нікель-цинкового фериту забезпечує ізоляційний захист та високу індуктивність при достатньо малих геометричних розмірах елемента.

3. Розрахунок магнітних характеристик дрроселя за допомогою даної комп'ютерної моделі дає можливість суттєво спростити підбір величини немагнітного зазору.

4. Показано що запропонована конструкція магнітопроводу дає можливість підвищити індуктивність та добротність планарного елемента при збереженні його геометричних розмірів.

1. Бамдас А.М., Савиновский Ю.А. Дроссели фильтров радиоаппаратуры. – М.: Советское радио, 1962 – 191 с.
2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
3. Лупенко А.М., Мовчан Л.Т., Натяга В.М., Сисак І.М. Метод широтно-імпульсного регулювання потужності розрядних джерел світла [Електронний ресурс] 2011 – Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1065>. 2011.
4. Планарные трансформаторы на основе многослойных печатных плат:[Електронний ресурс] / Режим доступу: [http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2003\\_6\\_28.php](http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2003_6_28.php)
5. Терентьев Б. Электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА): история, принцип работы, проблемы // Компоненты и технологии. – 2008. – №5. – С. 106–110.
6. Edlinger J., Steinschaden J. Simulation and Characterization of a Miniaturized Planar Coil. – Dorndirn, 2009. – 100 p.
7. Manufacturers of magnetic and advanced materials: [Електронний ресурс] / Режим доступу: [http://www.magneticsgroup.com/m\\_ferr\\_nizn.htm](http://www.magneticsgroup.com/m_ferr_nizn.htm)
8. Ultra-thin Inductors for DC/DC Converters: [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/006/pdf/006-13.pdf>

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ПЛАНАРНОЙ СИСТЕМЫ

**В.А.Андрійчук**, докт.техн.наук, **М.С.Наконечный**

**Тернопольский национальный технический университет им. И.Пулюя,**

**ул. Руськая, 56, Тернополь, 46000, Украина.**

**E-mail: [nakmiron@ukr.net](mailto:nakmiron@ukr.net)**

*Проведено комп'ютерне моделювання індуктивного елемента планарної системи з використанням магнітної середовища нікель-цинкового феррита марки CDM 5005. На основі розв'язаної осесиметричної задачі отримано залежності зміни індуктивності та добротності планарного елемента від частоти і показано вплив геометричних розмірів моделі на ці параметри. Показано, що запропонована конструкція магнітопровода дозволяє отримувати необхідну індуктивність і добротність планарного елемента при заданих геометричних розмірах. Бібл. 8, табл. 1, рис. 6.*

**Ключевые слова:** планарная система, индуктивный балласт, индуктивность, добротность.

## COMPUTER SIMULATION INDUCTIVE ELEMENT OF THE PLANARY SYSTEM

**V. Andriichuk, M. Nakonechnyi**

**Ternopil Ivan Puliuia National Technical University,**

**str. Ruska, 56, Ternopil, 46000, Ukraina.**

**E-mail: [nakmiron@ukr.net](mailto:nakmiron@ukr.net)**

*In this paper, the authors considered the most common types of planar magnetic inductive elements, and analyzed their advantages and disadvantages. Actuality use this type of inductive elements as ballasts of fluorescent lamps. A computer simulation of inductive element planar system using magnetic environment nickel-zinc ferrite brand CDM 5005 Based unleashed axisymmetric problem is obtained depending on changes in inductance and quality factor of a planar element frequency, and the influence of geometrical dimensions of the model to these parameters. It is shown that fill the space between the turns of the coil inductance increases by more than half. and reduce the size of inductive elements more than three times. Due to the reduced length of the conductive material decreases the resistance of the coil. The calculation of the magnetic characteristics of the ballast using a computer model makes it possible to simplify the selection of non-magnetic gap size. References 8, table 1, figures 6.*

**Keywords:** planar system, inductive ballast inductance, quality factor.

1. Bamdass A.M. Filter choke of radio equipment. – Moskva: Sovetskoe Radio, 1962. – 191 p. (Rus)
2. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. Calculation of Inductance. – Leningrad: Energoatomizdat, 1986. – 488 p. (Rus)
3. Lupenko A., Movchan L., Natiaga V., Sysak I. Method of time-proportional control of discharge light power. Available at: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1065> (accessed 01.12.2014). (Ukr)
4. Planar transformers based on multilayer boards. Available at: [http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2003\\_6\\_28.php](http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2003_6_28.php) (accessed 01.12.2014). (Rus)
5. Terentev B. Electronic ballasts: history, principles, problems // Components and Technologies. – 2008. – №5. – Pp. 106–110. (Rus)
6. Edlinger J., Steinschaden J. Simulation and Characterization of a Miniaturized Planar Coil. – Dorndirn, 2009. – 100 p.
7. Manufacturers of magnetic and advanced materials. Available at: [http://www.magneticsgroup.com/m\\_ferr\\_nizn.htm](http://www.magneticsgroup.com/m_ferr_nizn.htm) (accessed 01.12.2014).
8. Ultra-thin Inductors for DC/DC Converters. Available at: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/006/pdf/006-13> (accessed 01.12.2014).

Надійшла 08.12.2014

Остаточний варіант 17.02.2015