

УДК 621.318.434.1

**В. Андрійчук, докт. техн. наук; М. Наконечний**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДРОСЕЛЯ ПЛАНАРНОЇ СИСТЕМИ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОЇ ЛАМПИ**

**Резюме.** Проведено комп'ютерне моделювання баластного дроселя планарної системи з використанням магнітного середовища нікель-цинкового фериту. Запропоновано рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів індуктивного елемента. Показано, що запропонована конструкція магнітопроводу дозволяє отримувати необхідну індуктивність і добротність планарного елемента й зменшити теплові втрати в порівнянні з традиційними конструкціями магнітопроводу.

**Ключові слова:** баластний дросель, планарна система, комп'ютерна модель.

**V. Andriychuk, M. Nakonechniy**

## **COMPUTER MODELLING CHARACTERISTICS OF BALLAST CHOKE OF THE FLUORESCENT LAMP**

**Summary.** Basing on the analysis of existing structures of the planar system induction coils authors proposed to fill the space between the turns of the coil by the ferromagnetic material. This design will increase the magnetic inductance, and will not increase of the dimension parameters. As the magnetic material nickel-zinc ferrite with specific resistance was chosen. Modeling of magnetic and temperature characteristics was conducted by the Comsol Multiphysics software.

It is shown that proposed construction of magnetic makes possible to get the necessary inductance and quality factor of choke in comparison with traditional designs of magnetic circuit. Based on the investigations, the authors proposed the recommendations concerning the choice of optimal parameters of inductive element, taking into account the index of operating current. It is shown that the small increase of inner orifice radius gives the opportunity to increase inductance with the small change of element's sizes, while the index of quality factor stays practically unchangeable.

Based on the simulation of magnetic and thermic field of choke, it is shown that the layers of insulating material serve as non-magnetic air gap. The elaborated computer model lets choose its thickness for providing the stationary inductance index in the process of remagnetizing.

According to the carried out research the operating temperature of the choke doesn't exceed 70 °C. Such temperature is nothing operating temperature range of choke materials, besides it won't cause the excessive heating of surrounding components in the scheme during operating. The quantity of heat consumptions that in the coil and consumptions in the magnetic circuit is three times less than those with traditional types of magnetic circuit.

The simulation (modeling) of work of the discharged stage operating of electronic starting system set in the established mode is held. It is shown that the proposed design of ballast choke provides the necessary indexes of voltage and current during the operating of the luminescent lamp. Due to the reduction of heat consumptions the proposed design increases the efficiency of luminescent lamp power supply system

**Key words:** ballast choke, planar system, computer model.

**Постановка проблеми.** Живлення сучасних люмінесцентних ламп забезпечується електронною пускорегулювальною апаратурою (ЕПРА), що забезпечує зростання світлового потоку на 15–20%, підвищення терміну служби лампи на 50%, та відсутність мерехтіння в порівнянні з традиційними електромагнітними ПРА [1].

Електронні ПРА (ЕПРА) складаються з трьох компонентів: запалюючий пристрій, пристрій стабілізації струму лампи та пристрій, що забезпечує електромагнітну сумісність джерела світла й електричної мережі. Стабілізація струму розрядної лампи всіх типів забезпечується за рахунок увімкнення послідовно з нею

струмообмежуючого елемента – баласту. В якості баласту може використовуватися будь-який активний, індуктивний або ємнісний опір, але на практиці застосовуються індуктивні елементи.

У сучасних ЕПРА баластні дроселі виконуються на магнітопроводах Ш-типу, що характеризуються великими габаритними розмірами в порівнянні з іншими електронними компонентами. З метою покращення масогабаритних показників та зменшення теплових втрат, було запропоновано використати дросель планарної системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** 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;
- малі габаритні розміри;
- малий розкид параметрів при серійному виробництві пристроїв;
- низький рівень електромагнітних перешкод.

До недоліків відносяться низьке значення добротності й індуктивності, що пояснюється відсутністю феромагнітного матеріалу в їх конструкції. В даний час виготовлення таких елементів відбувається методом фотолітографії (як елемента гібридних мікросхем) або травленням доріжок у формі спіралі на друкованій платі [2]. Для підвищення індуктивності планарних котушок вони можуть укладатися шарами та вміщуватися між феритові осердя малих розмірів [3,4]. Така конструкція дозволяє підвищити індуктивність, не збільшуючи кількість витків. У розглянутих конструкціях простір між витками котушки заповнювався ізоляційним матеріалом або ж залишався незаповненим.

У процесі роботи індуктивного баласту відбуваються втрати енергії у вигляді тепла, які складаються з втрат у обмотці та втрат в магнітопроводі, що пропорційні його об'єму [5]. Автори [6] показали, що у кращих дроселях для ламп потужністю 36 Вт втрачається близько 6 Вт (приблизно 15% потужності лампи). У малопотужних ламп (12–18 Вт) втрати потужності в дроселях можуть складати 50% потужності самих ламп.

**Мета і завдання дослідження.** Розрахунок та дослідження магнітних і температурних характеристик баластного дроселя планарної системи та формування рекомендацій для його практичної реалізації.

**Виклад основного матеріалу та методика досліджень.** Для підвищення індуктивності планарних індуктивних елементів (ІЕ) ми запропонували заповнити простір між витками котушки феромагнітним матеріалом з високим питомим опором, який би виконував роль ізолятора. В якості такого матеріалу було використано нікель-цинковий ферит з питомим опором  $10^6$  Ом·м [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, де немає особливих вимог до температурної стабільності.

Загальний вигляд моделі індуктивного елемента планарної системи зображено на рис. 1а.

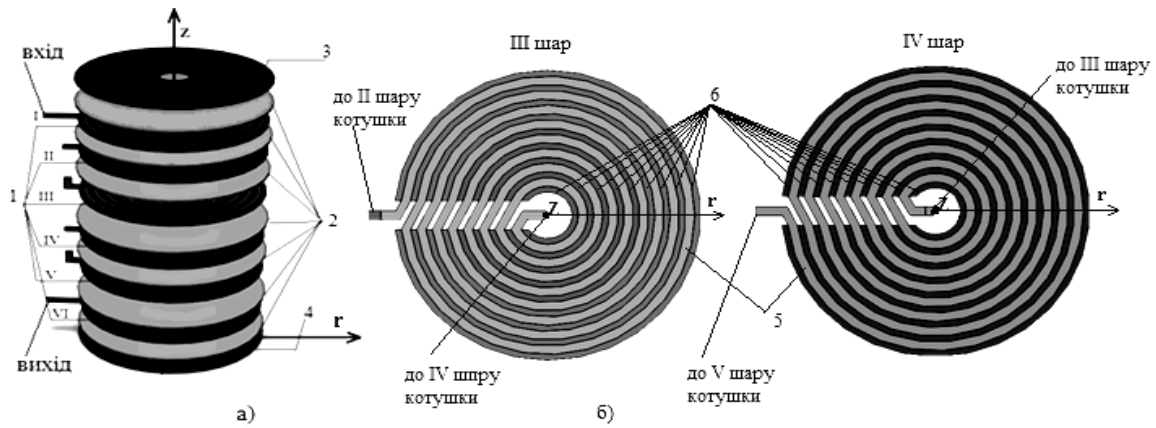


Рисунок 1. Загальний вигляд дроселя планарної системи

Figure 1. General view of the planar system choke

Шари котушки 1 поділяються ізолятором 2 та вміщуються між верхню 3 та нижню 4 феритові плівки. Шари котушки мають вигляд спіралі, закручені в напрямку за годинникову стрілку (рис.1б), 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 6.

Комп’ютерне моделювання магнітних, електричних та теплових характеристик дроселя проводилося в програмному комплексі Comsol Multiphysics. В силу симетрії конструкції дроселя було розглянуто осесиметричну задачу (рис.2).

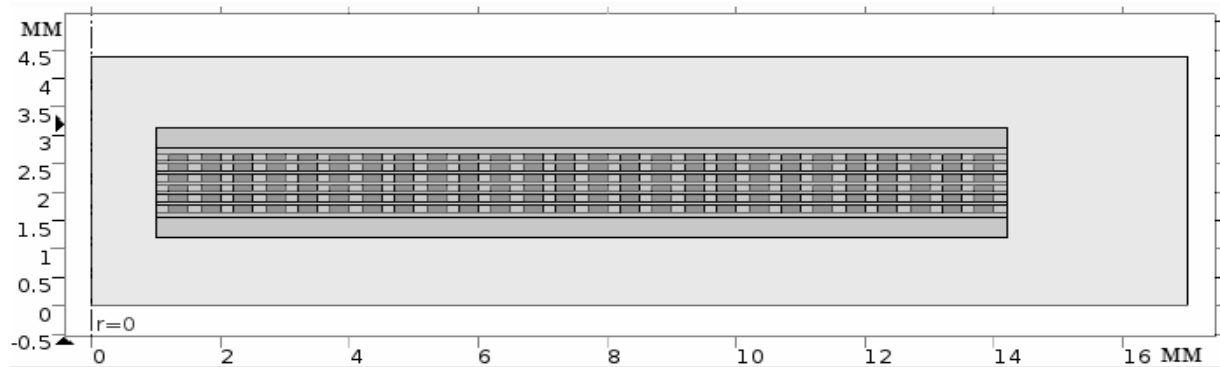


Рисунок 2. Геометрія моделі дроселя

Figure 2. Geometry of choke model

Закон Ампера-Максвела в диференціальній формі, що включає в себе зовнішнє джерело струму з густиною  $\mathbf{J}_e$ , має вигляд

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e \quad (1)$$

де  $\mathbf{H}$  та  $\mathbf{E}$  – напруженість магнітного та електричного полів;  $\mathbf{D}$  – вектор електричної індукції;  $\sigma$  – питома провідність;  $j$  – уявна одиниця;  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота.

Використовуючи визначення магнітного потенціалу  $A$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (2)$$

та електричного потенціалу  $V$ ,

$$\mathbf{E} = -\nabla V - j\omega\mathbf{A}, \quad (3)$$

і, врахувавши матеріальні співвідношення  $\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} = \varepsilon_r\varepsilon_0\mathbf{E}$  та  $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} = \mu_r\mu_0\mathbf{H}$ , рівняння (1) набуде вигляду

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) + (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A} + (\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla V = \mathbf{J}_e. \quad (4)$$

Подіявши на рівняння (4) оператором дивергенції, отримаємо

$$\nabla \cdot [(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A} + (\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla V - \mathbf{J}_e] = 0. \quad (5)$$

Вирази (4) та (5) складають систему рівнянь для визначення векторів  $\mathbf{A}$  та  $V$ . Ця система може бути зведена в одне рівняння шляхом поєднання вектора магнітного потенціалу та скалярного потенціалу в один вектор  $\tilde{\mathbf{A}}$

$$\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} - \nabla V = -j\omega\tilde{\mathbf{A}}. \quad (6)$$

Врахувавши вираз (6), система рівнянь (4) та (5) набуде вигляду

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \tilde{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{J}_e. \quad (7)$$

Вектор миттєвого значення густини струму в

обмотці дроселя визначається як  $\mathbf{J}_e = \sigma \frac{\sum V_i}{2\pi r}$ .

Значення потенціалу  $V_i$  для  $i$ -го витка вирішується з допомогою додаткового рівняння, що обмежує повне значення сили струму в котушці

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

де,  $I_k$  – струм у котушці.

Нелінійність магнітних властивостей магнітопроводу враховувалася за допомогою кривої намагнічування (рис.3), що вводилася в

програму у вигляді табличних даних [7]. В якості граничних умов приймалося: на границі симетрії  $B_n = 0$  – нормальна компонента магнітного поля рівна нулю, на верхній, правій та нижній;  $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$  – умова магнітної ізоляції.

Розподіл магнітного потоку зображено на рис.4. Бачимо, що лінії індукції магнітного поля циркулюють у площині Zr магнітопроводу та розподілені по всій площині котушки.

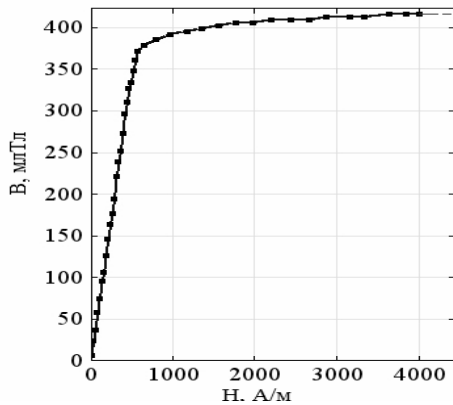


Рисунок 3. Крива намагніченості нікель-цинкового фериту

Figure 3. Magnetization curve of nickel-zinc ferrite

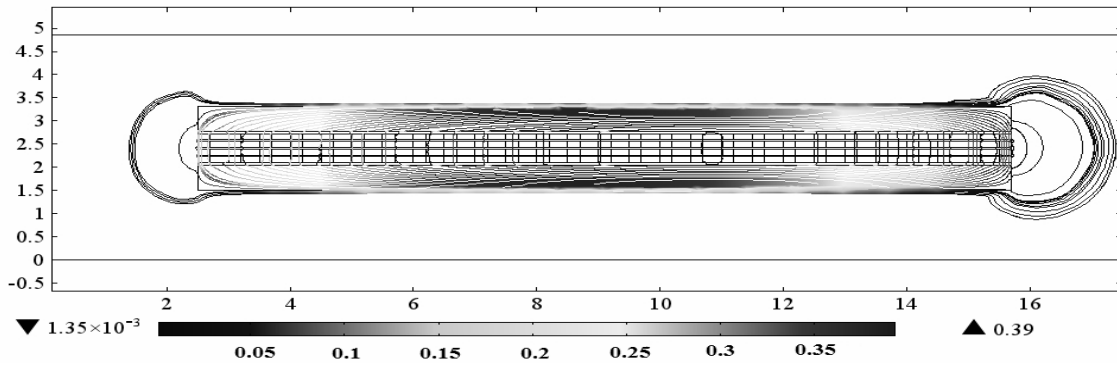


Рисунок 4. Розподіл ліній індукції магнітного поля, Тл

Figure 4. Distribution of the magnetic field lines of induction, T

Оскільки шари котушки поділені ізолятором з немагнітного матеріалу, то в цьому випадку він виконує роль розподільного немагнітного зазору. Товщина ізолятора підібрана таким чином, щоб максимальне значення індукції не перевищувало значення залишкової індукції, що для фериту даної марки становить 400 мТл. Моделювання проводилося при силі струму в котушці  $I_k = 0,45$  А з частотою 40 кГц. Як показало моделювання, величина магнітної індукції у верхній та нижній плівках залежить лише від сили струму в котушці та кількості витків у шарі, що потрібно враховувати при виборі товщини цих плівок.

Індуктивність баластного дроселя ЛЛІ лежить у межах 1–5 мГн. Такий широкий діапазон значень залежить від багатьох факторів: потужність лампи, робоча частота, довжина та діаметр колби, а також її форма. Збільшення або зменшення індуктивності дроселя в більшості випадків відбувається за рахунок кількості витків котушки. У випадку планарних систем зміна індуктивності може відбуватися шляхом регулювання радіуса внутрішнього отвору котушки (рис.5а).

Як бачимо з рисунка, невелике збільшення радіуса R дає можливість забезпечити потрібну індуктивність при меншій кількості шарів, що значно спростить процес виготовлення, а також підвищить добротність (рис.5б).

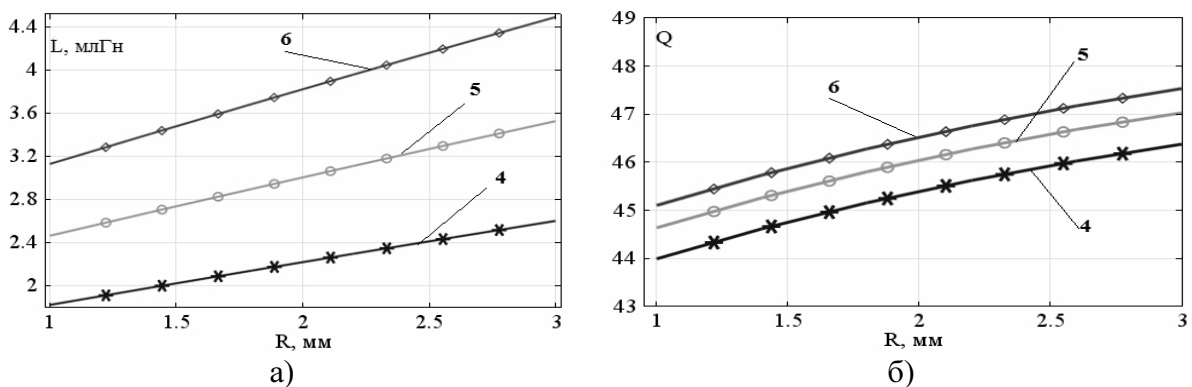


Рисунок 5. Вплив радіуса внутрішнього отвору на: а) індуктивність дроселя, б) добротність. Цифри на рисунку відповідають кількості шарів

Figure 5. Impact of inner radius of the orifice: a) inductance of the choke, b) the quality factor. The numbers in the figure correspond to the number of layers

У процесі роботи дроселя частина його енергії  $Q$  розсіюється у вигляді тепла. Величину таких втрат та робочу температуру дроселя  $T$  можна розрахувати, провівши тепловий розрахунок. Рівняння теплового балансу матиме вигляд

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q; Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(J \cdot \dot{E}) + \frac{1}{2} \operatorname{Re}(j \omega B \cdot \dot{H}), \quad (9)$$

де  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$  – густина, ізобарна теплоємність та коефіцієнт теплопровідності відповідно;  $\dot{E}$  та  $\dot{H}$  – уявна частина напруженості електричного та магнітного полів. У процесі нагрівання пристрою частина тепла передається навколишньому середовищу за рахунок конвекції. Для врахування цього поставлено такі граничні умови: на границі симетрії умова теплової ізоляції –  $q|_{r=0} = -n(-k \nabla T) = 0$ , на всіх інших відкритих границях задається тепловий потік  $q|_s = -n(-k \nabla T) = h(T_c - T)$ .  $T_c$  – температура навколишнього середовища при розрахунках дорівнювала  $20^\circ\text{C}$ . Теплофізичні характеристики матеріалів зведено в табл.1.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів

	Густина $\text{кг} / \text{м}^3$	Теплоємність $\text{Дж} / \text{кг} \cdot \text{K}$	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{K}$
Ферит (NiZn)	5250	756	9,7
Мідь	8700	385	400
Ізолятор ( $\text{SiO}_2$ )	2200	298	9

При тривалій роботі дроселя настає стан теплової рівноваги, при якому кількість теплової енергії, що виділяється всередині дроселя, дорівнює кількості енергії, що виділяється в навколишнє середовище (рис.6). Розраховані втрати складають 1,6 Вт.

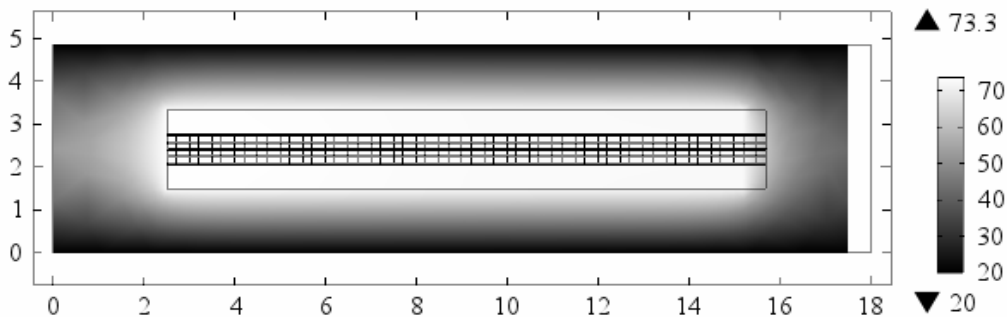
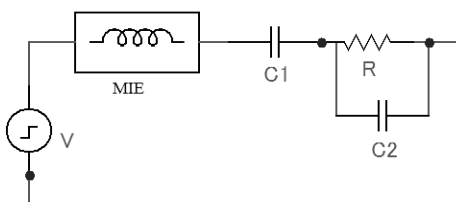
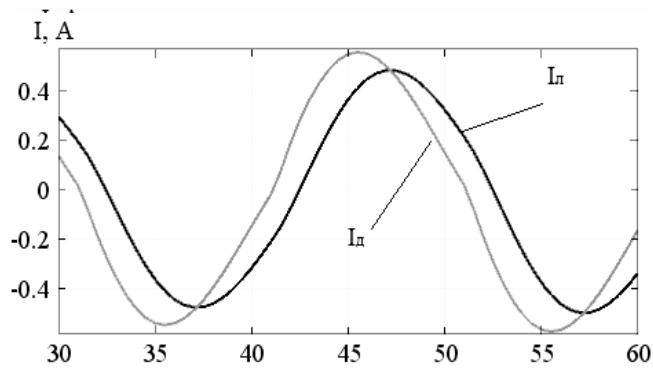


Рисунок 6. Розподіл температури дроселя в стані теплової рівноваги,  $^\circ\text{C}$

Figure 6. Temperature distribution of choke in the thermal equilibrium state,  $^\circ\text{C}$





Із проведеного магнітного та температурного розрахунку бачимо, що при розробленні конструкції дроселів планарної системи для збільшення індуктивності доцільнішим є збільшення кількості витків у шарі. Це дасть більший приріст площі поверхні дроселя, тим самим знизить робочу температуру елемента.

в)

**Рисунок 7.** Еквівалентна електрична схема моделі – а, осцилограми напруг – б, та струмів – в

**Figure 7.** The equivalent electrical circuit model – a, voltage oscillogram – b, and currents – c

На рис.7 а зображено еквівалентну електричну схему вихідного каскаду ЕПРА. Тут МІЕ – модель дроселя, лампа представлена опором  $R=380$  Ом,  $C1=4,2$  нФ,  $C2=4,5$  нФ (рис.7б). На рис.7б представлено осцилограму напруги живлення вихідного каскаду ЕПРА  $U_V$ .

В даній моделі дросель складався із 4 шарів по 25 витків у кожному. Розрахована індуктивність становить 2,2 мГн, при геометричних розмірах 2 мм висоти та діаметром 30 мм. Осцилограми струму, що проходить через лампу  $I_L$  та напруги  $U_a$ ,  $U_o$  в установленому режимі показано на рис.7б та 7в. Як бачимо з рисунка, дана конструкція дроселя дозволяє забезпечити стабільну роботу при збереженні малих геометричних розмірів. Окрім цього, котушка даного дроселя складається зі 100 витків, що дає можливість зменшити як її активний опір, так і затрати матеріалу.

**Висновки.** Проведено розрахунок планарних індуктивних елементів для високочастотного живлення ЛЛІ потужністю 36 Вт. Представлено методику розрахунку та проведено розрахунок теплового режиму роботи дроселя в ЕПРА. Показано осцилограми струмів й напруг дроселя та ЛЛІ. Розраховані втрати складають 1,6 Вт, що понад 3,5 рази менше у порівнянні з традиційними конструкціями баластних дроселів.

**Conclusions.** The calculation of planar inductive elements for high-power fluorescent lamps of 36 watts is held. The methods of calculation and the calculation of the thermal regime of choke ballasts in the circuit are presented. The current and voltage oscillogram of choke and fluorescent lamps are shown. The estimated loss is 1.6 W, which is more than in 3.5 times less comparing with traditional designs of ballast chokes.

**Список використаної літератури**

1. Терентьев, Б. Электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА): история, принцип работы, проблемы [Текст] / Б. Терентьев // Компоненты и технологии, 2008 – №5 – С.106–110.
2. Edlinger, J. Simulation and Characterization of a Miniaturized Planar Coil [Text] / J. Edlinger, J. Steinschaden // Dorndirn, 2009 – 100 p.
3. Ultra-thin Inductors for DC/DC Converters: [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/006/pdf/006-13.pdf>
4. Планарные трансформаторы на основе многослойных печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2003\\_6\\_28.php](http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2003_6_28.php)
5. Афанасьев, А.М. Определение энергетических и массогабаритных показателей пассивных элементов импульсных преобразователей [Текст] / А.М. Афанасьев, А.В. Еремина // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2013. – №5. – С.13–19.
6. Переломов А.А., Баршадский И.А., Модернизация осветительной установки путем замены электромагнитных пускорегулирующих аппаратов на электронные [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://ea.donntu.org>:
7. Hitachi metals soft ferittes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hitachi-metals.co.jp>

*Отримано 05.02.2015*