

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з основних напрямів розвитку світлотехнічної галузі на сьогоднішній час є підвищення ефективності джерел світла та освітлювальних установок. Поряд із світлодіодними, газорозрядні джерела світла, зокрема люмінесцентні лампи (ЛЛ), в цьому плані залишаються найбільш перспективними. В останні роки для освітлення в основному використовуються ЛЛ, діаметр трубки яких менший 20 мм. Такі ЛЛ характеризуються підвищеною світловіддачею (105 лм/Вт) та меншим вмістом ртуті. Вони можуть функціонувати лише в поєднанні з високочастотними електронними пускорегулювальними апаратами (ЕПРА). Використання таких ЕПРА забезпечує відсутність пульсації світлового потоку, збільшення терміну експлуатації, можливість регулювання світлового потоку в широкому діапазоні.

Одним з важливих компонентів ЕПРА є індуктивний елемент (дросель), який виконує роль баласту для ЛЛ. Він виступає окремим елементом схеми і вимагає трудо- і енергоємних операцій при його виготовленні та характеризується великими габаритами. Тенденції в розвитку сучасної радіоелектронної апаратури спрямовані на використання гібридно-плівкових інтегральних схем та впровадження однотипного технологічного процесу їх виготовлення. Перспективними є планарні індуктивні елементи (ІЕ), які мають ряд переваг: менші габаритні розміри, вищі значення магнітного зв'язку між витками обмотки, менший розкид параметрів при серійному виробництві пристроїв, нижчий рівень електромагнітних перешкод.

Розвитком теоретичних досліджень електромагнітних характеристик планарних ІЕ займалися ряд відомих вчених: П. Л. Калантаров, А. А. Цейтлин, М. В. Немцов, И.А. Громыко, С. Н. Ahn, Mark G. Allen, F. Hammerle, Shen Wang, Yan Jiang, K. Barry та інші. Незважаючи на отримані результати, залишається цілий ряд задач, які потребують свого вирішення, а саме: підвищення індуктивності та добротності планарних ІЕ при збереженні масогабаритних показників, дослідження впливу магнітного середовища та форми провідника на електричні та температурні характеристики, розрахунок електронних пристроїв з планарним ІЕ. Тому **актуальним** є моделювання процесів в планарних ІЕ для розрахунку їх конструкцій у мікромодульному виконанні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукової теми “Регулювання потужності розрядних джерел світла енергоощадними електронними пускорегулювальними апаратами” (номер державної реєстрації 0111U005287).

Мета й задачі дослідження. Метою дослідження є розробка математичних моделей планарних індуктивних елементів та розрахунок їх електромагнітних і температурних характеристик.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичні моделі, які б дозволяли проводити розрахунок електромагнітних характеристик планарних індуктивних елементів;

- провести дослідження електричних та магнітних параметрів індуктивних елементів з різними формами провідного елемента;
- розрахувати втрати в індуктивних планарних елементах та розподіл температури;
- розробити модель вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарата з індуктивним елементом планарної системи в якості дроселя люмінесцентної лампи.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та температурні процеси в планарних індуктивних елементах, зумовлені особливостями їх будови та матеріалами виготовлення.

Предмет дослідження – планарні індуктивні елементи в електронних пускорегулювальних апаратах для живлення ЛЛ.

Методи дослідження. Поставлені задачі вирішувалися на основі використання: теорії електромагнітного поля; теорії теплообміну та теплопередачі; методів імітаційного та фізичного моделювання. Числові розрахунки та моделювання проводилися з використанням програмних засобів MATLAB та COMSOL Multiphysics.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблена математична модель для дослідження магнітних та електричних характеристик планарних індуктивних елементів, що дозволило враховувати особливості їх поведінки в високочастотних полях.
2. Розвинуто математичну модель для розрахунку температурних характеристик планарних ІЕ, яка дозволяє враховувати тепловідведення в результаті конвекції, теплопровідності та радіаційного випромінювання.
3. Отримала подальший розвиток модель ЕПРА з індуктивним елементом планарної системи в якості баластного дроселя люмінесцентної лампи, що дозволило врахувати мікромодульний варіант його будови.

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновано конструкцію планарного індуктивного елемента з феромагнітним заповненням міжвиткового простору.
2. Розроблено схему вихідного каскаду ЕПРА з планарним індуктивним елементом для люмінесцентних ламп та запропоновано методику розрахунку його електромагнітних параметрів.
3. Запропоновано методику та алгоритм розрахунку теплових характеристик індуктивного елемента ЕПРА. Встановлено, що температурний режим в корпусі ЕПРА, для ЛЛ типу Т5 потужністю 35 Вт не залежить від його розташування, для коефіцієнта форми $\gamma_1 = a:b = 1:4$ та круглої конфігурації його конструкції не перевищує 30 °С.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В [2,7–9] проведено аналіз, вибір та розрахунок параметрів магнітного середовища, в [5] проведено дослідження впливу форми планарного ІЕ на його магнітні параметри, в [1, 3, 11] виконано моделювання магнітних характеристик планарних ІЕ з магнітним середовищем, у [10] проведено моделювання та розрахунок температурних

характеристик, у [4, 12] проведено розрахунок та дослідження характеристик вихідного блоку ЕПРА з планарним ІЕ, в [6] проведено дослідження електромагнітної сумісності компактних ЛЛ.

Апробація. Основні результати дисертації були оприлюднені та обговорювалися на наукових конференціях: XVII наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 20–21 листопада 2013 р., м. Тернопіль; V Міжнародна науково-технічна конференція "Современные тенденции развития светотехники", 15–16 травня 2013 р., Харків; XI Международная научно-техническая конференция "Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики", 3–4 грудня 2013, Саранск (Россия); V Міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання в електротехніці, електроніці та світлотехніці МЕЕС'14», Національний авіаційний університет, Київ, 1–3 жовтня 2014 р; Міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19–21 травня 2015 р. м. Тернопіль.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 робіт, зокрема 6 статей у ліцензованих ДАК наукових періодичних виданнях, з них 1 в іноземному виданні, та 1 у виданні, що входить в наукометричну базу Scopus.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 125 найменувань, на 11 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 134 сторінок, з них 120 основного тексту, 61 рисунок, 6 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, відзначено її зв'язок із науковими програмами та темами, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, зазначено методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок здобувача, наведено дані апробації та публікацій основних результатів роботи, описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел та електронних ресурсів проаналізовано особливості конструкції, магнітні та електричні характеристики планарних ІЕ. Проведено аналіз магнітних матеріалів, методів та програмного забезпечення для моделювання та розрахунку фізичних систем, сформульовано основні задачі дослідження.

У другому розділі представлено математичні моделі та розраховано вплив форми планарного багатошарового ІЕ на його індуктивність та електропровідність.

Розрахунок проводився для п'яти варіантів котушок без магнітного середовища:

- 1) круга радіусом r ;
- 2) квадратна з стороною $b = 2r$, яка описана навколо круглої радіусом r ;

3) круга радіусом $r_2 = r\sqrt{2}$, яка описана навколо квадратної;

4) трикутна зі стороною $c = \frac{6r}{\sqrt{3}}$, яка описана навколо круглої радіусом r ;

5) круга радіусом $r_3 = 2r$, яка описана навколо трикутної.

На рис. 1 показані залежності індуктивності котушок від їх площі. Маркери на графіках відповідають кількості витків, $w = (5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30)$.

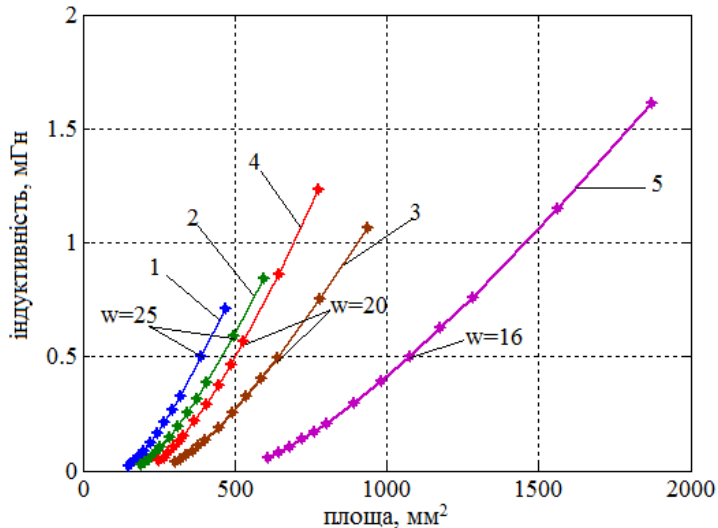


Рис. 1. Залежність індуктивності котушок різної форми від їх площі: 1 – круга з радіусом r ; 2 – квадратна з стороною $b = 2r$; 3 – круга з радіусом $r_2 = r\sqrt{2}$; 4 – трикутна з стороною $c = 6r / \sqrt{3}$; 5 – круга з радіусом $r_3 = 2r$

Із даних залежностей випливає, що для забезпечення однакової індуктивності (наприклад 0,5 мГн), котушка круглої форми матиме 25 витків, квадратної – приблизно 23, а трикутної – 19. Круглі котушки, що описані навколо квадратної та трикутної, матимуть 20 та 16 витків, відповідно. Показано, що при збільшенні внутрішнього радіуса, зростання площі круглих котушок більш стрімке, ніж зростання їх індуктивності.

Збільшення кількості витків супроводжується збільшенням довжини провідника, що призводить до зростання омичного опору

котушки та збільшення витрат матеріалу на її виготовлення.

Зв'язок між індуктивністю тришарової котушки та її опором показано на рис. 2.

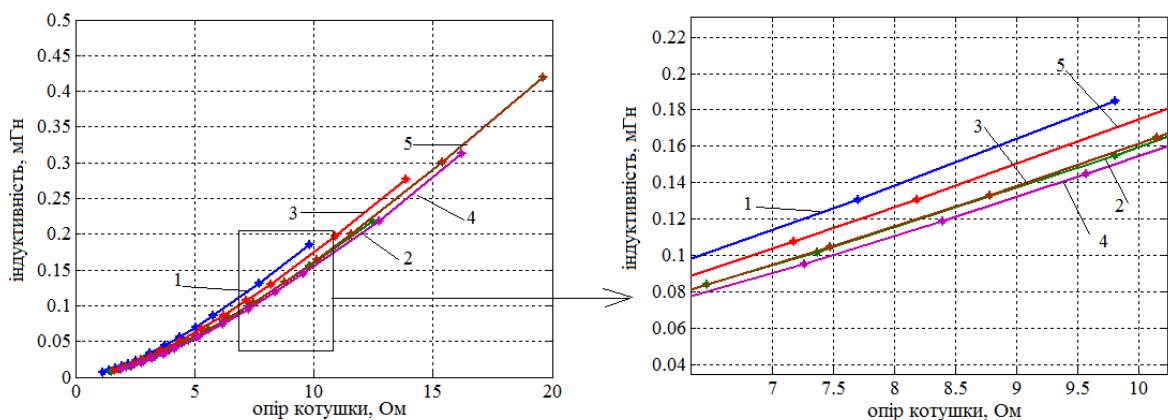


Рис. 2. Зв'язок між індуктивністю тришарової котушки та її опором: 1 – круга з радіусом r ; 2 – квадратна з стороною $b = 2r$; 3 – круга з радіусом $r_2 = r\sqrt{2}$; 4 – трикутна з стороною $c = 6r / \sqrt{3}$; 5 – круга з радіусом $r_3 = 2r$

З залежностей видно, що опір тришарової трикутної котушки при індуктивності 0,12 мГн на 17 % більший у порівнянні із круглою. Моделювання показало, що кругла форма котушки є найбільш оптимальною з точки зору її добротності. Тому для подальшого дослідження було вибрано варіант багатошарової котушки круглої форми.

Для підвищення індуктивності простір між витками котушки було заповнено феромагнітним матеріалом з високим питомим опором, який виконував одночасно і роль ізолятора. В якості такого матеріалу було запропоновано використати нікель-цинковий ферит з питомим опором 10^6 Ом·м. Загальний вигляд такого планарного ІЕ показано на рис. 3.

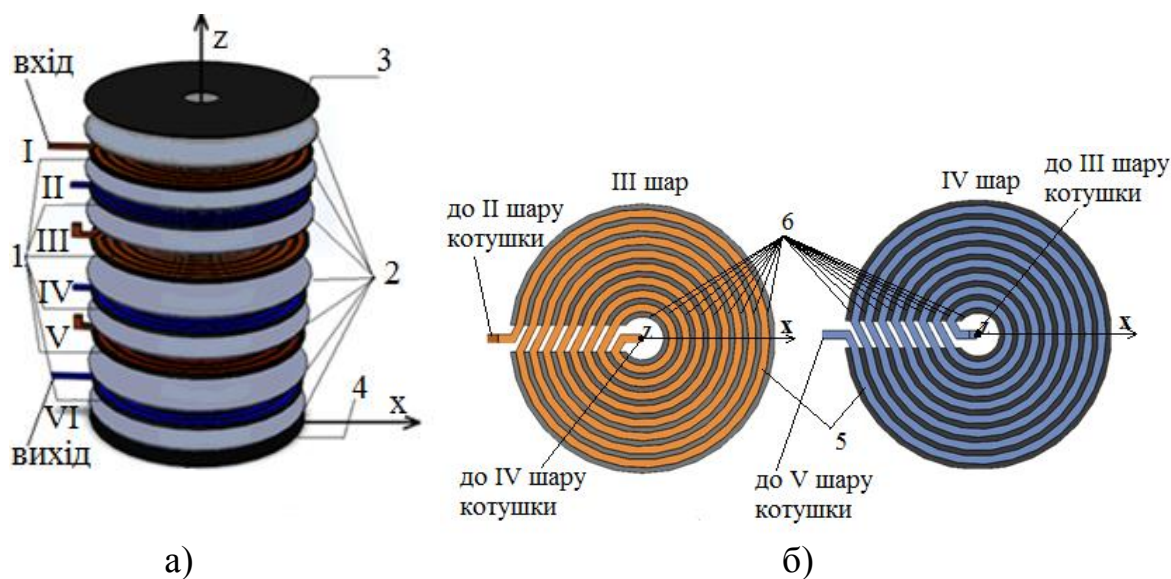


Рис. 3. Геометричне представлення ІЕ: а – загальний вигляд, б – переріз четвертого та п'ятого шарів

Він складається з одношарових котушок 1, які розділені ізоляційними плівками 2 та розміщені між верхньою 3 та нижньою 4 феритовими плівками. Витки 5 мають вигляд спіралі, закрученої в напрямку за годинниковою стрілкою: непарні шари – (I, III, V) – до середини, парні – (II, IV, VI) – назовні (рис. 3,б). Така конфігурація шарів ІЕ забезпечує проходження електричного струму в одному напрямку. Простір 6 між витками заповнено нікель-цинковим феритом. Верхні та нижні плівки можуть бути виготовлені як з нікель-цинкового, так і з магній-цинкового фериту.

Для розрахунку електричних та магнітних характеристик ІЕ планарної системи було розроблено його модель в програмному комплексі Comsol Multiphysics, що дозволяє враховувати вплив форми провідника та частоти струму на його опір і залежність вектора магнітної індукції $\mathbf{B}$ від напруженості магнітного поля $\mathbf{H}$.

Для розрахунку було використано систему рівнянь Ампера–Максвела, що встановлює зв'язок між компонентами електричного і магнітного полів. Система рівнянь для векторного магнітного потенціалу $\mathbf{A}$:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}; \\ (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu^{-1}\mathbf{B}) = \mathbf{J}_e, \end{cases} \quad (1)$$

де $j = \sqrt{-1}$; ω – циклічна частота; σ – питома провідність; ε_0 , μ_0 – електрична та магнітна сталі відповідно; ε , μ – діелектрична та магнітна проникність середовища відповідно.

Вектор миттєвого значення густини струму в котушці визначався як

$$\iint_S \mathbf{J}_e = I_\kappa, \quad (2)$$

де I_κ – струм у котушці, що задавався як початкова умова.

Геометричне представлення моделі ІЕ зображено на рис. 4. Котушка збуджувалася синусоїдним струмом I_κ в діапазоні частот 10 ... 80 кГц.

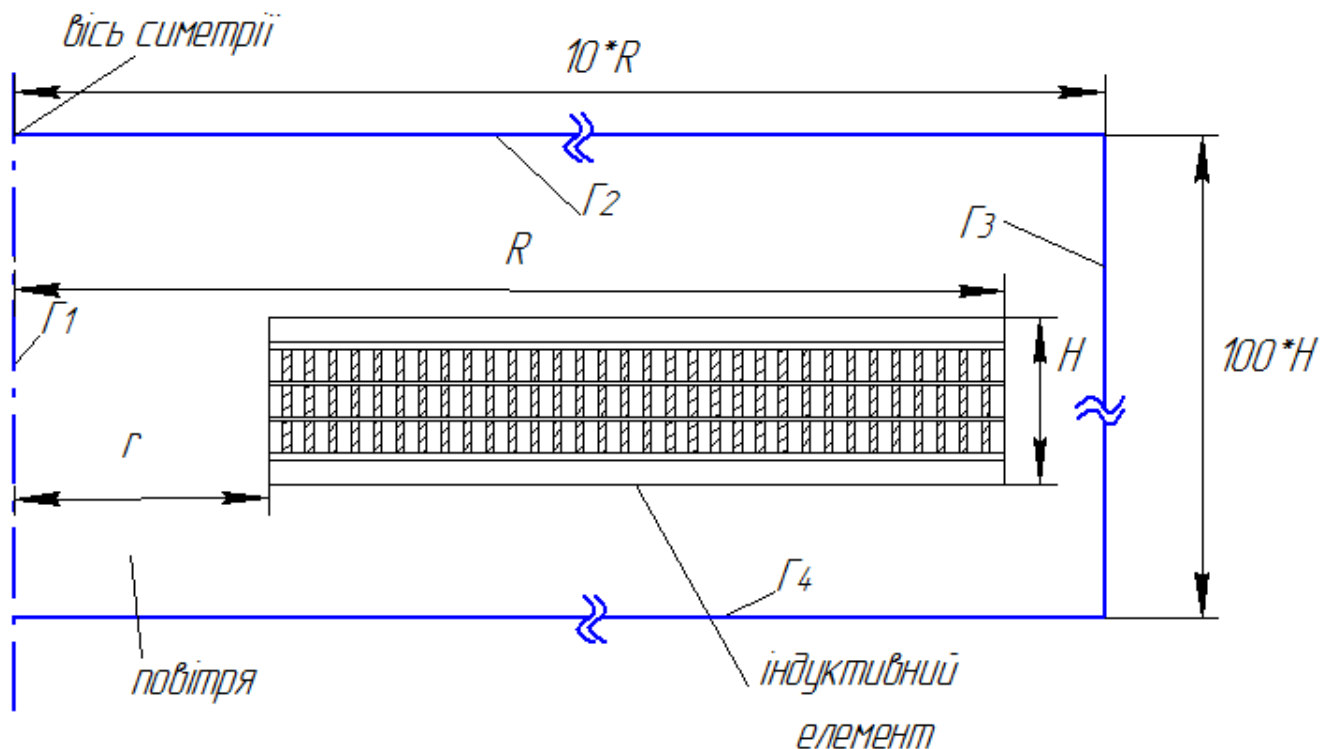


Рис. 4. Геометрія моделі індуктивного елемента

При розрахунках витки спіральної котушки планарного ІЕ круглої форми були представлені відповідними замкнутими витками. В якості граничних умов було прийнято: на границі симетрії Γ_1 – нормальна компонента магнітного поля рівна нулю $B_n = 0$; на границях $\Gamma_2 - \Gamma_4$ – використовується умова магнітної ізоляції $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$ та електричної ізоляції $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$, де $\mathbf{n}$ – вектор нормалі до поверхні.

Нелінійність магнітних властивостей магнітопровода враховувалася за допомогою кривої намагнічування, що вводилася в програму у вигляді табличних даних.

Для дослідження впливу форми провідника на поверхневі ефекти в ІЕ було вибрано параметр коефіцієнта форми $\gamma = a:b$, де a та b ширина та висота провідника, відповідно. За основу взято розмір 0,11 мм. Розглянуто три випадки: $\gamma_1 = 1:4$, $\gamma_2 = 2:2$, $\gamma_3 = 4:1$ (рис. 5). Таке значення коефіцієнта форми дало можливість зберегти площу поперечного перерізу провідника.

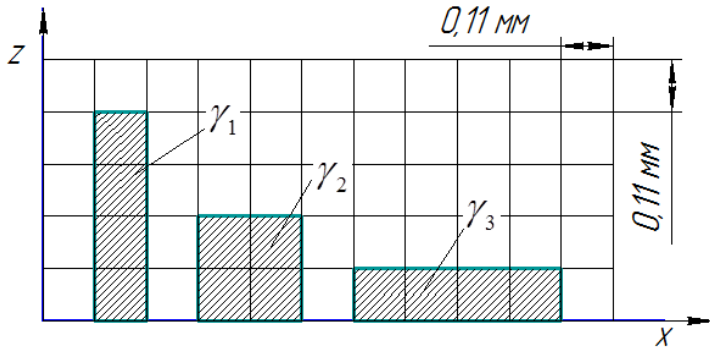
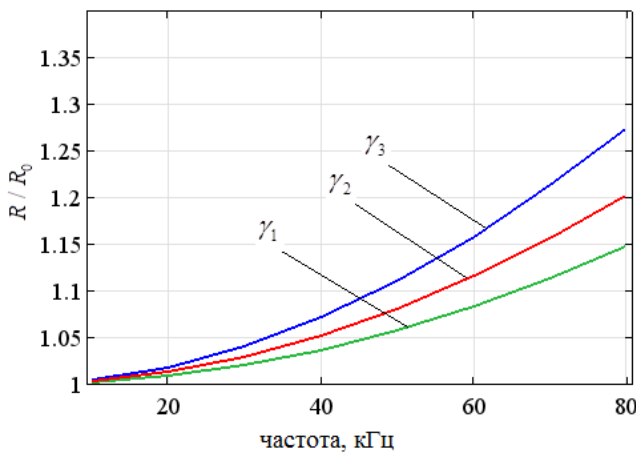


Рис. 5. Поперечний переріз провідника з коефіцієнтами форми $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$

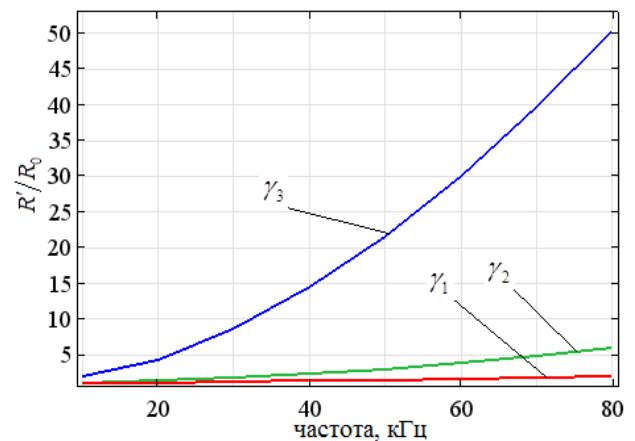
Оскільки відстань між витками, їх кількість та внутрішній радіус котушки для трьох випадків залишалися незмінними, то зростання ширини провідника призводить до збільшення загальної довжини провідника. Тому для порівняння вибрали відношення R/R_0 та R'/R_0 , де R – опір котушки на змінному струмі без магнітного

середовища, R' – опір котушки на змінному струмі з наявністю магнітного середовища, R_0 – опір на постійному струмі.

Моделювання проводили для котушок, які склалися з трьох шарів по 32 витки в кожному з внутрішнім радіусом $r = 3,5$ мм та відстанню між витками 0,2 мм. Розглядалися два випадки: без магнітного середовища та з магнітним середовищем. При такій конфігурації опір котушки при постійному струмі в першому випадку $R_{0\gamma_1} = 1,779$ Ом, в другому – $R_{0\gamma_2} = 2,144$ Ом, в третьому – $R_{0\gamma_3} = 2,875$ Ом. Залежності відносного опору котушки від частоти показано на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Залежність відносного опору ІЕ від частоти для трьох варіантів коефіцієнтів форми $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: а – при відсутності магнітного середовища між витками котушки, б – при наявності магнітного середовища між витками котушки

Видно, що найбільше значення R/R_0 спостерігалось у випадку γ_3 , а найменше при γ_1 . Квадратна форма провідника займає проміжне значення. У всіх трьох випадках форми провідника при відсутності магнітного середовища відношення R/R_0 суттєво не відрізняються та лежать в межах 1,15...1,27 Ом для частоти 80 кГц.

Наявність магнітного середовища для провідника з коефіцієнтом форми γ_1 приводить до несуттєвого збільшення R'/R_0 в порівнянні з R/R_0 , а його залежність від частоти близька до лінійної (рис. 6,б). Така ж залежність спостерігається і для γ_2 (крива 2). У випадку γ_3 , суттєве збільшення опору котушки спостерігається на всьому діапазоні частот 10...80 кГц. Отже наявність магнітного середовища призводить до збільшення опору котушки, для $\gamma_1 - R'/R_0 = 2$, для $\gamma_2 - R'/R_0 = 5$, для $\gamma_3 - R'/R_0 = 40$.

Оскільки шари котушки розділені ізолятором з немагнітного матеріалу, то в цьому випадку він виконує роль немагнітного зазору. Товщина ізолятора підібрана таким чином, щоб максимальне значення індукції не перевищувало значення залишкової індукції, що для фериту даної марки становить 300 мТл.

Заповнення феритом області між витками для коефіцієнта форми провідника γ_1 дає можливість збільшити індуктивність планарного ІЕ більше, ніж в три рази від – 0,48 мГн до 1,6 мГн (рис. 7) та добротності від 75 до 230 (на частоті 80 кГц), при збереженні габаритних розмірів та незначному збільшенні опору його обмоток. Зміна матеріалу фериту нижньої та верхньої плівки з нікель-цинкового фериту марки PL11 на магній-цинковий ферит марки L18Н призвело до незначного підвищення як індуктивності так і добротності.

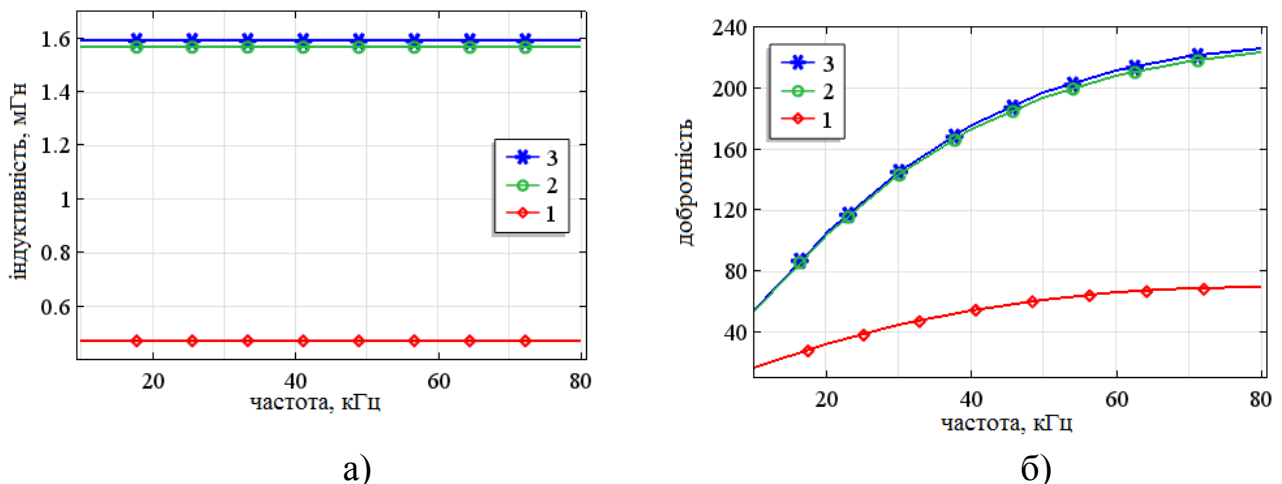


Рис. 7. Залежність індуктивності та добротності дроселя від частоти:
1 – без магнітного середовища між витками котушки, 2 – з магнітним середовищем, верхньою та нижньою плівками з фериту PL11, 3– з магнітним середовищем, верхньою та нижньою плівками з фериту L18Н

Як показали розрахунки, 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.

В третьому розділі проведено розрахунок втрат в планарному ІЕ та їх вплив на його температурні характеристики. Втрати в ІЕ були розділені на втрати в осерді $P_{осерд}$ та втрати в обмотці $P_{обм}$. Втрати в осерді поділялись на втрати на перемагнічування P_{II} та вихрові струми P_{BC} . Втрати в обмотці ІЕ поділялись на омичні, що визначалися втратами на постійному струмі P_r , втрати від скін-ефекту P_{CE} і втрати від ефекту близькості P_{EB} . Таким чином, загальні втрати ІЕ мають п'ять складових і можуть бути записані в наступному вигляді:

$$P_z = P_{осерд} + P_{обм} = (P_{II} + P_{BC}) + (P_r + P_{CE} + P_{EB}).$$

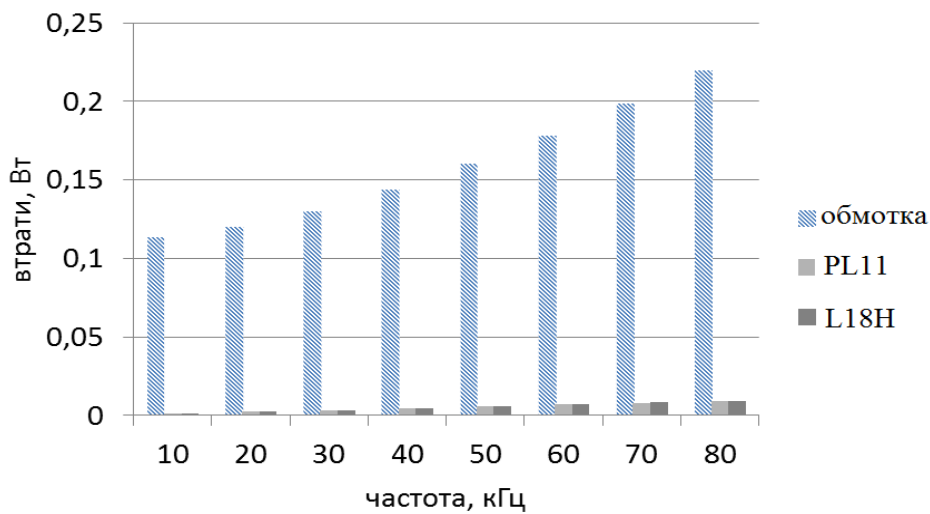


Рис. 8 Гістограми втрат в котушці та магнітопроводі ІЕ при γ_1 .

Розрахунки втрат проводилися для двох випадків матеріалів нижньої та верхньої плівок: 1 – нікель-цинковий ферит марки L18H, 2 – магній-цинковий ферит марки PL11. Гістограми втрат в котушці та магнітопроводі приведено на рис. 8. З гістограми видно, що зі

збільшенням частоти електромагнітного поля відбувається зростання втрат як в самій котушці, так і в магнітопроводі. У діапазоні частот 10 ... 80 кГц втрати в обмотці для γ_1 зростають приблизно від 0,1 до 0,2 Вт.

Частотні залежності втрат в котушках з коефіцієнтом форми провідника γ_2 та γ_3 показано на рис. 9.

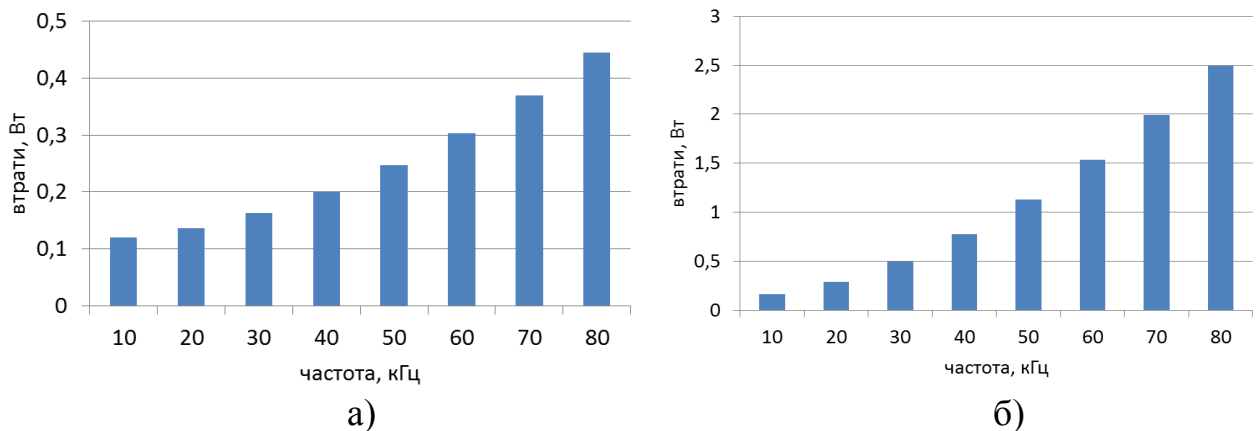


Рис. 9 Гістограми втрат в котушці ІЕ при різних формах провідника; а) – γ_2 б) – γ_3

Оскільки зміна форми провідника призведе до зміни радіуса ІЕ та його індуктивності, то при моделюванні було вибрано таку кількість витків, щоб індуктивності планарних ІЕ залишалися приблизно однаковими. Для γ_2 котушка складалася з трьох шарів по 29 витків в кожному, що забезпечило індуктивність 1,57 мГн, у випадку γ_3 індуктивність планарного ІЕ була рівна 1,49 мГн, при трьох шарах по 25 витків в кожному.

Розрахунки показали, що втрати в котушці з квадратною формою витків γ_2 у порівнянні з формою провідника γ_1 є вдвічі більшими, та складають 0,44 Вт на частоті електромагнітного поля 80 кГц. У випадку γ_3 вже на частоті 30 кГц втрати складають 0,5 Вт і стрімко зростають, досягаючи 2,5 Вт на частоті 80 кГц.

Варто також зазначити, що зі збільшенням радіусу ІЕ зріс і об'єм магнітопроводу верхньої та нижньої плівок, що призвело до зростання втрат у ньому. У випадку провідника з коефіцієнтом форми γ_2 на частоті 80 кГц втрати для фериту L18Н складають 0,01 Вт, а для фериту PL11 – 0,011 Вт. У випадку γ_3 втрати для фериту L18Н були рівні 0,012 Вт, а для PL11 – 0,014 Вт. Хоча й зміна форми провідника призвела до збільшення втрат в магнітопроводі, вони все ж залишаються набагато меншими порівняно з втратами в котушці.

Для розрахунку температурного режиму планарного ІЕ була розроблена модель, яка базується на геометрії моделі, що використовувалася для розрахунку магнітних та електричних параметрів ІЕ, але доповнена елементом друкованої плати ЕПРА (рис. 10).

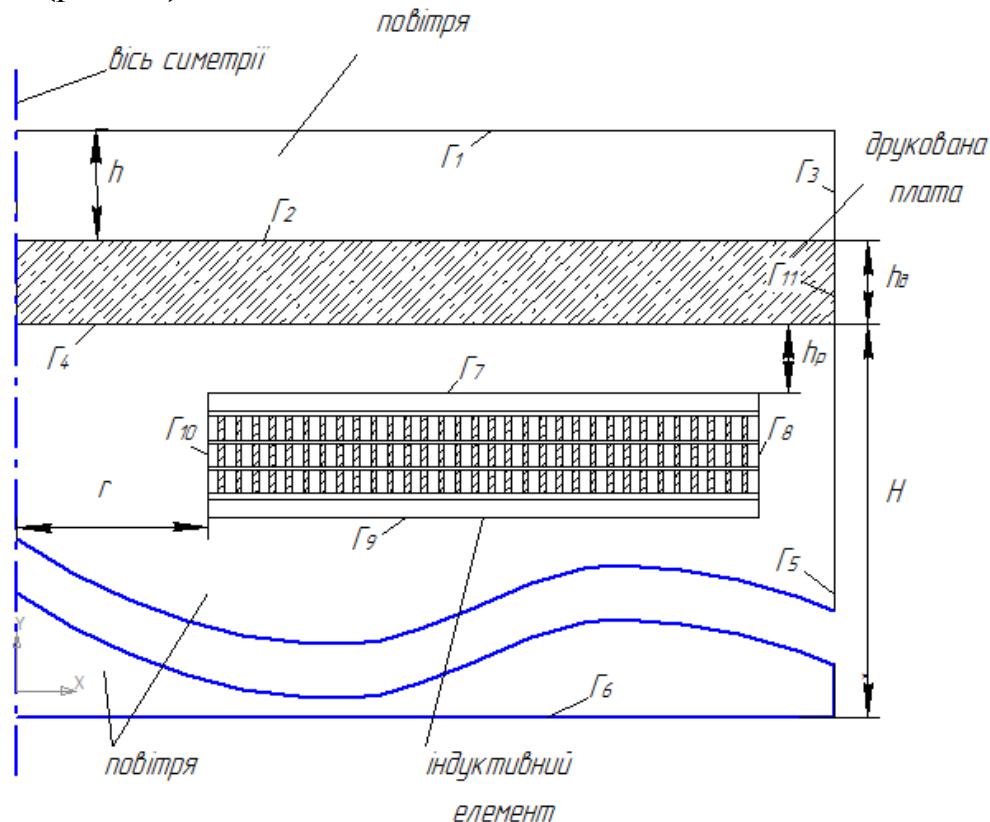


Рис. 10. Геометрія моделі ІЕ в корпусі ЕПРА

При моделюванні приймали, що ІЕ знаходиться в корпусі ЕПРА, який вмонтовано в світловий прилад. ІЕ розміщувався на відстані $h_p = 1,5$ мм від друкованої плати, товщина якої складає $h_o = 2$ мм. Сама друкована плата закріплена в корпусі ЕПРА на відстані $h = 2$ мм від верхньої кришки, яка контактує з оточуючим середовищем.

При створенні математичної моделі теплопровідності та конвекції планарного ІЕ вважали:

- повітря вважається прозорим, а тверді поверхні, що беруть участь в теплообміні, вважаються сірими поверхнями;
- на межі розділу різнорідних середовищ реалізується умова ідеального теплового контакту;
- повітряні потоки – ламінарні.

Температурний розрахунок зводився до визначення в будь-який момент часу значення температури T у всіх точках простору геометрії моделі. Для цього було використано рівняння неперервності теплового потоку, яке для ІЕ та друкованої плати має вигляд:

$$c\rho \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q, \quad (3)$$

де c – питома ізобарна теплоємність; ρ , k – густина та коефіцієнт теплопровідності елементів середовища, відповідно, Q – кількість теплоти, яка виділяється в ІЕ та рівна сумарній кількості теплових втрат в котушці і магнітопроводі:

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}) + \frac{1}{2} \operatorname{Re}(j\omega \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}). \quad (4)$$

Оскільки ІЕ знаходиться в повітряному просторі, то для нього рівняння неперервності теплового потоку:

$$\rho_n c \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q_n, \quad (5)$$

де ρ_n – густина повітря при температурі T ; $\mathbf{u}$ – вектор швидкості повітря; Q_n – кількість теплоти, що передається від ІЕ.

Для опису процесу конвекції повітря було використано рівняння механіки газу, що дозволяє знайти вектор $\mathbf{u}$ та значення тиску p в кожній точці змодельованого простору:

$$\rho_n (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) - \frac{3}{2} \eta(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \mathbf{F}, \quad (6)$$

де $\mathbf{I}$ – одинична матриця; η – в'язкість повітря; $\mathbf{F} = \mathbf{g} \cdot \rho_n$ – сила, що діє на одиницю об'єму нагрітого повітря; $\mathbf{g}$ – прискорення вільного падіння;

Для розрахунків було також використано рівняння нерозривності:

$$\nabla \cdot (\rho_n \mathbf{u}) = 0. \quad (7)$$

На зовнішніх границях ІЕ для врахування теплового випромінювання використано рівняння Стефана-Больцмана:

$$-\mathbf{n} \cdot (k \nabla \cdot \mathbf{T}) = \varepsilon_{\phi} \sigma T^4,$$

де $\varepsilon_{\phi} = 0,2$ – ступінь чорноти фериту; $\mathbf{n}$ – вектор нормалі до поверхні ІЕ; σ – стала Стефана-Больцмана.

При розрахунках вважалося, що температура верхньої кришки, яка контактує з оточуючим середовищем, залишається постійною, тому на границях Γ_1 , та Γ_{11} задавалася температура $T_{\text{ноч}} = 20$ °С. Границі Γ_3 , Γ_5 , Γ_6 вважалися відкритими, що забезпечило вільне відведення та підведення повітря:

$$\left[-p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) - \frac{3}{2}\eta(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] \mathbf{n} = p_0 \mathbf{n},$$

а границі Γ_2 , Γ_4 , $\Gamma_7 - \Gamma_{10}$, – закритими, а саме $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$.

Теплофізичні характеристики матеріалів, що були використані для моделювання, зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів

Тип матеріалу	Густина, кг/м ³	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Температура Кюрі, °С
Ферит NL80	5250	756	9,7	180
Ферит PL11	4900	720	16	240
Мідь	8700	385	400	–
Ізолятор (SiO ₂)	2200	298	9	–
Друкована плата (FR4)	1900	1369	0,3	–

Моделювання проводилося на частоті 80 кГц при силі струму 250 мА та $T_{\text{ноч}} = 20$ °С, $p_0 = 101,3$ кПа для котушки з коефіцієнтом форми γ_1 . У випадку монтажу ІЕ на контактних ніжках вважалося, що він перебуває на висоті $h_p = 1,5$ мм від друкованої плати. В цьому випадку повітря під дією конвекційних потоків може рухатися між друкованою платою та ІЕ. Температурне поле та розподіл швидкостей у стані температурної рівноваги показано на рис. 11.

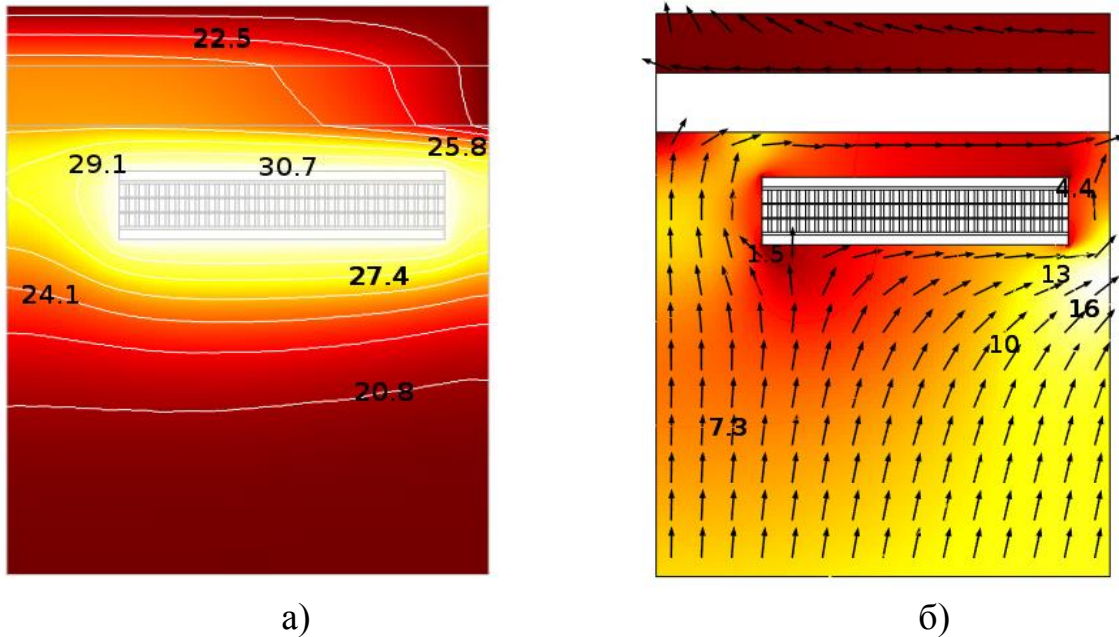


Рис. 11. Ізолінії температури, °С (а) та розподіл швидкостей повітря, мм/с (б) в частині простору ЕПРА в стані температурної рівноваги

Незаповнений простір в центральній частині індуктивного елемента служить додатковим отвором для відводу тепла, зумовленого як нагріванням, так і в результаті взаємного випромінювання протилежних поверхонь. Температура друкованої плати відрізняється від температури ІЕ на 7 °С і складає близько 22 °С. Отримані значення температури поверхні ІЕ вказують на можливість його розміщення на друкованій платі. Це дає можливість відведення тепла не лише за рахунок конвекції, але й за допомогою теплопровідності. Результати моделювання температурного розподілу та напрямку конвекційних потоків показано на рис. 12.

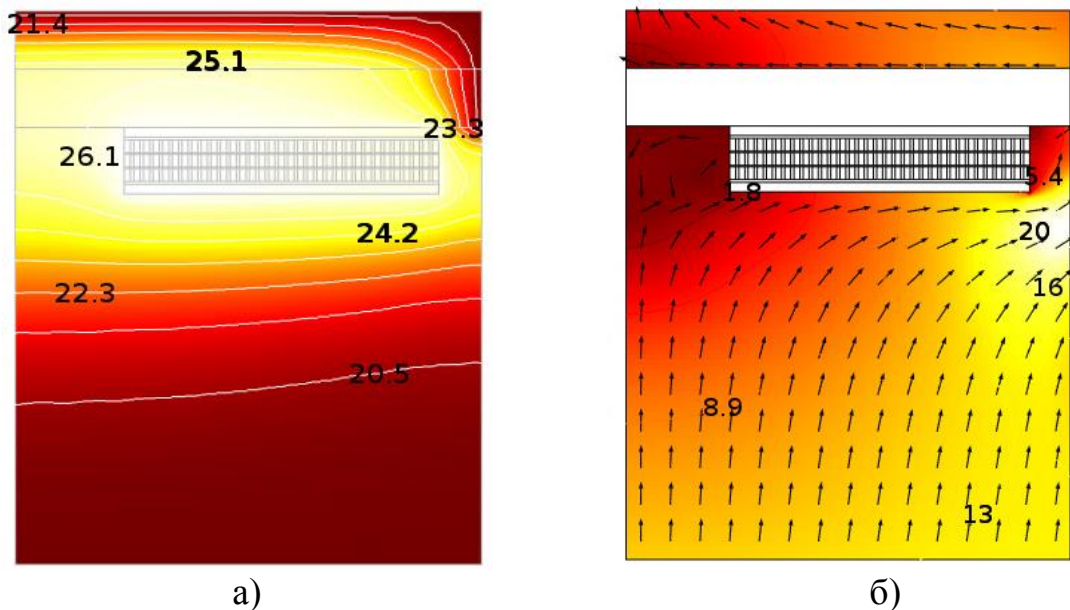


Рис. 12. Ізолінії температури, °С (а) та напрямку конвекційних потоків (б) у стані температурної рівноваги при розміщені ІЕ на друкованій платі

В цьому випадку температура ІЕ є суттєво нижчою, ніж при розміщенні під платою і розподілена нерівномірно по його поверхні. При такому розміщенні, як і в попередньому випадку, це спричинено малою площею тепловідведення

Температура друкованої плати є вищою в порівнянні з попереднім розміщенням ІЕ та становить 25 °С. Варто зазначити, що така температура не впливатиме як на саму плату, так і на інші компоненти схеми, оскільки нагрівання в основному відбувається в області, яка знаходиться під самим індуктивним елементом.

Моделювання показало, що потужність втрат за рахунок випромінювання в зв'язку з відносно низькою температурою самого ІЕ є незначною та складає для зовнішніх поверхонь у стані температурної рівноваги 5,6 мВт. Таке випромінювання не призведе до суттєвого нагрівання оточуючих компонентів.

Температура поверхні ІЕ розміщеного на друкованій платі у випадку коефіцієнта форми γ_2 та γ_3 становила 40 °С та 65 °С, відповідно. Тепловий розрахунок показав, що конструкції ІЕ з коефіцієнтами форми провідника γ_1 та γ_2 , залишаються теплонавантаженими на всьому діапазоні досліджуваних частот, а їх температури не перевищують температуру оточуючого середовища на 30 °С. У випадку γ_3 на частоті вищій 60 кГц конструкція планарного ІЕ є теплонавантаженою та потребує примусового охолодження для забезпечення нормального теплового режиму роботи.

У четвертому розділі проведено моделювання вихідного каскаду ЛЛ з планарним ІЕ.

Найбільш поширеною схемою вихідного каскаду ЕПРА є напівмостовий резонансний інвертор з послідовним коливальним контуром LC, в якому ЛЛ під'єднана паралельно до конденсатора С.

При роботі ЛЛ на частоті, вищій 10 кГц через інерційність процесів в плазмі розряду її вольт-амперну характеристику можна вважати лінійною. Це дозволило розглядати лампу як активний опір. Для дослідження роботи ЛЛ з планарним ІЕ було проведено моделювання роботи вихідного каскаду в середовищі Comsol Multiphysics. Для цього модель ІЕ було доповнено еквівалентною схемою електричного кола вихідного каскаду (рис. 13). Тут ЛЛ представлена $R1 - R4$, опором ділянок електродів та R_d – еквівалентним опором плазмового розряду. Модель дроселя планарної системи представлена у вигляді джерела струму I_o , з власним опором R_o та індуктивністю L_o .

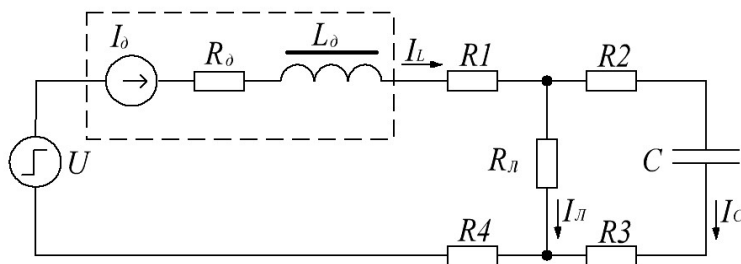


Рис. 13. Еквівалентна схема вихідного каскаду ЕПРА з планарним ІЕ

Вирази для індуктивності дроселя та ємності конденсатора мають вигляд:

$$L = \frac{U_m \eta}{\omega_n I_{mL}}, \quad C = \frac{1}{\omega_n^2 L},$$

де η – коефіцієнт втрат енергії в котушці дроселя та на електродах ЛЛ; ω_n – частота напруги живлення в номінальному режимі; $I_{mЛ}$ – амплітудне значення струму ЛЛ в номінальному режимі; U_m – амплітудне значення напруги на інверторі.

Розрахунок номінальних параметрів елементів вихідного каскаду проводився за наступним алгоритмом:

- 1) із значення струму ЛЛ та частоти слідування імпульсів інвертора розраховуємо величини індуктивності дроселя та ємності конденсатора;
- 2) по розрахованому значенню ємності вибираємо конденсатор з близьким номінальним значенням з наявної номенклатури;
- 3) перераховуємо значення індуктивності дроселя або, при можливості, змінюємо частоту слідування імпульсів.
- 4) з частотної залежності струму електродів ЛЛ вибираємо частоту підігріву $\omega_{роз}$ такою, при якій значення струму через електроди ЛЛ не перевищує максимально допустиме для даного типу лампи;
- 5) з частотної залежності напруги на резонансному конденсаторі вибираємо частоту $\omega_{зн}$, при якій напруга на ЛЛ рівна напрузі запалювання.

Для прикладу було взято вихідний каскад ЕПРА для лампи типу Т5 потужністю 35 Вт, для якої значення робочого струму $I_n = 175$ мА та напруги $U_n = 205$ В.

Результати розрахунку номінальних параметрів такого каскаду становлять: індуктивність $L = 1,6$ мГн, ємність $C = 2,7$ нФ. Залежність відношення напруги на ЛЛ U_n до напруги на інверторі U в режимі підігріву, запалювання та горіння показано на рис. 14.

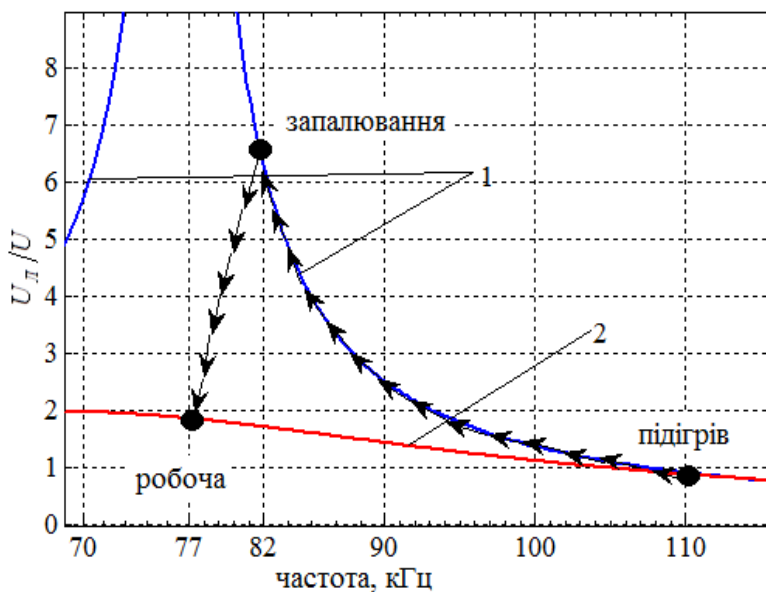
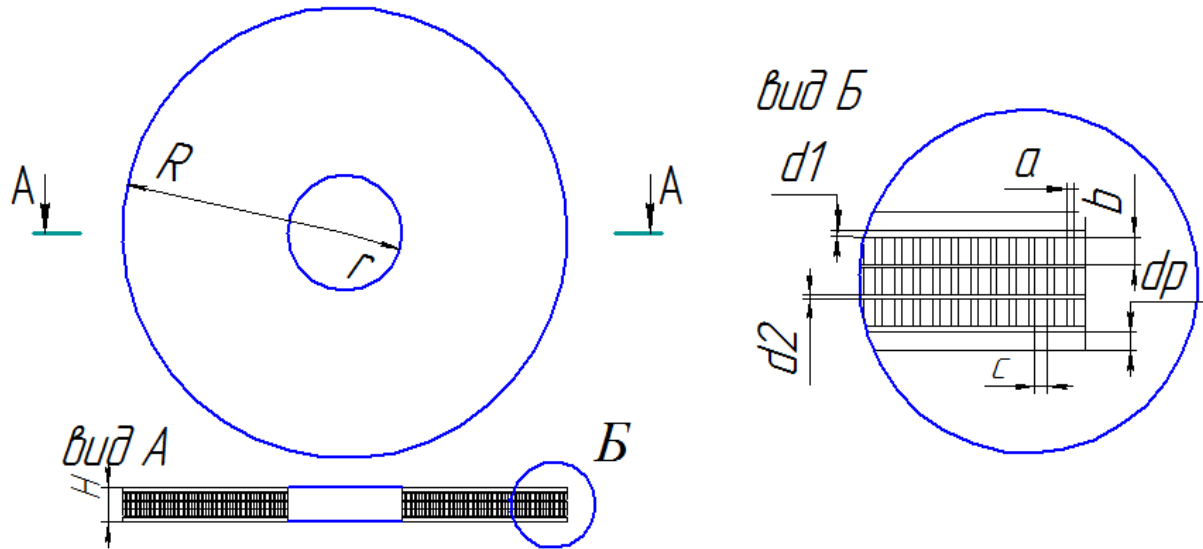


Рис. 14. Залежність відносної напруги на лампі від частоти: 1 – режим запалювання, 2 – робочий режим

Процес запалювання розряду в лампі полягає в плавному зменшенні частоти резонансного контура від частоти підігріву (110 кГц) до робочої частоти (77 кГц). При цьому траєкторія переміщення робочої точки відбувається по резонансній кривій з високою добротністю (ділянка «підігрів – запалювання»). Зі зменшенням частоти значення напруга на конденсаторі зростає та при досягненні 1000 В (точка запалювання на рис. 14) відбувається запалювання лампи. Опір лампи R_d стає набагато

меншим, що призводить до зниження добротності резонансного контура. В подальшому частота поступово зменшується з 82 кГц до робочої 77 кГц.

Загальний вигляд планарного ІЕ, та його геометричні розміри показано на рис. 15.



Кількість витків	32	Ширина провідника, a , мм	0,11
Кількість шарів	3	Відстань між витками, b , мм	0,2
Внутрішній радіус ІЕ, r , мм	3,4	Товщина ізолятора, $d2$, мм	0,05
Зовнішній радіус ІЕ, R , мм	13,5	Товщина плівок, dp , мм	0,33
Товщина, H , мм	2,28	Товщина ізолятора між плівками та котушкою, $d1$, мм	0,33
Висота провідника, c , мм	0,44		

Рис. 15. Загальний вигляд та розміри планарного ІЕ для ЛЛ типу Т5 з потужністю 35Вт

Шляхом моделювання отримано осцилограми напруг та струмів лампи і дроселя при роботі в номінальному режимі, які показано на рис. 16.

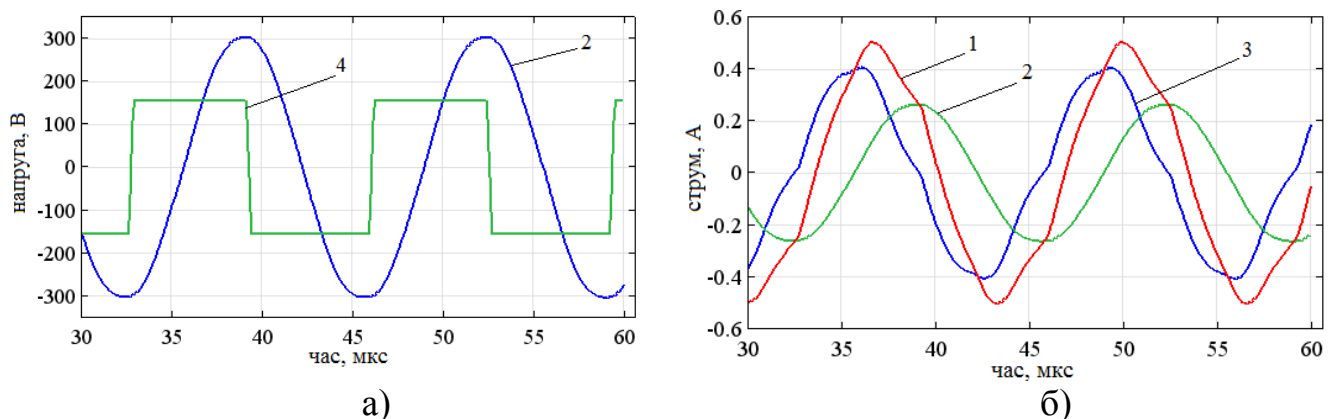


Рис. 16. Осцилограми напруги (а) та струму (б) елементів вихідного каскаду: 1 – дроселя; 2 – лампи; 3 – конденсатора; 4 – напруги на інверторі

З рис. 16,а та 16,б видно, що електромагнітні параметри планарного ІЕ забезпечують необхідні значення струму та напруги лампи. Амплітудні значення становлять 0,247 А та 300 В, відповідно. Амплітудне значення струму дроселя є у два рази більше, ніж струм лампи, та становить 0,5 А.

ВИСНОВКИ

1. Проведено розрахунок індуктивності, опору та добротності планарних ІЕ круглої, квадратної та трикутної форми. Показано, що оптимальною є багат шарова котушка, круглої форми, яка забезпечує на 17 % більшу добротність у порівнянні з іншими конфігураціями, при однаковій індуктивності.
2. Запропоновано конструкцію багат шарового ІЕ планарної системи в якому міжвитковий простір заповнено нікель-цинковим феритом марки PL11.
3. Розроблено математичну модель та алгоритм розрахунку магнітних та електричних характеристик планарних ІЕ з магнітним середовищем, що враховує форму провідника, частоту струму та нелінійність магнітних характеристик матеріалів. Встановлено, що наявність магнітного середовища змінює розподіл густини струму в котушці ІЕ та призводить до зростання його опору. Оптимальним перерізом провідника є $a:b=1:4$.
4. Проведено розрахунок втрат потужності в планарному ІЕ та показано, що основна доля втрат відбувається в обмотках котушки, у випадку коефіцієнта форми провідника $\gamma_1=0,11:0,44$ та $\gamma_2=0,22:0,22$ мм втрати потужності не перевищують 0,25 Вт та 0,45 Вт, відповідно.
5. На основі математичної моделі запропоновано алгоритм розрахунку температурних характеристик планарних ІЕ при їх охолодженні за рахунок конвекції, теплопровідності та радіаційного випромінювання. Показано, що ІЕ з коефіцієнтами форми γ_1 та γ_2 можна використовувати в ЕПРА без додаткового охолодження.
6. Запропоновано методику розрахунку електромагнітних параметрів ІЕ планарної системи для ЕПРА ЛЛ та проведено їх розрахунок для лампи Т5 потужністю 35 Вт.
7. Визначено частотний діапазон резонансу та нормальної роботи ЛЛ типу Т5 потужністю 35 Вт в режимах підігріву, запалювання та горіння, на основі розрахунку вихідного каскаду ЕПРА з планарним ІЕ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Андрійчук В. Комп'ютерне моделювання індуктивного елемента планарної системи / В. Андрійчук, М. Наконечний // технічна електродинаміка, 2015, №2 — С. 83–87;
2. Андрійчук В. Мікромагнітний розподіл поверхні плівки на основі комп'ютерної моделі / В. Андрійчук, Ю. Бачинський М. Наконечний. // Вісник

ТНТУ. — 2014. — Том 73. — № 1. — С 187-193. — (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

3. Андрійчук В. Аналіз якісних параметрів індуктивних планарних систем на основі комп'ютерної моделі / В. Андрійчук, М. Наконечний, М. Липовецький // Комунальне господарство міст, 2014, випуск 118(1) С. 22–25;

4. Андрійчук В. Комп'ютерне моделювання баластного дроселя планарної системи люмінесцентної лампи / В. Андрійчук, М. Наконечний // Вісник ТНТУ. — 2015. — Том 77. — № 1. — С. 185-191. — (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

5. Андрійчук В. Вплив форми планарних індуктивних елементів на їх електромагнітні параметри / В. Андрійчук, М. Наконечний // Вісник Хмельницького національного університету. 2016 – №1(233) – С. 73–78.

6. Andriychuk V. The effect of energy-efficient light sources on the quality of electricity / V. Andriychuk, N. Lipovetsky, M. Nakonechny, S. Potalitsyn // EUREKA: Physical Sciences and Engineering. – Tallinn – 2016. nr 1. – P. 38-48.

7. Використання аморфних плівок в якості магнітопроводу імпульсного блоку живлення: матеріали V Международной научно-технической конференции ["Современные тенденции развития светотехники"], (Харків, 15-16 травня 2013р.) / Міністерство освіти і науки України, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. – Х. : ХНУМГ, 2013. – С.48-51.

8. Використання тонкоплівкових матеріалів в баластах газорозрядних ламп: матеріали XV Наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 14–15 грудня 2011). – Т: ТНТУ, 2013. – С.157.

9. Перспективы использования тонких магнитных пленок в качестве балластов газоразрядных ламп: материалы XI Международной научно-технической конференции [«Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики»], (Россия, Саранск 3–4 грудня 2013), Саранск: СВМО, 2013. С.255-258.

10. Дослідження впливу температури на електромагнітні характеристики індуктивного елемента: матеріали XVIII наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 29–30 жовтня 2014). – Т. ТНТУ, 2014.– С. 148-149.

11. Дослідження якісних характеристик планарних індуктивних елементів: матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції [«Моделювання в електротехніці електроніці та світлотехніці МЕЕС14»], (Київ, 2–3 жовтня 2014). – К.: КНАУ, 2014. Режим доступу: <https://fracsim.wordpress.com>, вільний. – Загл. з екрану. (12.03.2015).

12. Наконечний Особливості конструювання вихідного блоку електронних пускорегулювальних апаратів: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції [«Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»], (Тернопіль, 19–21 травня 2015 р).. – Т: ТНТУ, 2015 – С. 172.

АНОТАЦІЯ

Наконечный М. С. Моделирование та розрахунок процесів у планарних індуктивних елементах для електронної пускорегулювальної апаратури люмінесцентних ламп. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла. – Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, – Тернопіль, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розробленню математичних моделей дослідження магнітних та електричних характеристик планарних індуктивних елементів для високочастотного живлення люмінесцентних ламп. Показано, що наявність магнітного середовища між витками котушки підвищує індуктивність та добротність при збереженні геометричних розмірів.

Розроблено математичну модель для розрахунку температурних характеристик планарних ІЕ при їх охолодженні за рахунок конвекції, теплопровідності та радіаційного випромінювання, на основі якої проведено розрахунок теплових втрат.

Проведено розрахунок вихідного каскаду ЛЛ, та моделювання роботи планарного індуктивного елемента в якості дроселя ЛЛ типу Т5 потужністю 35 Вт. Показано, що розрахована конструкція забезпечує необхідну величину напруги та струму на лампі.

Ключові слова: пускорегулювальний апарат, люмінесцентна лампа, планарний індуктивний елемент, індуктивність, добротність, теплові втрати, температура, математична модель індуктивного елемента, вихідний каскад.

АННОТАЦИЯ

Наконечный М. С. Моделирование и расчет процессов в планарных индуктивных элементах для электронной пускорегулирующей аппаратуры люминесцентных ламп. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 – светотехника и источники света. – Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя, – Тернополь, 2016.

В диссертационной работе определены основные направления использования планарных индуктивных элементов при конструировании устройств силовой электроники. Проведен расчет индуктивности, сопротивления и добротности планарных индуктивных элементов круглой, квадратной и треугольной формы. Показано, что оптимальной является многослойная катушка круглой формы.

Для повышения индуктивности и добротности планарных индуктивных элементов предложено конструкцию, в которой межвитковое пространство заполнено никель-цинковым ферритом, который одновременно исполняет роль изолятора.

Разработано математическую модель для исследования магнитных и электрических характеристик планарных индуктивных элементов, которая учитывает влияние формы проводника, частоту тока и нелинейность магнитных характеристик материалов. Показано, что наличие магнитной среды изменяет распределение плотности тока в катушке индуктивного элемента и приводит к росту его сопротивления.

Разработана математическая модель для расчета температурных характеристик планарных индуктивных элементов при их охлаждении за счет конвекции теплопроводности и излучения, проведен расчет тепловых потерь. Показано, что охлаждение только за счет конвекции малоэффективно в силу малых геометрических размеров индуктивного элемента. Предложено размещать его непосредственно на поверхности печатной платы, что позволило дополнительного отвести тепло и снизить рабочую температуру на 5 °С.

Рассчитаны частотные зависимости тока и напряжения ЛЛ типа Т5 с мощностью 35 Вт в режимах подогрева, зажигания и горения, проведено моделирование его работы в качестве дросселя ЛЛ, показано, что предложенная конструкция, обеспечивает номинальную величину напряжения и тока на лампе.

Ключевые слова: пускорегулирующий аппарат, люминесцентная лампа, планарный индуктивный элемент, индуктивность, добротность, тепловые потери, температура, математическая модель индуктивного элемента, выходной каскад.

ANNOTATION

M. S. Nakonechnyi. Simulation and calculation of processes in planar inductive elements for electronic start-control devices of fluorescent lamps. - Manuscript. The thesis for the degree of candidate of technical sciences (PhD), specialty 05.09.07 - lighting engineering and light sources, - Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, - Ternopil, 2016.

The thesis is dedicated to the development of mathematical models of magnetic and electrical characteristics of planar inductive elements research for high frequency power supply of fluorescent lamps. It is shown that the availability of magnetic medium between the turns of the coil increases the inductance and quality factor while maintaining the geometric dimensions. A mathematical model has been developed to calculate the temperature characteristics of planar inductive elements when they are cooled by convection, heat conduction and radial emission on the basis of which the calculation of heat losses has been done.

The calculation of the output stage of a fluorescent lamp and simulation of planar inductive element's work as throttle of fluorescent lamp of type T5 and power of 35 W has been done. It is shown that the calculated construction provides the lamp with the necessary voltage and current.

Key words: start-control device, fluorescent lamp, planar inductive element, inductance, quality factor, heat losses, temperature, mathematical model of inductive element, output stage.