

УДК 621.791:625

# Комп'ютерне моделювання та розрахунок індукції магнітного поля індукційного концентратора

Клименко<sup>f</sup> В. О., ORCID [0000-0003-2502-3738](https://orcid.org/0000-0003-2502-3738)Майкут<sup>f</sup> С. О., ORCID [0000-0002-0913-4190](https://orcid.org/0000-0002-0913-4190)Цибульський Л. Ю., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-7431-6417](https://orcid.org/0000-0002-7431-6417)Кузьмичев<sup>s</sup> А. І., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Національний Технічний Університет України

«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського» ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

DOI: [10.20535/2523-4455.mea.208707](https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.208707)

**Анотація**—Проведено комп'ютерне моделювання індукційного концентратора-трансформатора та розрахунок розподілу індукції магнітного поля в ньому в залежності від діаметра робочого індуктора та його положення в концентраторі. Розрахунок проведено за рівняннями Максвелла в диференціальній формі. Властивості матеріалу вважалися ізотропними, гістерезисом і магнітним насиченням нехтували. Модель враховувала розподіл густини струму в елементах індукційного концентратора-трансформатора, само- та взаємоіндукцію між елементами. Отримані залежності розподілу індукції магнітного поля від частоти струму живлення (для 5,7 кГц, 60 кГц та 440 кГц) та конструктивних параметрів, які доводять існування декількох резонансів передачі енергії від первинного індуктора до робочого.

**Ключові слова** — індукційний концентратор-трансформатор; індукція магнітного поля; комп'ютерне моделювання; рівняння Максвелла.

## I. ВСТУП

Індукційний нагрів отримав поширення в промисловості та у фізичних експериментах [1]. Було проведено багато різноманітних досліджень по індукційному нагріву і його застосуванню [2]–[4]. На відміну від концентраторів магнітного поля з використанням постійних магнітів [5], індукційні котушки дозволяють отримати магнітні поля значно більшої напруженості. Використання індукційних пристроїв з концентраторами дозволяє отримати магнітні поля з заданою конфігурацією і вирішувати різноманітні науково-технічні задачі: локальне закалювання частин складних деталей [6], нагрівання та намагнічування потоків газових сумішей для розділення компонентів [7], [8], випаровування та іонізація атомів [9], [10], плавлення та зварювання різноманітних матеріалів [11], [12], левітація фізичних [10] та біологічних об'єктів у магнітних пастках та ін. З електротехнічної точки зору конструкція з концентратором являє собою понижуючий трансформатор змінного струму, який передає потужність від багатовиткового індуктора (первинної обмотки) до одновиткового індуктора (вторинної обмотки). Вторинна обмотка генерує індукційні замкнуті струми (струми Фуко) в тілі, яке ними нагрівається. При цьому металеву поверхню, по якій протікають струми Фуко, можна вважати за третю обмотку трансформатора. З цієї причини

будемо використовувати термін «концентратор-трансформатор».

Індукційні котушки, які використовуються в технологіях і дослідженнях, можуть бути циліндричними, конічними або плоскими спіралями, мати складну ламану форму, мати від одного до десятків витків [10]. Різноманіття конструкцій викликано метою зосередити магнітне поле в заданій області. Для кожної конструкції і технологічного режиму застосування необхідно встановити оптимальні електротехнічні, електромагнітні та термічні умови. Обмеження на вибір частот електричного струму, який використовують для живлення індукторів, вимагає ускладнення конструкції – введення вторинних обмоток для трансформації електричної енергії та погодження імпедансу навантаження з джерелом [9], [10]. Трансформаторна конструкція оптимізує енергетичні та електротехнічні показники експлуатації індукційних систем, але у кожному випадку використання вимагає складних розрахунків оптимальної конструкції і режимів експлуатації.

В індукційних системах первинна обмотка використовується для погодження імпедансу з джерелом енергії, а вторинна – для зосередження енергії в заданому об'ємі. Саме тому вторинну обмотку часто називають концентратором. Окрім індукційного (електромагнітного) концентратора у вигляді



трансформатора, використовують також окремі елементи для концентрації магнітного потоку, які електрично не пов'язані з індуктором [5], [6]. Їх також називають концентраторами.

Індукційні концентратори технологічного призначення не мають єдиної універсальної конструкції через велику кількість можливих технологічних індукційних пристроїв і конфігурацій оброблюваних об'єктів. Це вимагає розробки і використання інженерних, наближених до практики, методик розрахунку, які передбачені для конкретних конструкцій. Однак ці методики мають базуватися на фундаментальних законах електродинаміки і в першу чергу на рівняннях Максвелла.

Актуальність роботи полягає в тому, що використання комп'ютерного моделювання дозволяє значно зменшити похибку розрахунків, провести оптимізацію всіх параметрів для заданих режимів експлуатації при суттєвому зменшенні часу та витрат на розробку пристрою. Особливо це актуально для індукційних концентраторів технологічного призначення у промисловості електронних приладів [9], [10]. Такі індукційні концентратори нагрівають робоче тіло з метою зміни його агрегатного стану, як то плавлення, випаровування та сублимація, з подальшою іонізацією парового потоку [9], [10]. Розробка таких індукційних систем вимагає рішення різних, але пов'язаних фізичних задач: електромагнітної, термоелектричної, термоемісійної і транспортної для атомів та електронів, іонізаційної, та задачі масопереносу матеріалу на підкладку.

Метою статті є комп'ютерне моделювання та дослідження індукції магнітного поля в робочому об'ємі індукційного концентратора магнітного поля циліндричної геометрії для широкого технологічного призначення.

Особливість індукційної системи, яка буде моделюватися, є те, що вона являє собою двохступеневий понижуючий трансформатор. Така система не розглядалася в літературі, але вона перспективна для визначених застосувань, і становить практичний інтерес для технології індукційного нагріву твердих тіл і плазми. Дослідження даної системи представляє також науковий інтерес, оскільки вона характеризується параметрами, які розподілені в просторі, і звичайний схемотехнічний підхід до її аналізу недоцільний.

## II. КОНСТРУКЦІЯ ІНДУКЦІЙНОГО КОНЦЕНТРАТОРА-ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ВИПАРНИКА З ІНДУКЦІЙНИМ НАГРІВАННЯМ

Індукційне нагрівання здійснюється електромагнітним полем, яке без втрат проникає через діелектричні стінки. Це дозволяє використовувати його для виробництва спеціальних матеріалів і електронних компонентів, коли випаровуються хімічно активні, токсичні та радіоактивні речовини в герметичних оболонках. До того ж, трубчасті електроди для деяких електронних пристроїв (електронних, рентгенівських і нейтронних трубок, фотоелектронних і вторинно-електронних помножувачів, внутрішніх електропровідних і екрануючих покриттів на елементах

в потужних генераторних приладах) виготовляють металізацією внутрішньої поверхні діелектричних трубок [13]. Типове застосування таких трубок – це оболонки трубчатих озонаторів на бар'єрному розряді, у яких металеве покриття виконує роль одного з електродів, а сама трубка є діелектричним бар'єром [14].

Індукційний нагрів через діелектричні стінки також застосовується в плазмотронах [7], [8] для генерації термічної плазми за рахунок взаємодії електромагнітного поля з іонізованим газом.

На Рис. 1 наведена фотографія індукційного концентратора-трансформатора в якості випарника, конструкція якого включає індуктор 1, вторинний виток 2, робочий індуктор для нагрівання завантаження в тиглі 3, теплозахисний екран для захисту підкладки від перегріву 4 та скляну підкладку у вигляді трубки 5. Тут індуктор 1 – первинна обмотка трансформатора змінного струму. Вторинний виток 2 – вторинна обмотка трансформатора, яка двома радіальними шинами з'єднана з робочим індуктором 3, який по суті є первинною обмоткою концентратора вторинного трансформатора. Поверхня тигля або речовини, що нагрівається індуктованими струмами Фуко, є вторинною обмоткою вторинного трансформатора. Як вже відмічалось, наведена конструкція представляє собою двохступеневий понижуючий трансформатор високої частоти.

Така конструкція при своїй відносній простоті дозволяє реалізувати широкий спектр технологічних операцій. Але індукційний концентратор-трансформатор, як технологічний пристрій для отримання парових потоків атомів різних речовин, при зовнішній простоті являє собою складний пристрій, який потребує системного та комплексного аналізу для оптимізації конструкції та режимів експлуатації.

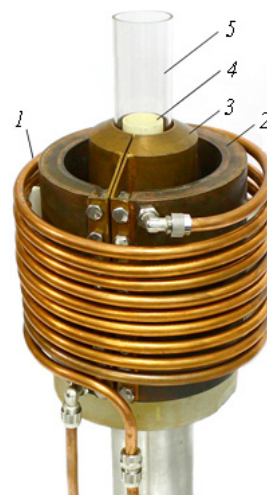


Рис. 1 Індукційний концентратор-трансформатор в якості випарника для металізації трубок

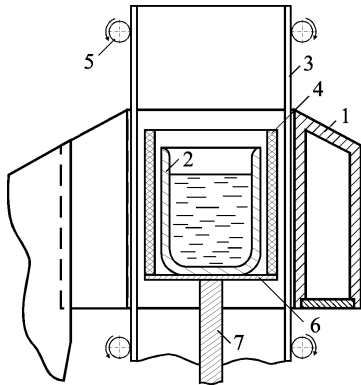


Рис. 2 Робочий індуктор концентратора з обладнанням для металізації трубок

Детально обладнання для металізації внутрішньої поверхні діелектричних трубок зображено на Рис. 2. Робочий одновитковий індуктор 1 з порожниною для водяного охолодження оточує тигель 2 з матеріалом, який випаровується. Тигель 2 разом з циліндричним теплозахисним екраном 4 розташований всередині трубки 3, на внутрішній поверхні якої конденсується плівка з пари матеріалу з тигля. Теплозахисний екран 4 знижує теплові втрати тигля і захищає трубу 3 від перегріву. Тигель для таких процесів зазвичай спікають з електропровідної кераміки, наприклад, за складом  $TiB_2 + TiC + AlN$ , графіту або  $Mo$ . В якості екрану використовують жаростійкі матеріали, як то  $BN$  або оксид алюмінію. Трубка 3 центрується за допомогою валиків 5. Тигель розміщено на діелектричному століку 6, який кріпиться до стійки 7.

Особливістю даного індукційного концентратора-трансформатора є комбінація одновиткового робочого індуктора зі знижувальним ВЧ автотрансформатором (10:1). Такий випарник призначений для нанесення металевого покриття ( $Al$ ,  $Cr$ ,  $Cu$ ,  $Zn$ ) товщиною 0,1-2,0 мкм на внутрішню поверхню скляних трубок діаметром 28-34 мм. Під час нанесення покриття трубка повільно піднімається для нанесення покриття по всій довжині.

Можливі різні модифікації випарних систем з індукційним нагріванням через діелектричні стінки, всі вони мають наступну перевагу – розміщення індукційної системи в атмосфері за межами вакуумної камери. Це значно полегшує їх обслуговування в порівнянні з розташуванням індукційної систем у вакуумі повністю.

На Рис. 3 наведено приклад конструкції індукційного концентратора-трансформатора з конкретними розмірами.

З метою охолодження всі складові індукційного концентратора виготовлені порожніми для пропускання охолоджувальної води. Робочий індуктор 3 приєднується до вторинного витка трансформатора 2 за допомогою двопровідної лінії передач 4.

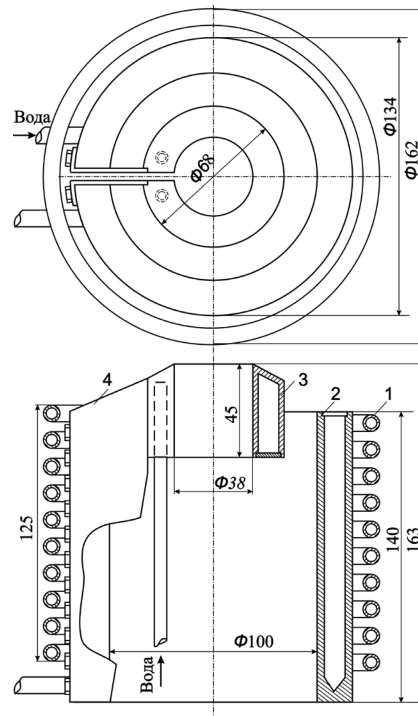


Рис. 3 Індукційний концентратор.

На Рис. 3 індуктор 1 роз'єднано з вторинним витком 2, це так зване, трансформаторне включення.

А на Рис. 1 показано, що верхній виток первинного індуктора електрично з'єднаний з вторинним витком, тобто маємо автотрансформатор. Але в нашому дослідженні з метою спрощення розглянуто індукційний концентратор з трансформаторним з'єднанням.

### ІІІ. ВИБІР МЕТОДУ І ЕТАПІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО КОНЦЕНТРАТОРА-ТРАНСФОРМАТОРА

Процес осадження конденсату на підкладки забезпечує декілька фізично пов'язаних процесів:

- розподіл струму в індукційному концентраторі при живленні індуктора високочастотною напругою;
- розподіл напруженості магнітного поля у просторі індукційного концентратора;
- розподіл струму в тиглі і в його завантаженні;
- розподіл температури в тиглі по поверхні випаровування та інших поверхнях;
- інтенсивність потоку та розподіл в просторі парового потоку матеріалу завантаження;
- розподіл напруженості електричного поля;
- розподіл іонізованих атомів в паровому потоці;
- траєкторії іонів та енергетичні параметри парового та іонного потоків.

Пов'язаний розрахунок всіх процесів у концентраторі здійснюється за фізико-топологічною схемою, яка встановлює зв'язок між процесами, вплив параметрів речовин та послідовність розрахунків.

Відповідно до мети дослідження в роботі досліджуються перші два процеси, які об'єднані назвою – електромагнітне дослідження. Це дослідження є ключовим для визначення задач дослідженням всіх наступних процесів. Адекватність моделі розподілу індукції магнітного поля фізичній дійсності визначає якість всіх подальших розрахунків.

Комп'ютерне моделювання для дослідження індукційного концентратора складається з 4 етапів:

- створення геометричної моделі і просторової межі розрахунків;
- привласнення елементам моделі фізичних властивостей відповідно до електромагнітної задачі;
- встановлення граничних та початкових умов;
- створення розрахункової сітки.

#### А. Етапи моделювання

Геометрична трьохмірна модель індукційного концентратора представлена на Рис. 4. Розміри за всіма осями задані у мм.

За середовище, яке оточує концентратор у дослідженні, обрано вакуум. Оточення, як і розрахунковий простір, задано паралелепіпедом з габаритами  $200 \times 200 \times 240$  мм<sup>3</sup>.

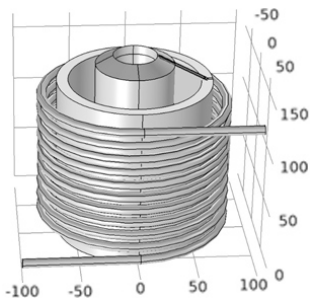


Рис. 4 Геометрична модель індукційного концентратора-трансформатора (розміри у мм).

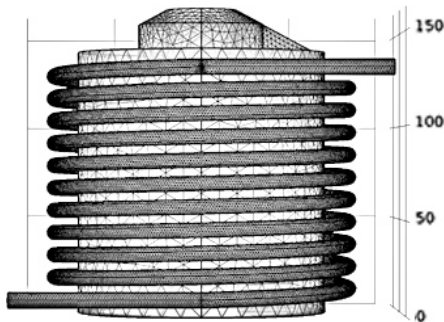


Рис. 5 Розрахункова сітка в елементах індукційного концентратора-трансформатора.

Як відображено на Рис. 1, всі елементи індукційного концентратора виготовлені з міді. У розрахунках використовувалося значення електропровідності міді – 59,98 МСм/м, що відповідає температурі 325 °С, яку зазвичай забезпечує вода охолодження при роботі концентратора.

Магнітна проникність міді –  $\mu=1$ .

Діелектрична проникність міді –  $\epsilon=1$ .

До індуктора концентратора прикладалася напруга 100 В частотою 440 кГц. Інші початкові умови для електромагнітної задачі не передбачені.

На Рис. 5 наведено приклад розподілу розрахункової сітки в елементах індукційного концентратора для розрахунку розподілу струму в них. На рисунку видно тільки поверхневу сітку, хоча в тілі елементів сітка також будується.

Для оптимізації розрахунків розрахункова сітка будується з меншим кроком у місцях більшої неоднорідності поля: густини струму, напруженості, потоку.

Загальна кількість вузлів розрахункової сітки у концентраторі досягала 1900000.

#### IV. МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСІВ

Розрахунок електромагнітного поля проводився за рівняннями Максвелла. В загальному випадку для нестационарних електромагнітних полів можна записати рівняння Максвелла в диференціальній формі як [15]:

- закон Ампера

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (1)$$

- закон Фарадея

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

- закон Гауса для магнетизму

$$\nabla \times \vec{B} = 0; \quad (3)$$

- закон Гауса

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (4)$$

де  $\vec{E}$  – напруженість електричного поля,  $\vec{D}$  – щільність електричного потоку,  $\vec{H}$  – напруженість магнітного поля,  $\vec{B}$  – індукція магнітного поля,  $\vec{J}$  – щільність струму провідності і  $\rho$  – щільність електричного заряду.

Змінна напруга на індукторі призводить до появи змінного струму в індукторі. Відповідно до формули (1) змінний струм індуктора генерує в навколишній області змінне магнітне поле, яке буде мати ту ж частоту, що і струм джерела. Індукція магнітного поля залежить від струму, що протікає в індукторі, геометрії котушки і відстані від котушки. Змінне магнітне поле індуктує вихрові струми в усіх елементах, розташованих поблизу.

За формулою (2) індуквані струми мають ту ж частоту, що і струм джерела, проте їх напрям протилежний струму індуктора, відповідно до знаку мінус у (2). Відповідно до (1), змінні вихрові струми, індуквані у вторинному витку трансформатора, створюють свої власні магнітні поля, які мають протилежні напрямки до напрямку основного магнітного поля індуктора. Повне магнітне поле концентратора є результатом магнітного поля джерела і індукваних магнітних полів.

Вищенаведені рівняння Максвелла мають невідому форму, оскільки число рівнянь менше числа невідомих. Ці рівняння стають визначеними, коли задані співвідношення між величинами поля. Наступні співвідношення визначають величини поля і справдливі для лінійного ізотропного середовища [15]:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}; \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}; \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (7)$$

де параметри  $\varepsilon$ ,  $\mu_r$  і  $\sigma$  позначають відповідно відносну діелектричну проникність, відносну магнітну проникність і електропровідність матеріалу.

Беручи до уваги рівняння (5) і (7), рівняння (1) можна записати як:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial(\varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E})}{\partial t}. \quad (8)$$

Для більшості практичних застосувань індукторів частота струмів менше 10 МГц. Щільність індукваного струму провідності  $\mathbf{J}$  набагато більше, ніж струм зміщення, тому останнім членом в правій частині рівняння (8) можна знехтувати. Тому воно перетворюється у:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}. \quad (9)$$

Використовуючи векторну алгебру в рівняннях (1), (2) і (6), можна показати, що

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{H} \right) = -\mu_r \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (10)$$

Оскільки індукція магнітного поля  $\mathbf{B}$  задовольняє умові нульової дивергенції за рівнянням (3), вона може бути виражена через магнітний векторний потенціал  $\mathbf{A}$  як:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (11)$$

А тоді з рівняння (2) і рівняння (11) випливає, що:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (12)$$

Отже, після інтегрування отримуємо:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi, \quad (13)$$

де  $\varphi$  електричний скалярний потенціал, і рівняння (7) можна записати як:

$$\mathbf{J} = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{J}_s, \quad (14)$$

де  $\mathbf{J}_s$  щільність струму джерела в індукторі.

Беручи властивості матеріалу як кусочно-безперервний і нехтуючи гістерезисом і магнітним насиченням (вакуум), отримуємо, що

$$\frac{1}{\mu_r \mu_0} (\nabla \times \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (15)$$

У якості граничних умов задавалися умова нерозривності нормальної складової напруженості електричного поля на границі середовищ

$$\mathbf{n}_2 \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = \mathbf{0},$$

та умова балансу нормальної складової напруженості магнітного поля

$$\mathbf{n}_2 \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_s,$$

де  $\mathbf{n}_2$  – нормаль до поверхні зі сторони вакууму,  $\mathbf{E}_1$ ,  $\mathbf{E}_2$  та  $\mathbf{H}_1$ ,  $\mathbf{H}_2$  – напруженості електричного та магнітного полів в елементі індукційного концентратора та у вакуумі відповідно на їх границі.

#### V. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ЗА МОДЕЛЛЮ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розрахунок індукції магнітного поля виконувався для різних розмірів внутрішнього діаметра робочого індуктора і декількох його положень по висоті в трансформаторі. Зразки цих конструктивних варіантів приведено на Рис. 6.

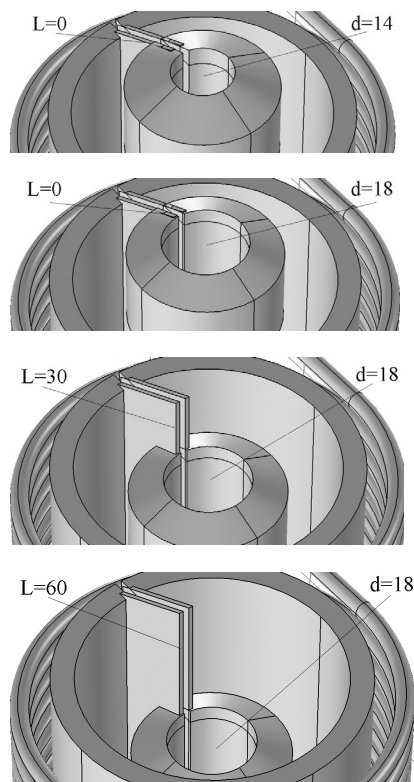


Рис. 6 Зразки конструктивних варіантів індукційного концентратора.

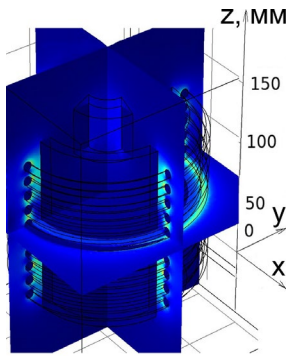


Рис. 7 Якісна картина розподілу індукції магнітного поля в просторі індукційного концентратора.

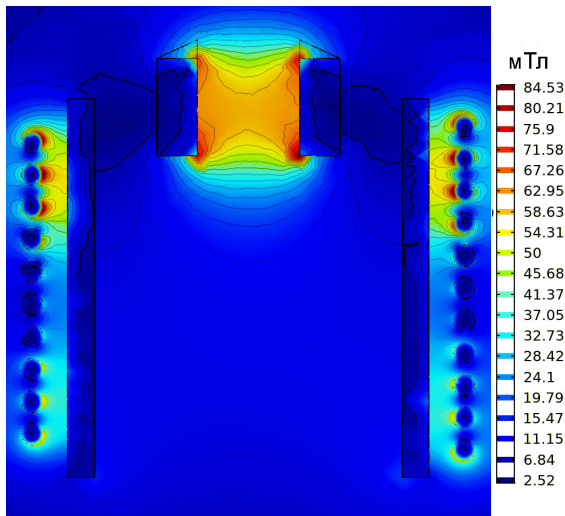


Рис. 8 Розподіл індукції магнітного поля в осьовому перетині індукційного концентратора.

На Рис. 7 наведено приклад кольорової карти розподілу індукції магнітного поля в просторі індукційного концентратора при частоті струму індуктора 440 кГц.

На Рис. 8 наведено приклад розрахунку розподілу індукції магнітного поля в площині осьового перетину індукційного концентратора при частоті струму індуктора 5,7 кГц.

Здебільшого розподіл індукції магнітного поля в середині робочого індуктора носить симетричний характер відносно осі концентратора. Незначне збурення (менше 1%) спостерігається внаслідок розрізу у робочому індукторі для з'єднання з трансформатором. Відзначимо, що біля стінок робочого індуктора індукція значно вища.

На Рис. 9, Рис. 10 та Рис. 11 наведено графіки розподілу індукції магнітного поля вздовж осі індукційного концентратора при різних частотах живлення, висоті розміщення робочого індуктора та його внутрішнього діаметра (пояснення на Рис. 6).

Порівняння графіків на Рис. 9 показує, що від частоти струму живлення концентратора розподіл

індукції магнітного поля в концентраторі не залежить, але суттєво залежить її амплітудне значення. Причому, при зростанні частоти амплітудне значення індукції магнітного поля пропорційно спадає. Питання про вибір частоти в індукційних пристроях подвійного технологічного призначення вимагає погодження протиріччя: для нагрівання речовин необхідно зменшувати частоту до часток кілогерц, а для іонізації парових частинок необхідно частоту збільшувати до одиниць мегагерц. Встановлена залежність дозволяє вибрати оптимальну частоту для всіх технологічних процесів, але при додаткових умовах: швидкість випаровування, об'єм та потенціал іонізації атомів речовини, яка випаровується.

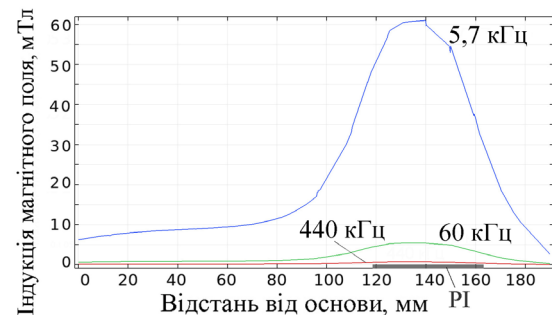


Рис. 9 Індукція магнітного поля на осі індукційного концентратора при різних частотах живлення (PI – положення робочого індуктора).

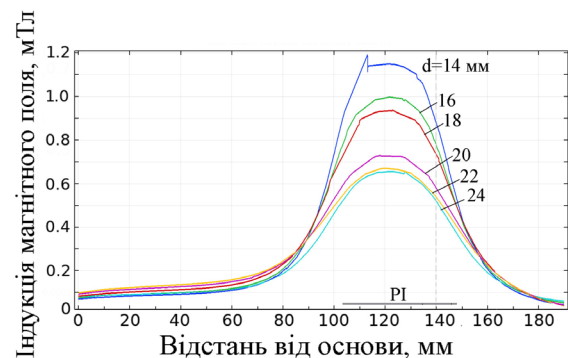


Рис. 10 Індукція магнітного поля на осі індукційного концентратора при різному діаметрі робочого індуктора d.

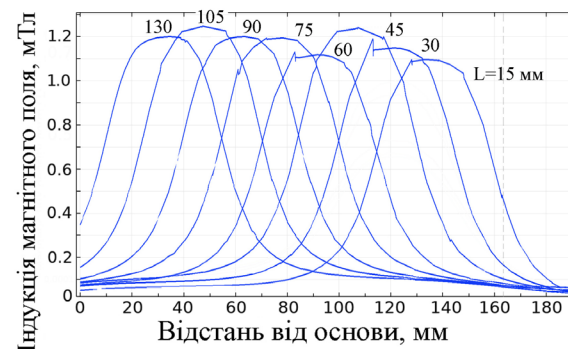


Рис. 11 Залежність індукції магнітного поля на осі індукційного концентратора від положення робочого індуктора.

Рис. 10 ілюструє залежність індукції магнітного поля від внутрішнього діаметра робочого індуктора  $d$  при частоті 440 кГц. Зменшення діаметра призводить до зростання індукції магнітного поля, але одночасно зменшує об'єм речовини, яка випаровується.

Критерії оптимальності конструкції та режимів експлуатації індукційного концентратора-трансформатора залежать від його призначення, але визначальними завжди є надійність та продуктивність роботи. До критеріїв складно віднести енергетичну ефективність, яка не враховується при використанні унікальних технологічних пристроїв.

Рис. 11 ілюструє залежність індукції магнітного поля на осі концентратора від положення робочого індуктора при його зміщенні  $L$  вздовж осі від верхнього положення (див. Рис. 3) вниз з кроком 15 мм. Розрахунок виконано при частоті живлення 440 кГц.

Аналіз графіків Рис. 10 та Рис. 11 показує, що положення робочого індуктора та його розміри впливають на комплексний імпеданс індукційного концентратора-трансформатора. На це вказує не монотонна зміна амплітуди магнітної індукції при монотонній зміні діаметра робочого індуктора (Рис.10) та положення робочого індуктора в концентраторі-трансформаторі (Рис.11)

Залежність розподілу індукції магнітного поля від частоти струму живлення та конструктивних параметрів доводить існування декількох резонансів передачі енергії від первинного індуктора до робочого.

Отримані результати відображають гарну кореляцію з фізичними властивостями індукційних систем, що підтверджує адекватність побудованої моделі та розрахунків по ній.

Проведене дослідження не дозволяє зробити однозначні висновки та пропозиції щодо оптимальної конструкції і режимів експлуатації концентратора. Але побудована та досліджена модель є першим та вирішальним етапом фізико-топологічного моделювання індукційного двохступеневого концентратора-трансформатора.

#### ВИСНОВКИ

Аналіз результатів розрахунку розподілу індукції магнітного поля в двохступеновому індукційному концентраторі-трансформаторі дозволив встановити зв'язок між конструктивними та електромагнітними параметрами пристрою. Запропонований алгоритм розрахунку індукції магнітного поля дозволив отримати результати, які адекватно відтворюють цю залежність, що свідчить про доцільність використання рівнянь Максвелла для аналізу нестационарних електромагнітних полів. Для визначеності системи математичних рівнянь використовувалися співвідношення між величинами поля, властивості матеріалу вважалися ізотропними і кусочно-безперервними, гістерезисом і магнітним насиченням нехтували.

Точність розрахунків визначалася кількістю вузлів чисельного розрахунку, яка досягала 2,5 млн.

Також для адекватності результатів розрахунків фізичній сутності процесів в моделі враховувався розподіл густини струму в елементах індукційного концентратора-трансформатора, само- та взаємоіндукцію між елементами.

Залежність розподілу індукції магнітного поля від частоти струму живлення та конструктивних параметрів доводить існування декількох резонансів передачі енергії від первинного індуктора до робочого. На це вказує не монотонна зміна амплітуди магнітної індукції при монотонній зміні діаметра робочого індуктора (Рис. 10) та положення робочого індуктора в концентраторі-трансформаторі (Рис. 11)

Результати відображають гарну кореляцію з фізичними властивостями відомих індукційних систем, що підтверджує адекватність побудованої моделі та розрахунків по ній.

Результати роботи використовуються при розробці установки нанесення металевих покриттів на внутрішню поверхню скляних трубок озонаторів.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. Rudnev, D. Loveless, and R. Cook, *Handbook of Induction Heating, 2nd Edition*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017, ISBN: 978-1-1387-4874-3.
- [2] J. La, K. Bae, S. Lee, and M. Song, "Coil design optimization for an induction evaporation process: Simulation and experiment," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 30, 2016, DOI: [10.1007/s12206-016-0904-0](https://doi.org/10.1007/s12206-016-0904-0).
- [3] V. Kilib, E. Unal, and H. Demir, "Coupling and power transfer efficiency enhancement of modular and array of planar coils using in-plane ring-shaped inner ferrites for inductive heating applications," *J. Appl. Phys.*, vol. 1, no. 122, pp. 83–88, 2017, DOI: [10.1063/1.4992119](https://doi.org/10.1063/1.4992119).
- [4] B. Kibret, M. Premaratne, P. Lewis, R. Thomson, and P. Fitzgerald, "A time-varying magnetic flux concentrator," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 49, no. 33, 2016, DOI: [10.1088/0022-3727/49/33/335003](https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/33/335003).
- [5] N. Barka, "Study of the machine parameters effects on the case depths of 4340 spur gear heated by induction - 2D model," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 1–4, no. 93, pp. 1173–1181, 2017, DOI: [10.1007/s00170-017-0586-5](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0586-5).
- [6] F. Li, X. Li, Q. Zhao, T. Zhu, and Y. Rong, "Modeling and Simulation of Induction Heating with Magnetic Flux Concentrator," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 268–270, pp. 983–991, 2012, DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.268-270.983](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.268-270.983).
- [7] R. Crawford and J. Douglas, "Emission control system with controlled induction heating and methods for use therewith," US 10267193, 2019, URL: <https://patents.justia.com/patent/10267193>.
- [8] J. Shang and S. Surzhikov, "Plasma and Magnetic Field Generation," in *In Plasma Dynamics for Aerospace Engineering*, Cambridge University Press, 2018, pp. 225–265.
- [9] A. Kuzmichev and L. Tsybulsky, "Termoemissionnyy ionizator parov metallov [Termoemission ionizer of metal vapor]," *Her. Khmelnytskyi Natl. Univ.*, vol. 231, no. 6, pp. 217–224, 2015, URL: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2015\\_6/\(231\)2015-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2015_6/(231)2015-6-t.pdf).
- [10] A. Kuzmichev and L. Tsybulsky, "In Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials," in *Evaporators with Induction Heating and Their Applications*, InTech, 2011, pp. 269–302.
- [11] L. Tir and N. Fomin, *Sovremennyye metody induktsionnoy plavki [Modern methods of induction melting]*. Moscow: Energiya, 1975.
- [12] H. Konyushkov and R. Musyn, *Spetsial'nyye metody svarki davleniyem [Special methods of pressure welding]*. Saratov: Ay Pi Er Medi, 2009, ISBN: 978-5-904000-04-2.



[13] V. Proleyko, *Bazovyye lektsii po elektronike (v 2-kh tomakh). T.1. Elektrovakuumnaya, plazmennaya i kvantovaya elektronika [Basic lectures on electronics (in 2 volumes). Vol. 1. Electrovacuum, plasma and quantum electronics]*. Moscow: Tekhnosfera, 2009, ISBN: 978-5-94836-214-4.

<https://pdfs.semanticscholar.org/d56c/f1ace9cde763aef313e843b77745af075637.pdf>.

[14] W. Smith, "PRINCIPLES OF OZONE GENERATION," *Watertec Engineering Pty.* [Online]. Available:

[15] D. John, *Classical Electrodynamics*, 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1962, ISBN: 0-471-43131-1.

Надійшла до редакції 25 липня 2020 року

UDC 621.791:625

## Computer Model and Calculation of Magnetic Field Induction of Induction Concentrator

V. O. Klymenko<sup>f</sup>, ORCID [0000-0003-2502-3738](https://orcid.org/0000-0003-2502-3738)

S. O. Maikut<sup>f</sup>, ORCID [0000-0002-0913-4190](https://orcid.org/0000-0002-0913-4190)

L. Yu. Tsybul'skiy, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-7431-6417](https://orcid.org/0000-0002-7431-6417)

A. I. Kuzmych'ev<sup>g</sup>, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—Computer modeling of the induction concentrator-transformer and calculation of the induction of the magnetic field in it for different variants of design are carried out. The peculiarity of the induction system that was modeled is that it is a two-stage step-down transformer. Such a system has not been considered in the literature, but it is promising for certain applications, and is of practical interest for the technology of induction heating of solids and plasma. The study of this system is also of scientific interest because it is characterized by parameters that are distributed in space, and the usual circuit approach to its analysis is inappropriate.

Computer modeling for the study of induction concentrator-transformer consisted of 4 stages: the creation of a geometric model and the spatial boundary of the calculations; assignment of physical properties to the elements of the model in accordance with the electromagnetic problem; establishment of boundary and initial conditions; creation of a settlement grid. In accordance with the purpose of the study, the work examines the processes that are united by the name - electromagnetic research. This study is not only initial - it is a key study that determines the study of all processes in the induction concentrator-transformer. The adequacy of the model of magnetic field induction distribution to physical reality determines the quality of all subsequent calculations.

The distribution of magnetic field induction depending on the diameter of the working inductor and its position in the concentrator is established. The calculation is performed according to Maxwell's equations in differential form, which is appropriate for non-stationary electromagnetic fields. The properties of the material were considered isotropic, as well as the hysteresis and magnetic saturation were neglected. The model took into account the distribution of current density in the elements of the induction concentrator-transformer, self- and mutual induction between the elements.

The dependences of the magnetic field induction distribution on the supply current frequency (for 5.7 kHz, 60 kHz and 440 kHz) and design parameters are obtained, which prove the existence of several resonances of energy transfer from the primary inductor to the working one. Moreover, with increasing frequency, the amplitude value of the induction of the magnetic field decreases proportionally. The question of the choice of frequency in induction devices for technological purposes is always ambiguous. Criteria for optimal design and operating modes of induction concentrator-transformer depend on its purpose, but the determinants are always reliability and productivity.

The obtained results reflect a good correlation with the physical properties of induction systems, which confirms the adequacy of the constructed model and calculations with it. The study does not allow to make unambiguous conclusions and proposals for the optimal design and operating modes of the concentrator-transformer, however the constructed and researched model is the first and decisive stage of physical and topological modeling of induction two-stage concentrator-transformer.

**Keywords** — *induction concentrator-transformer; magnetic field induction; computer simulation; Maxwell's equation*

