МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
за освітньо-професійним рівнем «магістр»

«ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ВИСОКОЧАСТОТНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ»

Виконала : ст. 2 курсу, групи НФ-51
Криковлюк Т. О.
Спеціальність
105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма:
Прикладна фізика нетрадиційної енергетики
Керівник: Кудрявцев Ігор Миколайович
Рецензент:

Харків - 2021 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології____
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) __магіср
Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ __О.П.Кулик
__підпис__

"____"_____2021_року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

_____Криковлюк Тетяни Олександрівни_____

1. Тема роботи «Оптимізація процесу індукційного нагріву високочастотним електромагнітним полем»

керівник роботи Кудрявцев Ігор Миколайович, канд. фіз-мат. наук, доцент

затверджені наказом по університету від "__" _____ 20__ року №_____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Перелік питань, які потрібно розробити

Аналіз науково-технічної літератури, вивчення особливостей роботи індукційних нагрівачів, розробка оригінального лабораторного стенду, дослідження ефективності індукційних нагрівачів високочастотним електромагнітним полем.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вивчення науково-технічної літератури.
2	Розробка та збір експериментального стенду, нагрівальної конструкції із застосуванням індукційного нагрівача високочастотним електромагнітним полем та контрольно-вимірювальної апаратури.
3	Вимірювання електромагнітних полів та температур нагріввння зразка.
4	Дослідження режимів роботи стенду з різними напругами.
5	Теоретична обробка експериментальних результатів.

5. Дата видачі завдання_____

Студент _____ Т. О. Криковлюк

Керівник роботи _____ І .М. Кудрявцев

Реферат

Криковлюк Тетяна Олександрівна «Оптимізація процесу індукційного нагріву високочастотним електромагнітним полем» (випускна робота магістру), - Харків: ХНУ. імені В.Н. Каразіна, 2021.- 62 с.

Робота присвячена вивченню особливостей дослідження процесу індукційного нагріву високочастотним електромагнітним полем. Вона складається з вступу, трьох розділів, висновку, містить 35 малюнків, 8 графіків, 5 таблиць, список використаних джерел з 19 найменувань. Досліджувалася робота експериментальної плоскої біфілярної котушки індуктивності в залежності від різних умов (частоти, дистанції у вертикальному напрямку по центральній осі котушки), побудовані графіки залежності зміни електромагнітних полів від дистанції, температури елементу, що нагрівається від часу, залежності потужності від напруги живлення.-Отримані результати дозволяють досягти оптимізації індукційного нагріву високочастотним електромагнітним полем.

Ключові слова: електромагнітна індукція, індукційне нагрівання, закон електромагнітної індукції, індукційний струм, електромагнітне поле

Abstract

Krykovliuk Tetyana Oleksandrivna " Optimization of the process of induction heating by a high-frequency electromagnetic field" (master's thesis), - Kharkiv: KhNU. named after VN Karazina, 2021.- 62 p.

The work is devoted to the study of the peculiarities of the study of the process of induction heating by a high - frequency electromagnetic field. It consists of an introduction, three sections, a conclusion, contains 35 figures, 8 graphs, 5 tables, a list of sources used with 19 items. The work of the experimental flat bifilar inductor depending on different conditions (frequency, distance in the vertical direction along the central axis of the coil) was studied, graphs of dependence of electromagnetic fields change on distance, temperature of element heated by time, power on supply voltage. The obtained results allow to achieve optimization of induction heating by a high-frequency electromagnetic field.

Keywords: electromagnetic induction, induction heating, law of electromagnetic induction, induction current, electromagnetic field

Зміст

Вступ

Розділ 1. Аналіз науково-технічної літератури

1.1 Основні теоретичні відомості

1.2 Закон електромагнітної індукції

1.3. Індукційне нагрівання

1.4. Застосування індукційного нагрівання

1.5. Патенти.

Розділ 2. Проведення експериментальних досліджень

2.1. Постановка експерименту

2.2. Розробка лабораторного стенду

Розділ 3. Проведення теоретичних досліджень

Висновки

Список використаних джерел

ВСТУП

Технологія індукційного нагріву в даний час є кращою технологією нагріву в багатьох промислових, побутових та медичних напрямках через її переваги щодо ефективності, швидкого нагріву, безпеки, чистоти та точного управління. Досягнення в ключових технологіях, таких як силова електроніка, методи управління та конструкція магнітних компонентів, дозволили розробити високонадійні та економічні системи, зробивши цю технологію легкодоступною та повсюдною. Індукційне нагрівання забезпечує безконтактне, швидке та ефективне нагрівання струмопровідних матеріалів. У традиційних процедурах відкрите полум'я безпосередньо нагріває металеву частину. Навпаки, при індукційному нагріванні циркулюючими електричними струмами об'єкту передається тепло. Цей метод ґрунтується на властивостях радіочастотної енергії. В електромагнітному спектрі ця частота тече в інфрачервоному та мікрохвильовому діапазоні. Металева частина ніколи не контактує з полум'ям, тому що тепло передається до об'єкта за допомогою електромагнітних хвиль. Таким чином, індуктор не нагрівається і об'єкт не забруднюється. При правильному налаштуванні процес можна легко повторити та легко контролювати.

Сьогодні індукція зайняла своє місце в нашій промисловій економіці як засіб прискорення виробництва деталей, зниження виробничих витрат та досягнення якісних результатів. Індукційне нагрівання стає однією з кращих технологій нагріву в промислових, побутових та медичних застосуваннях, серед інших пристроїв, завдяки своїм перевагам у порівнянні з іншими класичними методами нагріву, такими як нагрівання полум'ям, нагрівання опором чи у печі.

1. Аналіз науково-технічної літератури

1.1 Основні теоретичні відомості

В основі багатьох пристроїв у нинішній час лежить явище електромагнітної індукції, наприклад, радіоприймачах, в трансформаторах, у двигуні або генераторі електричного струму і багатьох інших пристроях. Електромагнітною індукцією називається процес, при якому в провідному контурі замкнутої конфігурації виникає струм під час змін магнітного потоку, який пронизує його. Індукційне нагрівання провідників засноване на фізичному явищі індукції, відкритому Майклом Фарадеєм. (Рис1.1) [1].

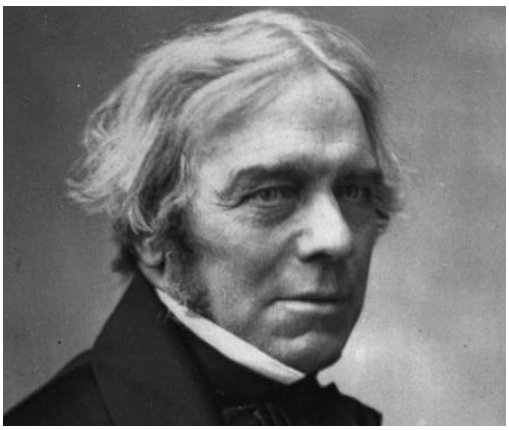


Рис.1.1 Майкл Фарадей (1791-1867) [1]

Фарадей найбільший експериментатор в галузі електрики та магнетизму 19-го століття і один з найбільших фізиків-експериментаторів усіх часів, невпинно працював протягом 10 років, намагаючись довести, що магніт може викликати електрику. В 1831 йому нарешті вдалося використовувати дві котушки дроту, намотані навколо протилежних сторін кільця з м'якого заліза (рис. 1.2).

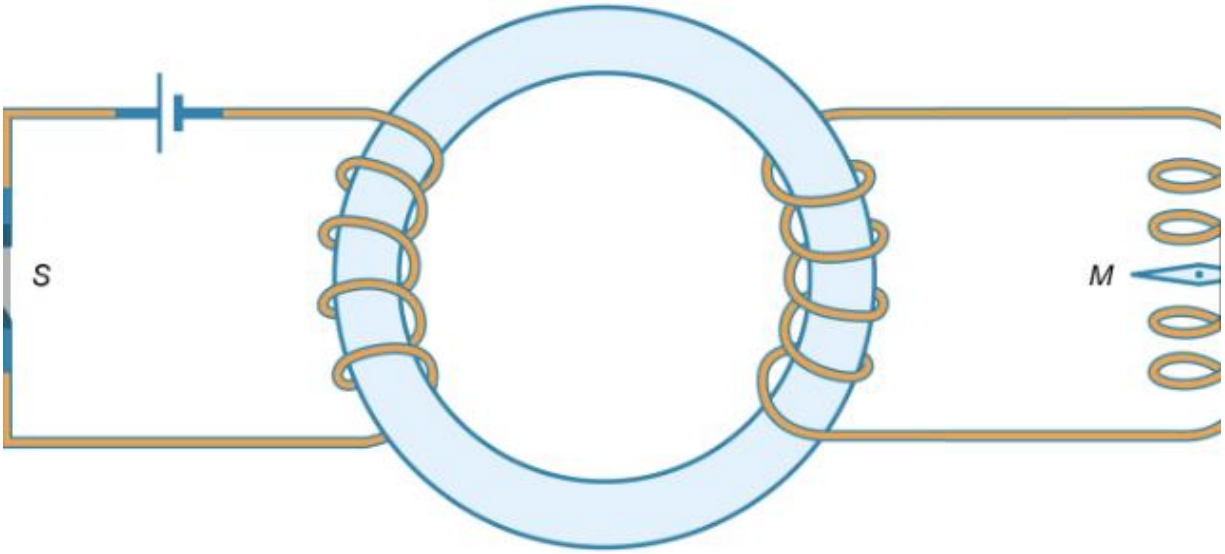


Рис 1.2

Перша котушка була прикріплена до батареї; коли через котушку проходив струм, залізне кільце намагнічувалось. Провід від другої котушки був протягнутий до стрілки компаса на відстані метра, досить далеко, щоб на нього не вплинув безпосередньо якийсь струм у першому ланцюзі . Коли первинний струм було відключено, стрілка компаса відхилилася, але у протилежному напрямку. Ґрунтуючись на цьому спостереженні в інших експериментах, Фарадей показав, що зміни магнітного поля навколо першої котушки відповідальні за індукцію струму в другій котушці. Він також продемонстрував, що електричний струм може бути викликаний переміщенням магніту, включенням та вимкненням електромагніту і навіть переміщенням електричного дроту в магнітному полі Землі. Індукційне кільце Фарадея було, по суті, першим електричним трансформатором. Він зберігся донині і виставлений у музеї Королівського інституту (Рис. 1.3). [3]



Рис1.3 індукційне кільце Фарадея[4]

Безперечно, це залишається одним із найважливіших наукових об'єктів історії наукиПотім Фарадей зауважив, що при заміні залізного кільця на мідний індукований струм був набагато слабшим, і він був схожий на те, коли спіральні дроти взагалі ні на що не намотувалися. Очевидно, різниця тут у тому, що залізне кільце допомагало генерувати набагато сильніший електромагніт, чого не могла зробити немагнітна мідь. За кілька місяців Фарадей побудував перший, хоча і примітивний, електричний генератор (Рис1.4)[2].

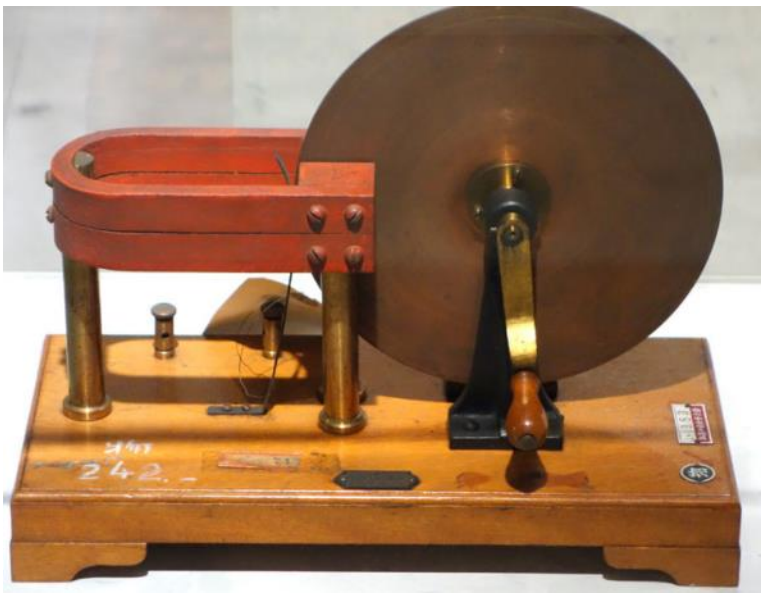


Рис.1.4 Диск Фарадея – перший електромагнітний генератор.[2]

Наступний крок був важливим. Фарадей зрозумів, що має бути "якийсь особливий ефект, що має місце під час формування магніту, а не просто його віртуальне наближення, що миттєво індукований струм порушується" [4]. Він провів експеримент, який досі знайомий у будь-якому науковому класі у світі. Він замінив дротяну спіраль, з'єднану з батареєю та генеруючу магнітне поле, на простий постійний стрижневий магніт. Потім він узяв порожню котушку з дроту, кінці якої підключив до гальванометра. Швидко встромивши магніт у котушку, побачив, що стрілка гальванометра відхилиться. Якщо повернути процес назад, витягнувши магніт назовні, голка відхилиться у протилежному напрямку. Потім, постійно переміщуючи стрижневий магніт всередину і з котушки, він міг змусити стрілку гальванометра коливатися з боку на бік синхронно з рухом магніту.

Фарадей продовжив експерименти з більш потужними постійними магнітами та електромагнітами різної сили, але основний принцип залишився тим самим. Він тріумфально заявляє, що «різні експерименти... я думаю, найповніше доводять виробництво електрики зі звичайного магнетизму» [2]. Він вирішує називати «дію, що надається звичайними магнітами» магнітоелектричною індукцією, щоб відрізнити її від вольт-електричної індукції, що створюється полем струмопровідного дроту. Що стосується другого дроту, який піддається цій індукції, він описує його як «в особливому стані» [4]опору утворенню в ньому електричного струму. Але в цей момент він визнає, що йому ще доведеться зрозуміти властивості матерії, що знаходиться в цьому стані, особливо тому, що він експериментує з різними матеріалами, що проводять, такими як мідь і срібло, які самі по собі не є магнітними.

Фарадей зрозумів, що йому потрібно знайти спосіб створення змінного магнітного поля, і продовжив розробку покращеної версії експерименту з диском. Він встановив мідний диск на латунну вісь, щоб міг вільно обертатися між двома полюсами постійного магніту. Потім він підключив

диск до гальванометра, прикріпивши один провід до центру, а інший торкаючись його обода (як на Рис 1.5)[4].

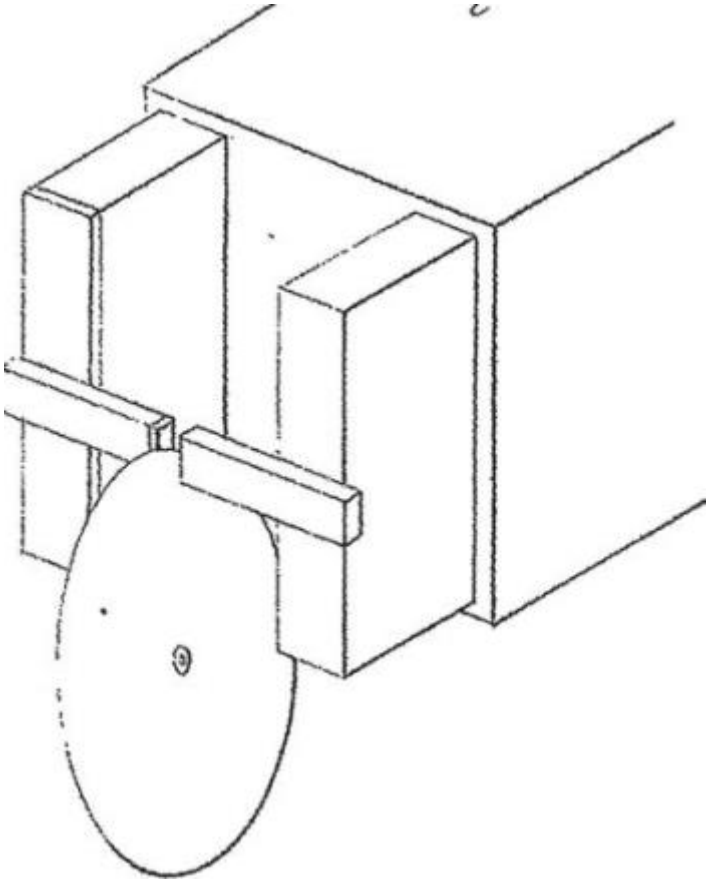


Рис 1.5 Диск Фарадея, що обертається, що генерує безперервний електричний струм у провідному диску, коли він обертається між двома полюсами потужного постійного магніту. Ця діаграма взята з оригінальної статті Фарадея[4]

Потім, коли диск обертався, гальванометр реєстрував безперервний струм, який повинен був проходити в радіальному напрямку через диск. Зміна напрямку обертання диска на протилежне призвела до відхилення стрілки гальванометра у протилежному напрямку, що означає зміну напряму електричного струму.

Як відомо, Фарадей зауважив: «Отже, тут було продемонстровано виробництво постійного струму електрики звичайними магнітами» [4]». Його пояснення того, що відбувалося, чудово зрозуміло: «Якщо кінцевий провід

переміщається так, щоб розрізати магнітну криву, в дію включається сила, яка має тенденцію проштовхувати через неї електричний струм» [4]

За допомогою цього експерименту Фарадей зміг показати, як магнітне поле та безперервний механічний рух виробляють безперервний електричний струм. Він винайшов електричний генератор.

Потім він приєднує два дроти, які підключені до гальванометра, до різних точок на ободі диска, що обертається, і розуміє, що індукований струм завжди спрямований під прямим кутом до руху диска і що в цьому випадку потік електрики знаходиться в радіальному напрямку.

Звичайно, ми можемо бачити, наскільки далеко Фарадей та інші були в той час від розуміння справжньої природи електричного струму після того, як він звертається до різних видів електрики. Він визначає п'ять різних типів: гальванічну електрику (виробляється батареєю), загальну електрику (наприклад, розряд зарядженого тіла, такого як лейденська банка), магнітоелектрика (під яким він передбачає індукований струм), термоелектрику, електрику тварин (наприклад, вироблену деякими істотами, такими як електричний вугор).

1.2 Закон електромагнітної індукції

Щоб створити струм в ланцюзі потрібна електрорушійна сила. На это указывает явление электромагнитной индукции, при котором при изменении магнитного потока в цепи изменяется электрическая мощность индукции.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = -\frac{d\Phi_в}{dt} \qquad (1.1)$$

Мінус у законі індукції (1.1) відображує правило Ленца.

Еміль Христофорович Ленц (1804—1861) дав правило визначення напряму індукційного струму. «Індукційний струм завжди спрямований так, що створюване ним магнітне поле ускладнює або гальмує рух, що викликає індукцію, наприклад, при наближенні котушки до магніту виникає індукційний струм ,що має такий напрям, що створене ним магнітне поле буде протилежно магнітному полю магніту. В результаті між котушкою та магнітом виникають сили відштовхування.[3]

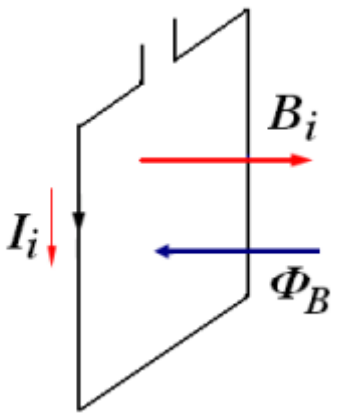


Рис.1.4 контур зі струмом[4]

Збільшення потоку (Рис.1.2) $\frac{d\Phi_в}{dt} > 0$ викликає $\varepsilon_i < 0$ т.е індукційне поле B_i спрямовано назустріч зовнішньому полю, потік якого $\Phi_в$.

Глибоке пояснення явища електромагнітної індукції дав англійський фізик Джемс Клерк Максвелл – творець закінченої математичної теорії електромагнітного поля.

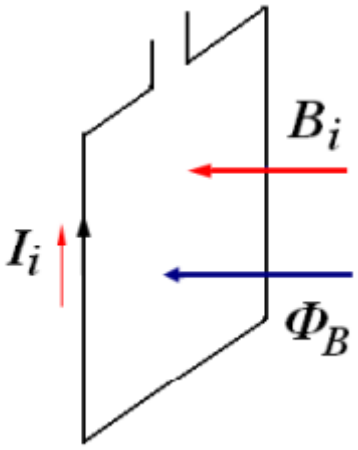


Рис.1.5 контур зі струмом[4]

Зменшення потоку (Мал.1.2) $\frac{d\Phi_в}{dt} < 0$ викликає , $\varepsilon_i > 0$ тобто індукційне поле B_i співпадає з dt > 0 Ei і напрямом зовнішнього поля, потік якого $\Phi_в$.

Закон Фарадея універсальний, оскільки залежить від способу зміни магнітного поля.

$$\boldsymbol{\varepsilon_i} = -\frac{d\Phi_в}{dt} = -\frac{d(\vec{\mathbf{B}}\vec{\mathbf{S}})}{dt} = -\frac{d(BScos\alpha)}{dt} \qquad (1.2)$$

Потік магнітної індукції можна змінювати такими способами:

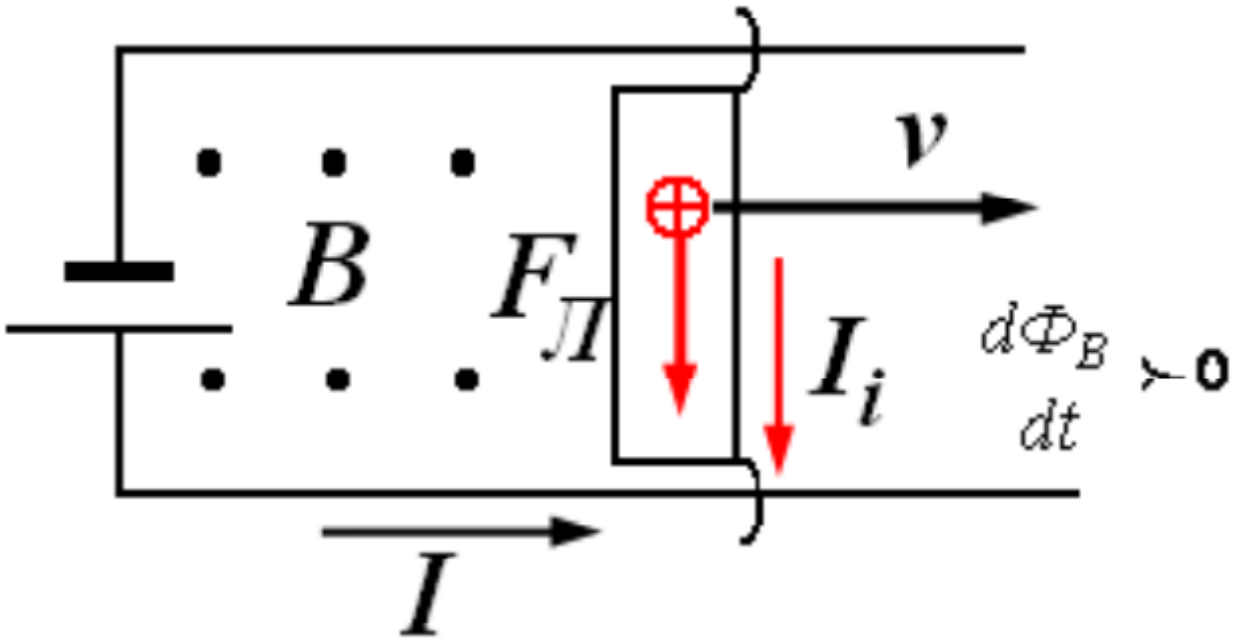
Змінювати площу рамки S.

$$\boldsymbol{\varepsilon_i} = -\frac{d\Phi_в}{dt} = -B\frac{d(\mathrm{S})}{dt} \qquad (1.3)$$

Рис.1.6 Схема із зміненою площею рамки[5]

Сила Лоренца діє на заряди у провіднику

Обертати рамку.



$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = -\frac{d(BScos\alpha)}{dt} = BS\frac{dsin\alpha}{dt} \qquad (1.4)$$

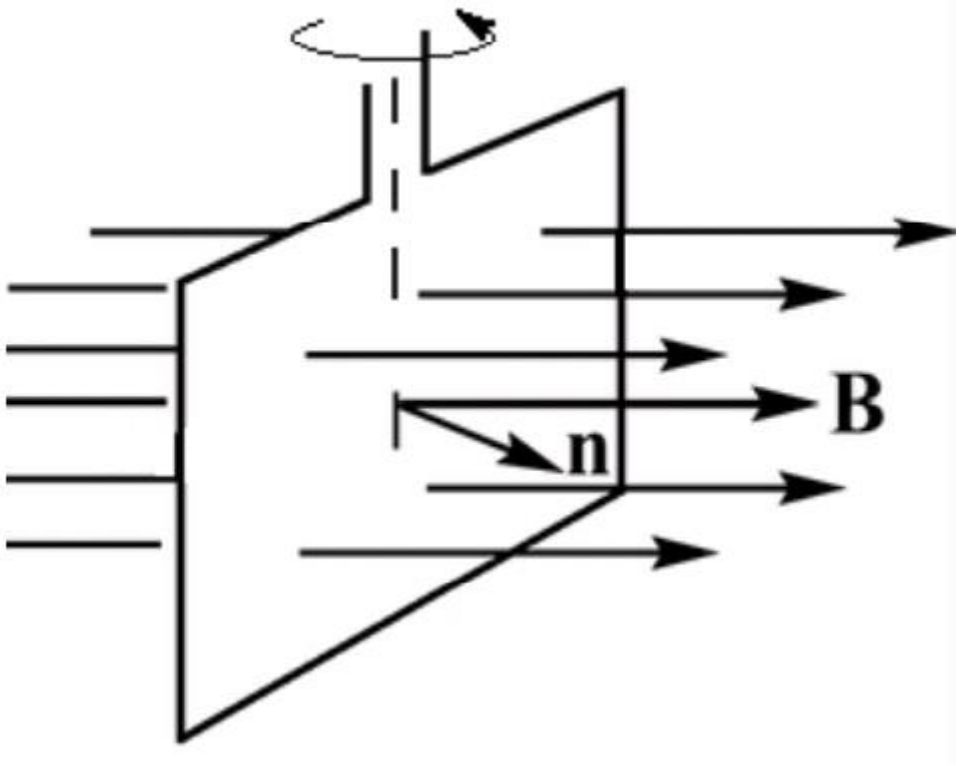


Рис.1.7 Обертання рамки[5]

Магнітне поле, що змінюється, індукує електрорушійну силу (ЕРС) і, отже, електричне поле. Напрямок ЕРС протидіє зміні. Ця третина рівнянь Максвелла є законом індукції Фарадея і включає закон Ленца. [5].

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = -\frac{d\Phi_{\text{в}}}{dt} \tag{1.5}$$

е.д.с. індукції:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \oint_L \vec{E}_{\text{стор}}\, d\vec{l} \tag{1.6}$$

Вихрове електричне поле

е.д.с. індукції:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \oint_L \vec{E}_{\text{стор}}\, d\vec{l}$$

Результуюче поле:

$$\text{E}=E_{\text{кул}} + \text{E}_{\text{стор}} \tag{1.7}$$

$$\text{E}_{\text{стор}} = \text{E} - E_{\text{кул}} \tag{1.8}$$

$E_{\text{кул}}$ - напруженість електростатичного поля, $\text{E}_{\text{стор}}$ - напруженість поля сторонніх сил.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \oint_L (\vec{\text{E}} - \vec{E}_{\text{кул}}) d\vec{l} = \oint_L \vec{\text{E}} d\vec{l} - \oint_L \vec{E}_{\text{кул}} d\vec{l} \tag{1.9}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \oint_L \vec{\mathrm{E}} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_{\mathrm{в}}}{\partial t} \neq 0. \qquad (1.10)$$

Вихрове електричне поле

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \oint_L \vec{\mathrm{E}} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_{\mathrm{в}}}{\partial t} \neq 0.$$

отже, електричне поле, яке збуджується змінним магнітним полем - вихрове.

Закон електромагнітної індукції у диференційній формі

Формула Стокса:

$$\oint_L \vec{\mathrm{A}} d\vec{l} = \int_S rot\vec{A} d\vec{S} \qquad (1.11)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \oint_L \vec{\mathrm{E}} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_{\mathrm{в}}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}\int_S \vec{B} d\vec{S} \qquad (1.12)$$

Контур не змінює форму, отже, операції диференціювання та інтегрування можна поміняти місцями та перейти до приватної похідної:

$$\oint_L \vec{\mathrm{E}} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \qquad \rightarrow \qquad (1.13)$$

$$\oint_L \vec{\mathrm{E}} d\vec{l} = \int_S rot\vec{E} d\vec{S} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \qquad (1.14)$$

Електронний механізм виникнення е.р.с. індукції

Сила, що діє на електрон, відмінна від нуля тільки на самому початку руху провідника, так як упорядкований рух електронів уздовж провідника від А до С викликає виникнення у провіднику електростатичного поля, що перешкоджає подальшому перерозподілу електронів.

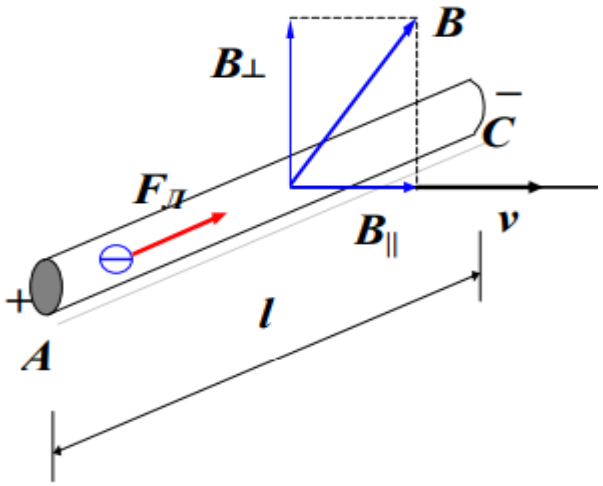


Рис.1.8 [5]

$$F_{Л} = F_{ел.стат};\qquad (1.15)$$

$$qvBsin\alpha = qE\qquad (1.16)$$

$$\rightarrow E=vBsin\alpha.\qquad (1.17)$$

$$\Delta\varphi=El=vBlsin\alpha = vB_{\perp}l.\qquad (1.18)$$

$$\varphi_A - \varphi_C = \Delta\varphi = -\varepsilon_i; \quad v = \frac{dx}{dt}; \quad ldx = dS.$$

$$\varepsilon_i = -B_{\perp}\frac{ldx}{dt} = -\frac{dB_{\perp}S}{dt} = -\frac{d(BS)}{dt} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$d\Phi_B$ - потік через поверхню, що прокреслюється провідником під час руху.

1.3 Індукційне нагрівання

Сучасні установки індукційного нагріву - це складні високопродуктивні агрегати потужністю десятки мегават. Вони є невід'ємними складовими частинами автоматизованих технологічних систем вищого рівня. Безперервно зростають вимоги до якості нагріву, ефективності термічних процесів та процесів управління. При этом.«достоинства методу індукційного нагріву може бути повною мірою використані лише тому випадку, якщо є точне уявлення про ті залежності, яким підпорядковується метод у цілому, а й у окремих його частинах» /41/. [6] Ці слова видатного російського вченого В. П. Вологдіна, написані 1947 року, зберегли свою актуальність і сьогодні.

Найдосконалішим видом нагріву є такий, при якому тепло створюється безпосередньо в тілі, що нагрівається. Такий спосіб нагрівання добре здійснюється пропусканням через тіло електричного струму. Однак, пряме включення тіла, що нагрівається, в електричний ланцюг не завжди можливе з причин технічного і практичного характеру.

У цих випадках досконалий вид нагріву може бути здійснений застосуванням індукційного нагріву, при якому тепло також створюється в тілі, що нагрівається, що виключає зайву, зазвичай велику, втрату енергій в стінках печі або в інших нагріваючих елементах. Тому, незважаючи на порівняно невисокий к.к.д. генерування струмів підвищеної та високої частоти, загальний к.к.д. індукційного нагріву виявляється часто вищим, ніж при інших способах нагріву.

Індукційний спосіб дозволяє також здійснювати швидке нагрівання неметалічних тіл рівномірно по всій їх товщині. Погана теплопровідність таких тіл виключає можливість швидкого нагрівання внутрішніх шарів звичайним способом, тобто підведенням тепла ззовні. При індукційному способі тепло утворюється однаково як у зовнішніх шарах, так і у внутрішніх

і може виникнути навіть небезпека перегріву останніх, якщо не зробити необхідної теплоізоляції зовнішніх шарів.

Особливо цінною властивістю індукційного нагріву є можливість дуже високої концентрації енергії в тілі, що нагрівається, легко піддається точному дозування. Індукційне нагрівання може виробляти високу щільність потужності, що дозволяє за короткий час взаємодії досягти необхідної температури. Це дає жорсткий контроль над схемою нагріву, при цьому візерунок досить точно слідує прикладеному магнітному полю, і дозволяє знизити теплові спотворення та пошкодження. Глибиною індукційного загартування можна керувати шляхом вибору індукційної частоти, щільності потужності та часу взаємодії.

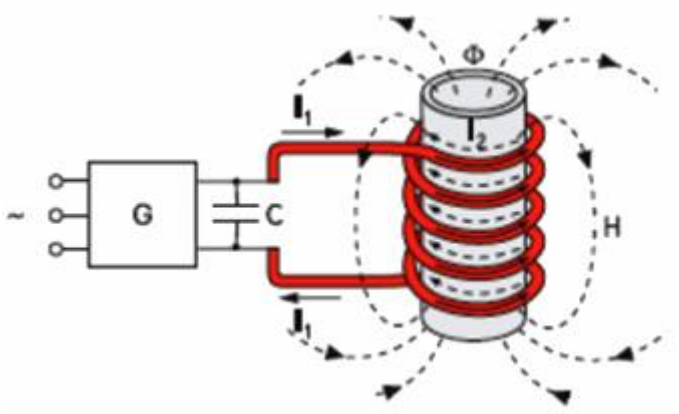


Рис 1.9. Схема індукційного нагрівання

Джерело високочастотної електрики використовується для пропускання великого змінного струму через котушку. Ця котушка відома як робоча котушка. Обігрівається деталь міститься в це інтенсивне змінне магнітне поле. Змінне магнітне поле індукує струм у провідній деталі. Це викликає перебіг величезних струмів через заготівлю. Тепло в зразку утворюється не вздовж усьому перерізу. При нагріванні зразка який має циліндричну форму найбільша щільність струму буде спостерігатися на поверхні, а десь до середини буде знижуватися експоненційно. Цей ефект має назву скін-ефект. Цей ефект збільшує ефективний опір металу проходженню

великого струму. Отже, він значно збільшує ефект нагріву, викликаний струмом, індукованим у заготівлі.

$$j_x = J_o\, e^{-kx} \tag{2.1}$$

Глибина, на якій щільність струму зменшиться до значення Jo/e, чи на 0,368 щільності на поверхні, є глибиною проникнення δ.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}} \tag{2.2}$$

де:

- ρ питомий опір матеріалу заготівлі
- μ_r питома проникність матеріалу заготівлі
- μ_o проникність вакууму (4π x 10-7Hm-1)
- ω = 2πf кутова частота
- f - частота.

Доцільно відкоригувано це було на практиці:

$$\delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{f\mu_r}} \tag{2.3}$$

Якщо узяти поверхневий шар товщини яяка дорівнює однієї глибини проникнення, то ми побачимо що там утворюється 86,5% усього тепла, узявши шар двох глибин проникнення ми побачимо, що δ 98%, у шарі 3δ 99,8 % (належить до циліндра з діаметр якого більше ніж 8 δ).

Стало зрозуміло, що глибина проникнення безпосередньо залежить від індукторної частоти струму, від питомого опору та відносної проникності, матеріалу заготовки при робочій температурі.

Для більшого розуміння наведемо глибину проникнення вуглецевої міді та сталі у (мм):

частота [Hz]	50	500	1000	2000	4000	8000	10000	20000	50000
медь 40°C	10	3,2	2,3	1,6	1,1	0,8	0,7	0,5	0,3
сталь 1200°C	78	25	17,5	12,3	8,6	6,2	5,5	3,9	2,5

Табл.1.1. глибина проникнення вуглецевої міді та сталі.

Якщо разглядати експлуатаційні витрати, то нас цікавить ефективність нагрівання. Оцінити ефективність можливо за допомогою відношення

$$\eta_e = \frac{1}{1 + \frac{D + \delta_1}{d - \delta_2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \cdot \mu_r}}} \qquad (2.4)$$

де:

- ρ_1 опір (питомий) матеріалу індуктора
- ρ_2 опір (питомий) матеріалу заготівлі
- δ глибина проникнення
- μ_r відносна проникність матеріалу заготівлі.
- D внутрішній діаметр котушки індуктора
- d діаметр заготівлі

Зі збільшенням відношення D/d спостерігается зниження ефективності, через те що зменшується зв'язок магнітного поля індуктора з заготівлею.

Тому стає необхідність використовувати більше одного індуктора для великого діапазону діаметрів заготівлі. Ефективність знижується також через збільшенням відношення δ/d. Якщо δ/d низьке це використовується, для поверхневого загартування, коли швидкий процес нагрівання змінюється на охолодження тонкого поверхневого шару.

Для правильного формування необхідно, щоб матеріал був достатньо прогрітий та по можливості рівномірно. Тому частіше вибирається повільніше нагрівання, такє щоб тепло могло дістатися до середини заготовки. Збільшення глибини проникнення сприяє рівномірності нагріву. Баланс ефективності перенесення енергії до заготівлі від індуктора та частоти для досягнення необхідного прогріву потребують знаходження компромісного рішення.

На практиці було доказано, що для нагрівання до 1200 ° С вуглецевої сталі економічним є наступний діапазон розмірів:

частота [Hz]	диаметр заготовки [мм]	сторона прямоугольного сечения [мм]
50	200-600	180-550
250	90-250	80-225
500	65-180	60-160
1000	50-140	45-125
2000	35-100	30-80
4000	22-65	20-60
8000	16-50	15-45
10000	15-40	14-35
20000	10-30	9-25

Табл.1.2 економічний діапазон розмірів для нагрівання до 1200°С вуглецевої сталі

Товшина шини має більш ніж 2,5 разу перевищувати глибину проникнення, для плоскої заготовки. При малій товщині виникає проникність та ефективність нагрівання знижується, що також необхідно враувати при виборі обладнання.

Циліндр, що плавить пластиковий матеріал, ізольований керамічною ізоляцією товщиною 15 мм, і таким чином а) тепло не йде в навколишнє середовище, і ми отримуємо значну економію енергії; б) індукційні котушки не нагріваються від тепла, що виділяється в циліндрі, тому вони працюють при низьких температурах , що призводить до тривалого терміну служби, коли стрічкові нагрівальні елементи з неправильним налаштуванням, якщо там використовується ізоляція, значно скорочується термін служби.

При приготуванні на індукційній плиті індукційна котушка у варильній панелі нагріває залізну основу посуду. Сковороди з мідним дном, алюмінієві сковороди та сковороди з інших кольорових металів зазвичай не підходять. Переваги індукційних плит включають ефективність, безпеку (нагрівається сама по собі індукційна панель не буде) та швидкість. Доступні як вбудовані, і переносні індукційні плити. Струми, що наводяться в трубі, проходять по відкритому шву і нагрівають краї, внаслідок чого температура стає достатньо високою для зварювання.

Особливості та загальновідомі переваги індукційного нагріву створили широкі можливості застосування його у багатьох галузях промисловості. Крім того, він дозволяє створювати нові види конструкцій, які зовсім не можна здійснити при звичайних способах термообробки.

Індукційне нагрівання відбувається в електропровідному об'єкті, коли об'єкт знаходиться в змінному магнітному полі. Індукційне нагрівання відбувається через гістерези і втрат на вихрові струми. Гістерезисні втрати виникають тільки в магнітних матеріалах, таких як сталь, нікель і дуже небагато інших. Втрати на гістерезис переконують нас, що це викликано

тертям між молекулами, коли матеріал намагнічується спочатку в одному напрямку, а потім в іншому. Молекули можна як невеликі магніти, які обертаються за кожної зміни напрями магнітного поля. Потрібна робота (енергія), щоб перевернути їх. Енергія перетворюється на тепло. Швидкість витрати енергії (потужності) збільшується із збільшенням швидкості реверсування (частоти).

Вихрострумові втрати виникають у будь-якому провідному матеріалі в змінному магнітному полі. Прикладами є мідь, латунь, алюміній, цирконій, немагнітна нержавіюча сталь та уран. Вихрові струми - це електричні струми, що індукуються у матеріалі дією трансформатора. Як випливає з їхньої назви, здається, що вони рухаються вихорами на вирі всередині твердої маси матеріалу. Вихрострумові втрати набагато важливіші за гістерезисні втрати при індукційному нагріванні.

Для нагрівання сталі з метою гарту, кування, плавлення або будь-яких інших цілей, що вимагають температури вище температури Кюрі, ми не можемо покладатися на гістерезис. Сталь втрачає свої магнітні властивості вище за цю температуру. Коли сталь нагрівається нижче точки Кюрі, внесок гістерези зазвичай настільки малий, що їм можна знехтувати. Для всіх практичних цілей I 2 R вихрових струмів - єдиний спосіб, яким електрична енергія може бути перетворена на тепло для цілей індукційного нагрівання.

1.4 Застосування індукційного нагрівання

Індукційні нагрівачі поділяються на три категорії за частотою роботи:

1. Середньочастотні установки, що працюють на частоті 6 - 20 кГц - Індукційне нагрівання (індукційний нагрівач), штампування, термообробка сталі в індукційних печах, термообробка зварних швів, кування, відпал, загартування кранових коліс;

2. Високочастотні установки, що працюють на частоті 20 - 40 кГц - Індукційне нагрівання під штампування (індукційний нагрівач), загартування струмами високої частоти, поверхневе загартування сталі, загартування ТВЧ, штампування, термообробка сталі;

3. Надвисокочастотні установки, що працюють на частоті 40 - 70 кГц - Індукційна пайка (індукційний нагрівач), паяння ТВЧ, поверхневе загартування ТВЧ.Индукционные нагреватели делятся на категории по конструкциям теплообменников:

1. Індукційний нагрівач кожухового типу
2. Індукційний нагрівач із трубчастим теплообмінником
3. Індукційний нагрівач з об'ємним теплообмінником (електронагрівник індуктивно-кондуктивного типу – саме так називає його виробник)

Індукційний нагрівач кожухового типу

Зовні нагадує електродний котел, проте відрізняється від останнього способом нагрівання теплоносія. Усередині кожуха розміщений витягнутий індуктор, усередині та зовні якого розташовується теплообмінник, що нагрівається під впливом електромагнітного поля. Проходячи через теплообмінник вода нагрівається і подається в систему опалення.

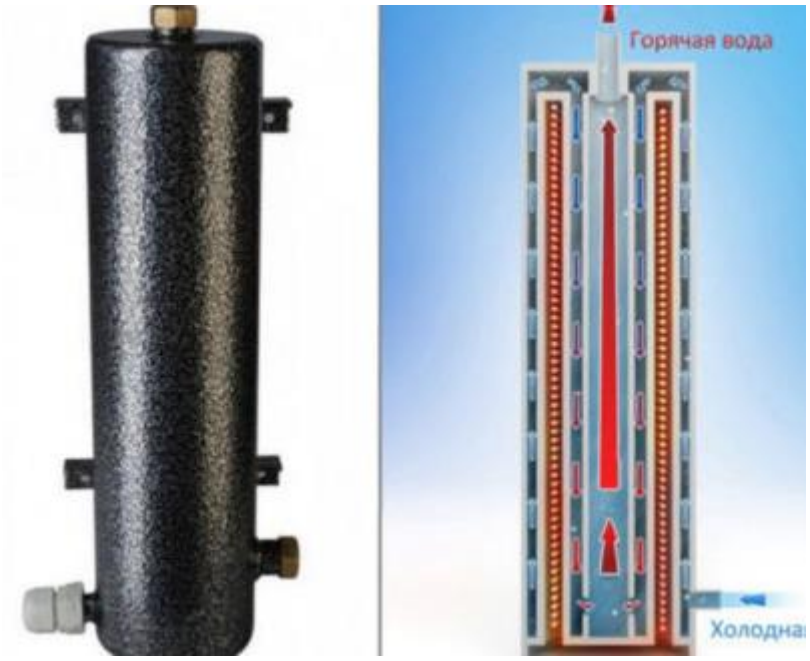


Рис. 1.10 Індукційний котел SAV []

Переваги конструкції:

• Більш компактний, має менші габарити і масу, ніж інші типи індукційних нагрівачів. Є думка, що естетично він виглядає краще, але це спірно, по-перше, і не є визначальним для промислового нагрівача.

• Менш матеріаломісткий (теплообмінний пристрій складається з «чорного» металу марки Ст3сп) порівняно з іншими представниками класу, а тому в нього нижча за собівартість і, відповідно, ціна придбання.

• Може розміщуватись на стіні (інші індукційні нагрівачі – тільки підлогового виконання)

Індукційний нагрівач із трубчастим теплообмінником

Ці нагрівачі вже не ховаються у кожух. Котушка індуктивності (первинна обмотка) повністю відокремлена від теплообмінника (вторинної обмотки) що виключає ураження електричним струмом: навіть у разі порушення ізоляції

обмоток електромережа не може замкнутися на теплоносій, так що це справжній другий клас електробезпеки. І, нарешті, по-третє, теплообмінний пристрій тут є набір трубок, що обгинають котушки індуктора.

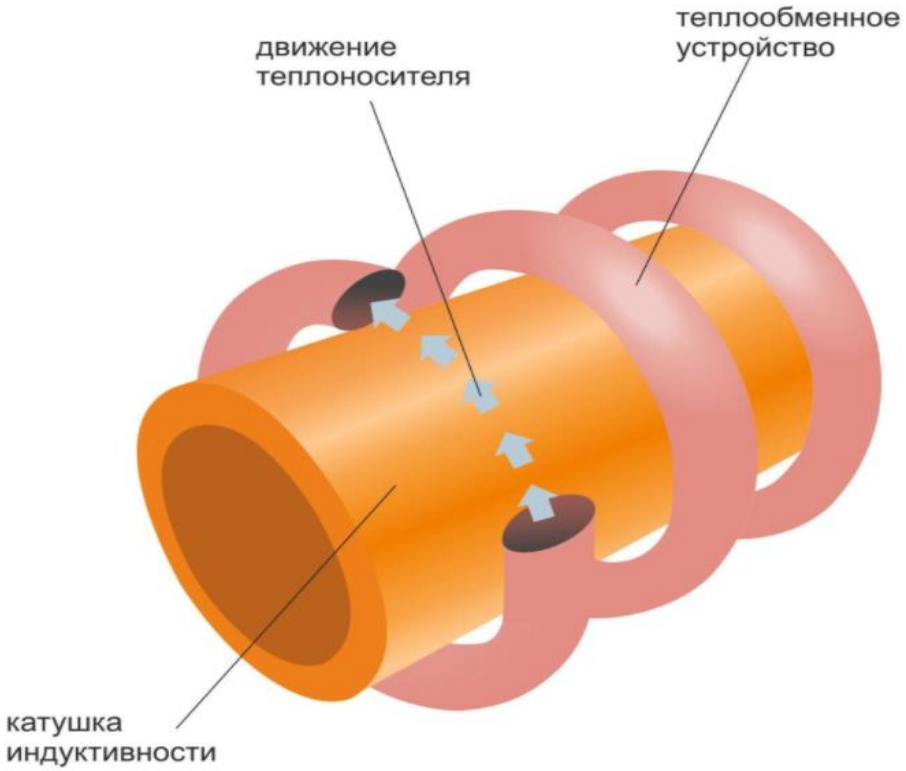


Рис. 1.11 Схематичне зображення індукційного нагрівача з трубчастим теплообмінником

Індукційний нагрівач з об'ємним теплообмінником

Індукційні нагрівачі з об'ємним теплообмінником з'явилися приблизно в XXI столітті і під час їх створення, безсумнівно, було враховано недоліки всіх інших конструкцій. Конструкція нагадує індукційний нагрівач із трубчастим теплообмінником, проте замість трубок тут використовується порожнистий циліндр, усередині якого знаходиться індуктор.

Це також повноцінний індукційний нагрівач, конструкція якого ріднить його із «сухим» трансформатором. І він, звичайно, має всі

переваги, які з цього випливають: висока надійність, довговічність, пожежна та електрична безпека, оскільки первинна обмотка, на яку подається напруга, відокремлена від теплообмінника, що виключає ураження електричним струмом: це повноцінний другий клас електробезпеки .

Вихрові струми тут виникають у товщі металу, з якого виготовлений порожнистий циліндр. Потрібно відразу відзначити, що саме конструктивне рішення підвищує надійність нагрівача та його стійкість до пошкоджень. Судіть самі: обмотки котушок індуктивності, які можна легко пошкодити у нагрівача з трубчастим теплообмінником, надійно закриті від зовнішнього впливу. Від завзятого шкідника вони, звичайно, не врятують, а от випадково зашкодити індуктор значно складніше.

Промислові індукційні нагрівачі мають приголомшливу потужність – 100 кВт і більше. За подібних умов метал нагрівається від двох процесів, згаданих вище, загартування і відпустки, просто плавиться. На цьому принципі побудовано індукційні печі з приголомшливими здібностями до енергоспоживання. Втілена задумка: енергія передається безпосередньо сталі, що нагрівається на очах. Це дозволяє застосовувати явище індукції у ковальстві.

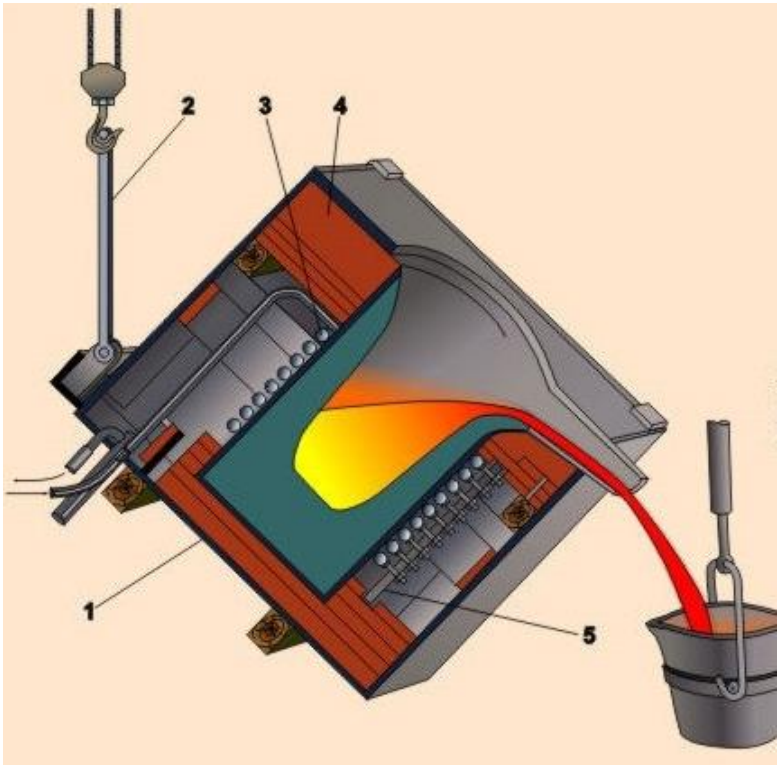


Рис.1.12 Індукційна плавильна піч [17]

1. Каркас печі
2. Механізм перекидання
3. Водоохолоджений індуктор
4. Футурування печі (тигель)
5. Струмопровідна шина

Гаряче штампування - це найбільш затребуваний вид проведення штампування металу. Для створення даного виду деформації металу застосовують спеціальне обладнання, наприклад, ковальський нагрівач.

Ковальський нагрівач – це обладнання індукційного нагріву, що дозволяє виробляти такі види високотемпературної обробки металу: гаряче штампування, кування, висаджування та деформація за допомогою пластики. Обробка металевих виробів проводиться завдяки впливу струмів високої частоти, що мають високу потужність, на виріб.



Рис.1.13 Індуктивний Ковальський нагрівач [15]



Рис.1.14 Індуктор для індукційного ковальського нагрівача [15]

Диаметр заготовки мм	Время нагрева с	Удельная мощность Вт/см²	Диаметр заготовки мм	Время нагрева с	Удельная мощность Вт/см²
Частота = 6000 Гц (Глубина горячего проникновения индукционного поля в металл = 7 мм)					
15	5	505	45	90	82
20	7,5	400	50	125	67
25	13,5	300	60	227	-
30	22,5	205	70	405	-
35	35	149	80	650	-
40	58	108			
Частота = 2000 Гц (Глубина горячего проникновения индукционного поля в металл = 12 мм)					
40	30	195	75	207	58
45	45	162	80	250	51
50	58	133	90	345	40
55	77	110	100	460	33
60	102	93	120	850	24
65	132	78	140	1340	17
70	167	68	160	1910	13
Частота = 500 Гц (Глубина горячего проникновения индукционного поля в металл = 20 мм)					
70	97	190	110	320	53
75	115	143	120	120	43
80	136	116	130	600	34
85	157	100	140	775	28
90	181	87	150	985	23
95	207	76	160	1200	20
100	240	68			

Табл.1.5 Характеристики індукційного ковальського нагрівача [15]

У побуті індукційне нагрівання використовують у приладах для приготування їжі та водонагрівачах. Це дозволяє отримувати дорогі безінерційні прилади, які одночасно мають високий ККД. Трійка назв на слуху, де використовується технологія:

1. Мультиварки.

2. Варильні панелі.

3. Водонагрівачі.

Виробники кухонної техніки активно розробляють нові моделі індукційних мультиварок. Ці пристрої гарно підходять для приготування різноманітних та корисних страв.

Механізм пристрою складається з нагрівального елементу, який розігріває дно чаші та інші складові виробу. Температура, яка потрібна для приготування різноманітних страв, усередині виробу нагрівається за декілька

хвилин. Ця функція дуже зручна та дозволяє комфортно обсмажувати м'ясо, овочі (компоненти азіатських страв) і супи. [12]Мультиварка здатна підтримувати встановлений рівень потужності та високий ККД.



Рис. 1.15 Мультиварка Zigmund & Shtain MC-DS42IH [12]

Переваги індукційного нагріву мультиварки:

- Потужність, що споживається 1200-1400 Вт;
- Функція економії електроенергії;
- Функція точного контролю температури;
- Можливість скорочення часу на приготування їжі;
- нагрівання проводиться за допомогою кришки, куди вмонтовано ТЕН (функція 3D нагріву), відбувається замкнутий теплообмін усередині ємності;
- безпека експлуатації.

Індукційна варильна плита

Індукційна плита – це сучасний кухонний пристрій, який має безліч переваг, порівнянно з іншим аналогічним обладненням.

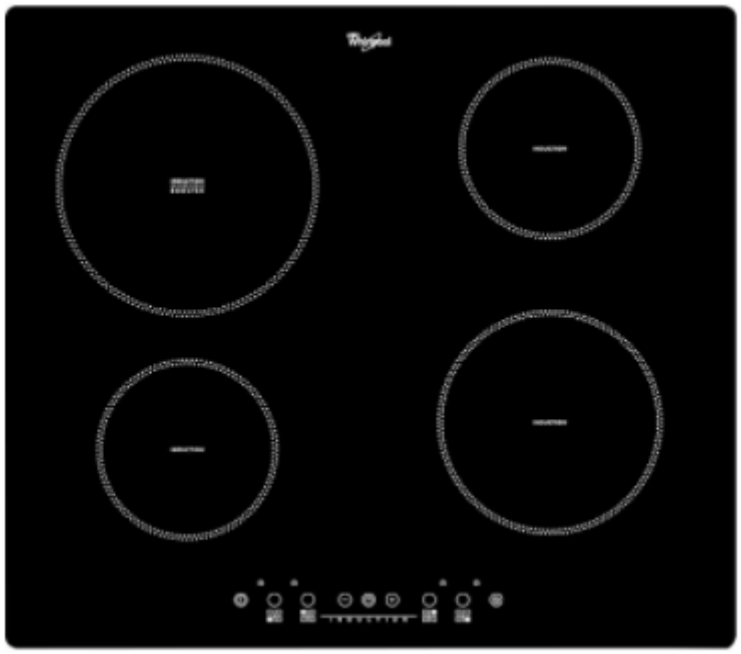


Рис.1.16 Індукційна панель [13]



Рис.1.17 Влаштування ндукційної плити

Переваги індукційних панелей:

1. Економічність. Індукційні плити на 20% більш ефективні . ККД звичайних електричних плит не більше 70%

2. Процес приготування швидший. Плита має можливість швидко виконувати нагрівання води, завдяки цьому і сам процес приготування стає набагато коротшим.

3. Безпчність. Індукційні плити мають мінімальну загрозу щодо ймовірності обпекання від поверхні, ризики зведені до мінімуму

4. Зручні для використання. Просто доглядати таку поверхню, сама поверхня гладка та не нагрівається.

5. У плиті є декілька режимів для приготування різноманітних страв з різними температурними режимами.

6. Естетичний вигляд, індукційна плита виглядає сучасно.

7. Такі плити екологічні. Внаслідок того, що індукційна поверхня не нагрівається, у приміщення не поступає зайве тепло, у приміщенні менша температура. І повітря не надходять шкідливі речовини.

Індукційний водонагрівач



Рис.1.18 Індукційний проточний водонагрівач [14]

Варіанти саморобних пристроїв

На просторах інтернету розміщено велику кількість саморобних пристроїв для різних цілей.

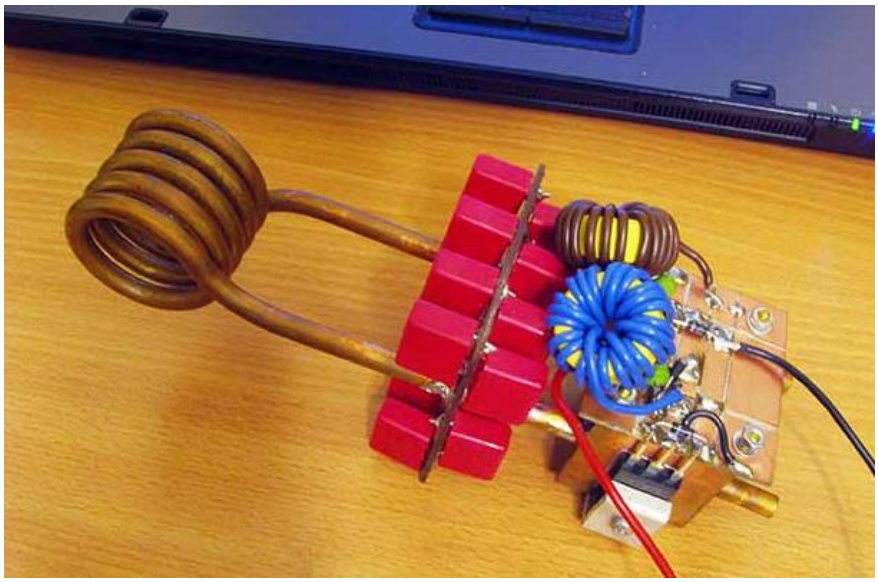


Рис.1.19 Індукційний нагрівач виготовлений з комп'ютерного блоку живлення 250-500Вт [16]



Рис.1.20 Водонагрівач із поліпропіленової труби з живленням від інвертора [16]



Рис.1.21 Саморобний індукційний нагрівач [11]

Переваги індукційного нагріву

1. Компактність установок – це одна з важливих переваг, яка спонукала деякі організації на заміну обладнання. Тепер зовсім не обов'язково обладнати та орендувати величезні площі під виробництво, адже установки для нагріву досить компактні та можуть поміститися навіть у невеликому цеху.
2. Виробничий процес стає набагато комфортнішим, тому що корпус установки не нагрівається, а отже, не нагріває температуру в приміщенні.
3. Деталь отримує рівномірний розподіл тепла під час нагрівання, це робить процес нагрівання якіснішим.
4. Індукційне нагрівання дозволяє нагрівати тільки ту частину деталі, яка потребує нагрівання, завдяки цьому можна заощадити значну частину електрики.
5. Завдяки індукційному загартування метал стає міцнішим і всі його фізичні характеристики покращуються.
6. Безпека (немає відкритого полум'я)
7. Екологічні, немає шкідливих викидів та сторонніх запахів

1.5 Патенти

Патент США №US 2010/0213190 від 26.08.2010 «Проточний індукційний нагрівач» для нагрівання рідин, що включає індукційну котушку, розміщену в камері з феримагнітними стінками, вздовж яких проходять канали для руху рідини. Нагрівання рідини походить від феримагнітних стінок камери індуктора. Пристрій не вимагає додаткового електромагнітного екранування.

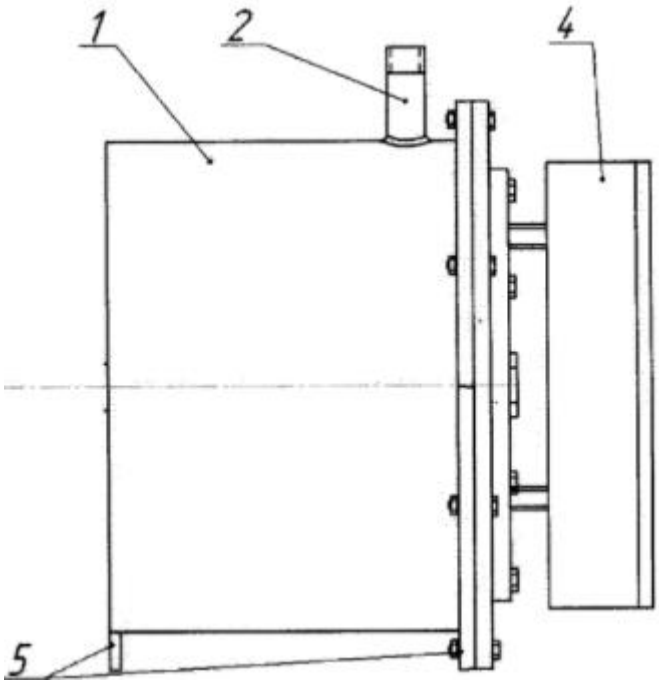


Рис.1.22 Загальний вигляд індукційного нагрівача рідини Вигляд сбоку [17]

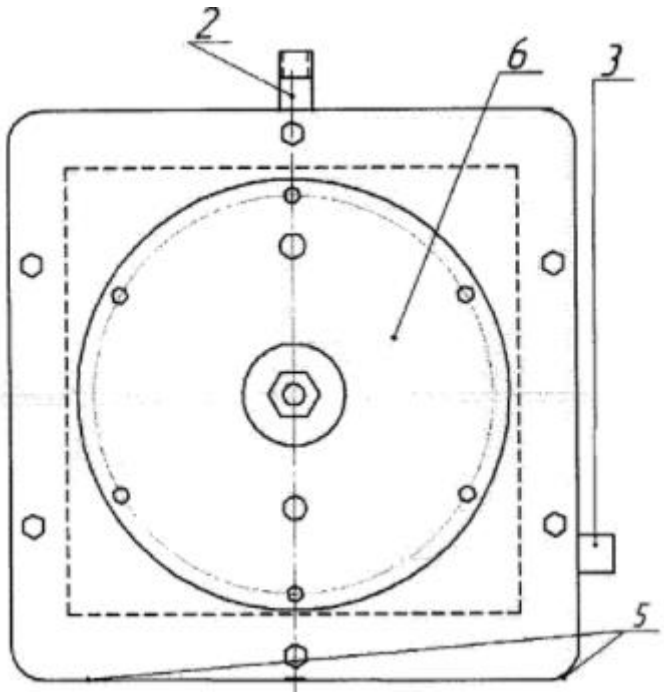


Рис. 1.23 Загальний вигляд індукційного нагрівача рідини Вигляд спереду[17]

Винахід відноситься до електроенергетики і може бути використане в системах опалення, гарячого водопостачання, в технологічних процесах підігріву рідин, де потрібно забезпечити малий градієнт температур між нагрівачем і рідиною, що нагрівається в проточному режимі або в накопичувальній ємності. Індукційний нагрівач містить циліндричний корпус з вхідним і вихідним патрубками, феримагнітний корпус для індукційної котушки з електричною обмоткою із ізольованих проводів, феримагнітну кришку корпусу індукційної котушки, корпус виконаний з труби квадратного перерізу, стінки корпусу для індукційної котушки мають різну товщину. , Що створює лабіринтну форму руху рідини Технічним результатом є збільшення потужності нагрівача.

Рідина, що надходить через вхідний патрубок 3 подається у внутрішню порожнину корпусу нагрівача і зворотним потоком вздовж внутрішньої і зовнішньої стінок циліндричного корпусу індукційної котушки через розділову пластину виходить у вихідний патрубок 2. При об'єднанні трьох корпусів нагрівачів рідина по каналах утворених роздільними пластинами

проточні отвори проходить всі три корпуси нагрівачів і виходить через вихідний патрубок 2.

Недоліком пристрою є мала товщина стінок камери та кришки індуктора, що призводить до спотворення форми електромагнітного поля і, як наслідок, зниження коефіцієнта потужності (cos ϕ), а застосування однотипної конструкції діапазону частот з 8-кратним перекриттям діапазону збільшить втрати і в цілому приведе до низького коефіцієнта корисної дії.

Патент на винахід UA №2400944 C1, опубліковано 27.09.2010 «Вихровий індукційний нагрівач та пристрій обігріву для приміщень» для використання в системах опалення та водопостачання. Містить феромагнітну ємність циліндричної форми. До торцевих стінок циліндричної ємності з протилежних сторін прикріплені концентрично дві металеві труби з утворенням лабіринтного виходу для рідини, що нагрівається. Має індукційну обмотку з мідного дроту, укладену в герметичний тороїдальний циліндричний корпус з немагнітного ізоляційного матеріалу, розташовану в центрі і коаксіально з трубами. Подача рідини в ємність здійснюється трубою через центр циліндричного корпусу обмотки.[17]

Проведення експериментальних досліджень

2.1. Постановка експерименту

І так, приступимо до частини експерименту. Для визначення найефективніших режимів роботи проведено низку експериментальних вимірів. Стенд складається з таких елементів:

1. Генератор високочастотних електромагітних коливань (Рис 2.1)

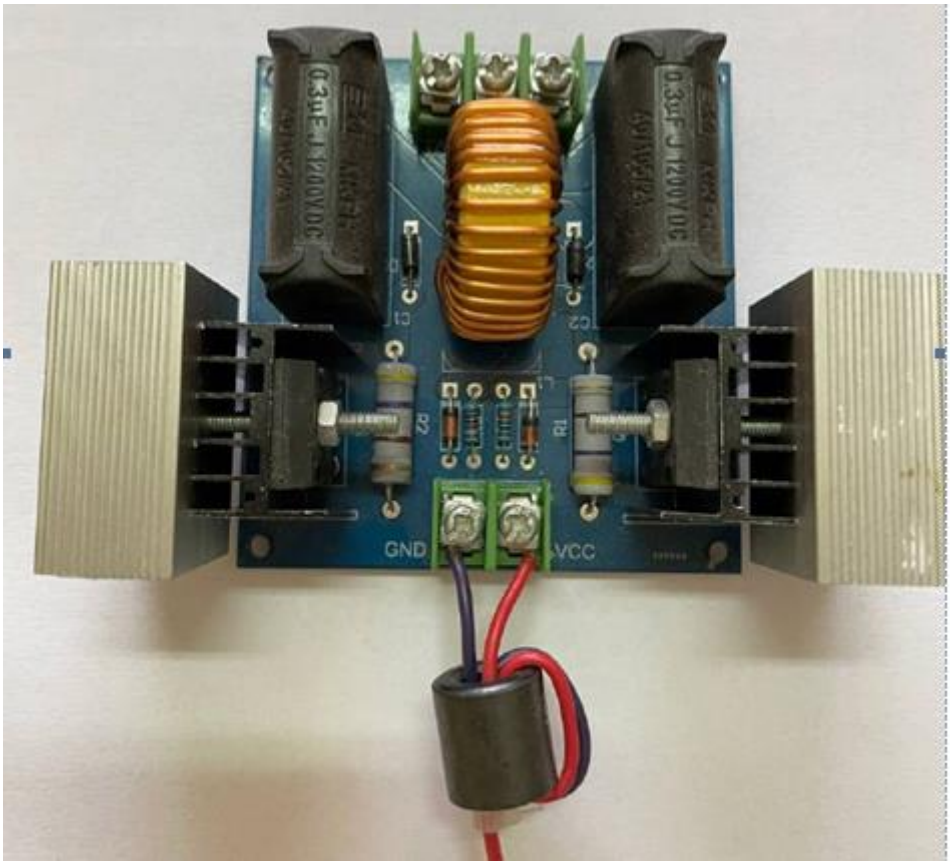


Рис2.1 Генератор електромагітних коливань

У генератор встановлені силові польові транзистори IRF250. Діапазон роботи напруги високочастотного генератора 12-30 В. Потужність генератора високочастотних коливань обмежена до 150 Вт. Робоча частота силового генератора (драйвера) склала 170 кГц, напруга живлення 12 В DC, споживана потужність холостого ходу 55 Вт. Електрична схема автогенератора електромагнітних коливань показана на Рис 2.2

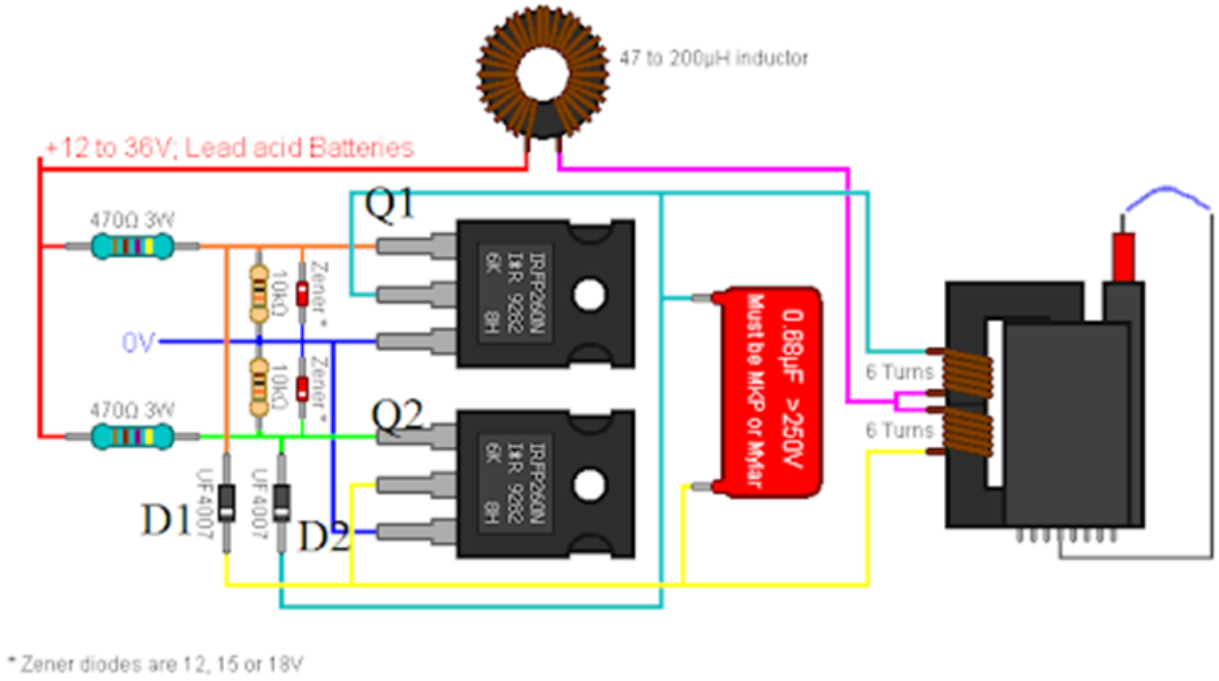


Рис 2.2 Електрична схема автогенератора електромагнітних коливань

2. Індуктор, виконаний у вигляді плоскої спіральної котушки з відведенням від центру (Рис 2.3)



Рис 2.3 Індуктор

Індуктор має активний опір 0,3Ом. Індуктивність спіральної котушки – 0,08мГн, а резонансна частота 1,56МГц. Виконана із матеріалу Cu-Al. Розміри – Діаметр котушки – 180 мм, перетин 1,5 мм. кількість здвоєних витків -16, Електроопір - 0,3 Ом,Індуктивність - 80 мкГн.

3. Регульований блок живлення з діапазоном напруги від 12 до 24В. Сила струму до 5А. (Рис 2.4)



Рис 2.4 Регульований блок живлення

У роботі застосовувалися вимірювальні прилади:

1. Детектор електромагнітного поля GB8702 (Рис 2.5) з точністю визначення електричного поля до 1 В/м та магнітного до 0.01 мТл. Діапазон приладу розрахований на вимірювання від 1 В/м до 1999 В/м для вимірювання електричного поля та 0.01мТл до 99.99 мТл для вимірювання магнітного поля в діапазоні температур від 0 до 50 градусів за Цельсієм. Детектор електромагнітного поля працює за вологості до 80%. Порогове значення сигналу спрацьовування 40В/м або 0.4 мТл. Час спрацьовування – близько 0,4 секунди. Джерелом харчування служать 3 АААбатарейки по 1.5В.



Рис 2.5 Детектор електромагнітного поля GB8702

3. Ручний EMF-вимірювач електромагнітного випромінювання (Рис 2.6)

Діапазон вимірювання електромагнітного поля: 0,01-19.99мТл, роздільна здатність:0,1 підтримують шкалу мг/0.01 мТл, поріг сигналізації: більш ніж 4,0 підтримують шкалу мг/0.4 мТл. Діапазон вимірювання електричного поля: 1-1999 В/м. Роздільна здатність: 1 В/м. Поріг тривоги: понад 40 В/м. Частотний діапазон 5 Гц-3500 МГц. Автоматичне відключення-10 хвилин бездіяльності. Значок низького заряду батареї-менше, ніж 6,8 V Перемикач температурного блоку - ℃ / ℉. Умови експлуатації - 0 ℃-40 ℃ / 32 ℉-104 ℉ 45%-80% RH.



Рис 2.6 Детектор електромагнітного випромінювання MastfuyiFY876

4. Інфрачервоний пірометр UNI-T UT303A для безконтактного вимірювання температури дозволяє вимірювати температури в діапазоні від -32С до 650С.



Рис 2.7 Інфрачервоний термометр UNI-T UT303A

Також у роботі використовується нагрівається елемент з нержавіючої сталі у вигляді плоского дика діаметром D=19см і товщиною 4 мм з рукояткою (Рис2.8)



Рис2.8 Диск із нержавіючої сталі

2.2. Розробка лабораторного стенду

Для проведення експерименту було зібрано установку, що складається з послідовно підключених регульованого блоку живлення, генератора високочастотних електромагнітних коливань, індуктора, виконаного у вигляді плоскої спіральної котушки з відведенням від центру (Рис2.9)



Рис2.9 Експериментальний стенд для дослідження електромагнітних полів індуктора у вигляді плоскої спіральної котушки з відведенням від центру

Схематично показано встановлення для дослідження електромагнітних полів індуктора показано на Рис.2.10 з урахуванням всіх вимірювальних приладів.



Рис. 2.10 Схема установки та вимірювальні прилади

У першій серії експериментів (Рис.2.9) змінюючи інтервал по вертикалі від 2.1 до 15.3 см вимірювалося електричне поле детекрором електромагнітного випромінювання MastfuyiFY876 . Балу помічено цікаву залежність від відстані зі стрибком, величина якого становила 116В/м на 7.3 см від поверхні індуктора в експерименті№1 (Табл 2).

h	E
2.1	327
3.0	265
3.2	248
3.5	235
4.0	200
4.6	151
5.2	89
5.8	69
6.5	39
7.3	116
7.5	109
8.4	90
8.8	91
9.8	75
10.3	65
11.3	52
12.3	42
13.3	32
14.3	22
15.3	9

Табл. 2 Таблиця залежності електричного поля від висоти

h- відстань по вертикалі від центру котушки, де вимірюється електричне поле.

Стрибок на висоті 7.3 см від індуктора яскраво показаний на графіку залежності електричного поля від дистанції до вимірювального приладу MastfuyiFY876 у першому експерименті (Рис2.11)

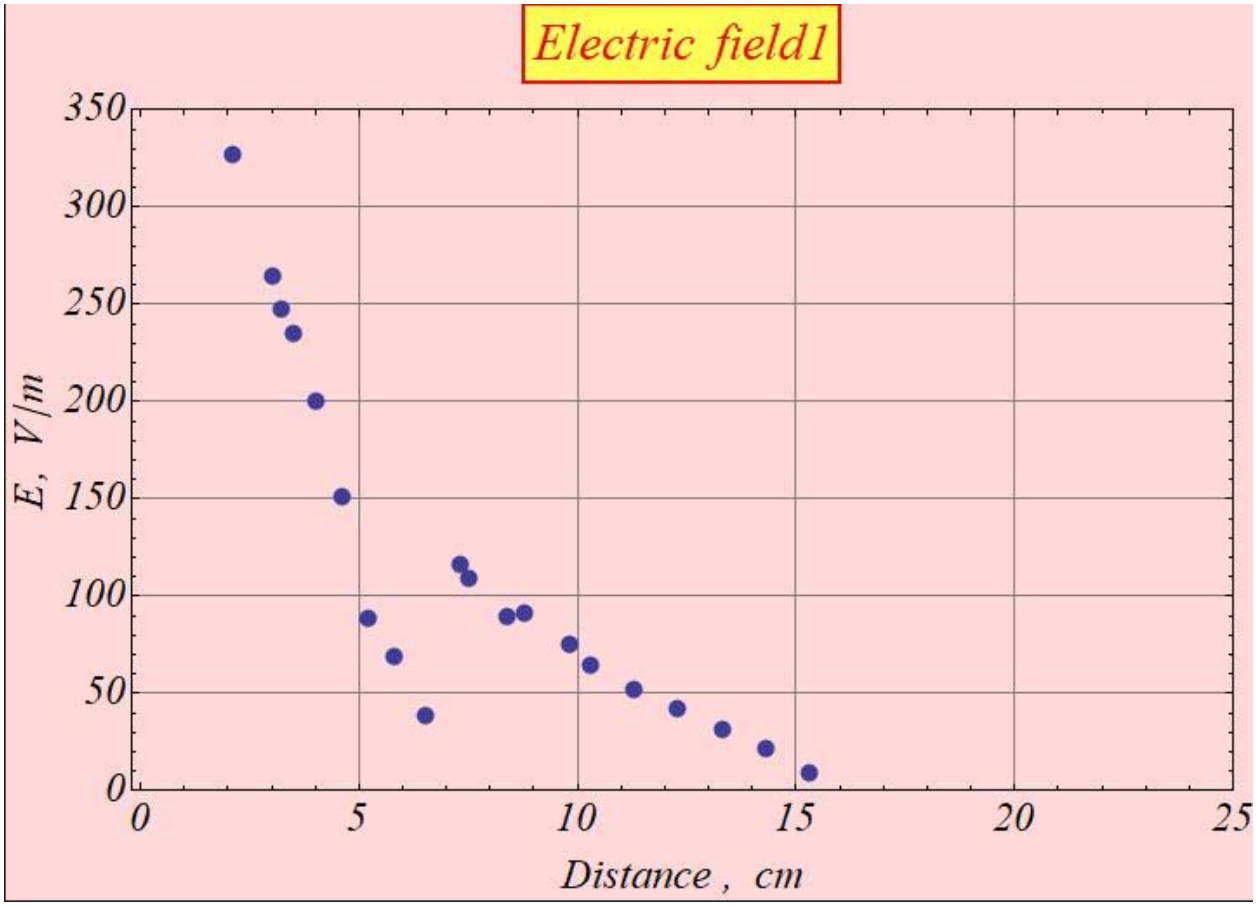


Рис 2.11 Графік залежності електричного поля від відстані

У другому експерименті вимірювалися електричне та магнітне поле детектором електромагнітного поля GB8702. Збільшуючи дистанцію від центру індуктора, виконаного у вигляді плоскої спіральної котушки з відведенням від центру з кроком 0.5 см до 11.1 см і далі з кроком 1.0 до 21.1 см, вимірювали електричне і магнітне поле (Табл.2.1). Найбільше значення електричного поля в 0.66 В/м було зафіксовано на дистанції 3.6см від центру індуктора, помічено, що величина електричного поля значно зменшується і стрибкоподібно починаючи з дистанції 10.1 см.

h	B	E
2.1	459	0.25
2.6	465	0.49
3.1	450	0.34
3.6	415	0.66
4.1	404	0.42
4.6	371	0.31
5.1	343	0.31
5.6	338	0.37
6.1	330	0.25
6.6	352	0.35
7.1	317	0.27
7.6	299	0.25
8.1	295	0.21
8.6	272	0.26
9.1	251	0.21
9.6	246	0.37
10.1	231	0.18
10.6	226	0.25
11.1	211	0.20
12.1	189	0.31
13.1	174	0.29
14.1	159	0.21
15.1	148	0.22
16.1	139	0.23
17.1	134	0.21
18.1	124	0.27
19.1	115	0.18
20.1	110	0.25
21.1	104	0.21
21.1	95	0.18

Табл. 2.1 Електричне та магнітне поле від висоти

На Графіці (Рис 2.12) можна спостерігати залежність електричного поля центру індуктора, виконаного у вигляді плоскої спіральної котушки з відведенням від центру від дистанції до GB8702 вимірювального приладу. На відстані 6.6 см від центру котушки по вертикалі також виявлено стрибки, як і в експерименті №1. Далі по дистанції поле лінійно зменшується.

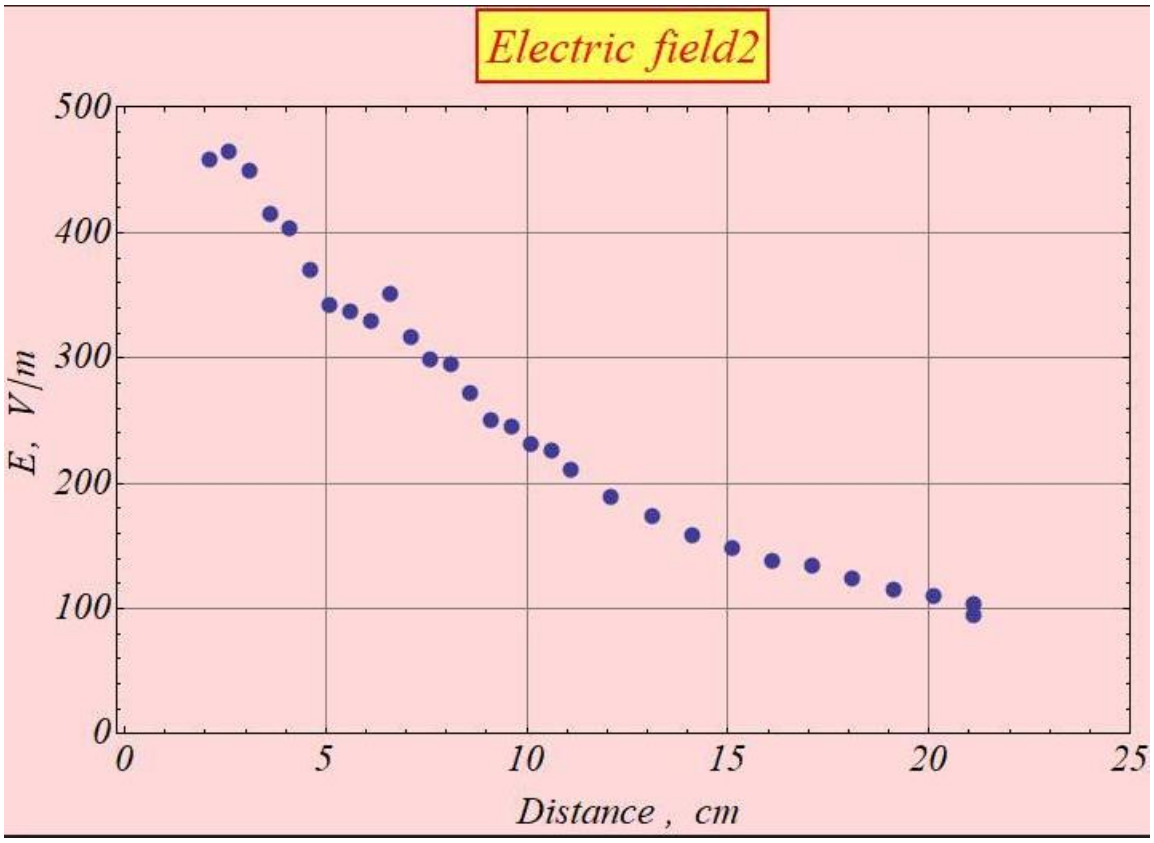


Рис 2.12 залежність електричного поля від дистанції до вимірювального приладу GB8702. Експеримент №2

На Графікі (Рис 2.12) можна спостерігати залежність електричного поля центру індуктора, виконаного у вигляді плоскої спіральної котушки з відведенням від центру від дистанції до GB8702 вимірювального приладу. На відстані 6.6 см від центру котушки по вертикалі також виявлено стрибки, як і в експерименті №1. Далі по дистанції поле лінійно зменшується.

В експерименті №2 спостерігаються сильні осциляції магнітного поля, середнє значення магнітного поля слабо зменшується з висотою від центру спірального індуктора! Робоча частота котушки 170 кгц. Величина магнітного поля на дистанції від 2.1см до 21.1см від спіральної котушки з відведенням від центру (Рис 2.13) до вимірювального приладу GB8702 спадає від 465мкТл (на інтервалі 2.6см) до 91 мкТл (92 мкТл). На дистанції 6.6 см також спостерігається стрибок магнітного поля до 352 мкТл.

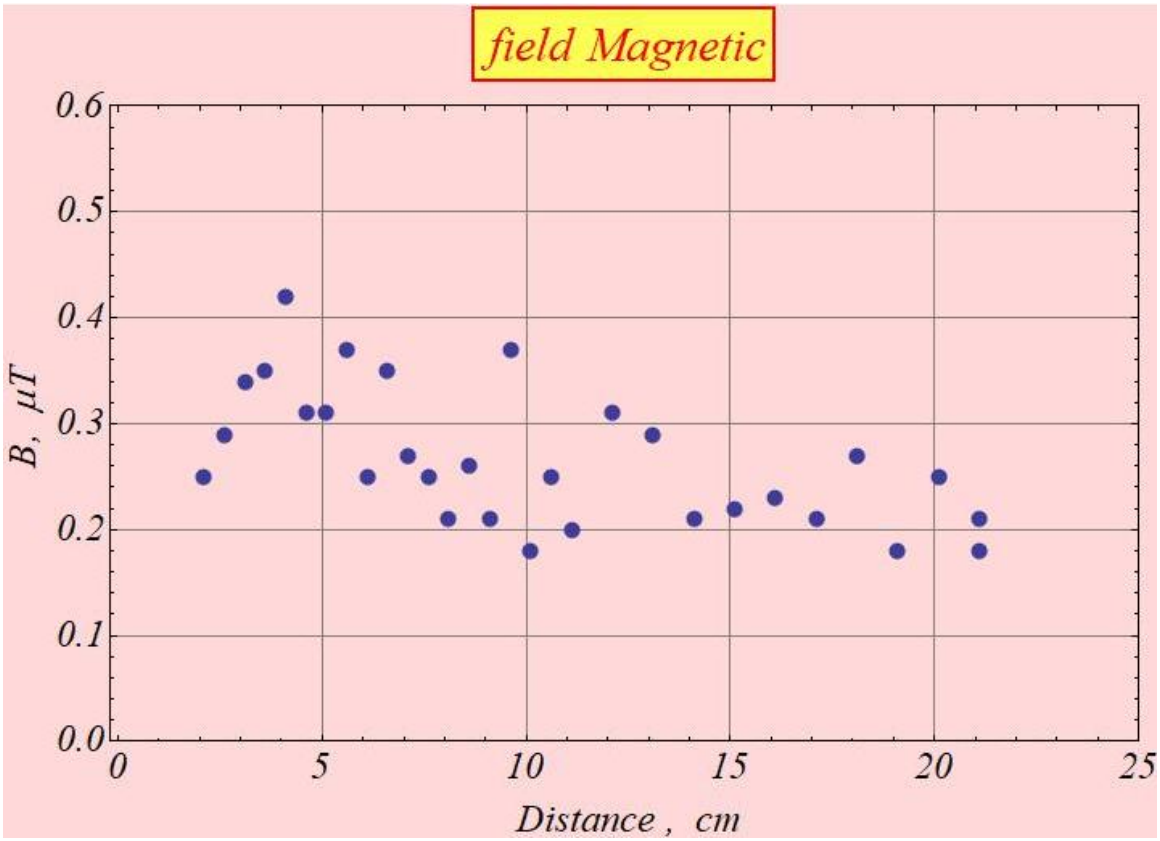


Рис 2.13 залежність магнітного поля від дистанції до вимірювального приладу GB8702. Експеримент №2

Надалі у роботі використали дисковий сталевий зразок діаметром 19 див і завтовшки 4 мм, який повністю закривав індукційну котушку.

У другій серії експериментів вимірювалися електричне та магнітне поля над вибраним сталевим феромагнітним диском по висоті над центром із тією самою робочою частотою генератора. При цьому споживана електрична потужні

Вимірювання електричного та магнітного полів детектором GB8702 по висоті над феромагнітним сталевим зразком показує, що електричне поле монотонно зменшується з висотою (Рис 2.14), а магнітне осцилює(Рис 2.15)

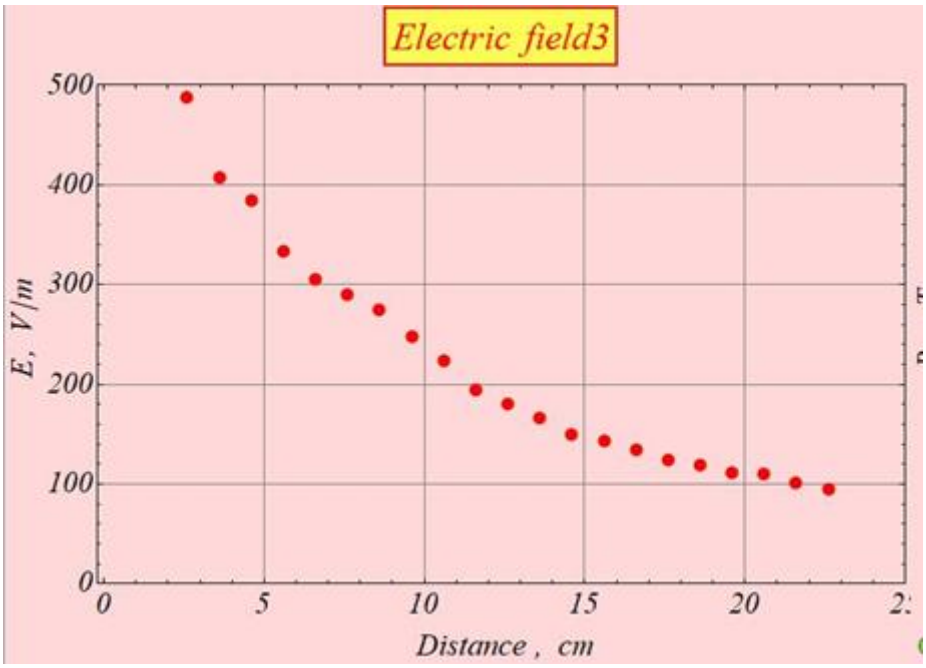


Рис 2.14 графік залежності електричного поля від дистанції

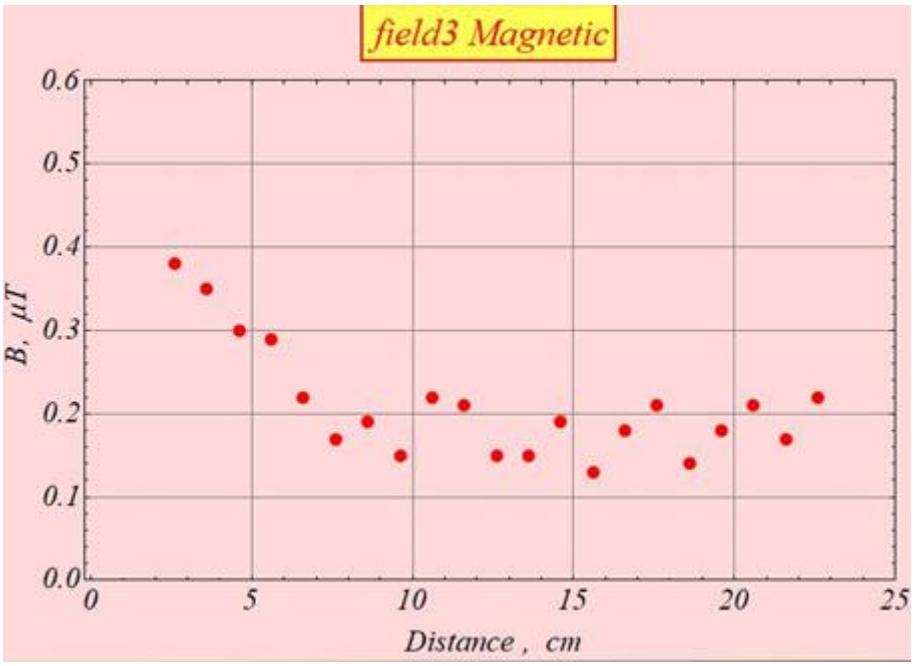


Рис 2.15 графік залежності магнітного поля від дистанції

Для порівняння електричного поля над центральною частиною індуктора в холостому режимі та за наявності сталевого феромагнітного екрануючого диска був побудован графік залежності електрични полів від дистанції, де (сині маркери)- значення електричного поля над центральною частиною індуктора в холостому режимі та (червоні маркери)- за наявності сталевого феромагнітного екрануючого диска (Рис 2.16)

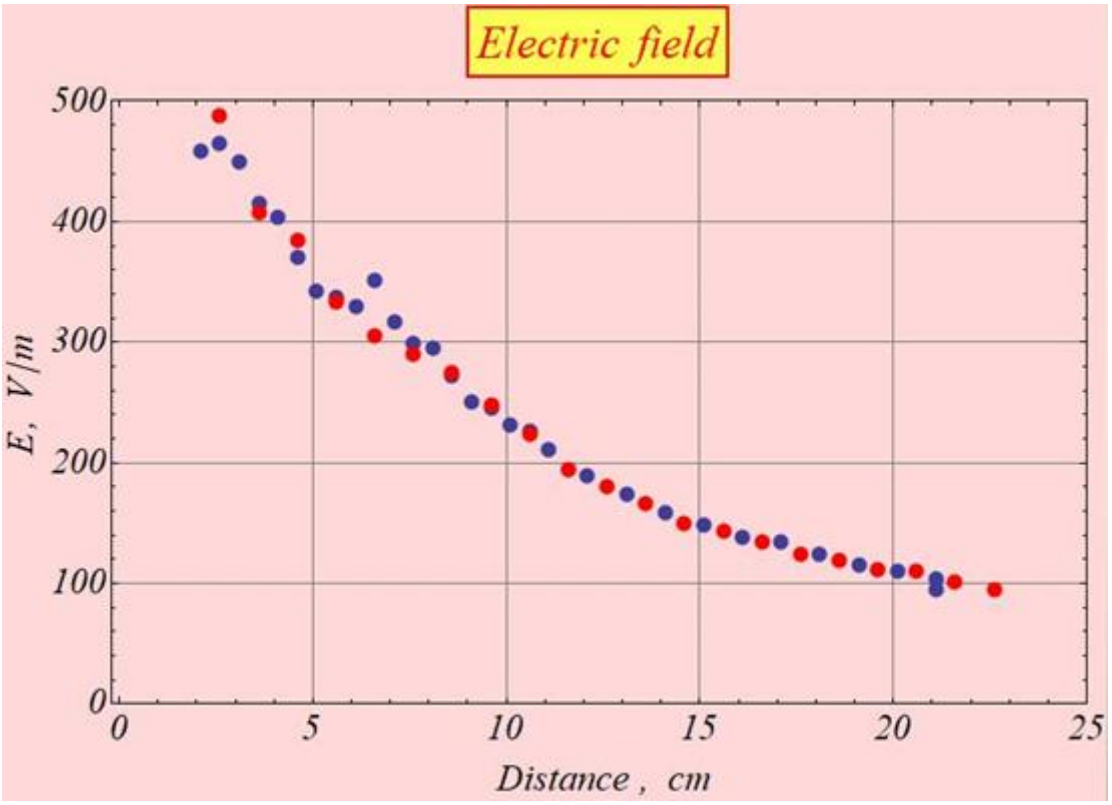


Рис 2.16 порівняння електричного поля в холостому режимі та за наявності сталевого феромагнітного екрануючого диска

Як видно з графіків, змінне електричне поле, створюване обраною індукційною котушкою, практично не екранується сталевим феромагнітним диском, що проводить, товщиною 4 мм по всій висоті над зразком!

Згладжується лише стрибок електричного поля на висоті 7 см від центру котушки.

У третій серії експериментів вимірювалася залежність температури сталевого диска діаметром 153 мм та товщиною 0,6 мм від часу нагріву.Uпіт = 12 В DC. Nвх = 57 Вт. (Рис 2.17)

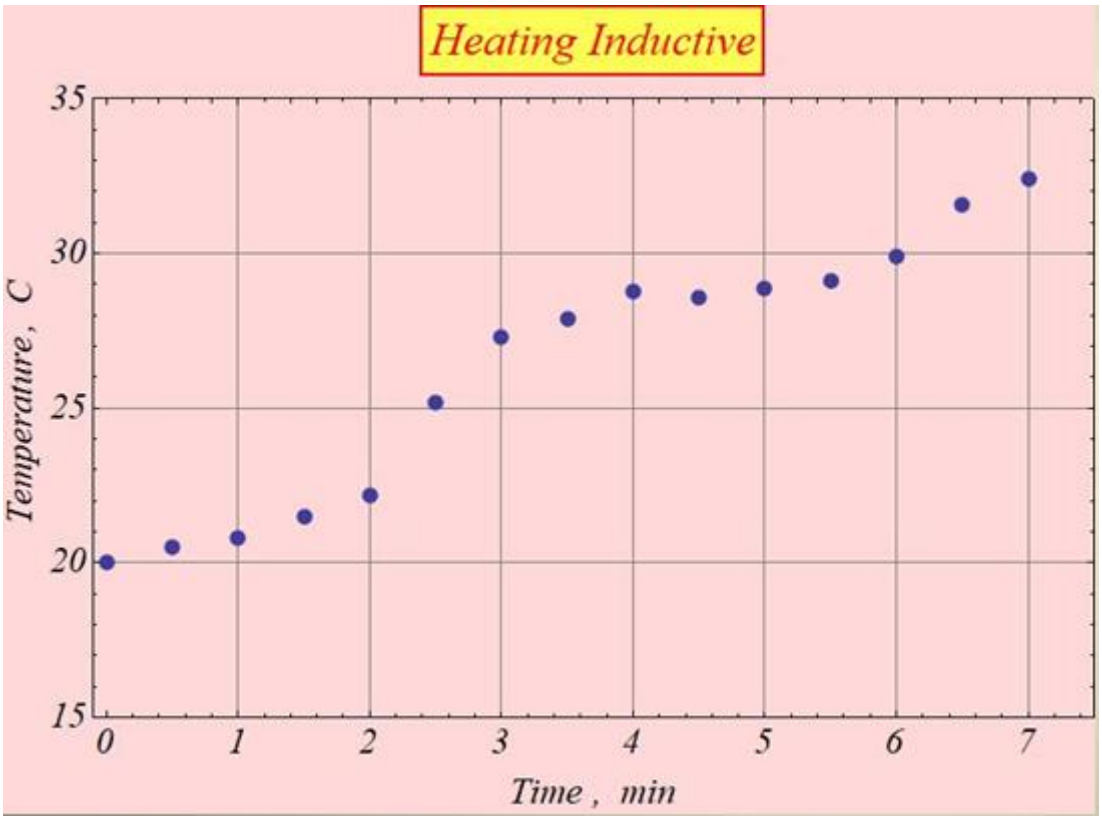


Рис 2.17 залежність температури сталевого диска від часу нагріву

Як ми бачимо з графіку залежності, спостерігається виражене ступінчасте нагрівання, що свідчить про нелінійність процесу індукційного нагріву з вибраним індуктором.

У четвертій серії експериментів вимірювали залежність електричної потужності від напруги живлення (Рис 2.18).

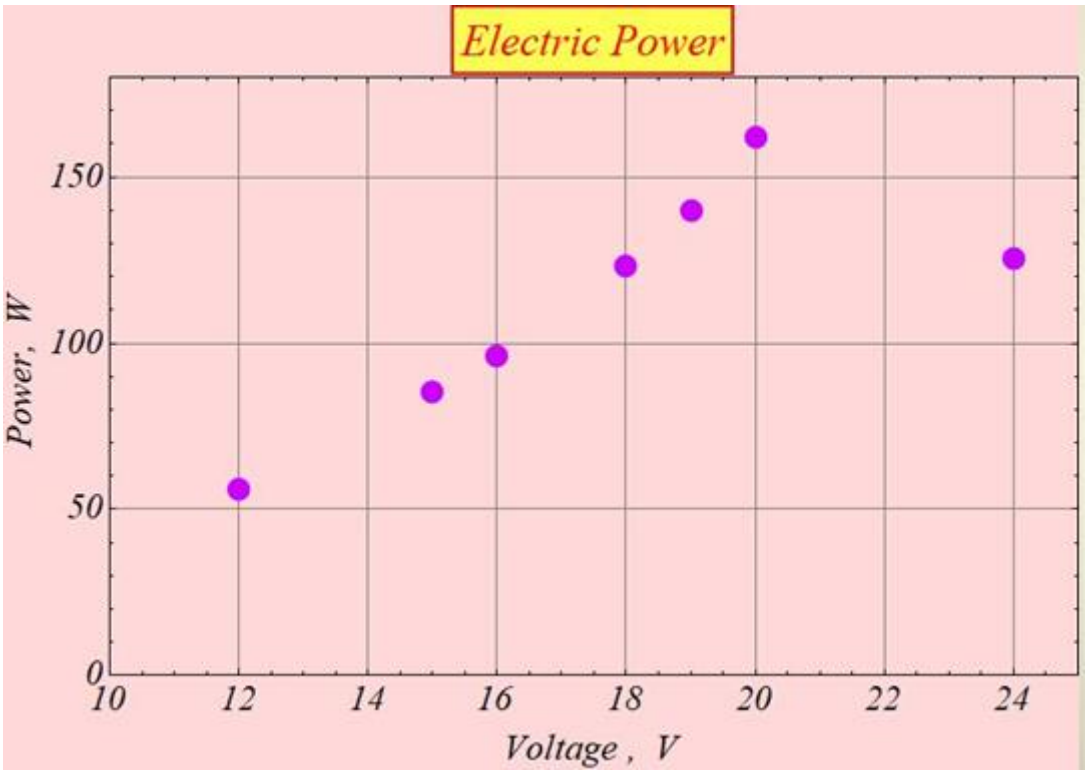


Рис 2.18 залежність електричної потужності від напруги живлення

Спостерігається параболічний зростання потужності до напруги 20, далі відбувається зрив стаціонарного процесу з появою вібрацій котушки, різким нагріванням силових транзисторів і зниженням потужності індукційного нагріву.

ВИСНОВКИ

Для визначення фізичних особливостей роботи індукційного нагрівача та найбільш ефективних режимів його функціонування було проведено низку експериментальних досліджень, у ході яких було виміряно показники температури, потужності, електричного та магнітного поля.

- Для зниження електромагнітних втрат в індукційній котушці вона повинна виготовлятися із ізольованого багатожильного проводу – літцендрату;
- Продуктивність установки істотно залежить від конструкції та способу намотування індукційної котушки, яка повинна забезпечувати мінімальний електричний опір за максимальної індуктивності;
- Електромагнітні поля від обраної плоскої спіральної котушки з біфілярною обмоткою з частотою 170 кГц не екрануються товстим сталевим диском і істотно виходять за його межі;
- Спостерігається явно виражений стрибок еперемінного електричного поля на висоті, що дорівнює 0,8 радіуса індукційної котушки;
- Невелика електрична потужність силового генератора (до 200 Вт) забезпечує повільне розігрів зразків і має бути на порядок вищим для забезпечення реального практичного застосування;
- Для оптимізації режиму функціонування індукційного нагрівача необхідний підбір робочої напруги кожної обраної конструкції.

Проведена робота може надати певні відомості, залежно від вимог різних пристроїв на основі індукційної нагрівальної установки.

Список використаних джерел

1. https://elektroznatok.ru/info/people/michael-faraday
2. https://electroandi.ru/elektrichestvo-i-magnetizm/opyty-faradeya.html
3. М. Лившиц. Закон электромагнитной индукции // Квант. — 1998. № 3
4. Фарадей М. 1832 г. Экспериментальные исследования электричества . Фил. Пер. R. Soc. Лондон. 122 , 125–162. (DOI: 10.1098 / rstl.1832.0006).
5. Ромишевский Е., Стасенко А.Л. Магнитная сила и закон электромагнитной индукции //Квант. — 2008. — № 5. — С. 38-40
6. Зильберман Г.Е. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1970. 384 с
7. Джеймс ФАЙЛ.2012 г. Переписка Майкла Фарадея (6 томов, Лондон, 1991–2012)
8. Савельев, И.В. Курс общей физики. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. 2-е изд.-М.: Наука, 1982.-496с.
9. https://www.theengineer.co.uk/
10. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рощин, М. А. Рысс и др. : под ред. Д. Я. Поволоцкого. М.: Металлургия, 1984. — 568 с.
11. Васильев А. С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1990. — 80 с. — (Библиотечка высокочастотника-термиста; Вып. 15). — 5300 экз. — ISBN 5-217-00923-3.
12. Бабат Г. И., Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. — М.: Госэнергоиздат, 1948
13. https://vashtehnik.ru/vodonagrevateli/indukcionnyj-vodonagrevatel.html
14. https://www.zigmund-shtain
15. https://www.whirlpool.com.ua
16. https://digital.ua/
17. https://mosinductor.ru/info/articles/sovremennye-induktsionnye-kuznechnye-nagrevateli/
18. https://otivent.com/indukcionnyj-nagrevatel-svoimi-rukami
19. https://patents.google.com