

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електронних приладів та пристроїв

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Л.Д. Писаренко

“ ” 2019 р.

Дипломна робота

освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»

з напрямку підготовки **6.050802 – Електронні пристрої та системи**

на тему: Концентратор електромагнітної енергії

Виконав:

студент IV курсу, гр. ДЕ-51

Клименко Владислав Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник доцент, к.т.н., Цибульський Леонід Юрійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль доцент, к.т.н. Чадюк Вячеслав Олексійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент проф., к.т.н. доц. Орлов Анатолій Тимофійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.050802 –

Електронні пристрої та системи (Електронні прилади та пристрої)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Л.Д.Писаренко

«_____» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Клименку Владиславу Олеговичу

1. Тема проекту «Концентратор електромагнітної енергії»

і керівник проекту Цибульський Леонід Юрійович, доцент, к.т.н., доцент затверджені наказом по університету від « » _____ 2019 р., № _____

2. Строк подання студентом проекту « 10 » червня 2019 р.

3. Вихідні дані до проекту: Параметри індуктора: радіус котушки – 180 мм, кількість витків – 10, концентратор типу «концентратор з нерухомими стінками»; підвищення густини магнітного потоку не менше ніж в 2 рази.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Анотація; вступ; огляд базових типів концентраторів, фізичні основи, принцип роботи, конструкція; огляд сучасних комплексних систем з використанням концентратора електромагнітної енергії; моделювання індуктора з концентратором електромагнітної енергії; дослідження моделі індуктора з концентратором електромагнітної енергії; перелік використаної науково-технічної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу: концентратор електромагнітної енергії креслення складальне, концентратор електромагнітної енергії креслення деталей; допоміжні графічні матеріали з рисунками, графіками та формулами.

6. Дата видачі завдання 15.04.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по електромагнітним концентраторам	20.04.2019– 15.05.2019	
2	Розробка геометрії концентратора на основі даних з опрацьованої літератури	16.04.2019– 14.05.2019	
3	Розробка фізично-топологічної моделі індуктора з концентратором	15.04.2019– 26.05.2019	
4	Розрахунок за моделлю індуктора з концентратором	27.04.2019– 17.05.2019	
5	Розробка складального креслення і деталювання	18.05.2019– 22.05.2019	
6	Оформлення пояснювальної записки	22.05.2019– 01.06.2019	
7	Перевірка на унікальність	10.06.2019	
8	Креслення плакатів з формулами та графіками, підготовка доповіді	13.06.2019	
9	Підписання дипломної роботи	16.06.2019	

Студент гр. ДЕ-51 _____ В.О. Клименко

Керівник проекту _____ Л.Ю. Цибульский

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту

на тему: **«Концентратор електромагнітної енергії»**

Київ – 2019

РЕФЕРАТ

Концентратор електромагнітної енергії

Бакалаврська робота напряму підготовки 6.050802 – «Електронні пристрої та системи» спеціалізації «Електронні прилади та пристрої». Клименко Владислав Олегович. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-51. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 75 с., іл. 45, табл. 1.

Ключові слова: індуктор, концентратор електромагнітної енергії, магнітний потік, електромагнітна індукція.

Короткий зміст роботи: В дипломному проекті розглянуто основні способи концентрації електромагнітної енергії та пристрої, за допомогою яких реалізується концентрація. Розглянуто використання концентраторів і пояснена їх роль в сучасних комплексних пристроях. Описано алгоритм моделювання і створено фізичну модель індуктора з використанням концентратора електромагнітної енергії в середовищі COMSOL Multiphysics. Приведено результати розрахунку електромагнітної задачі моделі методом скінченних елементів. Розроблене складальне креслення та деталювання індуктора з концентратором електромагнітної енергії, який може забезпечити наступні параметри:

- значне підсилення магнітної індукції (більше ніж в 4 рази в порівнянні зі звичайним індуктором) ;
- простоту в виготовленні;
- низьку собівартість .

АНОТАЦІЯ

В дипломному проекті розглянуто основні способи концентрації електромагнітної енергії та пристрої, за допомогою яких реалізується концентрація. Розглянуто використання концентраторів і пояснена їх роль в сучасних комплексних пристроях. Описано алгоритм моделювання і створено фізичну модель індуктора з використанням концентратора електромагнітної енергії в середовищі COMSOL Multiphysics. Приведено результати розрахунку електромагнітної задачі моделі методом скінченних елементів. Розроблене складальне креслення та деталювання індуктора з концентратором електромагнітної енергії, який може забезпечити наступні параметри:

- значне підсилення магнітної індукції (більше ніж в 4 рази в порівнянні зі звичайним індуктором) ;
- простоту в виготовленні;
- низьку собівартість .

S U M M A R Y

In the thesis project examines the main methods of concentration of electromagnetic energy and devices, through which the concentration is realized. The use of concentrators is considered and their role in modern complex devices is explained. The simulation algorithm is described and a model of the inductor with a concentrator of electromagnetic energy is created in the environment of COMSOL Multiphysics. The results of calculation of electromagnetic research by the finite element method of the developed model of the device are presented. An assembly drawing and detailing of inductor with a concentrator of electromagnetic energy have been developed, which can provide the following parameters:

- significant increase in magnetic induction (more than 4 times compared with the usual inductor);
- simplicity in manufacturing;
- low cost.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 БАЗОВІ ТИПИ КОНЦЕНТРАТОРІВ. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ, ПРИНЦИП РОБОТИ, КОНСТРУКЦІЯ.....	13
1.1 Магнітний концентратор з нерухомими стінками.....	13
1.2 Гідромагніт.....	23
1.3 Концентратор заснований на методі вибуху	30
1.4 Висновки до розділу 1	35
2 РОЗГЛЯД СУЧАСНИХ КОМПЛЕКСНИХ ПРИСТРОЇВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕНТРАТОРА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	36
2.1. Пристрій герметизації керамічного модуля з концентратором і спосіб його використання.....	36
2.1.1 Передумови створення пристрою.....	37
2.1.2 Опис найкращого способу застосування пристрою	40
2.2. Магнітний датчик з модулюючим концентратором для зниження рожевого шуму.....	48
2.2.1 Передумови створення пристрою.....	49
2.2.2 Опис найкращого способу застосування пристрою	50
2.3 Висновки до розділу 2	52
3 МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКТОРА З КОНЦЕНТРАТОРОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	53
3.1. Попередня підготовка програми до розробки моделі	53
3.2 Побудова геометричної моделі концентратора.....	56
3.3 Побудова геометричної моделі індуктора.....	62
3.4 Підготовка моделі до дослідження.....	63
3.5 Висновки до розділу 3	67

					БР. 6.050802.051.009 ПЗ			
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ доквм</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>	Концентратор електромагнітної енергії	<i>Літ</i>	<i>Арк</i>	<i>Арквміів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Клименко В.О.</i>						
<i>Певевін</i>		<i>Цибульський Л.Ю.</i>					9	75
<i>Реценз.</i>		<i>Орлов А.Т.</i>				«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-51		
<i>Н. Контр</i>		<i>Чадюк В.О.</i>						
<i>Затверд</i>		<i>Писаренко Л.Д.</i>						

4 РОЗРАХУНОК ЗА МОДЕЛЛЮ ІНДУКТОРА З КОНЦЕНТРАТОРОМ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ..... 68

4.1 Розрахунок густини магнітного потоку та коефіцієнта його підсилення
концентратором 68

4.2 Розрахунок залежності густини магнітного потоку від геометричних
розмірів зовнішнього витка концентратора 72

4.4 Висновки до розділу 4 74

ВИСНОВКИ..... 75

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 76

Додаток А. Технічне завдання

Додаток Б. Специфікація

Додаток В. Специфікація

									Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				10

ВСТУП

В сучасних технологічних процесах широко використовуються методи термічної обробки матеріалів та різної природи впливу на них з використанням магнітної індукції. Індукційне нагрівання використовується в металургії і промисловості при пайці, плавці та загартуванні матеріалів та в випарниках. Пристрої засновані на явищі електромагнітної індукції широко використовуються в медицині. При виробництві електронних пристроїв явище електромагнітної індукції використовується у великій кількості процесів, наприклад при очищенні підкладок і створенні на них кремнієвих структур. Також створюють індукційні плазмотрони, які мають широке застосування в обробці матеріалів потоками плазми.

Однак ці та багато інших процесів є неможливими або неефективними при використанні звичайного соленоїда. В випадках коли треба сконцентрувати магнітний потік в певній точці чи об'ємі, не піддаючи впливу сусідні області, або для отримання значної напруженості магнітного поля використовуються концентратори електромагнітної енергії. При відсутності концентратора поле розповсюджується в просторі навколо соленоїда, в тому числі на частини заготовки які не потребують обробки та допоміжні елементи пристрою, які не мають безпосередньо брати участь у процесі. В результаті отримуються великі паразитні втрати, а також порівняно низька напруженість поля в робочому об'ємі при локальних процесах, що зменшує ефективність або взагалі робить їх неможливими.

При використанні концентратора створюваний соленоїдом магнітний потік «заганяється» в невеликий об'єм і набуває в ньому високої щільності. Таким чином можна отримати магнітне поле з високою напруженістю, яке до того ж концентрується в невеликому об'ємі, що дозволяє використовувати його в локальних процесах. Таку суть роботи має концентратор з нерухомими стінками, який є найпоширенішим серед всіх варіантів концентраторів і є основним об'єктом дослідження в даній роботі.

									Анк
									11
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

Метою даної роботи є розробка моделі індуктора з концентратором електромагнітної енергії та дослідження її електромагнітних параметрів. Відповідно до заданих параметрів індуктора необхідно розробити концентратор, який підвищить максимальну густину магнітного потоку, що створюється котушкою, не менше ніж в 2 рази.

					БР. 6.050802.051.009 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1 БАЗОВІ ТИПИ КОНЦЕНТРАТОРІВ. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ, ПРИНЦИП РОБОТИ, КОНСТРУКЦІЯ

Припустимо, що деяка порожнина, яка містить магнітний потік, оточена середовищем з безкінечною провідністю. Внаслідок скін-ефекту магнітне поле не проникає в провідник, воно ніби «замуровано» в порожнині.

Якщо спробувати стиснути магнітний потік деформацією стінок, то його інтегральна величина не зміниться, але виросте середня напруженість магнітного поля. Той же ефект спостерігається, якщо помістити в порожнину тіло з провідного матеріалу: магнітний потік витісняється в проміжок між стінками порожнини і введеним в неї тілом.

Таким чином, за допомогою провідних тіл і оболонок можна регулювати магнітний потік, міняючи його геометрію. Завдання концентрації магнітного потоку становить великий інтерес з точки зору отримання більшої напруженості магнітних полів. Існує три методи концентрації магнітного потоку:

1) соленоїд оточується системою провідних тіл таким чином, що створюваний ним магнітний потік «заганяється» в невелику порожнину і набуває в ній високої щільності;

2) провідна рідина, що радіально рухається всередині об'єму, який містить магнітний потік, «захоплює за собою» магнітні силові лінії і стискає магнітний потік;

3) магнітний потік оточується провідною оболонкою, яку швидко стискають за допомогою вибуху, збільшуючи щільність потоку в багато разів.

1.1 Магнітний концентратор з нерухомими стінками

Г. Бабат та М. Лозинський були першими хто вивчив і реалізував концентрацію магнітного потоку[1]. Ними була розглянута задача про

									Адж
Змн.	Адк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				13

розподіл магнітного потоку і вихревих струмів в області, що складається з провідників та ізоляторів. В дослідженні для моделювання поля і його розподілу вчені використовували електролітичну ванну. Це обумовлено тим, що напруженість магнітного поля і вектор-потенціал підпорядковуються за межами провідного середовища рівнянню Лапласа. Провідне середовище моделювалось в електролітичній ванні за допомогою ізолятора. Масштаб моделювання можна було вибрати довільний.

Бабат і Лозинський не відразу прийшли до кінцевої моделі концентратора, довгий час проводилось вдосконалення і створення ідеальної геометрії концентратора. І їх старання окупилися – подібні концентратори зі схожими параметрами і формою використовуються донині. В процесі розробки виникали деякі проблеми. Індуктор живився від високочастотного генератора, який мав робочу напругу 10 кВ, під час нагрівання виробу(матеріалу) відбувалась термоелектронна емісія між виробом і одновитковою котушкою, в результаті чого відбувався пробій. Потрібно було зменшувати напругу на виток, не програючи при цьому в ефективності. Була необхідність зменшити напругу, що діяла на виток не втрачаючи при цьому ефективність пристрою. В зв'язку з чим Бабат і Лозинський розробили концентратор зображений на рис. 1.1. Котушка, навита за допомогою прямокутної мідної труби, поміщався в круглий кожух з того ж матеріалу, який всередині мав диск з розрізом (також мідний) в якому був зроблений круглий отвір. Вихреві струми сильно нагрівали диск, тому в цілях охолодження в ньому був зроблений канал в який подавався холодоагент. Потужність, яку розсіювала котушка, була більше за 200 кВт.

Дослідження Бабата і Лозинського довели, що концентратор є неідеальним пристроєм і збільшує енергетичні втрати. Провідне тіло внесене в робочий об'єм котушки створювало вихреві струми. Останні в свою чергу зумовлювали втрати енергії на джоулеве тепло. Але конструкція концентратора дозволяла перерозподілити густину електромагнітної енергії, тим самим частково зменшивши втрати на джоулеве тепло.

						<i>Апк</i>
					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>	
<i>Змн.</i>	<i>Апк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>14</i>

внутрішній поверхні вкладиша. За рахунок цього магнітний потік створений котушкою концентрувався в отворі «вкладиша», витісняючись з його об'єму.

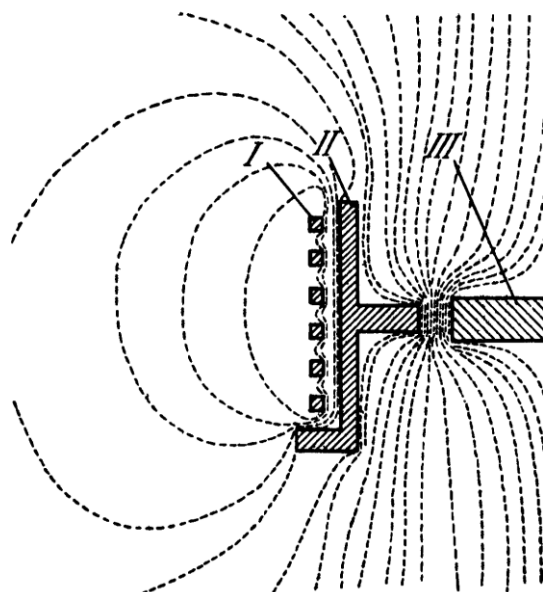


Рисунок 1.2 – Концентратор Бабата і Лозинського (конфігурація магнітного поля). I – соленоїд; II – провідний кожух; III – круглий диск.

Визначимо залежність струму в котушці та «вкладиші» від часу. Струми I_1 та I_2 повинні задовольняти рівняння (первинний ланцюг складається з котушки і конденсаторної батареї):

$$\begin{aligned} L_1 \frac{dl_1}{dt} - M \frac{dl_2}{dt} + R_1 I_1 + \frac{1}{C_0} \int I_1 dt &= 0, \\ L_2 \frac{dl_2}{dt} - M \frac{dl_1}{dt} + R_2 I_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1.1)$$

з початковими умовами $I_1 = I_2 = 0$ при $t = 0$; напруга на конденсаторі C дорівнює V_0 при $t = 0$. Де L_1 , L_2 , R_1 , R_2 - індуктивності і опори відповідно соленоїда і «вкладиша», M - коефіцієнт взаємної індукції.

Введемо змінну $\theta = \omega_0 t$, де $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, і коефіцієнти затухання

$$D_1 = R_1/\omega_0 L_1, \quad D_2 = R_2/\omega_0 L_2.$$

Система рівнянь (1.1) зводиться до одного лінійного диференційного рівняння третього порядку:

									Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				16

використовувалась без «вкладиша» і була референсом. Живила дослідну установку конденсаторна батарея ємністю 2880 мкф і з напругою 4 кВ.

Концентратор витримав низку імпульсів напруженістю 200 кЕ, в той час як звичайна котушка зруйнувалась після першого імпульсу. Це пов'язано з перерозподілом магнітного потоку в електромагнітному концентраторі. За рахунок «вкладиша» магнітний потік витісняється з об'єму котушки, тому на неї діє менша сила ніж у випадку без «вкладиша». Міцна поверхня «вкладиша» приймає на себе «удар» пондеромоторних сил і захищає обмотку соленоїда від руйнування.

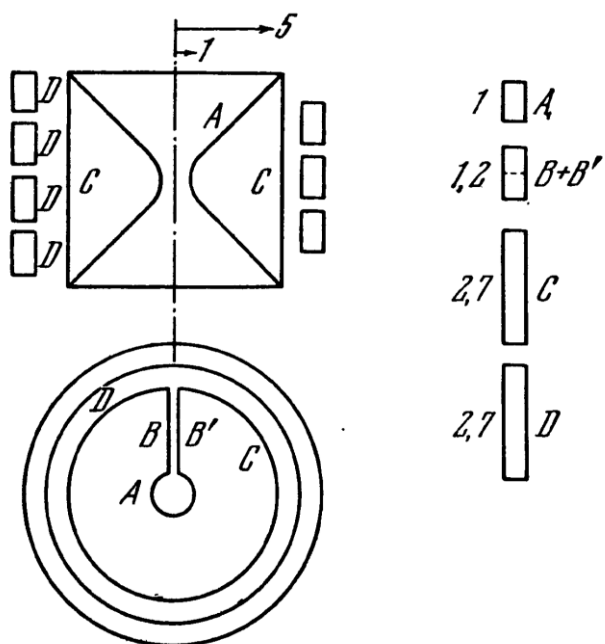


Рисунок 1.3 – Відносна величина омічних втрат в концентраторі Фонера і Хауленда. А – внутрішня поверхня концентратора; ВВ` – поздовжній розріз; С – зовнішня поверхня вкладиша; D – обмотка.

Хауленд і Фонер також досліджували концентратори і шукали ідеальну конструкцію, яка б мала мінімальні втрати і максимальну ефективність[3]. На рис. 1.3 наведено результати їх розрахунків енергетичних втрат в концентраторі з робочим об'ємом, що має форму гіперболоїда обертанья.

Видно, що основна частина втрат приходиться на зовнішню поверхню вкладиша і внутрішню поверхню соленоїда; втрати дещо менше в повздовжній щілині і зовсім малі в робочому об'ємі. Граничний випадок повинен відповідати концентратору, в якого втрати ліквідовані всюди, окрім робочого об'єму.

Така конструкція повинна бути вийняtkово міцна: наявність розсіяних полів в щілинах призводить до появи пондеромоторних сил, які намагаються збільшити ці щілини. Наприклад зовнішня поверхня концентратора і внутрішня поверхня соленоїда відштовхуються (тому Кім і Платнер були змушені забезпечити обмотку соленоїда міцною зовнішньою підтримкою).

Від розсіяних полів і джоулевих втрат на зовнішній поверхні концентратора можна здихатися, проточивши на ній глибокий паз в вигляді спіралі і помістивши в цей паз обмотку соленоїда. При укладанні обмотки в паз тіло концентратора автоматично розвантажує обмотку від дії аксіальної пондеромоторної сили.

Хауленд і Фонер виготовили концентратор із латуні з внутрішнім діаметром 12 мм і зовнішнім діаметром 15 см. На зовнішній поверхні концентратора був проточений спіральний паз із 17 витків. В процесі випробувань в паз укладались обмотки різних типів. Поверх обмотки надівався плексигласовий циліндр. Концентратор в зібраному вигляді показаний на рис. 1.4. Ширина поздовжнього розрізу рівнялась 1 мм. Використовувались обмотки трьох типів: мідна шина, одягнена в панчоку з пластику, мідна стрічка в поліхлорвінілової ізоляції і стандартний мідний дріт. Дріт укладався по п'ять жил паралельно.

Всі три різновиди обмотки чудово витримували повне навантаження при розряді батареї конденсаторів ємністю 200 мкф при напрузі 3 кВ. Обмотка із мідної стрічки при розряді батареї ємністю 134 мкф і напрузі 14 кВ виявила слабкі ознаки деформації в місці перетину з осевим розрізом в концентраторі. Розміщення обмотки в тілі концентратора настільки зменшувало радіальну

									Анк
									19
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

пондеромоторну силу, що обмотка трималась в пазах без зовнішньої підтримки, за рахунок тертя.

Напруженість магнітного поля, що генерувалась концентратором при використаних в експерименті тривалостях імпульса 230-300 мкс, мало залежала від типу обмотки.

В робочій порожнині концентратора було отримано поле напруженістю 270 кЕ. При цьому батарея конденсаторів ємністю 2000 мкф заряджалась до 2,7 кВ.

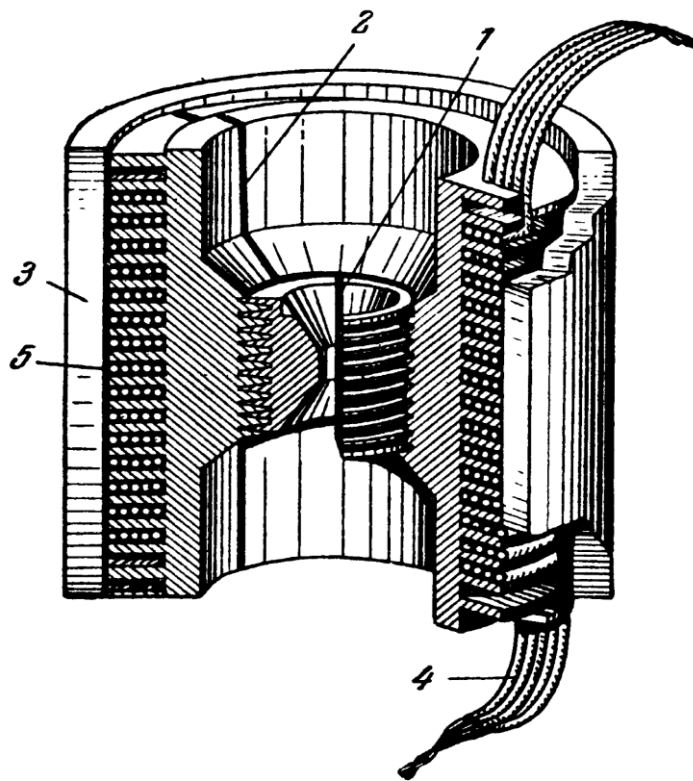


Рисунок 1.4 – Двоступеневий концентратор Фонера і Хауленда.

1 – вкладиш; 2 – розріз в концентраторі; 3 – захисний кожух; 4, 5 – обмотка.

Для збільшення напруженості магнітного поля в латунний концентратор запресовували додатково мідний циліндр із внутрішнім діаметром 2 мм. При цьому амплітуда магнітного поля зросла до 450 кЕ, але мідь не витримала механічної напруги і внутрішній діаметр циліндра збільшився.

									Арк
									20
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

При розряді на обмотку соленоїда батареї конденсаторів ємністю 134 мкф при напрузі 14 кВ латунний концентратор без мідного вкладиша руйнувався, розтріскуючись по радіусу.

Для детального вивчення дії пондеромоторних сил концентратор було зроблено «двоступеневим». В латунний концентратор вкручувався на різьбі інший, маленький концентратор, який був ізольований від першого тефлоном. Така структура дозволила дослідити серію змінних вкладишів, не чіпаючи інші вузли установки. Змінні вкладиші біли зроблені з магнію, що має такий же електричний опір, як і латунь, але більш міцного. Тому не викривлявся розподіл щільності струму, і в той же час при деформації вкладиша тіло концентратора не зазнавало змін.

Цікаві результати вийшли при підтримці не механічними, а магнітними силами. Вкладиш виготовлявся так, щоб між його зовнішньою поверхнею і концентратором залишався зазор. Магнітний потік, що проникав в зазор, збуджував направлені всередину радіальні пондеромоторні сили, що служили магнітною підтримкою. Вкладиші з магнітною підтримкою витримували більшу напруженість магнітного поля, ніж вкладиші з механічною підтримкою. Після того як експерименти з вкладишами, що мають різьбу, були закінчені, концентратор переробили. В великому латунному концентраторі проточили конусний отвір із гладкими стінками, призначений для розміщення вкладишів конусної форми, виготовлених з міді або берилієвої бронзи. Частина вкладишів пришлифовувалась безпосередньо до поверхні головного концентратора, інша частина відділялась тефлоновою прокладкою.

При відсутності прокладки і початковій напрузі на конденсаторах більше 1,5 кВ, між контактуючими поверхнями створювався дуговий розряд. Вкладиші оснащені прокладкою витримували імпульс від повністю зарядженої батареї (3 кВ, 2000 мкф). При цьому джоулеві втрати від поверхневих струмів у вкладишів із прокладкою були на 40% більше, ніж у вкладишів без прокладки. Магнітні сили вибивали вкладиш із концентратора,

									Арк
									21
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

тому використовувалась спеціальна підтримуюча обойма. Як уже було сказано, кожний концентратор має поздовжній розріз, на поверхнях якого додатково втрачається енергія. Щоб зменшити втрати, форму розрізу модифікували, надавши їй ступінчасту форму. В цьому разі концентратор виготовлявся у вигляді двох половин, торці яких мають рифлену поверхню. Потім їх стикували і між ними поміщали ізоляційну прокладку.

Останню серію експериментів Фонер і Хауленд провели з латунним вкладишем з внутрішнім діаметром 25 мм, впаяним в концентратор. Максимальна напруженість магнітного поля, отримувана в ньому, була 120 кЕ при тривалості півперіоду імпульсу 300 мкс і початковій напрузі батареї конденсаторів 3 кВ ємності 2000 мкф.

На рис. 1.5 зображено аксіальний розподіл поля, який вдалось отримати в ході дослідження. Концентратор електромагнітної енергії з нерухомими стінками є дуже гнучким приладом. Завдяки можливості змінювати вкладиші і обмотку соленоїда можна швидко міняти параметри поля, наприклад його геометрію.

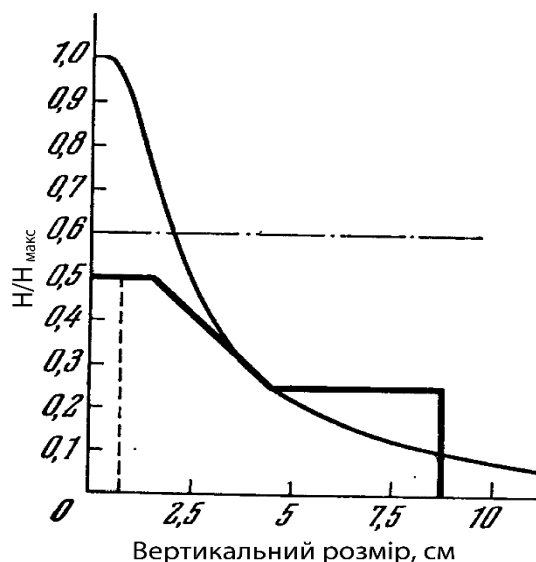


Рисунок 1.5 – Аксіальний розподіл магнітного поля в концентраторі Фонера і Хауленда.

Також можна регулювати тривалість імпульса, яка залежить від того скільки витків у первинній обмотці. На первинній обмотці втрачається багато енергії, тому для зменшення цих втрат її охолоджують.

Товстою лінією позначений силует двоступеневого концентратора, тонкою лінією – напруженість магнітного поля. Пунктиром позначено отвір в тілі концентратора.

1.2 Гідромагніт

Концентрувати магнітний потік можна не лише з допомогою металевих концентраторів, а й за допомогою рідини-провідника. Першим хто висунув цю ідею і розробив власний прилад був [4]. Гідромагніт, як його назвав Колм, мав дуже просту конструкцію – дві коаксіальні трубки між якими в радіальному напрямку текла рідина-провідник. (рис. 1.6). Аксіальне поле створювалось обмоткою збудження.

Силові лінії поля перетинають потік рідини. Під дією ЕРС індукції в рідині виникає струм, що створює додаткове магнітне поле співнаправлене з полем збудження, тобто поле створюване в рідині підсилює поле збудження. Звідси напруженість загального поля яке виникає в приладі залежатиме від величини поля збудження, а також від провідності рідини і її швидкості руху. Теоретична інформація щодо гідромагніту детально описана в [5]. Припустимо для простоти, що гідромагніт складається з безмежно довгих труб, рідина нестислива і позбавлена в'язкості і що тече вона лише в радіальному напрямі.

В циліндричній системі координат вісь z якої співпадає з віссю гідромагніта, осева і азимутальна складові швидкості рідини рівні нулю, і у встановленому режимі рух рідини описується рівняннями:

$$\frac{dv}{dr} = v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho} [jB]_r, \quad (1.6)$$

					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адж.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		23

$$v \frac{\partial v}{\partial r} = - \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{B^2}{2\mu} \right), \quad (1.10)$$

$$- \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(p + \frac{B^2}{2\mu} \right) = 0. \quad (1.11)$$

Із (1.11) випливає, що $\left(p + \frac{B^2}{2\mu} \right)$ не залежить від φ . Через неперервність потоку і радіальну направленість його руху вираз для v повинен мати вигляд:

$$v = \frac{f(\varphi)}{r}. \quad (1.12)$$

Підставивши (1.12) в (1.10), маємо:

$$\frac{f^2(\varphi)}{r^3} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{B^2}{2\mu} \right). \quad (1.13)$$

Так як згідно (1.11) перша частина (1.13) не залежить від φ , то $f(\varphi)$ може бути тільки константою. Тому (1.13) можна проінтегрувати:

$$\frac{\rho f^2}{2r^2} + p + \frac{B^2}{2\mu} = K, \quad (1.14)$$

де K – деяка стала.

Застосовуючи операцію *rot* до рівнянь (1.9) та (1.13):

$$rot[vB] + \frac{1}{\mu\sigma} \Delta B = 0, \quad (1.15)$$

записуючи (1.15) в циліндричних координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rvB) + \frac{1}{\mu\sigma} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 B}{\partial \varphi^2} \right] = 0, \quad (1.16)$$

і приймаючи до уваги, що B не залежить від φ , знаходимо рішення:

$$B = A_1 + \frac{A_2}{r^{\mu\sigma}}, \quad (1.17)$$

де A_1 і A_2 - сталі інтегрування.

де A_1 і A_2 - сталі інтегрування.

						Анк
					БР. 6.050802.051.009 ПЗ	25
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Визначимо ці сталі з крайніх та початкових умов. Нехай при $t = 0$ поле збудження дорівнює B_0 всередині гідромагніта ($r < r_1$) і рівне нулю при $r > r_1$. Тоді:

$$B = A_2 \left(\frac{1}{r^{Rm}} - \frac{1}{r_1^{Rm}} \right), \quad (1.18)$$

де

$$Rm = \mu \sigma f. \quad (1.19)$$

Щоб знайти A_2 , використаємо умову збереження магнітного потоку. В результаті отримуємо:

$$B = B_0 \frac{r_1^2 (2 - Rm)(r_1^{Rm} - r^{Rm})}{Rm(r_1^{2-Rm} - r_2^{2-Rm})r_1^{Rm} r^{Rm}}. \quad (1.20)$$

Відношення (1.20) характеризує радіальний розподіл магнітної індукції всередині гідромагніта. Видно, що індукція в гідромагніті сильно залежить від величини $Rm = \mu \sigma r$, яка називається магнітним числом Рейнольдса. Підсилення магнітної індукції B/B_0 в гідромагніті при різних значеннях Rm і $\alpha = r_1/r_2$ приведено на рис. 1.7.

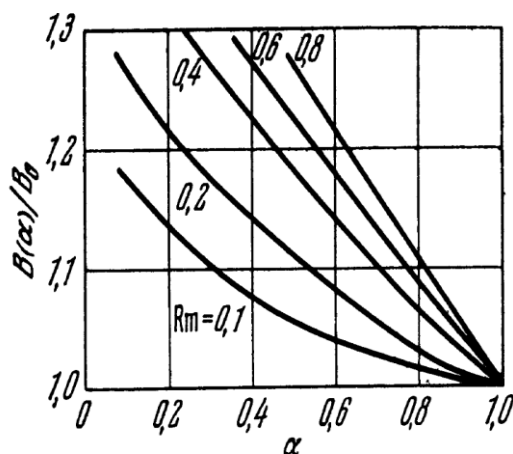


Рисунок 1.7 – Підсилення електромагнітної індукції в гідромагніті.

Важливе значення має величина енергетичних втрат в гідромагніті. Вирахуємо їх, приймаючи до уваги кінцеву в'язкість рідини. Втрати енергії в гідромагніті за одиницю часу на одиницю довжини уздовж осі рівні:

						Анк
Змн.	Адк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ	26

так як в силу екіпотенціальності стінок сектору $\int jE dV = 0$. Як і передбачалось, втрати в гідромагніті складаються з втрат на джоулеве тепло (перший член в (1.24)) і втрат на в'язке тертя.

Розрахунок (1.24) приводить до наступного виразу для потужності втрат на одиницю довжини гідромагніта (Вт/хв):

$$W = \frac{\pi}{r_2^2} \mu v^2 \operatorname{Re}^2 \left(\frac{1}{\alpha^2} - 1 \right) (0,616 + 0,679 \operatorname{Re}) + 0,644 \pi \frac{Rm}{\mu^2 \sigma} \left[1 - \left(\frac{B_0}{B} \right)^2 \right] B^2. \quad (1.25)$$

В роботі [4] теж були досліджені можливі нестійкості в гідромагніті. Для великих значень Rm критерій стійкості:

$$\frac{v}{B/\sqrt{\mu\rho}} < \left(\frac{2}{\pi} \right)^2. \quad (1.26)$$

Параметри гідромагніта з питомим опором рідини $1.1 \cdot 10^{-5}$ ом·см (натрій при 150°C), внутрішнім діаметром 2,5 см, зовнішнім діаметром 30 см і довжиною 7,5 см приведені в таблиці 1.

B_0 ,	10	10	100	100	60
$Q, \text{ м}^3/\text{хв}$	2	20	2	20	12
$V, \text{ В}$	0,44	4,4	4,4	44	15,8
$I, \text{ кА}$	0,12	1,2	1,2	12	4,3
$W, \text{ МВт}$	0,053	5,3	5,3	530	69
$p, \text{ кг/м}^2$	12	120	120	120	4000
$B, \text{ кгс}$	12,4	124	124	1240	450

Таблиця 1.1 – Параметри гідромагніта. B – індукція в робочому об'ємі, B_0 – індукція збудження, Q – швидкість потоку рідини, V – напруга, що створюється, I – повний струм, W – потужність втрат, p – тиск рідини на вході.

Експериментальну перевірку теорії [5] провів Колм, який виготовив і випробував невелику модель гідромагніта. Джерелом поля збудження в

експериментах Колма служив біттерівський соленоїд з діаметром внутрішнього отвору 10 см і максимальною напруженістю магнітного поля 70 кЕ. Велика величина поля збудження дозволила отримати значне індуковане магнітне поле простими засобами.

Структура приладу показана на рис. 1.9. Гідромагніт виготовлений із немагнітної сталі і складається з двох конусних коаксіальних труб 1 та 2, з великою кількістю отворів 8 і скріплених радіальними стінками, які розділяють робочу камеру на 6 відсіків. Знизу і зверху на камеру надягнені сталеві кришки 3. Внутрішній діаметр пристрою 2,5 см, зовнішній діаметр 6,5 см, довжина 2,5 см. Робоча камера змонтована в центрі сталеві труби 4 з внутрішнім діаметром 7,5 см, зовнішнім діаметром 10 см і довжиною 210 см.

Труба розміщена в соленоїді так, що гідромагніт знаходиться в області максимального магнітного поля.

Газоподібний азот під високим тиском надходить із балонів в центральну трубу 5 знизу і витискує рідину 6 (сплав натрій-калій) з нижнього резервуару по кільцевому периферійному каналу 7 вгору. Рідина протікає через отвори 8 у зовнішній стінці гідромагніта, надходить в робочу камеру і через отвори 9 у внутрішній стінці виходить в центральну трубу 10; після чого направляється у верхній резервуар 11. Після того як основна маса рідини опиняється зверху, азотні балони вимикаються і обидві камери з'єднуються з атмосферою. Тиск вирівнюється, і рідина через спеціальний невеликий отвір перетікає назад в нижню камеру. Потім цикл повторюється.

Гідромагніт працював в імпульсному режимі при тривалості імпульса близько 0.5 с. Індуковане магнітне поле вимірювалось пробною котушкою, що знаходилась в центрі гідромагніта. Отримана напруженість індукованого магнітного поля (1.9 кЕ) була близькою до вирахованої теоретично (2.1 кЕ). Невелика розбіжність обумовлена тим, що тиск в системі гідромагніта був менше за вимірний манометром на балонах з азотом.

									Анк
									29
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

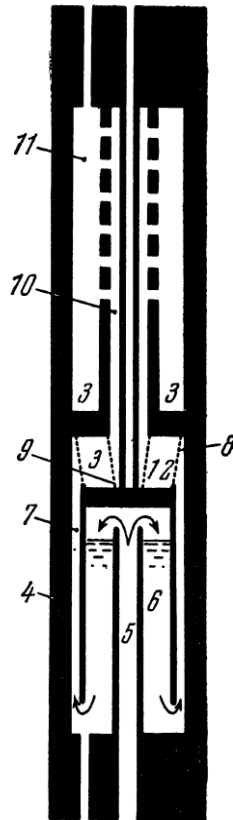


Рисунок 1.9 – Гідромагніт Колма.

1.3 Концентратор заснований на методі вибуху

Ідея підсилення напруженості магнітного поля за рахунок енергії, що виділяється під час вибуху, була вперше висунута Я. П. Терлецьким [6]. Він вирішив задачу про затухання струмів, індукованих в провідній сфері, і з'ясував, що затухання відбувається експоненціально з часом релаксації

$$\tau = \frac{4\pi}{c^2} \alpha R^2 \sigma, \quad (1.27)$$

де R – радіус сфери, σ – питома електропровідність сфери, і α – фактор форми, що має порядок одиниці. Для мідної сфери діаметром 10 см, час релаксації розрахований по формулі (1.27) перевищує 1 с.

Якщо застосувати до сфери всестороннє стиснення за час, що набагато менше часу релаксації, то вона буде вести себе як тіло з безкінечною провідністю. Якщо до початку стиснення сферу пронизував магнітний потік

закривалась. При подальшому стисненні магнітний потік «заморожувався» всередині циліндру.

Напруженість досягненого магнітного поля вимірювалась пробними котушками і осцилографувалась. Як правило, одна із пробних котушок розміщувалась всередині металевого циліндра, а друга – за його межами. Початковий магнітний потік контролювався величиною розрядного струму конденсаторної батареї; в якості датчика струму застосовували пробну котушку тороїдальної форми (пояс Роговського). Процес вибуху і стиснення провідної оболонки фіксувався на плівці за допомогою високошвидкісної камери. Схема експерименту показана на рис. 1.10. Деталі установки, обведені на схемі пунктирною лінією, знищувались вибухом. Для синхронізації первинного імпульсного магнітного поля, камери і детонації використовувалась спеціальна тригерна схема.

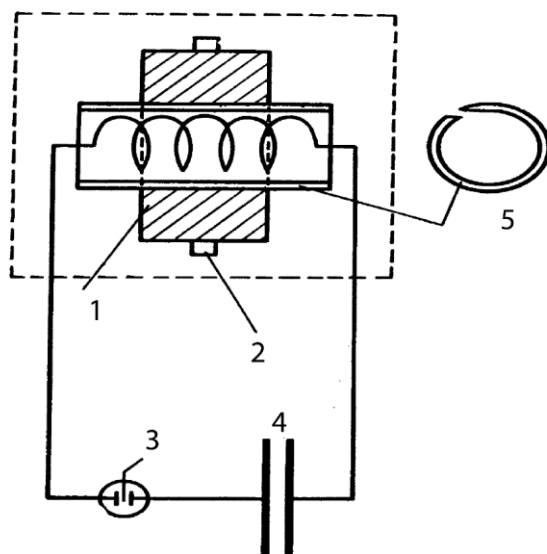


Рисунок 1.10 – Схема дослідження методу вибуху. 1 – кільце вибухівки; 2 – детонатор; 3 – тригер; 4 – батарея конденсаторів; 5 – «пастка».

В дослідженні, в залежності від індуктивного навантаження, використовувались дві батареї конденсаторів з однаковою робочою напругою 20 кВ. Перша батарея ємністю 435 мкФ була призначена для розряду на індуктивності близько декількох сотень мікрогенрі. Інша батарея ємністю

					БР. 6.050802.051.009 ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ доквм.	Підпис	Дата		32

ізолювалась. Діаметр датчика в повністю зібраному вигляді був в межах 7,5 – 10 мм. Кожен датчик калібрувався відомим магнітним полем, і експериментально отримана його стала порівнювалась з вирахованою.

1.4 Висновки

Аналіз науково-технічної літератури дозволяє зробити висновок, що концентратори електромагнітної енергії недостатньо вивчені і описані, не вистачає чіткої класифікації, особливо в просторі СНД.

При аналізі літератури було визначено три базові види концентраторів, на принципах роботи яких будуються всі сучасні інтерпритації. Описана історія створення, принцип роботи та конструкція електромагнітних концентраторів.

					БР. 6.050802.051.009 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

2 РОЗГЛЯД СУЧАСНИХ КОМПЛЕКСНИХ ПРИСТРОЇВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕНТРАТОРА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ

Концентратори електромагнітної енергії (концентратори потоку) використовуються в багатьох галузях промисловості. Сам по собі концентратор не є самодостатнім пристроєм, тому використовується в комплексних системах і пристроях для підсилення і локалізації магнітного потоку створеного індуктором пристрою або зовнішніми магнітними полями. Далі буде розглянуто декілька прикладів використання концентратора в комплексних приладах.

2.1 Пристрій герметизації керамічного модуля з концентратором і спосіб його використання

Пристрій індукційного нагріву для герметизації модуля містить по суті повітронепроникну камеру, яка складається з кераміки або іншого високотемпературного ізолюючого матеріалу, в який поміщені ковпачок і керамічна підкладка, до якої приєднана мікросхема. Ущільнювальна стрічка з припою або іншого матеріалу для пайки розміщується на краях ковпачка, де з'єднується з кінцевою підкладкою кришки. Радіочастотна котушка (РЧ-катушка), яка служить індуктором в пристрої, живиться високочастотним генератором, що генерує електромагнітне поле в радіочастотному спектрі. РЧ-катушка орієнтована на локалізацію індукованого струму на периферії ковпачка і ущільнювальної стрічки. РЧ-катушка являє собою одновиткову катушку, виготовлену з мідного кільцевого концентратора, припаяного на катушку з мідної трубки. Концентратор необхідний для точного розподілу енергії на краях ковпачка для рівномірного нагріву ущільнювальної стрічки, щоб контролювати потік припою і забезпечити його рівномірний розподіл. Без концентратора електромагнітне магнітне поле було б розсіяним,

						<i>Арк</i>
					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>36</i>

створюючи велику ймовірність впливу приладу на мікросхему і підкладку. Індукований струм розсіюється у вигляді тепла, поки стрічка ущільнювача не розплавиться. РЧ-потужність потім відключається. Камера знаходиться під тиском, щоб запобігти порушенню цілісності ущільнювальної стрічки нагрітим повітрям під кришкою, яке виходить через ущільнювальну стрічку, поки вона знаходиться в розплавленому стані. Після того як ущільнювальна стрічка охолоне в достатній мірі для затвердіння, тиск знижується і закінчений модуль видаляється з камери. Весь процес герметизації вимагає від десяти до п'ятнадцяти секунд на складання модуля.

2.1.1 Передумови створення пристрою

Даний винахід застосовується для герметизації напівпровідникових мікросхем на керамічних модулях із захисним ковпачком. Більш конкретно, він відноситься до способу герметизації керамічної підкладки з використанням пристрою за допомогою використання радіочастотного індукційного нагрівання.

При виготовленні сучасного комп'ютера одна або кілька напівпровідникових мікросхем, що забезпечують основні логічні схеми і схеми пам'яті для комп'ютера, електрично пов'язані з керамічної підкладкою. Керамічна підкладка, в свою чергу, електрично з'єднана з друкованою платою або декількома друкованими платами в комп'ютері.

Перед установкою керамічної підкладки на друковану плату її герметизують, покриваючи напівпровідникові мікросхеми на підкладці захисним ковпачком, який зазвичай складається з металевого матеріалу, який прикріплений до країв керамічної підкладки. Зібрана комбінація керамічної підкладки і металевого ковпачка являє собою модуль. Зазвичай використовують інший спосіб герметизації, процес якого є складним і затратним, а також потребує значної кількості часу і уваги оператора. Щоб прикріпити металевий ковпачок до керамічної підкладки на краї підкладки

									Анк
									37
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

наносили металеву ущільнювальну стрічку, зазвичай з припою на основі олова, срібного припою або іншого подібного припою.

Стрічковий ущільнювач сплющувався шляхом розміщення керамічного вантажу на ущільнювач і відбувалось комбінування матеріалу і вантажу за допомогою печі з тонким регулюванням. Потім, після зняття керамічної маси, в ковпачок подавалась термопаста. Після чого кріпильний інструмент поміщав металевий ковпачок на підкладку. Термопаста діяла як теплової міст між напівпровідниковими кристалами на підкладці і на ковпачку, що сприяло розсіюванню тепла через останній. Навколо ковпачка та підкладки встановлювалось кріпильне пристосування для додавання необхідного тиску для операції склеювання. Комбінація підкладка-ковпачок-кріпильне пристосування згодом проходить через іншу тонко керовану конвеєрну піч з інертною атмосферою. У даному способі операція склеювання є досить повільною, так як і вузол модуля, і кріпильний пристрій повинні бути нагріті до температури плавлення за допомогою конвективного нагріву. Після того, як модуль зібраний, над ним проводять серію електричних і фізичних випробувань, щоб визначити, чи всі компоненти були зібрані правильно. Якщо модуль не проходить тестування, він розбирається, проходячи через конвеєрну піч, і ті частини, які є повністю робочими, знімаються і використовуються при виробництві інших модулів.

Застарілий процес герметизації, описаний вище, є тривалим, дорогим і вимагає значного простору на підлозі в лінії виготовлення напівпровідників. Наприклад, одна конвеєрна піч має розміри 8 метрів в довжину, 1 метр в ширину, і висоту 2 метри. Комбіновані процеси вирівнювання ущільнювальної стрічки і з'єднання модулів в такій печі вимагають в середньому 40 хвилин для кожного модуля. Печі постійно працюють і безперервно продуваються азотом або іншим інертним газом; Згодом висока потужність, і використання газу для продування зумовлюють значні експлуатаційні витрати. Крім того, до вартості способу герметизації додано

										Анк
										38
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ					

вартість безлічі кріпильних пристосувань. Кріпильні пристосування виготовляються окремо для кожного типу модуля.

На додаток до проблем вартості, пов'язаних з застарілим процесом, при нагріванні всієї збірки модуля існує потенційна виробнича проблема: паяні з'єднання, які утримують напівпровідникові кристали на керамічній підкладці, можуть досягнути досить високої температури і поплавитись. «Термічна втома» є особливою проблемою, якщо модуль переробляється декілька разів.

Мета створення даного пристрою:

- скорочення часу обробки і витрат на операцію герметизації;
- усунення необхідності в конвеєрній печі в процесі герметизації;
- усунення необхідності в спеціальних кріпильних пристроях покращеному способі герметизації;
- зниження споживання енергії і використання продувального газу для операції герметизації;
- зменшення площі, яку займає пристрій герметизації.

Всі ці цілі досягаються за допомогою пристрою і вдосконаленого способу герметизації модуля індукційним нагріванням. Пристрій має повітронепроникну камеру, в яку поміщені керамічна підкладка і кришка. РЧ-котушка, яка є індуктором в пристрої, орієнтована таким чином, що РЧ-струм, індукований в ковпачку, локалізується на краю ковпачка і в області ущільнювальної стрічки. До камери під'єднаний впускний канал для газу, який компенсує збільшення тиску від нагрітого повітря під кришкою, і цим зберігає цілісність розплавленої ущільнювальної стрічки.

У кращому варіанті застосування герметизуючий пристрій складається з двох основних вузлів. Верхній вузол включає в себе РЧ-котушку для забезпечення ефекту індукційного нагріву. Нижній вузол містить ізоляційне гніздо, яке складається з керамічного або іншого високотемпературного ізолятора, в якому розміщені керамічна підкладка і кришка. Ізоляційне гніздо

									Апк
Змн.	Апк.	№ док.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				39

спирається на каретку для підйому інструменту, яка піднімає і опускає весь нижній вузол для контакту з верхнім вузлом і від'єднання від нього. Компоненти верхнього вузла встановлені на жорсткій рамі. На додаток до радіочастотної котушки верхній вузол містить камерну пластину, керамічну верхню притискну пластину і ізолюючу пластину. Коли нижній вузол піднімається в закрите положення і контактує з верхнім вузлом, керамічне гніздо з'єднується з камерною пластиною і керамічною верхньою притискною пластиною, утворюючи невелику камеру, в якій відбувається процес склеювання. Керамічна верхня притискна пластина контактує з кришкою і забезпечує тиск, необхідний для забезпечення надійного зв'язку з підкладкою. Після цього припаяна стрічка розплавляється радіочастотним струмом, індукованим в кришку і ущільнювальну смугу радіочастотною котушкою.

2.1.2 Опис найкращого способу застосування пристрою

Індукційне нагрівання – це метод підвищення температури електропровідного матеріалу. На підставі відкриттів Майкла Фарадея, температуру провідного матеріалу можна підвищити, піддаючи його впливу змінного електромагнітного поля. Електричні струми, індуковані в провідному матеріалі, розсіюють енергію в формі тепла. Заповнена водою котушка або індуктор діє як первинна обмотка трансформатора і оточує матеріал, що нагрівається, який діє як вторинна обмотка. Змінні струми, що протікають в первинній котушці викликають вихрові струми в провідному матеріалі, викликаючи його нагрівання. Глибина, до якої вихрові струми проникають в провідний матеріал, залежить від складної залежності між частотою змінного струму в індукторі, розмірами заготовки та магнітною проникністю і питомим опором провідного матеріалу.

Для процесу герметизації найбільш придатним є змінне електромагнітне поле в радіочастотному спектрі від 50 кГц до 10 МГц. У такій системі

					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		40

індукційного нагрівання в якості індуктора використовується РЧ-котушка для отримання дуже малих глибин вихрових струмів (0,1 мм) локалізованого нагрівання з високими швидкостями. Як правило, чим вище частота РЧ, тим менше вихровий струм і тим більш локалізований ефект нагрівання.

Надалі посилаємось на рис. 2.1, де представлений вигляд у перспективі завершеної збірки модуля. Напівпровідникові мікросхеми 11 електрично з'єднані з верхньою частиною керамічної підкладки 13 за допомогою невеликих шарів припою. Кульки припою прикріплені до контактних майданчиків як на мікросхемах 11, так і на підкладці 13. Захисний ковпачок 15 приєднаний до країв верхньої частини підкладки 13 за допомогою ущільнювальної смуги 17. Керамічна підкладка 13 має металізовану поверхню на верхній стороні, що має форму ущільнювальної стрічки 17 для забезпечення хорошого зв'язку. Ущільнювальна стрічка 17 зазвичай складається з свинцево-олов'яного або срібного припою, але може бути виготовлена з будь-якого матеріалу, сумісного з вузлом модуля. Підкладка 13 і ковпачок 15, зображені на рис.1 в розмірі 50×50 мм, однак винахід може легко адаптуватися до інших розмірів модуля. Термопаста забезпечує тепловий зв'язок між напівпровідниковими мікросхемами 11 і ковпачком 15. На нижній частині керамічної підкладки 13 закріплено більше сотні з'єднувальних штифтів 19, які забезпечують електричний контакт між підкладкою 13 та друкованою платою.

В теорії винахід можна використати також з неметалевим ковпачком. В такому випадку струм індукується тільки в ущільнювальну смугу 17. Але на практиці використовують слабше поле, і покладаються на індукційний ефект в металевих краях ковпачка. Тепло яке виділяється на краях ковпачка 15 буде передаватися ущільнювальній стрічці доки вона не розплавиться. Перевагою металевого ковпачка є його захисна дія на мікросхеми підкладки від РЧ-поля.

При використанні металевого ковпачка для ущільнювальної стрічки 17 використовується термопластичний пластиковий сплав на основі епоксидного або інший полімеру. Тепло, яке генерується в кришці 15, може

									Анк
									41
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

передаватися до полімерної стрічки 17, поки вона не досягне своєї температури плавлення, незважаючи на те, що в самій стрічці 17 струм не індукується. Використання полімерного матеріалу для ущільнювальної стрічки має перевагу у вигляді низької температури плавлення, тим самим додатково знижуючи ймовірність впливу на паяні з'єднання між підкладкою 13 і мікросхемами 11.

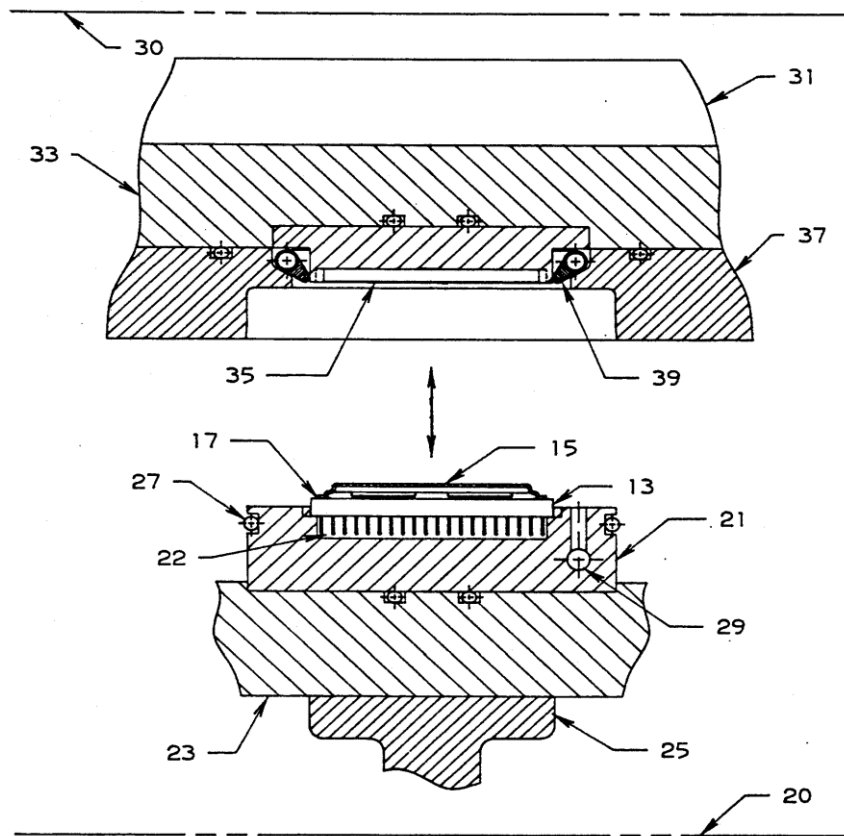


Рисунок 2.2 – Вигляд в поперечному розрізі пристрою РЧ-герметизації у відкритому положенні.

На рис. 2.2 показаний вид поперечного перерізу пристрою РЧ-герметизації у відкритому положенні. Однією з основних переваг пристрою є його компактність. Він має розміри приблизно 1 метр в ширину, 0.8 метра в довжину і 3 метри в висоту, включаючи генератор, який не показаний на малюнку. Пристрій замінює три конвеєрні печі, які потребують близько 152 квадратних метрів площі приміщення, що дуже сильно економить площу

									Анк
									42
Змн.	Адж.	№ док.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

напівпровідникової лінії. Керамічна підкладка 13 і ковпачок 15 розташовані в керамічному гнізді 21, яке знімається з нижнього вузла 20. Ущільнювальне кільце 27 допомагає ущільнювати камеру, коли пристрій РЧ-герметизації знаходиться в закритому положенні, і впускний канал газу 29, який постачає суміш газів під тиском до камери під час процесу скріплення також знаходиться в нижньому вузлі 20.

Верхній вузол 30 пристрою закріплюється міцною рамою 31, на якій також встановлені інші компоненти. Ізоляційна пластина 33 прикріплена безпосередньо до нижньої частини рами 31. До нижньої частини ізоляційної пластини 33 прикріплена керамічна верхня притискна пластина 35 і камерна пластина 37. У верхньому вузлі знаходиться РЧ-котушка 39, яка індукує РЧ-струм в краї ковпачка 15, розташованого над ущільнювальною стрічкою 17. Верхня притискна пластина 35 розташована над ковпачком 15. Для різних розмірів і типів підкладки 13 та ковпачка 15, роблять відповідні ізоляційне гніздо 21 і верхню притискну пластину 35. Іноді міняють і котушку 39, щоб бути впевненим, що енергія буде зосереджена навколо ущільнювальної стрічки 17. Гніздо 21, верхня притискна пластина 35 і камерна пластина 37 не обов'язково складаються з керамічного матеріалу, але вони повинні бути виготовлені з ізоляційного матеріалу, щоб уникнути зчеплення з РЧ-котушкою 39. Ізолятор з якого складаються камерна пластина 37, верхня притискна пластина 35 і гніздо 21 повинні витримувати температури 200 - 300 °С, в залежності від температури плавлення стрічки 17. Ізоляційна пластина 33 не повинна відповідати цим умовам, тому може бути виготовлена зі звичайного пластику.

На рис. 2.3 зображено поперечний переріз пристрою герметизації в закритому положенні. Камерна пластина 37, керамічне гніздо 21, верхня притискна пластина 35 і камерна пластина 37 з'єднуються разом, утворюючи закритий об'єм в якому відбувається процес герметизації. Ущільнювальне кільце 27 допомагає герметизувати камеру. При підйомі нижнього вузла 20 верхня металевий ковпачок 15 притискається притискною пластиною 35.

					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>	<i>АПК</i>
<i>Змн.</i>	<i>АПК</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		43

Завдяки цьому зникає необхідність в великій кількості додаткових кріплень. Сила притискання залежить від розміру кришки і приблизно лежить в межах від трьох до сорока кілограмів.

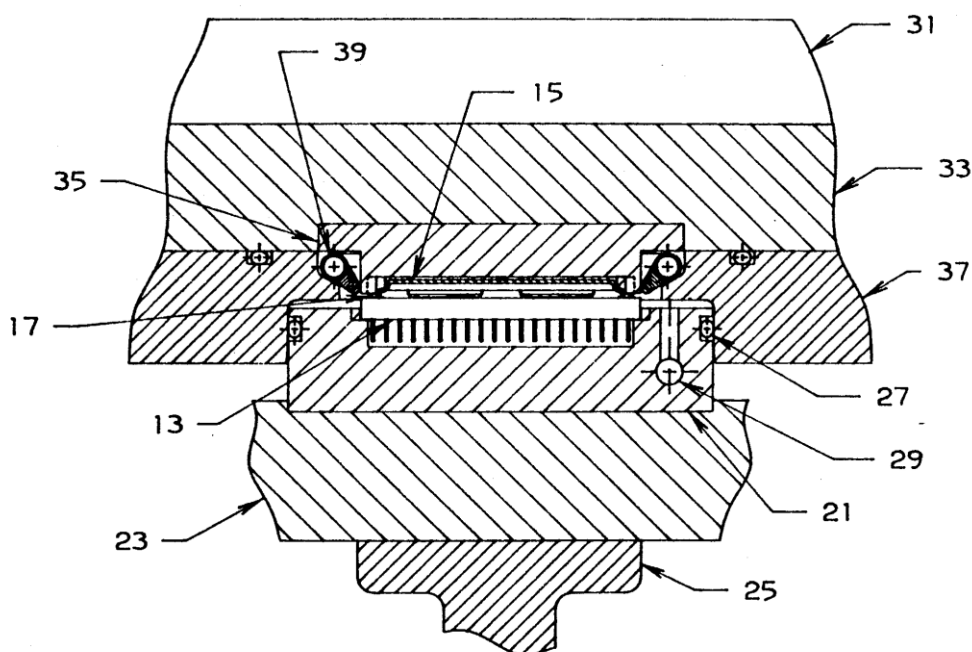


Рисунок 2.3 – Вигляд в поперечному розрізі пристрою РЧ-герметизації у закритому положенні.

Після підйому нижнього вузла 20 в закритий стан, високочастотний струм від генератора подається на РЧ-котушку 39. У оптимальному варіанті здійснення пристрій працює на частоті від 400 кГц до 600 кГц, з напругою більше 2000 вольт і потужністю 2,5 кіловата. Ковпачок 15 виготовляється зі сплаву з низьким коефіцієнтом розширення. Найкращим варіантом є Інвар (63,7% заліза, 36% нікелю, 0,3% молібдену). Всередині і зовні він покритий шаром міді. Кришки 50×50 мм разом з мідною оболонкою має товщину 0,65 мм. Ущільнювальна стрічка 17 складається з припою свинця з оловом (60/40), який має температуру плавлення 195 ° С і товщину 152 мкм. Сила затискання в такому випадку має бути близько 15-22 кілограмів. Завдяки індукваному струму ущільнювальна стрічка 17 плавиться протягом

декількох секунд, в основному завдяки енергії, що генерується в металевому ковпачку 15. Ущільнювальна стрічка 17 з'єднується з підкладкою 13 і металевими краями ковпачка 15. Необхідно розуміти, що вибір матерів для ковпачка і ущільнювальної стрічки, їх розміри і конфігурація котушки 39 та концентратора 43 можуть сильно змінити вибір вказаних вище параметрів.

Повітря, що знаходиться під поверхнею 15 ковпачка нагрівається, і прагне до розширення. Єдиним виходом для нагрітого повітря є розплавлена ущільнювальна стрічка 17. Вихід повітря може створити отвори в ущільнювальній стрічці, які ж неприйнятними через контакт навколишнього середовища з кристалами 11. Для запобігання створенню отворів здійснюють продування робочого об'єму інертним газом під тиском від 0,4 до 0,55 атмосфер. Газ запускають через впускний отвір 29. Газ вирівнює тиск з обох сторін стрічки доки вона не застигне. В даному пристрої застосовується газ, який не контактує зі стрічкою 17, мікросхемами 11 і підкладкою 13 (аргон, азот). Газ можна вводити після розплавлення стрічки 17, але до того як гаряче повітря встигне створити будь які отвори. В такому випадку газ не повинен бути інертним, бо він не буде контактувати з мікросхемою 11 і підкладкою 13. Стрічка охолоджується до затвердіння декілька секунд, після чого подачу газу припиняють.

Після припинення подачі газу, нижній вузол опускають і готовий модуль видаляється з пристрою для герметизації. Швидкість роботи пристрою, а отже і пропускна здатність залежить від безлічі факторів, починаючи з розмірів всіх елементів, закінчуючи потужністю струму РЧ-котушки. Але приблизно можна оцінити час збірки одного модуля. При виконанні герметизації описаним вище методом час збірки одного модуля буде приблизно дорівнювати від 10 до 20 секунд, що очевидно набагато швидше ніж при способі який використовувався раніше і потребував від 20 хвилин і більше.

На рис. 2.4 показаний вигляд в перспективі РЧ-котушки 39. РЧ-котушка 39, являє собою одновиткову котушку, виготовлену з мідного кільцевого

									Анк
									45
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

концентратора 43, припаяного на котушку з мідної трубки 44. Також можна використати багатовиткову котушку з концентратором, яка матиме невелику перевагу. В випадку з багатовитковою котушкою відпаде необхідність в узгоджувальному трансформаторі. В пристрої використана саме одновиткова котушка через простоту в монтуванні в пристрій. Котушка 39 з'єднана з вихідними клемми генератора за допомогою накидних гайок 41.

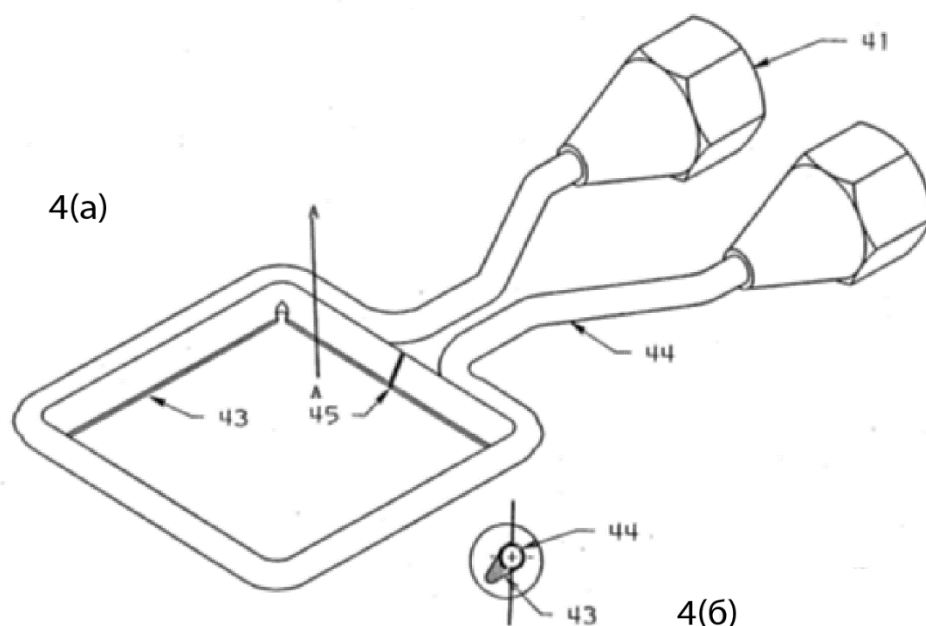


Рисунок 2.4

- а - вигляд у перспективі РЧ-котушки в пристрої для герметизації;
 б - вигляд в поперечному розрізі РЧ-котушки в пристрої для герметизації.

Трубки 44 котушки зроблені пустотілими, для протікання води чи іншого охолоджуючого засобу. Вода захищає котушку 39 від перегріву. Концентратор 43 фокусує енергію на краю ковпачка 15 і ущільнювальній стрічці 17. Концентратор 43 необхідний для точного розподілу енергії на краях ковпачка 15 для рівномірного нагріву ущільнювальної стрічки 17, щоб

					БР. 6.050802.051.009 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

контролювати потік припою і забезпечити його рівномірний розподіл. Без концентратора 43 електромагнітне магнітне поле було б розсіяним, створюючи велику ймовірність впливу приладу на мікросхему 11 і підкладку 13. Концентратор 43 має пропил 45, щоб уникнути короткого замикання приладу.

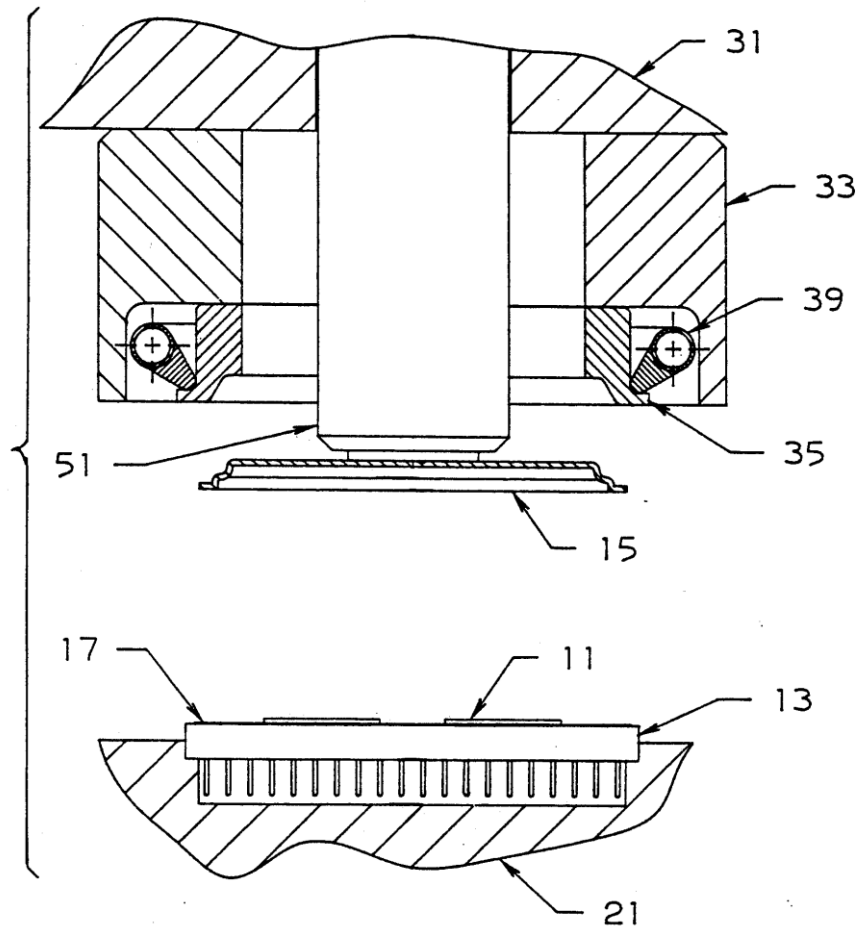


Рисунок 2.5 – Вигляд у поперечному розрізі модифікованої версії пристрою герметизації, який використовується для розбирання завершеного модуля.

На рис. 2.5 показаний модифікований прилад для герметизації, який використовується для розбирання закінченого модуля, якщо він не проходить випробування. Більша частина приладу не змінюється і залишається такою ж, як показано на рис.2 і 3, за винятком того, що камерна пластина 37 і кільце

ущільнювача 27 більше не потрібні. Керамічна притискна пластина 35 також не потрібна для забезпечення тиску на ковпачок 15 і модифікована так, щоб приймати утримувач 41, який утримує ковпачок 15 після того як ущільнювальна стрічка 17 розплавлена котушкою 39.

Робота модифікованого приладу, показаного на рис. 2.5 аналогічна описаній вище на рис. 2.2 і 2.3. Проте в цьому випадку готова збірка модуля поміщається в керамічне гніздо 21, а не в підкладку, яка використовувалася вище. Нижній вузол 20 піднімається до тих пір, поки кришка 15 не стикнеться з тримачем 51 і притискною пластиною 35. У цьому варіанті притискна пластина 35 в основному виконує функцію позиціонування ущільнювальної стрічки 17 щодо котушки 39. ВЧ-котушка 39 плавить ущільнювальну стрічку 17, а тримач 51 запобігає опусканню ковпачка 15 з підкладкою 13, і виконує відділення модуля в зборі. Після того, як підкладка 13 видалена, тримач 51 опускають, щоб полегшити зняття ковпачка 15.

Хоча пристрій описано у відношенні конкретного варіанта застосування, а саме герметизації, очевидно що пристрій може використовуватись і для інших цілей з незначними модифікаціями, які не впливають суттєво на принцип роботи приладу. Можуть бути використані інші конструкції котушки і концентратора. Описані варіанти застосування приладу не є обмеженнями його можливостей.

2.2 Магнітний датчик з модулюючим концентратором для зниження рожевого шуму

Пристрій відноситься до магнітних перетворювачів, конкретніше до магнітних датчиків, з модуляцією магнітного потоку за допомогою концентратора електромагнітної енергії. Магніточутливий пристрій вловлює низькочастотні магнітні поля. Це відбувається за рахунок рухомих концентраторів електромагнітної енергії, що модулюють досліджуваний сигнал. Концентратори коливаються з частотою модуляції, яка є набагато

						Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ	48

більшою, ніж у досліджуваного низькочастотного сигналу. За допомогою модуляції сигнал зміщується в область більш високих частот, що зводить майже до нуля рожевий шум. В приладі використовуються МЕМС концентратори електромагнітної енергії. Зазвичай використовують датчик заснований на ефекті Хола. Датчик побудований таким чином виходить дуже компактним та енергоефективним. Використовуються такі датчики в безлічі сфер. Наприклад в медицині вони використовуються для сканування мозку, а в науці для пошуку магнітних аномалій.

2.2.1 Передумови створення пристрою

Останнім часом зростає попит на датчики для вимірювання низькочастотних магнітних полів. Ці прилади використовуються в основному в наукових і промислових цілях. Основним критерієм для таких датчиків є мінімальні розміри і споживання енергії при найкращих характеристиках.

На сьогоднішній день є декілька типів магнітних датчиків, які широко використовуються. Найпростіший датчик заснований на ефекті Хола вловлює зміну напруги на провіднику, який поміщений в магнітне поле. Такі пристрої мають занадто низьку чутливість і не використовуються в медицині і інших сферах де важлива висока точність вимірювань. Інший тип датчика – магніторезистивний, має вищу чутливість і може використовуватись в більш складних задачах.

Також існують дуже чутливі датчики – НКІП (надпровідний квантовий інтерференційний пристрій) магнітометри. Але вони потребують охолодження до надвисоких температур, а тому є дуже громіздкими і енергозатратними. Тому необхідний пристрій, який при невеликих розмірах і високій енергоефективності, матиме високу чутливість для застосування при низьких частотах.

						<i>Анк</i>
					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>	
<i>Змн.</i>	<i>Анк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		49

Магнітометри, що використовуються для виявлення повільних тіл, зазвичай генерують сильний низькочастотний шум – рожевий, спектральна густина якого змінюється з частотою f за законом $1/f$. Зі збільшенням чутливості таких пристроїв збільшується і рожевий шум.

Таким чином, даний датчик має переваги в вигляді високої чутливості при вимірюванні низькочастотних сигналів, невеликих розмірів, високої енергоефективності, і головне – зменшення рожевого шуму.

2.2.2 Опис найкращого способу застосування пристрою

На рис. 2.6 і рис. 2.7 зображено приклад форми магнітометра, побудованого з використанням концентраторів електромагнітної енергії. Прилад складається з магнітного датчика 10 і двох концентраторів 40. Концентратори коливаються навколо осі 32. Якщо концентратори 40 знаходяться в площині підкладки, то вони збільшують виміряну щільність потоку в районі розміщення датчика. Концентратори 40 являють собою багатошаровий матеріал, що складається з декількох шарів товстої феромагнітної плівки. Ці шари плівки наносяться на полікремнієві стулки 20. Модуляція магнітного сигналу відбувається за рахунок коливань концентраторів 40 навколо осі 32. Концентратори на стулках приводяться в дію електростатично, для того щоб вони коливались з модулюючою частотою f_m . В середньому положенні концентраторів 40 (рис.2.7) магнітний потік концентрується в області датчика 10. При відхиленні концентраторів від середнього положення зменшується підсилення потоку магнітного поля в області датчика 10.

На рис. 2.7 зображено магнітометр а поперечному розрізі. Концентрація магнітного поля в області датчика 10 є найбільшою, якщо концентратори 40 і датчик 10 знаходяться на одній лінії. В поглибленнях 4 підкладки 5 знаходяться електродні майданчики 15. Також електродні майданчики 25

									Арк
									50
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

знаходяться на нижній частині полікремнієвих ступок 20. Електричне з'єднання між нижньою частиною електродних майданчиків 15 і подовжувачем 28 здійснено за допомогою наскрізного з'єднання 27. Всі майданчики 25 мають виступ 29. Він використовується для того, щоб зменшити їх площу поверхні.

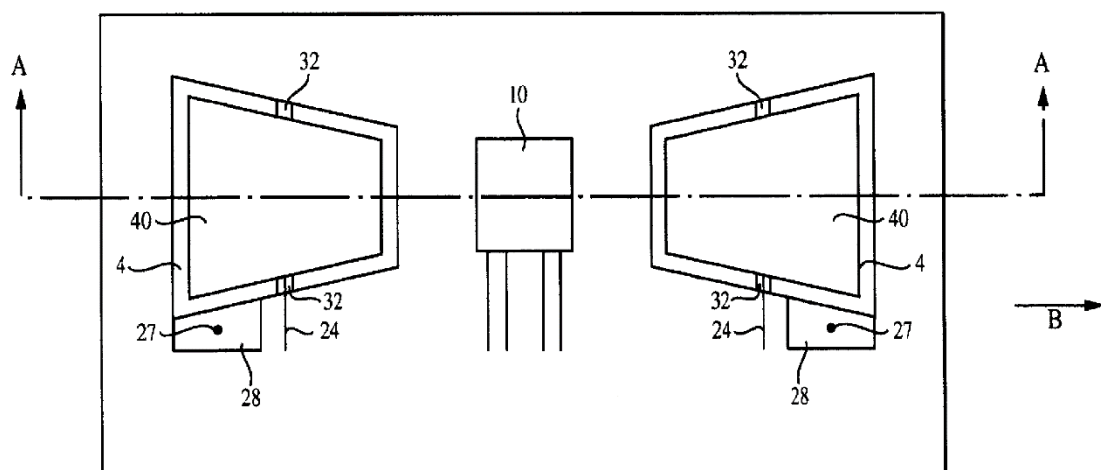


Рисунок 2.6 – Вигляд зверху модулюючого концентратора в поєднанні з магнітним датчиком.

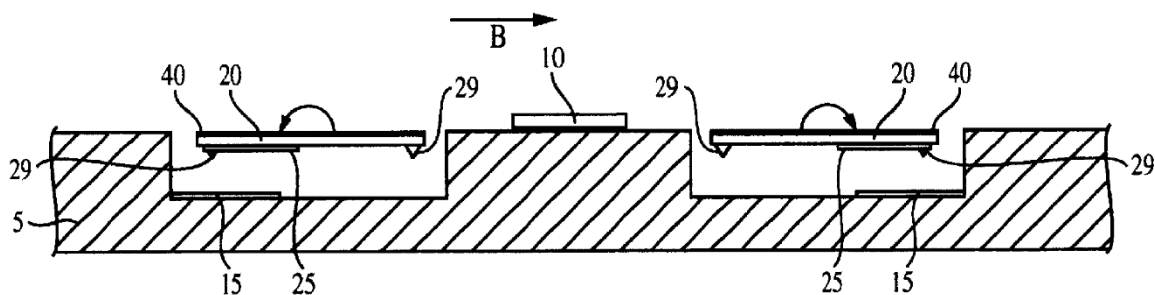


Рисунок 2.7 – Вигляд рис. 2.6 в поперечному перерізі по лінії А-А.

Ступки 20 з концентраторами 40 приводяться в дію за рахунок подачі струму з генератора змінного струму між майданчиками 25 і майданчиками 15. Коливальний рух ступок 20 з концентраторами модулює магнітний потік, який сприймає датчик 10. Завдяки модуляції робоча частота датчика 10 зсувається на частоту f_m . Після визначення сигналу його підсилюють за

допомогою вузькосмугового підсилювача в район частот близько f_m , де рожевий шум датчика 10 низький. Завдяки цим простим діям приладу вдається уникнути сильних рожевих шумів, які наявні в більшості магнітних датчиків при низьких частотах. Отримується шуканий сигнал шляхом демодуляції вихідного сигналу підсилювача. Смуга пропускання підсилювача повинна бути досить широкою, щоб включати низькі частоти в вихідний сигнал, що надходить в концентратор електромагнітної енергії.

2.3 Висновки

Концентратор електромагнітної енергії не є самодостатнім приладом і використовується у комплексних системах і пристроях, зазвичай в парі з індуктором.

Розглянуто два комплексних прилади, що суттєво відрізняються застосуванням, масштабами, принципами роботи і типом використаного концентратора. Наведено їх конструкцію та особливості застосування. Пояснена роль концентратора у кожному приладі.

Багато систем, що використовують індуктор, не зможуть нормально працювати без концентратора. Часто необхідно локалізувати виділену індуктором енергію, що без використання концентратора є неможливим.

									Анк
									52
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

3 МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКТОРА З КОНЦЕНТРАТОРОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ

Моделювання складних пристроїв проходить в два етапи. Першим етапом є створення геометричної моделі приладу, яке зазвичай проводять в спеціальних конструкторських програмах по типу AutoCAD. Другим етапом є створення геометрично-фізичної моделі, а також її аналіз і дослідження. Для другого етапу використовують дослідницькі програми. Таких програм зараз дуже багато, але найдоступнішою і найбільш функціональною є COMSOL Multiphysics. Завдяки використанню COMSOL Multiphysics вдалося обійти перший етап і не використовувати конструкторські програми. Цього вдалося добитися завдяки вбудованому в програмне забезпечення апарату для побудови геометричних примітивів і засобів для їх трансформації.

3.1 Попередня підготовка програми до розробки моделі

При відкритті програми з'являється головне вікно з двома можливими варіантами (рис. 3.1):

«Model Wizard» - створення середовища для моделювання з допомогою програми, з використанням готових фізичних модулів;

«Blank Model» - створення моделі без допомоги середовища і готових модулів.

Для спрощення побудови моделі використовуємо «Model Wizard». Далі відкривається вікно в якому необхідно обрати тип геометрії – «Space Dimension» (рис. 3.2). Для даного дослідження було обрано 3D-видя геометрії, так як він найбільш повно відображає картину фізичних процесів, що відбуваються в об'ємному тілі. Після вибору типу геометрії обираємо початкові необхідні нам фізичні модулі. В подальшому можна буде розширити список модулів при необхідності.

									Анк
									53
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

Четвертий невеликий сектор відображає повідомлення системи, журнал з записами подій в хронологічному порядку, і результати розрахунків.

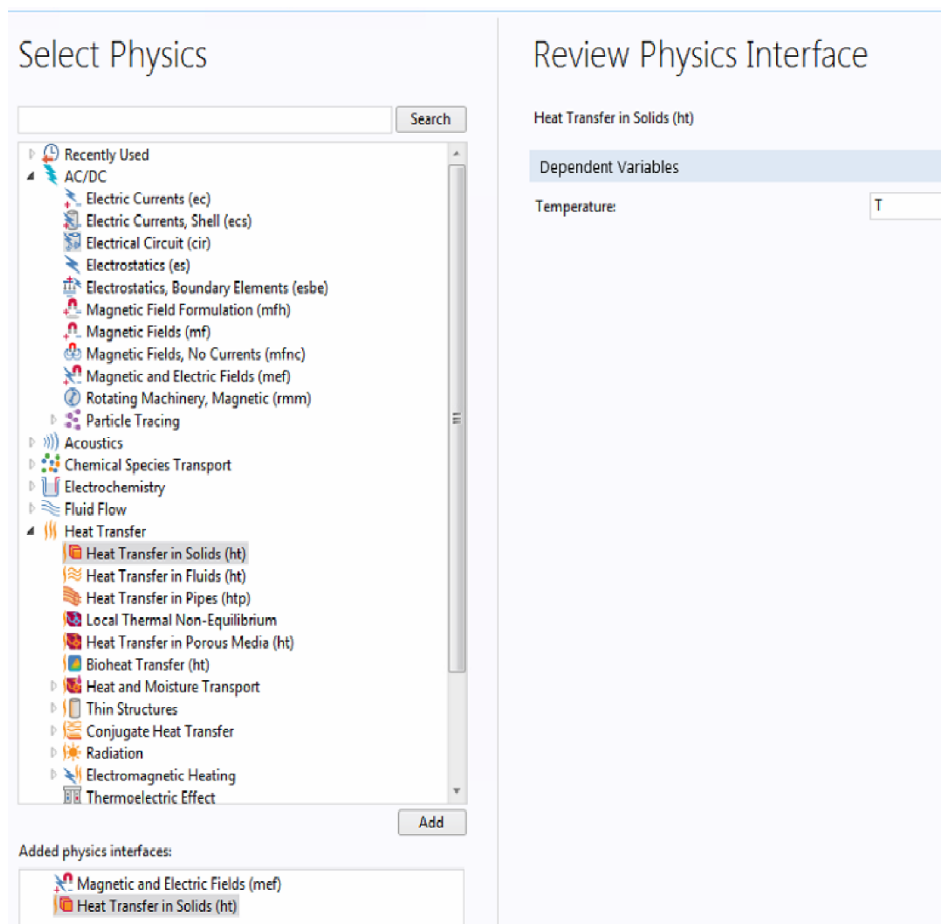


Рисунок 3.3 – Вікно вибору фізичних модулів.

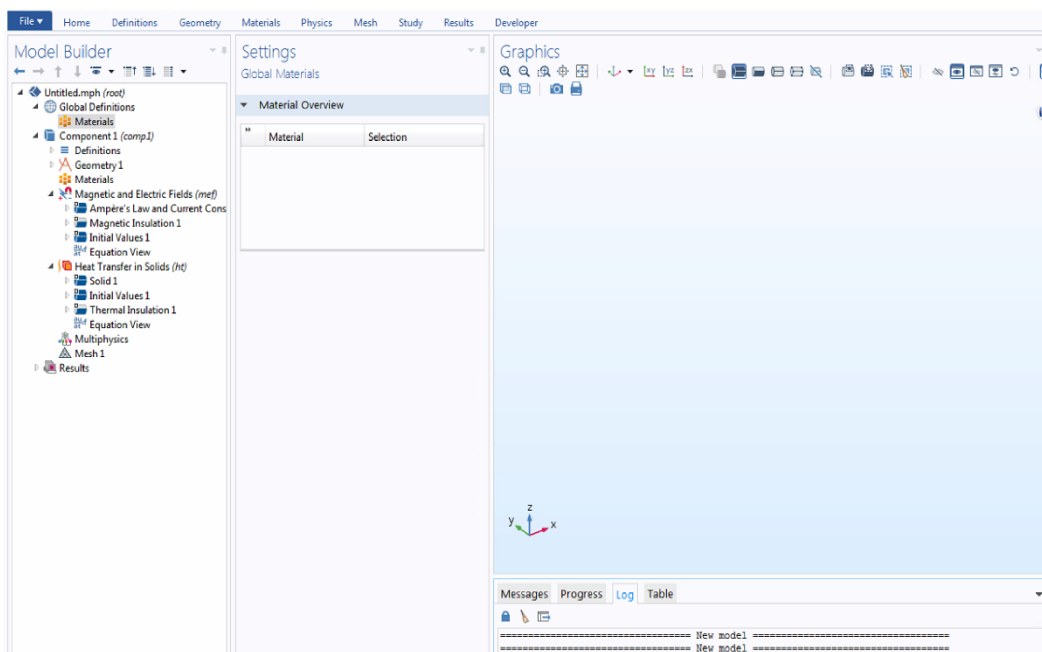


Рисунок 3.4 – Робоче середовище програми.

									Анк
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата					55

БР. 6.050802.051.009 ПЗ

3.2 Побудова геометричної моделі концентратора

Запропонована конструкція концентратора складається з двох частин – зовнішньої і внутрішньої. Струм індукований котушкою в зовнішньому витку концентратора по пластинам перетікає до внутрішнього витка (вкладиш), площа якого в багато разів менша. За рахунок цього на краю вкладиша відбувається сильне підсилення електромагнітного потоку, а отже відбувається концентрація електромагнітної енергії.

Середовище програми COMSOL Multiphysics містить вбудований апарат для побудови геометричних примітивів і засоби для їх трансформації (рис. 3.5).

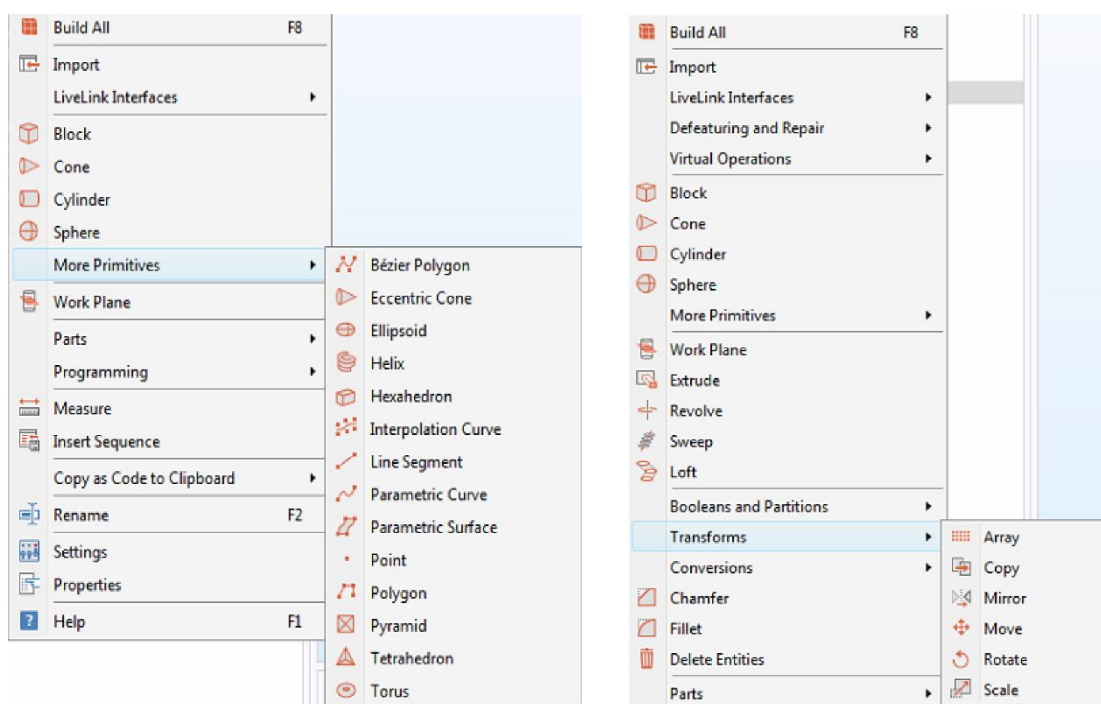


Рисунок 3.5 – Доступні геометричні примітиви (ліворуч) та операції для їх трансформації (праворуч).

Для моделювання зовнішнього витка концентратора необхідно побудувати два циліндри з різними радіусами і однаковою висотою. Радіус першого циліндра (cyl1) дорівнює зовнішньому радіусу витка концентратора, а радіус другого циліндра (cyl2) – внутрішньому радіусу. Далі віднімаємо

cyl2 від cyl1 і отримуємо заготовку для нашого концентратора. Далі більш докладно про те як реалізувати це все в середовищі COMSOL. В меню «Model Builder» натискаємо правою кнопкою мишки на вкладку «Geometry» і обираємо примітив «Cylinder». В результаті створиться «Cylinder 1», аналогічно створюємо «Cylinder 2». Натискаємо знову правою кнопкою мишки на «Geometry», далі у вкладці «Booleans and Partitions» обираємо операцію «Difference». З'явиться вкладка «Difference 1» за допомогою якої ми будемо виконувати віднімання. Після цього правою кнопкою мишки натискаємо на «Global Definitions», лівою на «Parameters». У вкладці «Parameter 1», що з'явилась записуємо «delta_Konc» у стовпчик «Name» і «10» у стовпчики «Expression» та «Value». Так ми задали різницю між радіусами циліндрів у вигляді сталої delta_Konc, що дорівнює 10 мм.

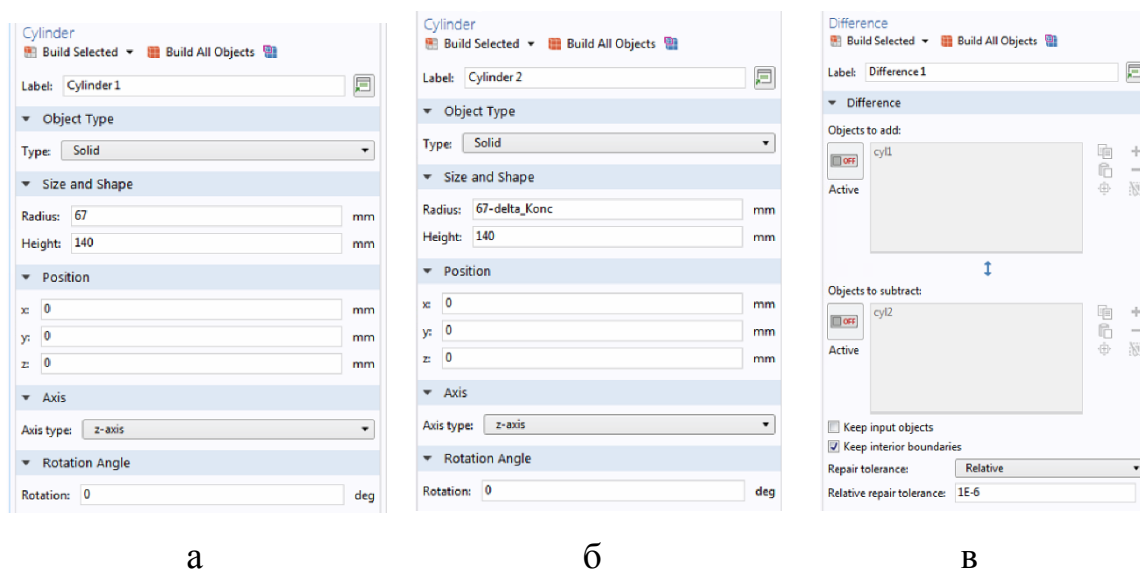


Рисунок 3.6 Параметри для введення (зовнішня частина): (а) – «Cylinder 1», (б) – «Cylinder 2», (в) – «Difference 1».

Ця різниця задається саме у вигляді сталої для подальшого параметричного дослідження. До вкладок «Cylinder 1», «Cylinder 2» та «Difference 1» записуємо параметри вказані на рис. 3.6. В результаті побудови отримуємо фігуру зображену на рис. 3.7, яка є основою для зовнішнього витка концентратора.

Далі моделюємо внутрішній виток концентратора. Аналогічно будемо два циліндри і зрізаний конус (обираємо примітив «Cone») з параметрами вказаними на рис. 3.8.

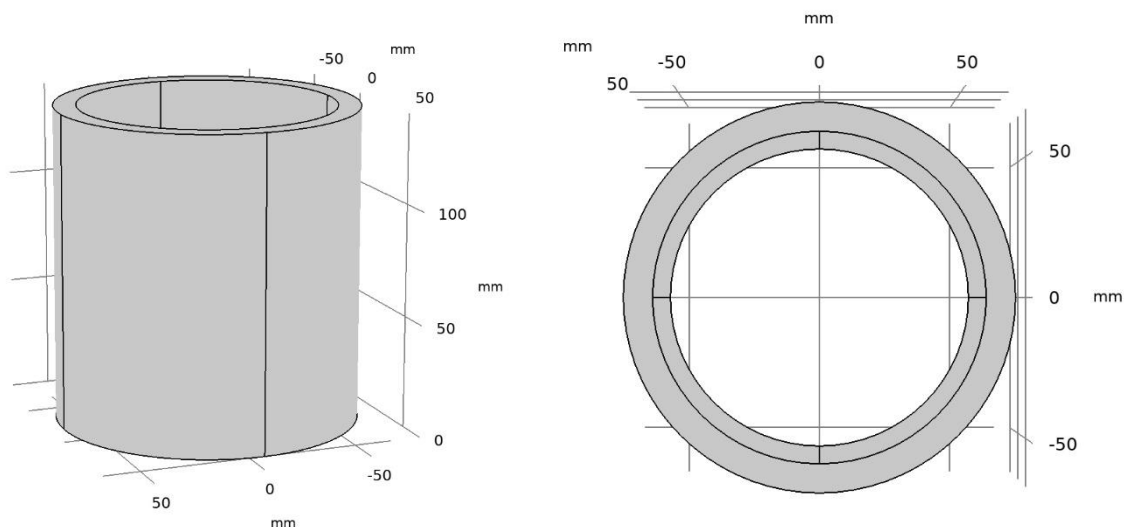
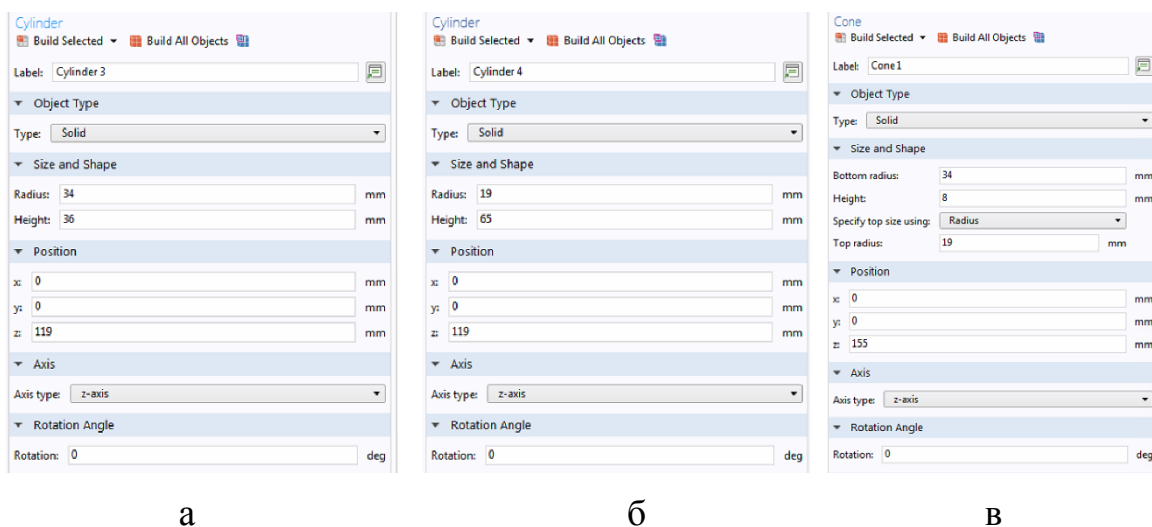


Рисунок 3.7 – Зовнішній виток концентратора.



а

б

в

Рисунок 3.8 Параметри для введення (внутрішня частина): (а) – «Cylinder 3», (б) – «Cylinder 4», (в) – «Cone 1».

По аналогії створюємо вкладку «Difference 2». Віднімаємо від циліндра «Cylinder 3» та конуса «Cone 1» циліндр меншого діаметра «Cylinder 4» для створення порожнини у внутрішньому витку концентратора. Параметри вкладки віднімання «Difference 2» вказані на рис. 3.9. В результаті побудови

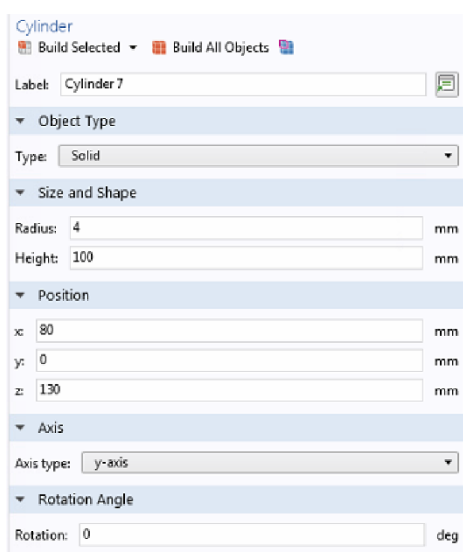
3.3 Побудова геометричної моделі індуктора

Існує два способи поєднання індуктора і концентратора:

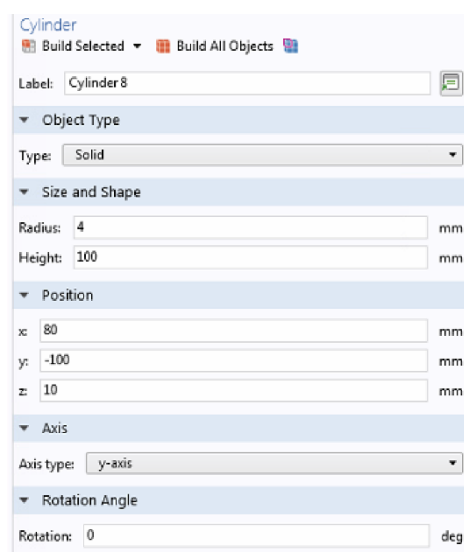
- Зустрічне з'єднання – котушка не підключена до концентратора;
- Автотрансформаторне з'єднання - котушка підключена до концентратора, так що струми в них протікають в одному напрямку.

Ми використали зустрічне з'єднання індуктора і концентратора. Котушка будується за допомогою примітиву «Helix». Додаємо вкладку «Helix 1» обравши примітив із списку. Котушка має декілька параметрів:

- «Number of turns» - кількість витків котушки, встановлюємо значення 10 витків;
- «Major radius» - радіус котушки, встановлюємо значення 80 мм, що дещо більше ніж радіус концентратора, враховуючи радіус витків;
- «Minor radius» - радіус поперечного перерізу витків котушки, встановлюємо значення 4 мм;
- «Axial pitch» - крок або відстань між витками, встановлюємо значення 10 мм.



а



б

Рисунок 3.15 Параметри для введення: (а) – «Cylinder 7», (б) – «Cylinder 8».

									Анк
									62
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

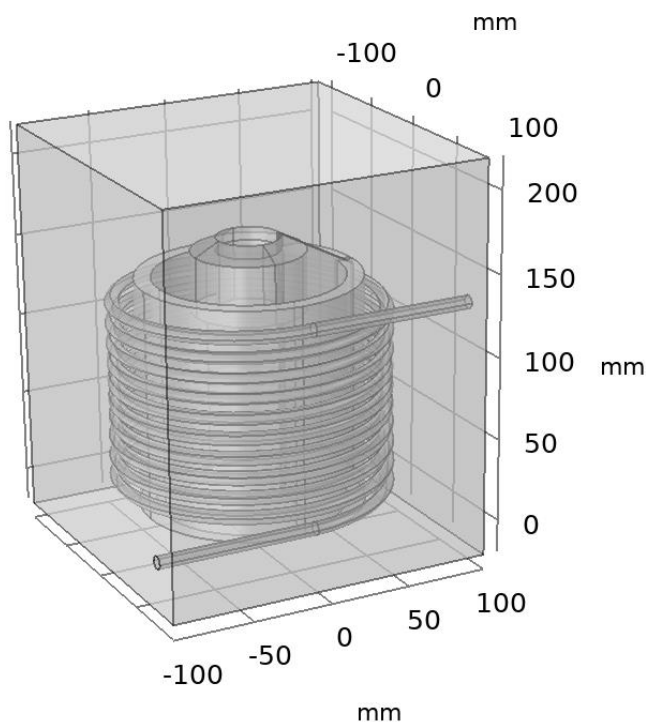
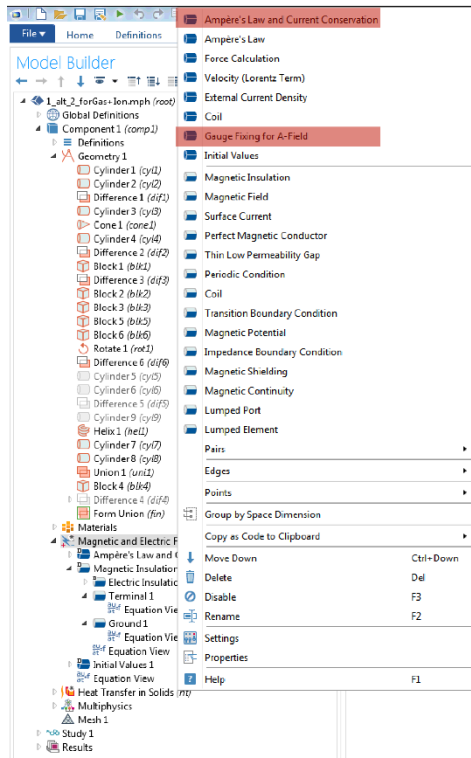


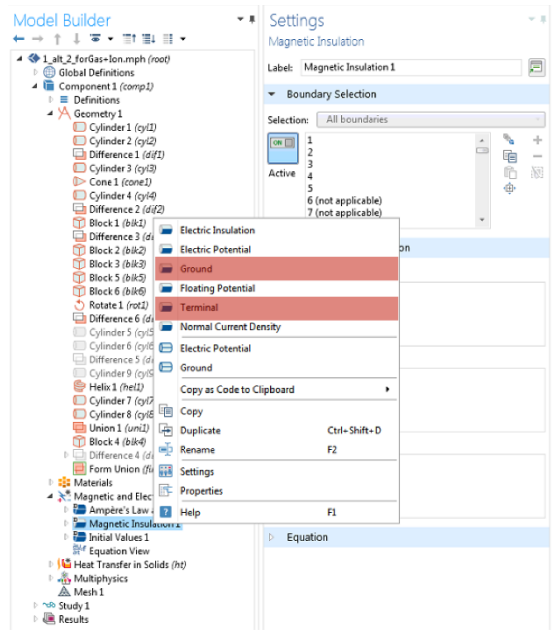
Рисунок 3.17 – Індуктор з концентратором в середовищі.

Далі задаються граничні умови і властивості матеріалів моделі. У вікні «Model Builder» правою кнопкою мишки натискаємо на вкладку «Materials», і обираємо «Add Material». Додаємо два матеріали – мідь при температурі 293 К і повітря, яке налаштовуємо як вакуум. Присвоюємо всім частинам концентратора, котушці і виводам матеріал «Copper». Паралелепіпеду, в якому знаходиться пристрій присвоюємо матеріал «Air». Присвоєння матеріалів зображено на рис. 3.18. Далі задаємо граничні умови для електромагнітної задачі. У вікні «Model Builder» необхідно натиснути правою конопкою мишки на «Magnetic and electric field» і обрати зі списку «Gauge Fixing for A-Field» і «Ampere’s Law and Current Conservation». Потім обираємо «Magnetic and electric field», натискаємо правою кнопкою на вкладці «Magnetic Insulation» і додаємо «Ground 1» і «Terminal 1». Обираємо краї виводів у вкладках «Ground 1» і «Terminal 1». У вікні «Settings» вибираємо тип виводу, у нашому випадку натискаємо «Voltage».

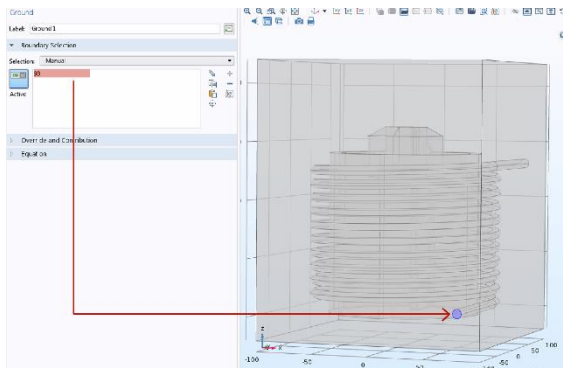
										Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ					64



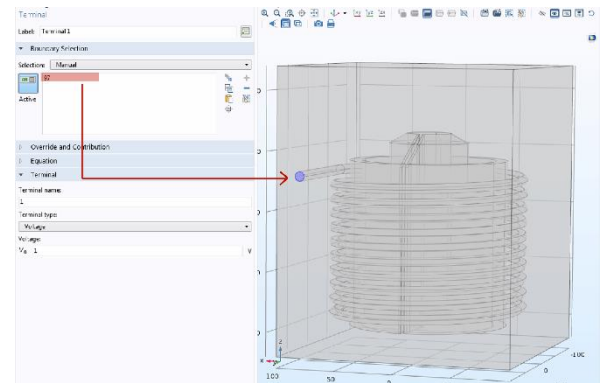
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.19 – Задання граничних умов: електромагнітні властивості (а);
електричні параметри (б); вивід, що заземлюється (в); вивід до якого
прикладається напруга (г).

4 РОЗРАХУНОК ЗА МОДЕЛЛЮ ІНДУКТОРА З КОНЦЕНТРАТОРОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ

4.1 Розрахунок густини магнітного потоку та коефіцієнта його підсилення концентратором

Щоб почати розрахунок моделі необхідно обрати вкладку «Study» і в ній натиснути «Compute». Результати розрахунку можна отримати у вигляді графіків, які будуються з використанням точок, перерізів, секторів і т. п. моделі, що досліджується. Розрахуємо і порівняємо густину магнітного потоку в індукторі з концентратором і в індукторі без концентратора. Для цього створюється копія моделі з якої видаляється концентратор, і залишається лише котушка. Графік густини магнітного потоку є базовим для вибраної фізичної моделі, тому програма буде їх автоматично у двовимірному вигляді в горизонтальній і вертикальній площинах. Щоб отримати результат необхідно натиснути на внутрішню вкладку «Magnetic Flux Density Norm», що знаходиться у вкладці «Results». Результат розрахунку для індуктора з використанням концентратора і без нього зображено на рис. 4.1.

З графіків видно, що індуктором без використання концентратора створюється достатньо низька магнітна індукція, яка є рівномірною у всьому об'ємі навколо індуктора. При використанні концентратора ми отримуємо сильно сконцентрований магнітний потік в області внутрішнього витка концентратора, тобто концентратор значно підсилює і локалізує магнітну індукцію, що створюється котушкою. Щоб кількісно визначити ефективність використання концентратора побудуємо одновимірні графіки, які більш наочно відображають підсилення магнітної індукції з використанням концентратора. Для цього натискаємо правою клавішою мишки на вкладку «Data Sets», обираємо «Cut Line 3D» і задаємо їй такі параметри (див. рис. 4.2). Тобто графік буде

									Анк
									68
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				

Для побудови графіку натискаємо правою клавішою мишки на вкладку «Results» і обираємо «1D Plot Group». У властивостях «1D Plot Group» в рядку «Data Set» обираємо «Cut Line 3D 2». Далі тиснемо правою кнопкою миші на «1D Plot Group», обираємо зі списку «Line Graph» і в рядок «Expression» записуємо «mef.normB». Після розрахунку отримуємо такі графіки (див. рис. 4.3).

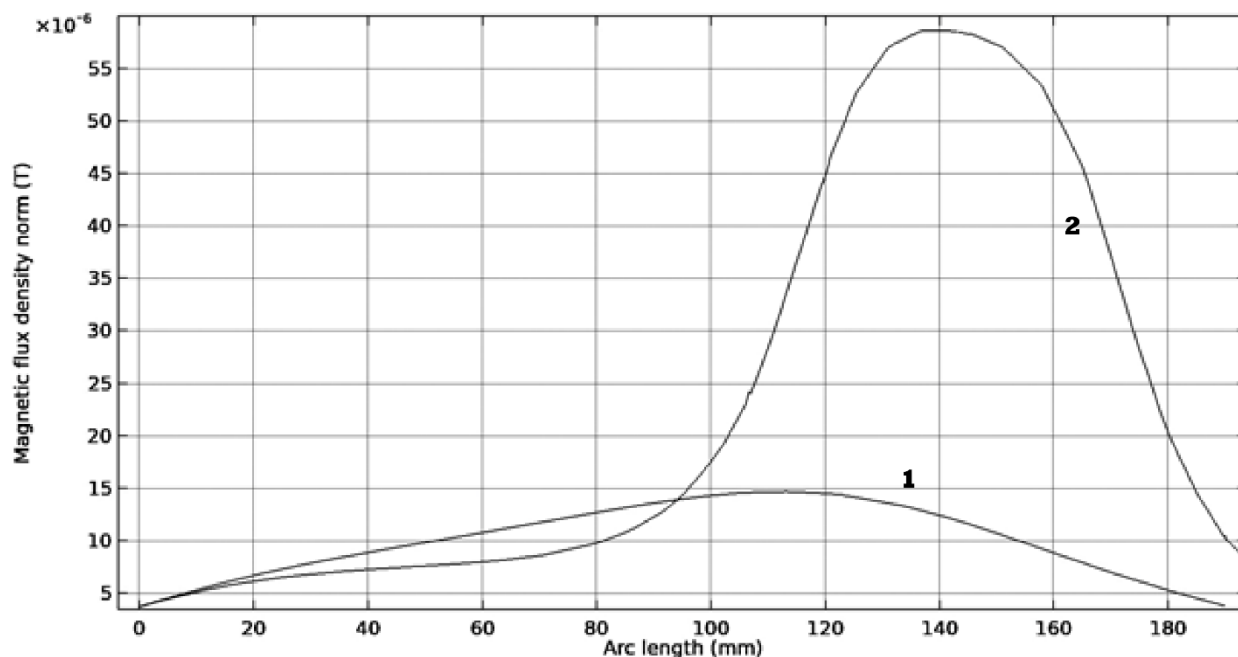


Рисунок 4.3 – Графік розподілу густини магнітного потоку індуктора 1 та індуктора з концентратором 2 в однаковому масштабі .

Графіки побудовано в однаковому масштабі для максимальної наочності. Видно, що пристрій з використанням концентратора створює в рази більшу густину магнітного потоку і локалізує її навколо внутрішнього витка. Визначимо коефіцієнт підсилення α магнітної індукції при використанні концентратора. За розрахунками максимальна щільність потоку в котушці $B_i = 14,9 \times 10^{-6}$ Тл, і в котушці з концентратором $B_{i+c} = 59,7 \times 10^{-6}$ Тл, тоді:

$$\alpha = B_{i+c} / B_i = 59,7 \times 10^{-6} / 14,9 \times 10^{-6} \approx 4 \quad (4.1)$$

Як бачимо, використання концентратора дозволяє підвищити максимальну густину магнітного потоку, яку виробляє індуктор в чотири рази. Так як модель знаходиться на стадії доопрацювання і оптимізації такий результат можна вважати досить непоганим. На графіку (рис. 4.3 (2)) видно, що максимальна густина магнітного потоку досягається в діапазоні від 120 до 160 мм по осі Z, де знаходиться внутрішній виток, чого нам і треба було добитись.

Додатково побудовано розподіл густини магнітного потоку в поперечному розрізі пристрою (рис.4.3). Такий вигляд результатів розрахунку можна отримати натиснувши правою клявішою мишки на вкладку «Results» і обиравши «2D Plot Group». У властивостях «2D Plot Group» в рядку «Data Set» обираємо «Cut Plane 2» який створюється по аналогії до «Cut Line 3D 2». «Cut Line 3D 2» є xz-площиною В результаті побудови отримаємо розподіл густини магнітного потоку індуктора з концентратором в поперечному розрізі (див. рис. 4.4) .

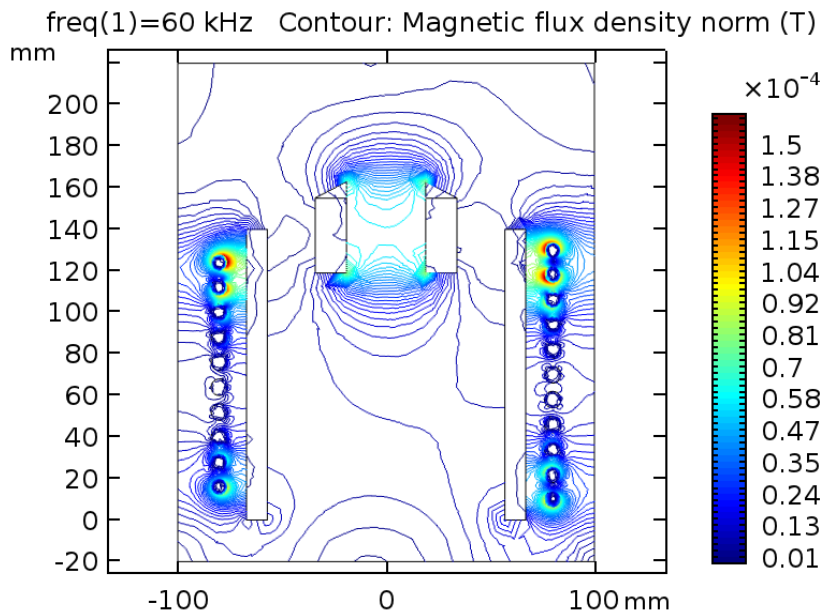


Рисунок 4.4 – Розподіл густини магнітного потоку індуктора з концентратором в поперечному розрізі.

4.2 Розрахунок залежності густини магнітного потоку від геометричних розмірів зовнішнього витка концентратора

Розрахунок проводиться шляхом параметричного дослідження. При побудові моделі ми задали внутрішній радіус зовнішнього витка концентратора як «67- delta_Konc», і тепер міняючи параметр «delta_Konc» ми можемо змінювати товщину зовнішнього витка концентратора. Для цього натискаємо правою кнопкою мишки на вкладку «Study» і додаємо «Parametric sweep». У вікні, що відкрилось в колонці «Parameter name» обираємо необхідний нам параметр, а в колонку «Parameter value list» записуємо початкове значення, крок і кінцеве значення параметру (рис. 4.5).

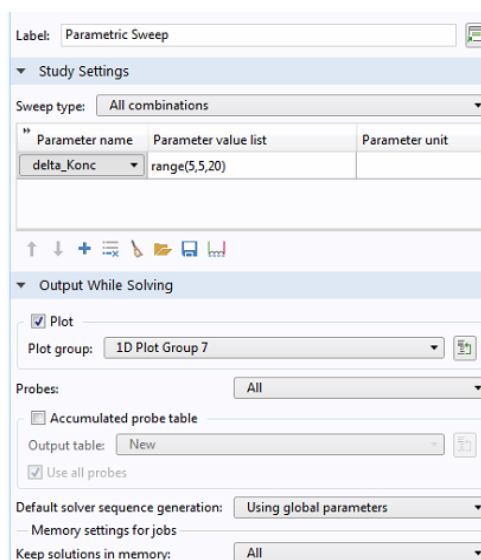
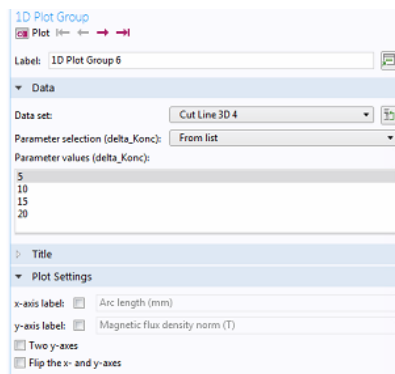


Рисунок 4.5 – Параметри «Parametric Sweep».

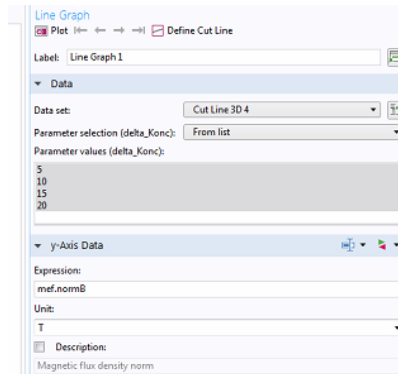
Далі у вкладці «Data Sets» додаємо «Cut Line 3D 4» аналогічно до попереднього розрахунку. В рядку «Data Set» обираємо «Parametric Solutions 1». Далі аналогічно до попереднього розрахунку додаємо «1D Plot Group 6» та «Line Graph» для неї, параметри яких вказані на рис. 4.6.

Після розрахунку отримаємо графік, який наочно показує, що найбільша густина потоку в районі внутрішнього витка отримується при найменшому $\text{delta_Konc} = 5$ (рис. 4.7).

									Анк
									72
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.009 ПЗ				



а



б

Рисунок 4.6 – Параметри «1D Plot Group б» (а) та «Line Graph» (б).

Після розрахнку отримаємо графік, який наочно показує, що найбільша густина потоку в районі внутрішнього витка отримується при найменшому $\text{delta_Konc} = 5$ (рис. 4.7). Так як чим менше параметр delta_Konc , тим менше товщина зовнішнього витка, можна зробити висновок, що при зменшенні товщини зовнішнього витка концентратора ми отримуємо більшу максимальну густина магнітного потоку.

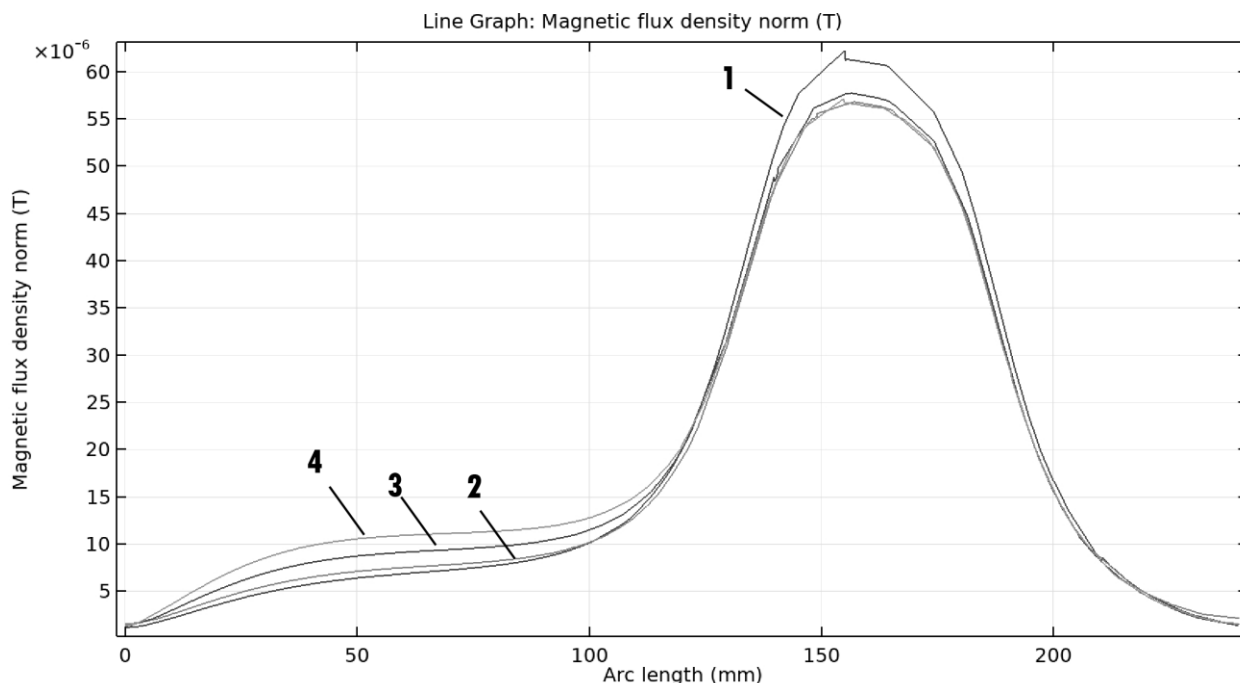


Рисунок 4.7 – Графік розподілу густини магнітного потоку індуктора з концентратором при різних значеннях товщини зовнішнього витка концентратора: 1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 15 мм; 4 – 20 мм.

Змн.	Адк.	№ докum.	Підпис	Дата

БР. 6.050802.051.009 ПЗ

Арк

73

4.3 Висновки

Проведено дослідження та розрахунок розподілу густини магнітного потоку індуктора з концентратором та індуктора окремо. Порівняно максимальні значення та розраховано коефіцієнт підсилення густини магнітного потоку при використанні концентратора.

Проведено параметричне дослідження і встановлено залежність розподілу магнітного потоку від товщини зовнішнього витка концентратора.

Створена модель дає можливість проводити інші дослідження і розрахунки, які будуть проведені в майбутньому.

					БР. 6.050802.051.009 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі було розглянуто основні типи концентраторів електромагнітної енергії, їх конструкцію і принцип роботи, а також використання концентраторів в складі сучасних комплексних пристроїв.

Розроблено концентратор електромагнітної енергії для заданого індуктора, створено і досліджено фізико-топологічну модель в середовищі Comsol Multiphysics.

Було детально описано кожен крок при побудові та дослідженні моделі, тому робота може бути використана в якості посібника при створенні принципово схожих моделей.

В результаті проведеного моделювання було отримано:

- готову модель індуктора з концентратором електромагнітної енергії, яку можна використовувати для різноманітних електромагнітних та теплових досліджень;
- розподіл густини магнітного потоку створеного індуктором з та без використання концентратора;
- коефіцієнт підсилення густини магнітного потоку при використанні концентратора;
- розподіл густини магнітного потоку індуктора з концентратором при різних значеннях товщини зовнішнього витка концентратора;

Розроблений прилад задовольняє поставлені вимоги: він простий в виготовленні, має низьку собівартість, локалізує і підвищує густину магнітного потоку індуктора більше ніж в 4 рази.

Розроблена модель дозволяє проводити безліч досліджень і в подальшому покращити ефективність приладу.

					БР. 6.050802.051.009 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		75

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
ЛІТЕРАТУРИ**

1. Babat G., Losinsky M. Concentrator of Eddy Currents for Zonal Heating of Steel Parts, Journal of Applied Physics, volume 11, issue 12 – American Institute of Physics, 1940. – 816 с.

2 Kim Y.B., Platner E.D. Flux Concentrator for High- Intensity Pulsed Magnetic Fields, Review of Scientific Instruments, volume 30, issue 7 – American Institute of Physics, 1959. – 524 с.

3. Kolm H., Mawardi O. Hydromagnet: A Self- Generating Liquid Conductor Electromagnet, Journal of Applied Physics, volume 32, issue 7 – American Institute of Physics, 1961. – 1296 с.

4. Терлецкий Я.П. Production of Very Strong Magnetic Fields by Rapid Compression of Conducting Shells, Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, том 32, выпуск 2 – «Наука/Интерпериодика», 1957. – 387 с.

5. Fowler C.M., Garn W.B., Caird R. Production of Very High Magnetic Fields by Implosion, Journal of Applied Physics, volume 31, issue 3 – American Institute of Physics, 1960. – 588 с.

6. Davies R.J., Simpson P.G. Induction Heating Handbook, Chapters 1,4,9,12,13 – McGraw Hill Higher Education, 1979.

7. Patent US 5182424A. Frank V. Module encapsulation by induction heating, 31-10-1989.

8. Patent US 3303314A. Hermann K. Inductor, 27-07-1963.

9. Patent US 4757175A. Mohr G. Roth D. Induction heating coil, 02-01-1987.

10. Patent US 7323666B2. Spohn P.D., Hoeck R.G. Inductively heatable components, 08-12-2003.

11. Patent US 5630958A. Stewart J., Godfrey P., Levy P. Side entry coil induction heater with flux concentrator, 27-01-1995.

					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>	<i>Адж</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		76

12. Patent US 6501268B1. Edelstein A., Hull D. Magnetic sensor with modulating flux concentrator for 1/f noise reduction 27-07-1963.

13. Researchgate. Magnetic Flux Concentrators Myths, Realities, and Profits [Електронний ресурс] – Режим доступу:

https://www.researchgate.net/publication/265550378_Magnetic_Flux_Concentrators_Myths_Realities_and_Profits // (дата звернення: 11.03.2019)

14. Sciencedirect. Flux Concentrators [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/flux-concentrators/> // (дата звернення: 15.02.2019)

15. Lawrence Livermore National Laboratory. Flux Concentrator Studies [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://conference.ippp.dur.ac.uk/event/283/contributions/851/attachments/830/933/Gronberg.pdf> // (дата звернення: 04.03.2019)

					БР. 6.050802.051.009 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		77

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1. Найменування і область використання.

Індуктор з концентратором електромагнітної енергії. Областю використання є сфера промисловості, а саме виробництво електронних пристроїв і металургія.

2. Основа для виконання роботи.

Основою для проектування є завдання на дипломний проект.

3. Мета і призначення розробки.

Метою розробки є створення фізично-топологічної моделі індуктора з концентратором електромагнітної енергії. Концентратор призначений для збільшення густини магнітного потоку котушки.

4. Технічні вимоги.

4.1. Вимоги до функціональних характеристик системи.

- Збільшення густини магнітного потоку не менше ніж в 2 рази;
- параметри індуктора: радіус котушки – 80 мм, кількість витків – 10, радіус поперечного перерізу витка котушки – 4 мм, відстань між витками – 10 мм;
- концентратор типу «концентратор з нерухомими стінками»;

4.2. Вимоги до надійності системи.

Система повинна видавати бажані результати незалежно від зовнішніх факторів.

4.3. Вимоги до технологічності.

Можливість виготовлення на обладнанні, до якого не висувається підвищених вимог.

					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>			
<i>Змн</i>	<i>Арк</i>	<i>№ доквм</i>	<i>Пілпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Клименко В.О.			<i>Концентратор електромагнітної енергії</i>	<i>Літ</i>	<i>Арк</i>	<i>Арквнів</i>
<i>Певевін</i>		Цибульський Л.Ю.						75
<i>Реценз.</i>						«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-51		
<i>Н. Контр.</i>		Чадюк В.О.						
<i>Затверд.</i>		Писаренко Л.Д.						

4.4. Вимоги до рівня уніфікації та стандартизації.

Використання технологій та елементів, регламентованих стандартами, прийнятими на території України. Уніфікації не потребує.

5. Вимоги до складових частин виробу, сировини та експлуатаційних матеріалів.

Використовувати матеріали та компоненти серійного виробництва помірної вартості.

6. Результати роботи.

Робота повинна містити наступні документи:

- пояснювальну записку;
- складальне креслення ;
- деталювання;
- специфікація;
- додатки.

					<i>БР. 6.050802.051.009 ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>81</i>

ДОДАТОК Б

