

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка індукційного приладу для обігріву приміщень

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

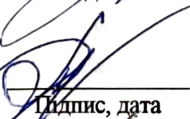
Шифр БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
3 курсу групи ЕТс-21-2


Підпис

СІНЬКОВ І.О.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

д.т.н., доц. Тимошук О.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

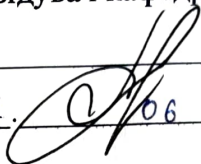
17 06 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС


17. 06 2024

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сіньков Ігор Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка індукційного приладу для обігріву приміщень керівник роботи Поліщук О.С., д.т.н., проф.**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 15 02 2024 р. № 8

2. Строк подання студентом роботи на кафедру МАЕЕС

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики побутових нагрівальних приладів-аналогів-аналогів.**

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи

2 Розробка конструкції індукційного нагрівального приладу

3 Розрахунки, що підтверджують працездатність індукційного нагрівального приладу

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Схеми керування індукційними приладами. Док. оглядовий

(A1). Аркуш 2. Індукційний нагрівальний прилад. Схема структурна

(A1). Аркуш 3. Індукційний нагрівальний прилад. Схема електрична

принципова (A1). Аркуш 4. Індукційний нагрівальний прилад.

Габаритне креслення (A1). Аркуш 5. Елементи індукційного

нагрівального приладу. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	02.06.24р.	
2 Розробка конструкції індукційного нагрівального приладу	08.06.24р.	
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність індукційного нагрівального приладу	18.06.24р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	21.06.24р.	

Студент

Підпис

Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Сіньков Ігор Олександрович**

2. Тема бакалаврської роботи
Розробка індукційного приладу для обігріву приміщень

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 60

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки:

1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи

2 Розробка конструкції індукційного нагрівального приладу

3 Розрахунки, що підтверджують працездатність індукційного нагрівального приладу

Висновки

Перелік джерел посилання

Підпис студента _____

" 17 " 06 20 24 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол N1 від " 25 " 06 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК _____

Рекомендації ЕК _____

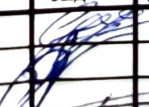


Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

" 25 " 06 20 24 р.

ЗМІСТ

Вступ		6
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	8
1.1	Загальні відомості про індукційне нагрівання	8
1.2	Способи нагріву приміщень	12
1.3	Схеми індукційних нагрівальних пристроїв та їх конструкції	14
1.4	Висновки до першого розділу	26
2	Розробка конструкції індукційного нагрівального приладу	27
2.1	Розробка електричної структурної схеми індукційного нагрівального приладу	27
2.2	Розробка електричних схем вузлів системи керування індукційним нагрівальним приладом	28
2.3	Розробка електричної схеми індукційного нагрівального приладу	36
2.4	Розробка елементів конструкції індукційного нагрівального приладу	40
2.5	Розробка індукційного нагрівального приладу	42
2.6	Розробка системи керування індукційним нагрівальним приладом	42
2.7	Рекомендації щодо застосування індукційного нагрівального приладу для обігріву приміщень	43
2.8	Висновки до другого розділу	45
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність індукційного нагрівального приладу	46
3.1	Основні вимоги до розробки індукційного нагрівального приладу	46
3.2	Фізична модель системи «індуктор-радіатор» індукційного нагрівального приладу	46

					БРМА24.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
		Сінков			Розробка індукційного приладу для обігріву приміщень	Літ.	Арк.	Акрюшів
		Полщук			Пояснювальна записка		4	60
		Полщук			ХНУ гр.ЕТс-21-2			

3.3	Математична модель системи «індуктор-радіатор» індукційного нагрівального приладу	49
3.4	Висновки до третього розділу	55
	Висновки	56
	Перелік джерел посилання	57
	Додатки	60

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Індукційні нагрівальні прилади (ІНП) широко застосовуються в різних технологічних процесах у машинобудуванні, металургії та побуті [14]. Сьогодні людство стикається з проблемою скорочення використання природних ресурсів, зокрема зменшення енергетичних витрат на обігрів приміщень. Одним із рішень є використання індукційних нагрівальних приладів, які засновані на індукційному нагріві тіл (переважно провідників) вихровими струмами, збуджуваними змінним магнітним полем. Таке обладнання належить до класу енергозберігаючого, завдяки високому коефіцієнту потужності [15], який залежить від частоти використовуваного струму. Це дозволяє знизити експлуатаційні витрати на обігрів приміщень. Індукційні обігрівачі мають мінімальну чутливість до коливань напруги, тому вони здатні стабільно працювати як у мережі постійного, так і змінного струму. ІНП характеризуються безшумною роботою та високим рівнем екологічної безпеки [15]. Завдяки цьому, використання індукційних нагрівальних приладів є ефективним і економічним способом обігріву приміщень, що робить їх розробку надзвичайно актуальною.

Метою цієї роботи є розробка індукційного нагрівального приладу для обігріву приміщень та її дослідження в різних режимах роботи.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести огляд та аналіз технологічного процесу, відомих схем і конструкцій індукційних приладів для обігріву приміщень;
- розробити систему керування індукційним нагрівальним приладом;
- розробити елементи конструкції індукційного нагрівального приладу;
- розробити фізико-математичну модель індукційного нагрівального приладу;
- розробити рекомендації щодо застосування індукційного нагрівального приладу для обігріву приміщень.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом розробки є характеристики та параметри індукційного нагрівального приладу.

Предметом розробки є нагрівальний прилад для обігрівання приміщення.

Таким чином, розробка індукційних нагрівальних приладів є актуальною та перспективною з огляду на їх високу ефективність, точність, екологічну безпеку, універсальність і зручність експлуатації. Впровадження інновацій в цій сфері сприятиме підвищенню якості продукції, зниженню енерговитрат та покращенню умов праці, що є важливими факторами для сучасного суспільства.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Загальні відомості про індукційне нагрівання

Електромагнітну індукцію відкрив Фарадей у 1831 році, і саме вона лежить в основі індукційного нагріву [16]. Загальне визначення електромагнітної індукції заключається в наведенні електричного струму в провідному матеріалі, що переміщується в магнітному полі. Є два види індукції, які описують це явище:

- індукція Лоренца, що виникає, коли магнітне поле не змінюється з часом, а провідний матеріал знаходиться в русі;
- індукція Неймана, яка виникає, коли потік магнітного поля змінюється з часом, а провідний матеріал залишається нерухомим.

У випадку індукційного нагрівання індукція Неймана появляється, коли коливальний струм подається на котушку, що створює змінне магнітне поле з певною частотою струму. Згідно із законом Ленца, наведена електрорушійна сила (ЕРС) завжди створює струм, магнітне поле якого протидіє зміні магнітного потоку джерела. Це магнітне поле індукує вихрові струми в матеріалі [17]. Вихрові струми (також відомі як струми Фуко) мають ту ж частоту, що й струм у котушці джерела. Вони спрямовані в протилежному напрямку. Струми виробляють тепло в матеріалі за рахунок джерел нагрівання. Через електромагнітні явища розподіл цих струмів є нерівномірним, що впливає на розподіл температури на поверхні самого матеріалу. Додатковий нагрів може виникати через втрати на гістерезис. Магнітні матеріали (матеріали з високою відносною проникністю) створюють опір змінному магнітному полю в котушці, що створює додаткове "тертя" і, відповідно, додаткове нагрівання, підвищуючи температуру матеріалу. На рисунку 1.1 наведено загальний принцип дії індукційного нагрівання.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

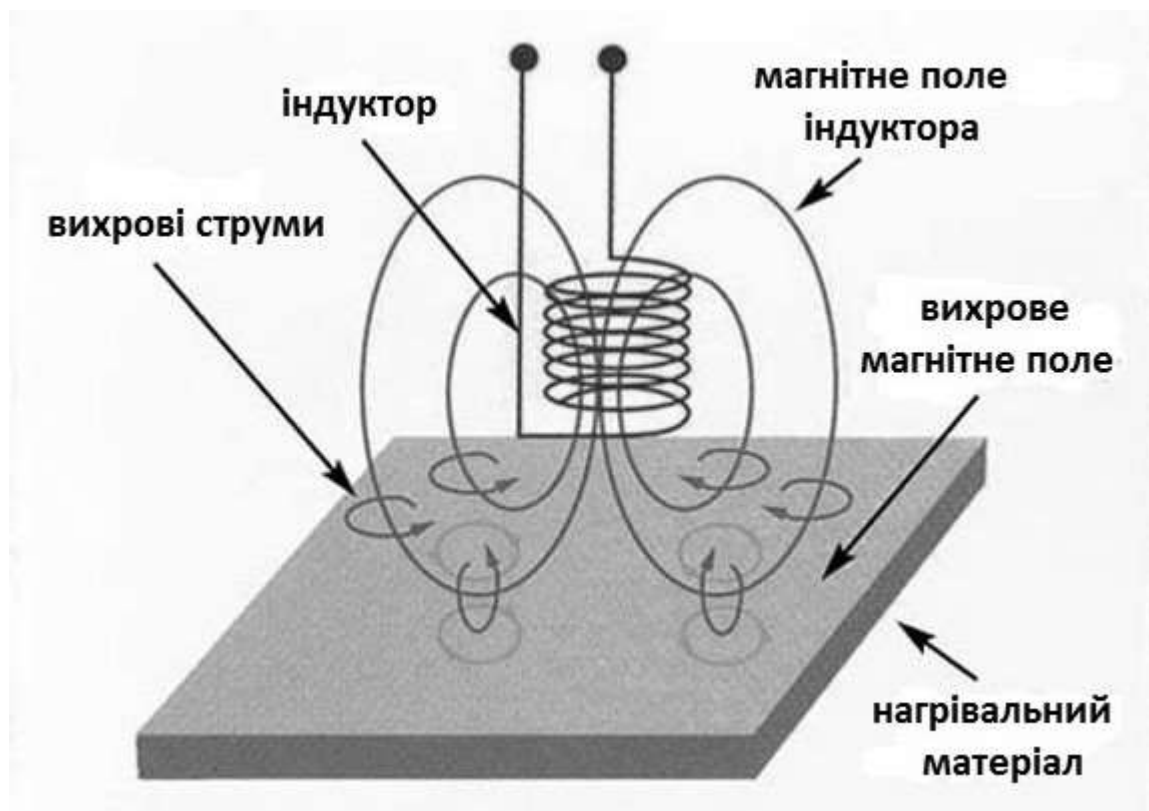


Рисунок 1.1 – Загальний принцип дії індукційного нагріву

Існує два механізми нагрівання, які залежать від ступеня намагніченості матеріалу та його початкової температури:

- при низькій температурі, коли нагрівання здійснюється за рахунок дії вихрових струмів і втрат на гістерезис;
- при високій температурі, коли нагрівання відбувається виключно за допомогою вихрових струмів;
- загальний механізм індукційного нагрівання включає три послідовні фізичні явища:
 - передача електромагнітної енергії від індуктора до матеріалу, що нагрівається, шляхом наведення вихрових струмів.
 - перетворення електроенергії вихрових струмів у теплову енергію завдяки ефекту Джоуля-Ленца.
 - перерозподіл тепла між гарячими та холодними зонами завдячуючи теплопровідності;

- температуру нагрітої частини можна контролювати, регулюючи електричні параметри з врахуванням властивостей матеріалу.

Параметри, що впливають на процес індукційного нагріву:

- властивості нагрівального матеріалу (теплові, магнітні, та електричні) і його початкова температура;

- матеріал і геометрія самого індуктора;

- вхідні електричні параметри (частота, потужність);

- розмір повітряного зазору між індуктором і матеріалом, що нагрівається;

- відносне положення індуктора щодо деталі, яка нагрівається.

Потужність, що передається в матеріал. Що нагрівається через індуктор, є ключовою характеристикою при індукційному нагріванні. Цю потужність можна знайти за допомогою рівнянь Максвелла, які базуються на наступних умовах:

- однорідність середовища;

- однорідність магнітного поля;

- нескінченна проста геометрія (нескінченний циліндр або пластина).

З цих умов і рівнянь Максвелла виводиться формула для переданої потужності:

$$P = \rho \cdot \frac{H^2}{p} \cdot F \cdot S, \quad (1.1)$$

де p – глибина проникнення електромагнітних хвиль в матеріал;

H – ефективне магнітне поле, яке створюється індуктором;

S – площа поверхні деталі;

F – активний коефіцієнт потужності (коефіцієнт переданої потужності);

ρ – питомий опір матеріалу.

Коефіцієнт F залежить від (d/p) -відносної товщини матеріалу на глибину проникнення. Залежність коефіцієнта представлена на рисунку 1.2.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

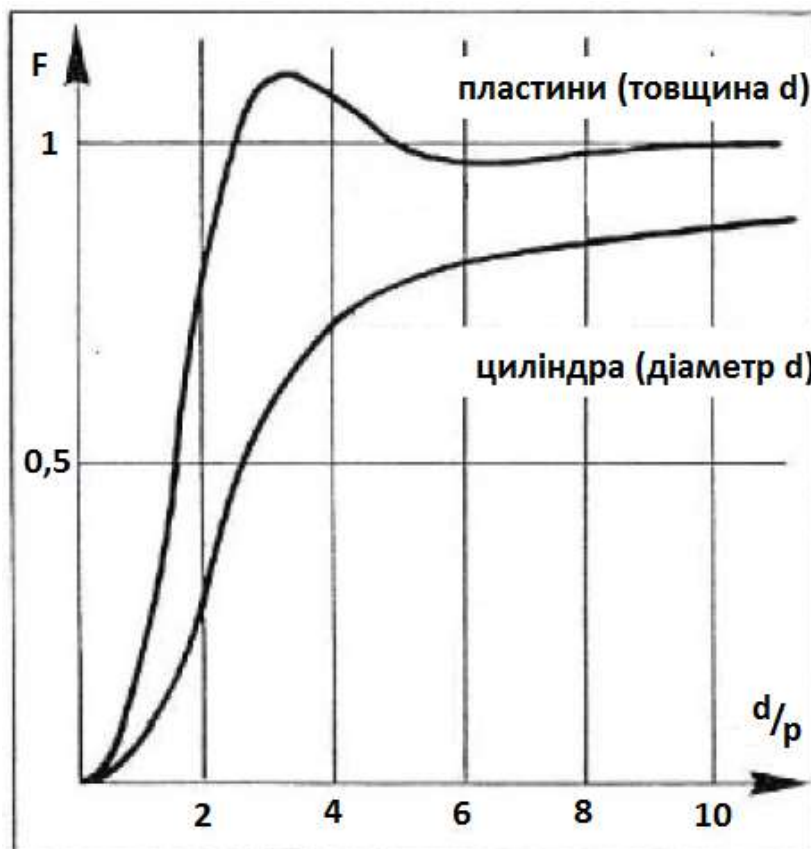


Рисунок 1.2 – Розвиток активного коефіцієнта потужності (F)

З рисунку 1.2 видно, що глибина проникнення зменшується зі збільшенням частоти. Передана потужність також зростає. Очевидно, що при зменшенні глибини проникнення співвідношення d/p , в свою чергу, збільшується, що призводить до підвищення коефіцієнта активної потужності. Однак збільшення частоти спричиняє концентрацію вихрових струмів на поверхні матеріалу, що підходить лише для поверхневого гарту [18].

Для досягнення ефективного нагрівання матеріалу слід знайти оптимальне співвідношення між максимальною потужністю і швидкістю нагрівання. Високі частоти призводять до високої переданої потужності на поверхні, а внутрішня частина деталі нагрівається за рахунок теплопровідності. Низькі частоти забезпечують рівномірне нагрівання, але відбувається це повільніше. Оптимальне значення може бути досягнуто з коефіцієнтом F від 0,7 до 0,8 [19].

Між використанням певної електричної потужності, що підводиться до індуктора, і активною потужністю на матеріалі частина енергії втрачається через такі фактори:

- втрати потужності, спричинені Джоулевым нагріванням в індукторі;
- втрати потужності в повітряному зазорі;
- потужність, що не передається до матеріалу.

Система, що складається з котушки з навантаженням, має індуктивність. Тому вона володіє активною потужністю.

1.2 Способи нагріву приміщень

Щоб забезпечити мешканцям в житловому приміщенні комфортні умови для проживання в холодний зимовий період, необхідна система, яка допомагає підтримувати потрібний температурний режим. Система опалення є найбільш вдалим інженерним рішенням зазначеної проблеми [20]. Опалення дозволяє підтримувати в будинку комфортні умови на протязі усього холодного періоду. На сьогодні існують різні види сучасних систем опалення.

Загальний принцип роботи будь-якої системи опалення заключається в тому, що джерело енергії нагріває тепловий носій, який через прилади цієї системи різними способами передає тепло повітрю, конструкціям приміщення або безпосередньо предметам і споживачам, що знаходяться в ньому [21]. Джерелом енергії можуть бути газ, що спалюється, рідке або тверде паливо, електроенергія, тепло Землі, тепла енергія Сонця, енергія, що виділяється при переході газу з одного агрегатного стану в інший. Теплоносіями можуть бути вода (інша рідина) або повітря.

Системи опалення можуть застосовувати один тепловий носій, як, наприклад, при безпосередньому нагріванні повітря в газових або електричних повітряно-опалювальних агрегатах, чи декілька – один основний та один проміжний, наприклад, вода у водяних повітряно-опалювальних агрегатах. Відповідно, в за-

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лежності від основного теплового носія, системи опалення можуть бути водяними або повітряними.

Водяні системи опалення складаються з генератора тепла (котла) і приладів опалення, через які циркулює тепловий носій, передаючи тепло повітря та предметам, що знаходяться у приміщенні.

Існують два основні способи передачі теплової енергії від теплового носія до повітря:

- конвекція;
- теплове випромінювання.

Суть конвекції полягає в перенесенні тепла за рахунок переміщення речовини у просторі. Вона спостерігається у рухомих рідинах та газах.

Теплове випромінювання – це перенос тепла у вигляді електромагнітних хвиль із взаємним перетворенням теплової енергії в променеву та навпаки.

Недоліками водяної системи опалення є необхідність розводки труб для подачі теплового носія від котла до нагрівальних приладів, що вимагає витрат на:

- труби,
- з'єднувальні елементи,
- додаткове обладнання,
- їх монтаж і обслуговування.

Якщо система довго не використовується, слід відкачувати воду, щоб уникнути замерзання труб в зимовий період, що може призвести до їхнього пошкодження. Також можливі протікання теплового носія під час експлуатації [22].

Повітряне опалення може здійснюватися як окремими повітряно-опалювальними агрегатами, так і каналними системами повітряного опалення, що з'єднані з системами припливно-витяжної вентиляції. Якщо повітряне опалення не передбачає застосування повітропроводів, то це є безканалні системи повітряного опалення. Прикладами таких систем можуть бути побутові обігрівачі, зокрема такі як конвектори, тепловентилятори, масляні радіатори, інфрачервоні обігрівачі тощо.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Особливу увагу приділяють індукційним нагрівальним установкам [23]. Вони споживають енергію електромагнітного поля, яку нагрівальний радіатор поглинає і перетворює на теплову. При проходженні струму через індуктор навколо нього утворюється змінне магнітне поле, яке пронизує радіатор. Це викликає появу електричного поля, лінії якого розміщені перпендикулярно до напрямку магнітного потоку і рухаються по замкнутому колу. Завдяки цим вихровим потокам електроенергія перетворюється на теплову. Таким чином радіатор нагрівається. Електрична енергія індуктора передається радіатору без використання контактів, тобто повітряним шляхом.

1.3 Схеми індукційних нагрівальних установок та їх конструкції

В основі індукційного нагріву знаходиться явище електромагнітної індукції. Його сутність полягає в тому, що при внесенні провідника в змінне електромагнітне поле в ньому появляється електрорушійна сила. Провідник, який чинить опір струму, що протікає через нього, нагрівається відповідно із законом Джоуля-Ленца. Найпростіша еквівалентна схема для індукційного нагріву наведена на рисунку 1.3 та аркуші [БРМА24.00.00.000ДО] [1].

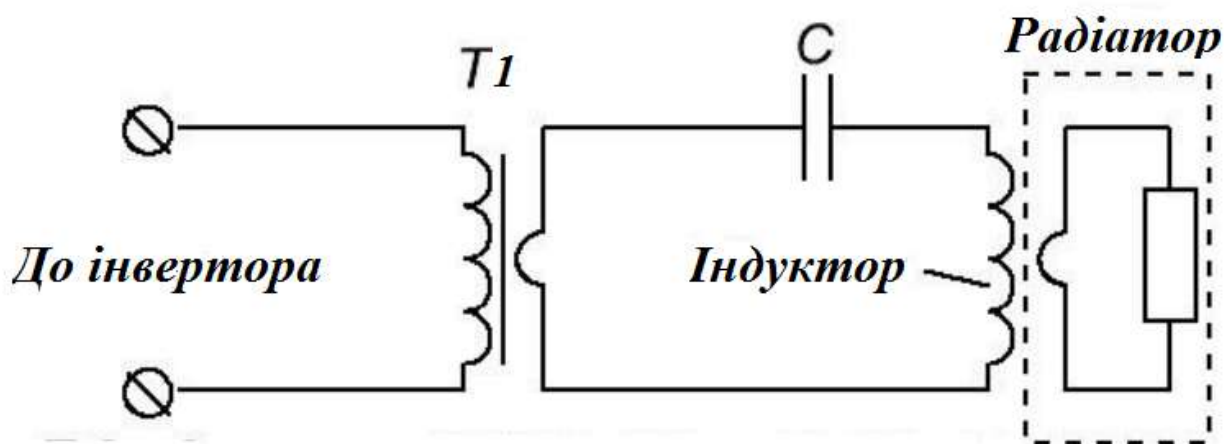


Рисунок 1.3 – Еквівалентна схема для індукційного нагріву

Для трансформатора Т1 слід вибрати матеріал з високою коерцитивною силою, наприклад, електротехнічну сталь. Товщина кожного листа в наборі не повинна перевищувати 0,35 мм.

Обмотки трансформатора з'єднуються з конденсаторами, ємність яких обернено пропорційна коефіцієнту трансформації, що визначає його резонансні властивості. Слід підібрати їх так, щоб пік резонансної кривої лежав в діапазоні 1000 Гц.

При під'єднанні живлення змінна напруга через буферний конденсатор надходить на діодний міст. В ньому вона випрямляється і заряджає конденсатор С5 (ємністю 4 мкФ до 300-350 В). Як тільки напруга стане рівною 300 вольт, схема керування (зібрана на діодисторі VS1 КН102Е, діодах UE5-7 і конденсаторі С6 ємністю 10 нФ) створює імпульс, який відкриває тиристор SV2 (типу Т122-25-12). Заряд, накопичений на С5 = 4 мкФ, переходить у первинну обмотку трансформатора Т1. Індукційний струм закриває тиристор, і негативна хвиля індукційного поля через діод Д122-25-12 створює змінний вихровий струм у самому трансформаторі Т1. Можливу діаграму зазначеного процесу наведено на рисунку 1.5.

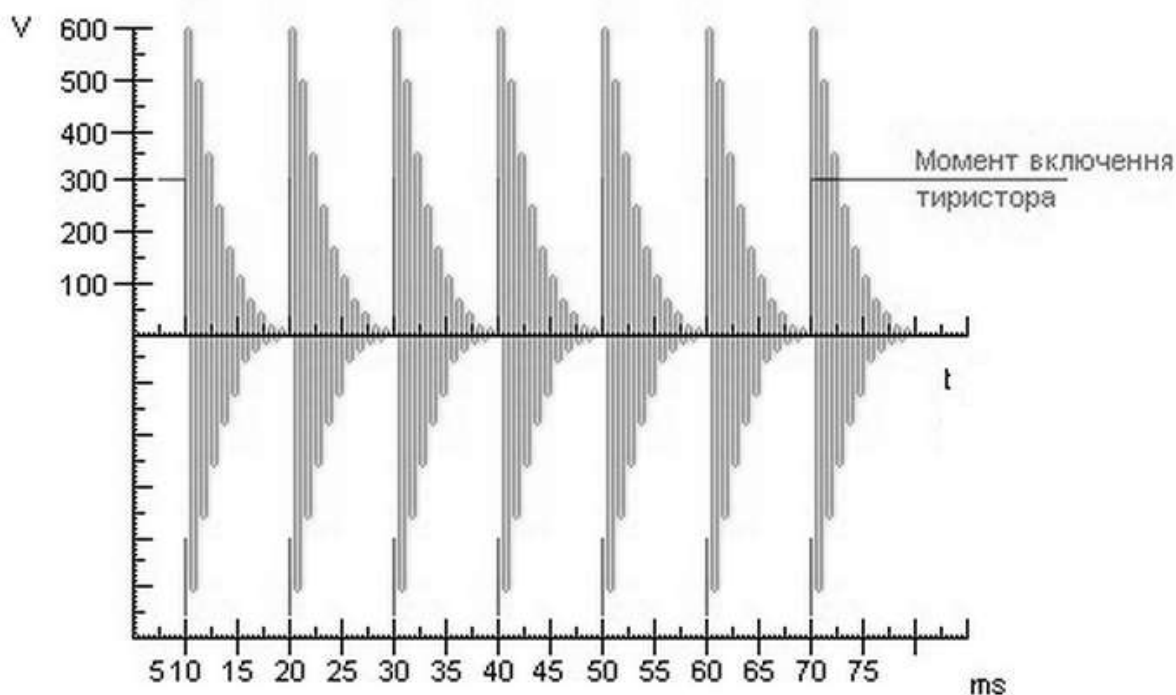


Рисунок 1.5 – Діаграма напруги для первинної обмотки трансформатора

Високий коефіцієнт корисної дії цієї схеми пояснюється використанням біфілярної первинної обмотки в трансформаторі, двох коливальних контурів з індуктивним зв'язком і коротко імпульсним запуском тиристора VS2. Схема управління налаштовується так, щоб період імпульсів складав 100 Гц.

Застосування індуктора як нагрівача наведено на рисунку 1.6, де зображено загальний вигляд однієї з його фаз. Індукційний проточний нагрівач [3] складається з обмотки 1, яка намотана на струмопровідну немагнітну трубу, закриту з обох сторін кришками з патрубками для підведення та відведення рідини. Всередині немагнітної труби розташована герметично закрита феромагнітна труба з електротехнічної сталі з шихтованим магнітопроводом. Між ними є зазор для проходження рідини, яка нагрівається в тонкому шарі. На внутрішній феромагнітній трубі закріплено датчик температури 8.

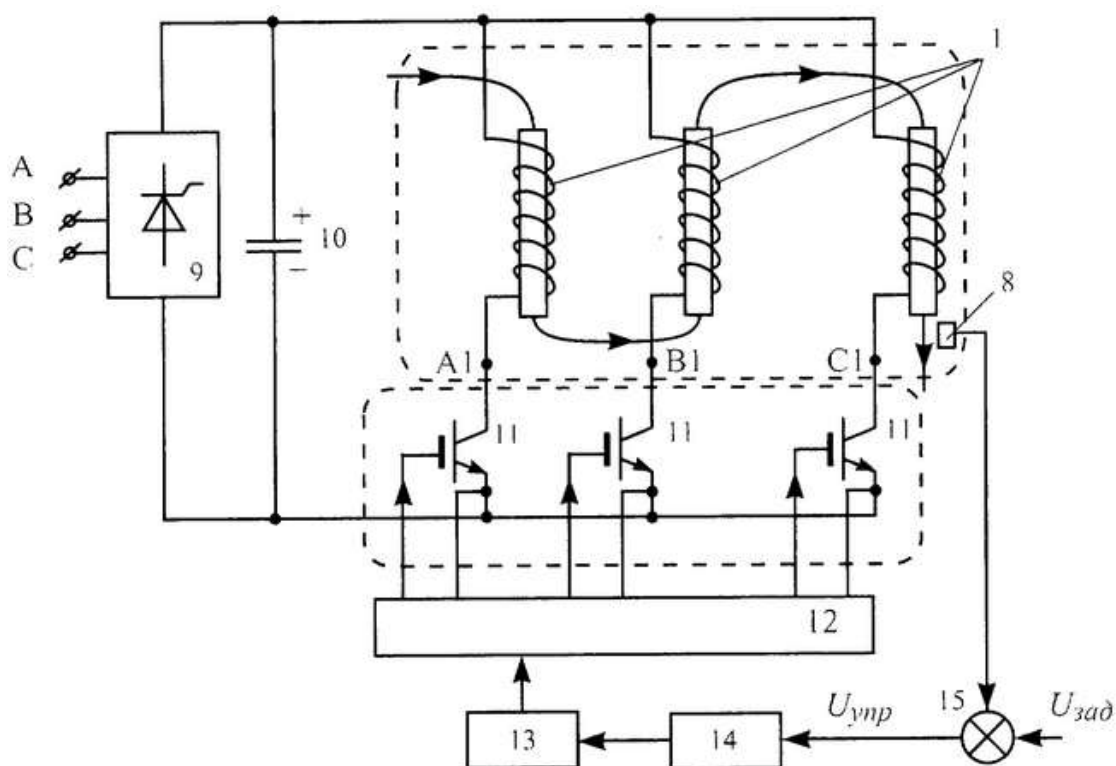


Рисунок 1.6 – Високо стабільний індукційний проточний нагрівач

Обмотки 1 високо стабільного індукційного нагрівача з одного боку з'єднані з позитивним виводом випрямляча 9 та конденсатором фільтра 10 через ну-

льову точку. Фазні виводи обмоток 1 (A1, B1, C1) через транзистори 11 з'єднані з негативним виводом випрямляча 9 і конденсатора 10. Бази транзисторів трифазного напівпровідникового комутатора підключені до виходу розподільника імпульсів 12, а його вхід з'єднаний через формувач імпульсів 13 з генератором імпульсів 14, керованим від датчика температури 8 через нульовий орган 15.

Принцип роботи високо стабільного індукційного проточного нагрівача базується на використанні поверхневого ефекту в металевих магнітопроводах. Це дозволяє покращити їх технологічні та енергетичні характеристики шляхом створення умов для більш вираженого прояву цього ефекту.

Електромагнітне поле, створене кожною з обмоток, пронизує магнітопровід. Верхня немагнітна труба функціонує як короткозамкнений виток, що спричиняє активні втрати по всій її довжині і залишається "прозорою" для електромагнітної хвилі. Феромагнітна труба (певної товщини, наприклад 4-5 см) при певній частоті (наприклад, 50-100 Гц) і напруженості магнітного поля (наприклад, 6000-7000 А/м) є напівпрозорою, що означає, що електромагнітна хвиля може проникнути через товщину труби і викликати в ній вихрові струми, які призводять до втрат енергії. Проте електромагнітна хвиля остаточно загасає і досягає шихтованого осердя, де виникає потік магнітної індукції, що створює вторинну ЕРС у феромагнітній трубі, підсилюючи поверхневий ефект і додаткові втрати, передаючи тепло нагрівальному середовищу. Таким чином, у трубах виникають активні втрати, які спричиняють їх нагрівання. Рідина, проходячи між трубами, нагрівається в тонкому шарі з обох сторін.

Функціонально високо стабільний індукційний проточний нагрівач працює таким чином. Трьох фазна мережа А, В, С підключається до випрямляча 9, де пульсуюча постійна напруга фільтрується і згладжується конденсатором фільтра 10, після чого подається на обмотки 1 самого індуктора і транзистори 11 комутатора. Спочатку на нуль-орган поступає сигнал $U_{зад}$. Генератор імпульсів 14 генерує імпульси максимальної частоти, які надходять на формувач імпульсів 13, де створюються імпульси визначеної тривалості. Розподільник імпульсів 12 по черзі подає ці імпульси на бази транзисторів 11, які по черзі відкриваються,

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

під'єднуючи обмотки 1 до джерела постійної напруги «плюс» і «мінус». Через обмотки проходить струм максимальної частоти, що викликає максимальні втрати і інтенсивне нагрівання рідини в трубах.

Коли температура досягне певного рівня, датчик температури 8 змінює свій стан. Нуль-орган порівнює $U_{зад}$ з сигналом зворотного зв'язку і змінює $U_{упр}$, що знижує частоту генератора 14, частоту комутації транзисторів 11, втрати в нагрівачі і стабілізує температуру самої рідини.

При збільшенні витрати рідини температура знижується, сигнал зворотного зв'язку, в свою чергу, зменшується, сумарний сигнал керування $U_{упр}$ зростає, що призводить до збільшення частоти генератора імпульсів 14 і, відповідно, частоти комутації транзисторів 11, збільшуючи втрати і стабілізуючи температуру.

Варто звернути увагу на низькочастотний індукційний нагрівач, загальний вигляд якого представлено на рисунку 1.7 [4].

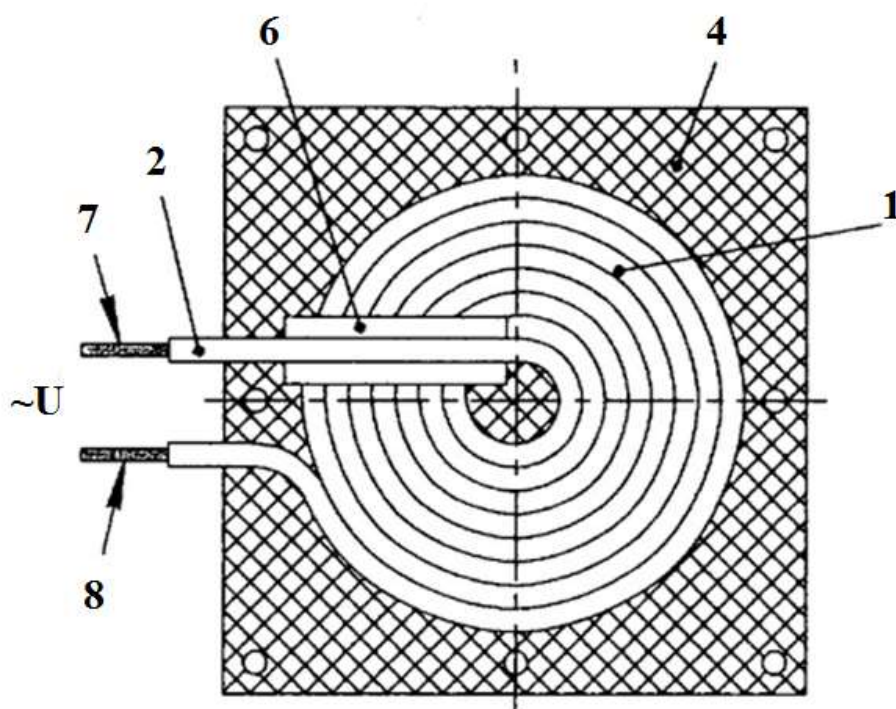


Рисунок 1.7 – Загальний вид низькочастотного індукційного нагрівача

Завдяки можливості застосовувати нагрівач як самостійний прилад, підвищується зручність його експлуатації, поскільки спрощуються роботи з його встановлення, що, в свою чергу, знижує витрати часу.

Зазначений нагрівач легко переносити і встановлювати в будь-якому приміщенні для нагрівання повітря, або занурювати в рідину в ємності для її нагрівання без потреби закріплення нагрівача на поверхні сталевих ємностей. На рисунку 1.7 представлено загальний вигляд нагрівача, який вміщує одну котушку, де металеві листи жорстко з'єднані між собою заклепками.

Нагрівач, що пропонується, може бути виконаний з однією або декількома котушками. Кожна котушка 1 зроблена у вигляді одношарової Архімедової спіралі з електропровідного матеріалу 2 із зовнішньою ізоляцією з малим питомим електроопором. Котушки 1 мають електричний зв'язок між собою і скріплені в одношарове індукційне полотно 4 за допомогою електро ізоляційного матеріалу 3. Електричне з'єднання котушок 1 виконано таким же електропровідним матеріалом 2, з якого виготовлені самі котушки 1. Місця спайок 5 (з'єднань) проводів котушок визначаються схемами їхнього електричного з'єднання в кожному нагрівачі.

Котушки 1 можуть бути розміщені по площі одношарового індукційного полотна 4 в один або декілька рядів. Розміри індукційного полотна 4, кількість котушок 1 на його площі, геометричні розміри котушок 1 і схеми їхнього електричного з'єднання підбираються окремо для кожного типу нагрівача в залежності від місця встановлення, умов роботи і потрібної потужності.

Між котушкою 1 і виводами дротів від її початку встановлена додаткова ізоляція 6. Вихідні кінці 7 і 8 котушок 1 виготовлені з можливістю під'єднання нагрівача до джерела електричного струму промислової частоти.

В кожному варіанті виконання нагрівача з обох сторін індукційного полотна 4 встановлені листи 9 і 10 з чорного металу, наприклад, сталеві листи. Листи 9 і 10 жорстко з'єднані між собою так, що внутрішня поверхня кожного з них повністю стикається з бічною поверхнею 11 і 12 індукційного полотна 4.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Жорстке з'єднання листів 9 і 10 може бути виконано з використанням з'єднувальних елементів 13, таких як заклепки, або шляхом завальцювання одного листа іншим чи іншими методами з'єднання.

В якості електроізоляційного матеріалу 3 можуть бути застосовані склопластик, матеріал на основі силіконової гуми або інший ізоляційний матеріал.

Нагрівач, що пропонується може бути встановлений у будь-якому положенні: вертикально, похило, горизонтально. Він може бути підвішений, закріплений на стінці або встановлений на підлозі на ніжках чи підставках для обігрівання житлових і службових приміщень, кабін і вагончиків. Крім цього, його можна застосовувати для тимчасового або постійного (до декількох років) нагрівання і підтримання заданої температури будь-яких рідких продуктів у ємкостях шляхом повного занурення нагрівача в ці рідини.

Функціональна схема індукційного котла, зображена на рисунку 1.8 [5].

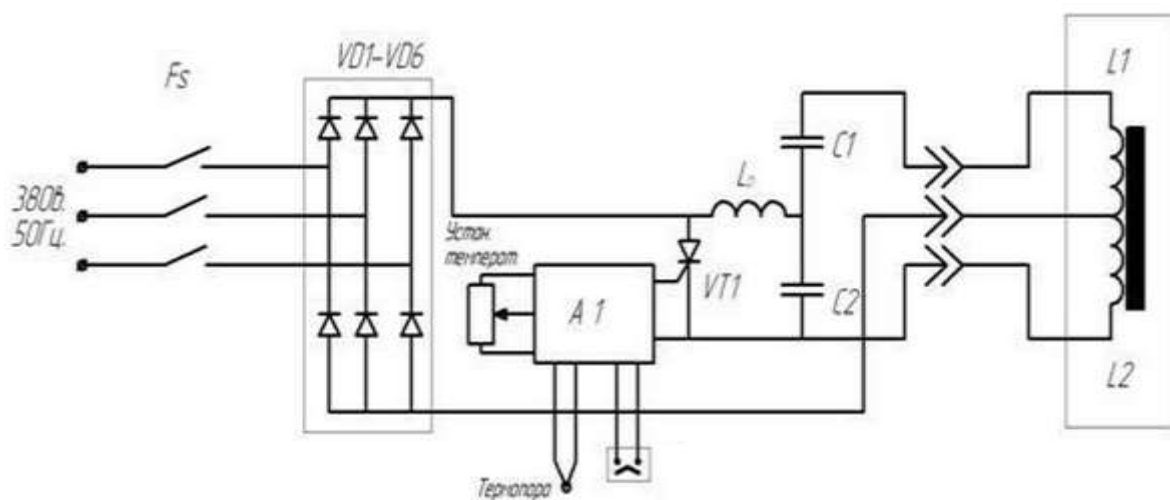


Рисунок 1.8 – Функціональна схема індукційного котла

Трьох фазна напруга живлення від електричної мережі випрямляється модулем VD1-VD6 і, маючи пульсації всього 14% від номінального значення 530 В, живить електронну схему перетворювача за схемою Фітч-Говелл. Струм заряджає конденсатори C1 і C2 у протилежних напрямках, що веде до різної полярності напруг на них, при цьому на вході в індуктор нагріву L1 і L2 напруга рівня-

ється нулю. Баластом для заряду конденсаторів виступає сам індуктор, який обмежує струм заряду. Практично вся енергія магнітного поля перетворюється на теплову енергію в трубках, а індуктор діє як резистор з електротехнічної точки зору. Це дозволяє застосовувати цикл заряду для нагрівання, при цьому заряд конденсаторів здійснюється до напруги, що не перевищує напруги живлення.

Якщо після цього на керуючий електрод тиристора VT1 подати сигнал включення, він відкриється і з'єднає протилежні полюси конденсатора C2 між собою через розрядну індуктивність L_r . Це створює паралельний коливальний контур, і конденсатор C2 починає перезаряджатися до повної інверсії напруги на його полюсах. Цей процес триває декілька десятків мікросекунд і залежить від величини ємності C2 та індуктивності L_r . Після перезарядження конденсатори C1 і C2 підключаються послідовно, і напруга на їхніх виходах стає рівною подвійній напрузі зарядки, тобто до 1000 В. Через обмотки індуктора L1 і L2 починає протікати струм, який створює вихрові струми в трубках і нагріває їх.

Тиристор VT1, що перебуває під зворотною полярністю напруги, через певний час вимикається і відновлює свої ізолюючі властивості до подачі наступного імпульсу запуску.

Таким чином, нагрівання труб проходить як під час зарядки, так і під час розрядки ємностей.

Теплова потужність, що виділяється в трубках нагрівача, залежить від частоти повторення циклів та може досягати 3-5 кГц при застосуванні звичайних тиристорів.

Пристрій А1 (електронний блок керування) призначений для керування імпульсами запуску тиристора відповідно до заданої температури, регулювання частоти в залежності від різниці між заданою і фактичною температурами теплового носія, а також для вимкнення системи при перегріванні індуктора.

Заслужує на увагу винахід (рис. 1.9) [6], який належить до теплотехніки і може застосовуватися для генерації великих теплових потоків, обігріву приміщень на підприємствах, у житлових будинках, а також для гарячого водопостачання в промисловості та сільському господарстві.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

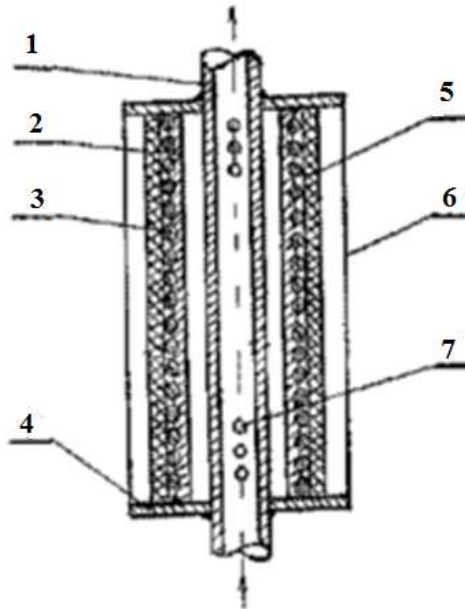


Рисунок 1.9 – Індукційний нагрівач

Індукційний нагрівач складається з теплоприймаючого осердя (1, 2) у вигляді двох коаксіально розташованих труб. На бічній зовнішній поверхні трубки 2 з більшим діаметром зроблені гвинтові канали, покриті електроізоляцією (наприклад, тонкий шар оксиду алюмінію). У каналах розміщений нагрівальний елемент 3 - витки металевого дроту. Фланці 4 зварюванням з'єднують труби (1, 2) осердя, яке також включає теплову ізоляційну трубку 5, отвір 7 та теплоізоляційний корпус 6.

При проходженні електричного струму по витках нагрівального елемента, вони, в свою чергу, нагріваються до температури 200-300 °С, передаючи тепло осердю, що складається з труб 1 і 2. Водночас змінне магнітне поле нагріває осердя, а сумарне тепло передається теплоносію (воді), який заповнює внутрішню частину індукційного нагрівача. В свою чергу нагріта вода через вихідний патрубок подається в систему опалення.

На рисунку 1.10 представлена схема пристрою індукційного нагрівання з секційним індуктором [7].

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

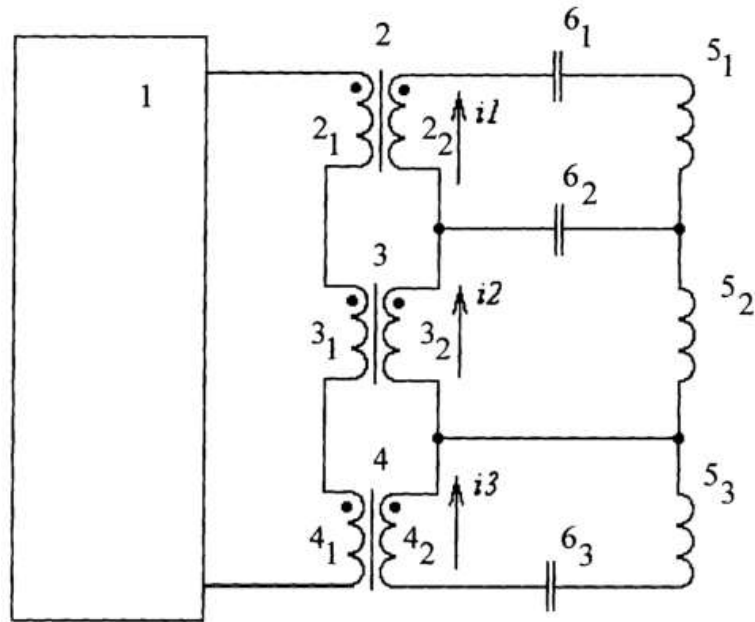


Рисунок 1.10 – Схема пристрою індукційного нагріву з секційним індуктором

Винахід відноситься до індукційного нагрівання, зокрема до пристроїв індукційного нагрівання з багатосекційним індуктором, де нагрівання різних зон нагрівального об'єкта, відповідних різним секціям індуктора, проводиться до різних температур.

Напруга від джерела 1 поступає на трансформатори 2, 3, 4, які по входу з'єднані послідовно, а по вторинній стороні живлять відповідні секції індуктора 51, 52, 53. Таке під'єднання трансформаторів дає змогу задавати коефіцієнтами трансформації будь-яку кратність струмів у секціях, а відповідно і необхідний розподіл потужності в індукторній системі. Для компенсації реактивної енергії секцій індуктора в прилад включені ємності 6, щоб не було контуру, що з'єднує секцію і обмотку, що живить без резонансної ємності. Це дозволяє компенсувати індуктивну напругу кожної секції шляхом підбирання відповідної ємності. Особливість такої компенсації полягає в тому, що деякі ємності є спільними для двох сусідніх секцій, тому для повної компенсації індуктивної енергії кожної секції ємності розраховуються відповідно до умови послідовного резонансу, з якої ви-

пливає, що реактивна напруга секції має бути рівною сумарному падінню напруги на ємкостях.

Особливою популярністю користується індукційний вихровий нагрівач, який може застосовуватися для обігріву приміщень [8]. Пристрій зображений на рисунку 1.11.

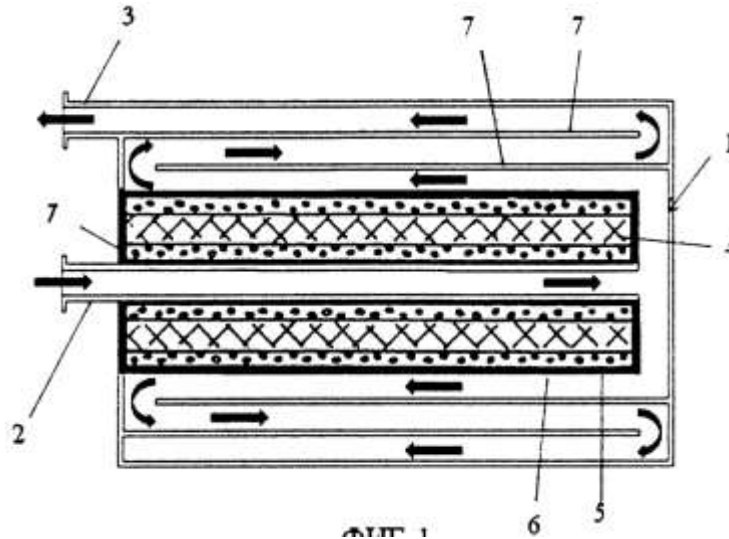


Рисунок 1.11 – Вихровий індукційний нагрівач

Нагрівач конструктивно виконаний у вигляді мідної котушки, що є первинною обмоткою з мідного дроту, розташованою всередині трубки. Вторинна обмотка представлена теплообмінним пристроєм, через який проходить теплоносій, що нагріває. Параметри котушки, осердя і теплообмінного пристрою розраховані таким чином, щоб забезпечити тривалу роботу нагрівача без перегрівання. Генератор призначений для нагрівання рідини (води, повітря, олії, антифризу) з мінімальними витратами енергетичних ресурсів і максимальним терміном служби нагрівача.

Індукційний генератор (нагрівач) складається з магнітопровідної циліндричної ємності 1, на протилежних кінцях якої, або з одного боку, є патрубки 2 і 3 для під'єднання до основного трубопроводу. Вхідний патрубок 2 розташований внизу або по центру ємності, а вихідний патрубок 3 знаходиться зверху.

Всередині ємності 1 закріплена внутрішня індукційна обмотка 4 з мідного дроту, що поміщена в герметичний тороїдальний циліндричний корпус 5, з

електро тепло ізоляційними прокладками б всередині та ззовні нього. Якщо пристрій містить дві або більше внутрішніх індукційних обмоток, кожна з них розташовується в окремому корпусі з прокладками. Вони закріплюються всередині циліндричної магнітопровідної ємності 1 концентрично одна в іншій із зазором між ними, або одна над іншою із зазором, або послідовно одна за одною. Також можна застосовувати три котушки на три фази для більш високих потужностей і рівномірного навантаження на електричну мережу.

Ємність 1 складається з чотирьох труб 7 різного діаметру, зварених співвісно для утворення лабіринтового проходу для теплоносія (повітря, води, олії, антифризу) з рівними проміжками між трубами. Обмотка 4 розташована всередині труб і залита епоксидною смолою, що забезпечує надійний захист від перегріву. Обмотка з внутрішнім проходом може охоплювати одну з труб.

У нагрівачі змінне магнітне поле впливає на структуру металу, нагріваючи його до 40 градусів за Цельсієм, що зменшує опір котушки і споживану потужність завдяки розігрітому металу. У цій конструкції використовується як зовнішнє магнітне поле, так і внутрішнє від первинної обмотки, що дозволяє обійтися без сердечника, спрощуючи конструкцію нагрівача і підвищуючи його теплопродуктивність.

1.4 Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто способи обігрівання приміщень та конструкції індукційних нагрівальних установок. Виявлено, що вони є перспективними, оскільки мають високий коефіцієнт корисної дії [23, 24, 29], компактні розміри. Це дозволяє розміщувати індукційні нагрівальні установки в приміщеннях будь-яких розмірів. Вони мають високу швидкість нагріву теплоносія. У них відсутня інерція при їх вимкненні. На основі огляду та аналізу наявних ІНУ було запропоновано розробити індукційну нагрівальну установку для обігрівання приміщень.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ

2.1 Розробка електричної структурної схеми індукційного нагрівального приладу

В результаті огляду та проведеного аналізу були розглянуті відомі схеми та конструкції індукційних нагрівальних пристроїв. Їх основними недоліками є відсутність можливості регулювання температури та їх впливу на роботу електричної мережі живлення. Тому виникла потреба створити конструкцію, яка б не мала вище зазначених недоліків.

На першому етапі проектування було розроблено структурну схему індукційного приладу, що представлена на рисунку 2.1 (аркуш [БРМА24.00.00.000Е1]).

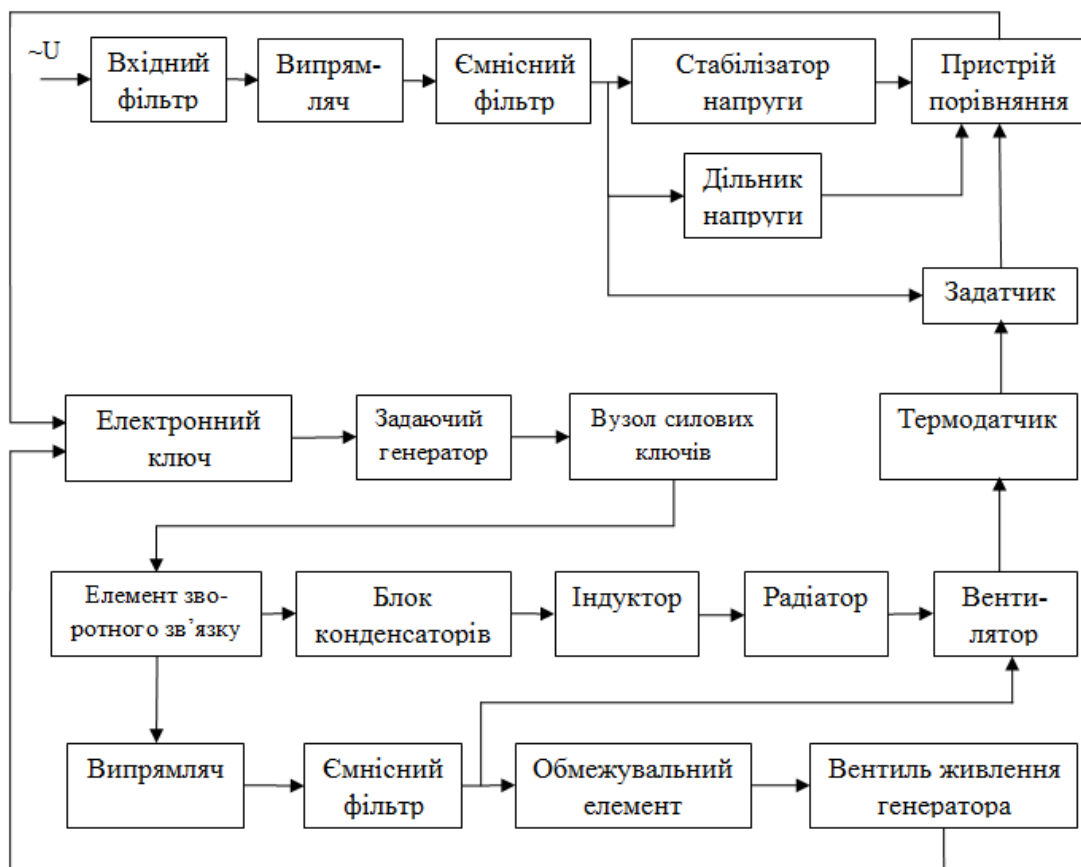


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи управління індукційним нагрівальним приладом

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Живлення схеми здійснюється від мережі змінного струму. Для зменшення перешкод встановлений вхідний фільтр. Змінна напруга подається на діодний міст, який, в свою чергу, випрямляє її. Для зменшення пульсацій випрямленої напруги в схемі встановлено ємнісний фільтр. Стабілізатор напруги використовується для живлення елементів схеми управління стабілізованою постійною напругою. Дільник напруги і задатчик використовуються для установки потрібного теплового режиму роботи, сигнали з якого поступають на вузол елемента порівняння. Електронний ключ застосовується для подачі напруги живлення на інтегральну мікросхему. Задаючий генератор створений на інтегральній мікросхемі і призначений для генерування електричних коливань. Вузол силових ключів побудований по мостовій схемі. Плечима схеми є транзистори. Елементом зворотного зв'язку для живлення схеми стабілізатора вентилятора використовується трансформатор струму. Індуктор застосовується для нагріву радіатора вихровими струмами високої частоти. Блок конденсаторів разом з індуктором утворюють вихідний коливальний контур. Підбір кількості конденсаторів обумовлений необхідною ємністю для забезпечення резонансу контуру на потрібну частоту.

2.2 Розробка електричних схем вузлів системи керування індукційним нагрівальним приладом

2.2.1 Розробка електричної схеми вузлів вхідного фільтра, випрямляча, ємнісного фільтра

Оскільки в процесі роботи індуктора генеруються високочастотні коливання, в колі живлення індуктора необхідно встановити електричний фільтр L1 для захисту від проникнення перешкод у електричну мережу. Для захисту схеми від коротких замикань використовується запобіжник FU1. Для перетворення змінної напруги мережі на постійну пульсуючу напругу застосовується діодний міст VD1. Електрична схема вузла показана на рисунку 2.2.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

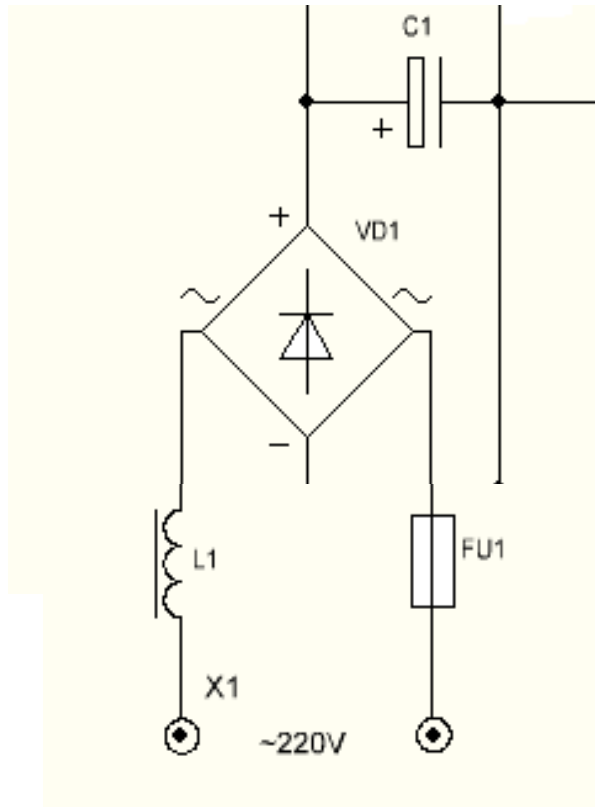


Рисунок 2.2 – Електрична схема вузлів вхідного фільтра, випрямляча, ємнісного фільтра

В якості ємнісного фільтра застосовується конденсатор С1, який використовується для згладжування пульсацій напруги.

2.2.2 Розробка електричної схеми вузла стабілізатора напруги

Для живлення схеми керування постійною стабілізованою напругою передбачений вузол стабілізатора напруги, основними елементами якого є стабілітрон VD2 і регулюючий транзистор VT1. Опори R3, R6, R9 виконують функцію баластних резисторів. Резистор R1 задає зміщення напруги на базу транзистора VT1 відносно його емітера. Електролітичні конденсатори C2 і C3 служать фільтром напруги на виході параметричного стабілізатора. Електрична схема вузла стабілізатора напруги показана на рисунку 2.3.

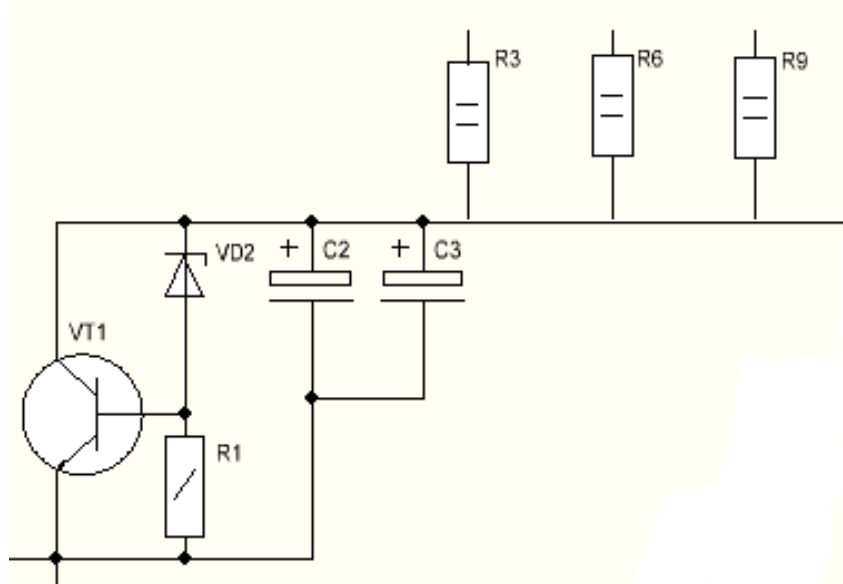


Рисунок 2.3 – Електрична схема вузла стабілізатора напруги

2.2.3 Розробка електричної схеми вузлів дільника напруги, пристрою порівняння, задатчика, термодатчика

Розроблені вузли побудовані на операційному підсилювачі DA1, що виконує роль компаратора та транзисторі VT3 (рис. 2.4).

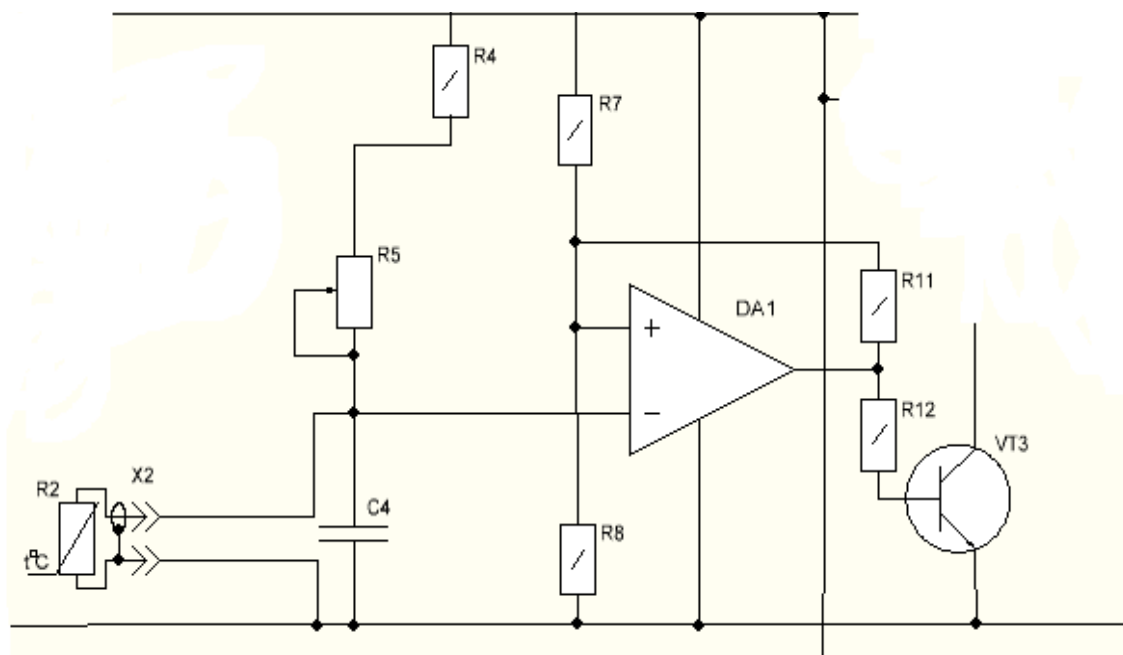


Рисунок 2.4 – Електрична схема вузлів дільника напруги, пристрою порівняння, задатчика, термодатчика

Режим роботи операційного підсилювача DA1 визначається дільником напруги на резисторах R4, R5, R2, який встановлює напругу на інвертуючому вході, та дільником на резисторах R7, R8, який встановлює напругу на неінвертуючому вході. Терморезистор R2 розміщується за вентилятором примусового охолодження і контролює температуру в приміщенні. Якщо температура нижча від заданої резистором R5, то на інвертуючому вході компаратора DA1 напруга стає вищою, ніж на неінвертуючому вході. Відповідно, на виході компаратора DA1 з'являється напруга, близька до нульової, і транзистор VT3 закривається, підвищуючи напругу на його колекторі, що в подальшому керує транзистором VT2. Конденсатор C4 згладжує пульсації напруги на терморезисторі R2.

2.2.4 Розробка електричної схеми вузла електронного ключа

Вузол електронного ключа використовується для подачі напруги живлення на інтегральну мікросхему DD1. В якості електронного ключа застосовується транзистор VT2, електрична схема якого показана на рисунку 2.5.

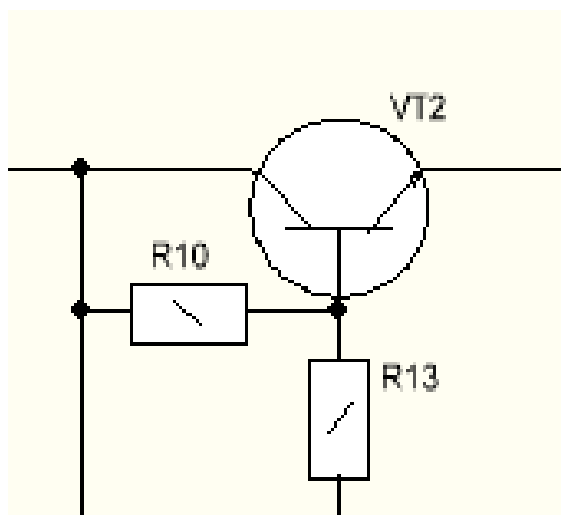


Рисунок 2.5 – Електрична схема вузла електронного ключа

Робота ключа керується напругою з колектора транзистора VT3. При закритті транзистора VT3 напруга на його колекторі збільшується, в результаті чого транзистор VT2 відкривається. Напруга із стабілізатора поступає на мікрос-

хему генератора DD1. В результаті генератор запускається і починає генерувати напругу керування силовими ключами.

2.2.5 Розробка електричної схеми вузла задаючого генератора

Вузол генератора, що задає побудований на інтегральній мікросхемі DD1 (рис. 2.6). Конденсатори C5, C6 разом із резисторами R14, R15 утворюють коливальний контур, що задає частоту роботи генератора. Конденсатори включені паралельно, що дає можливість підбирати ємність частото задаючого кола.

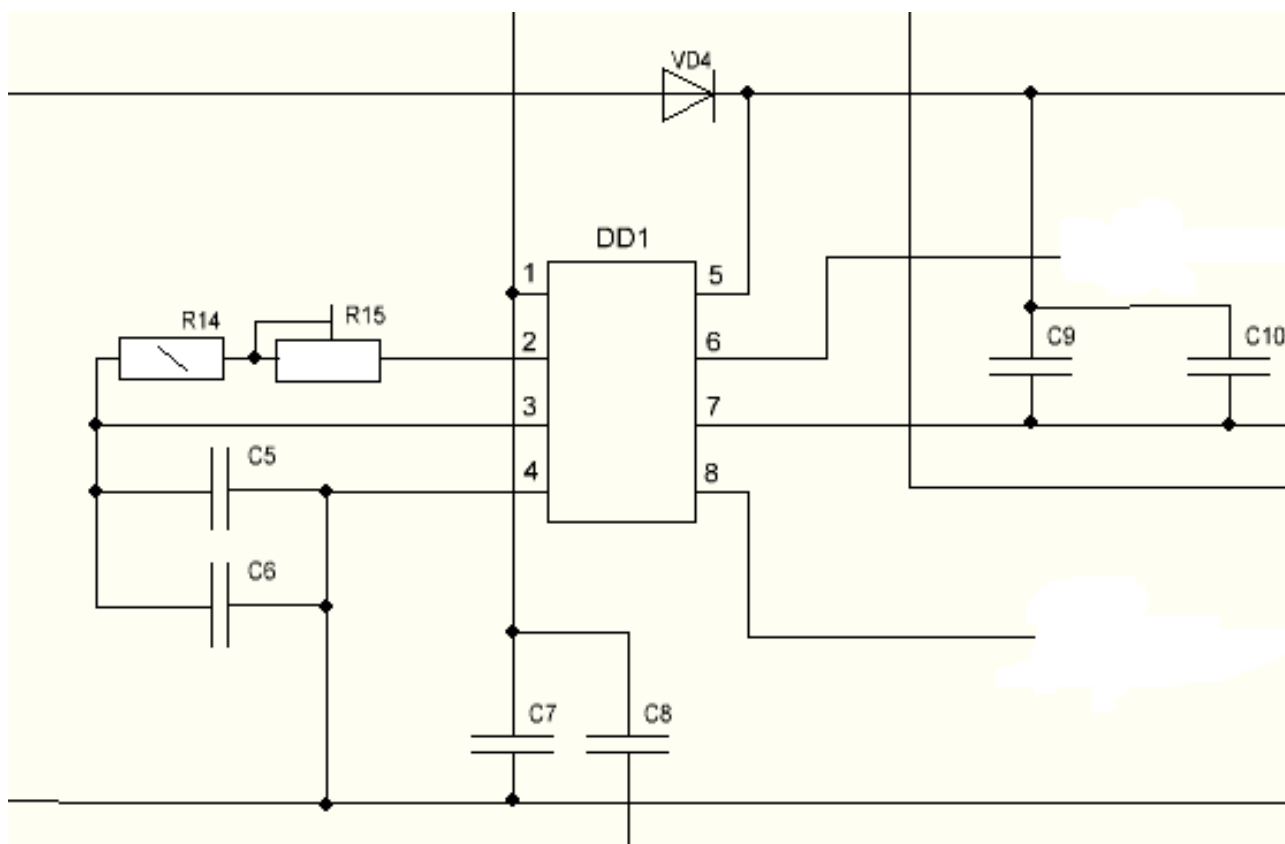


Рисунок 2.6 – Електрична схема вузла задаючого генератора

За допомогою резистора R15 можна налаштувати частоту генератора і визначити необхідність встановлення конденсатора C6. Конденсатори C7, C8, C9 і C10 є елементами ємнісного фільтра. Якщо температура в приміщенні підвищується до такого рівня, що опір терморезистора зменшується настільки, що напруга на інвертуючому вході операційного підсилювача стає нижчою, ніж на не-

інвертуючому, то на виході компаратора DA1 формується низька напруга, близька до напруги живлення. В результаті транзистор VT3 відкривається, і на його колекторі з'являється напруга, близька до нуля, що призводить до зменшення напруги на базі транзистора VT2, і він закривається. У результаті мікросхема генератора DA1 самоблокується і перестає генерувати електричні коливання.

2.2.6 Розробка електричної схеми вузла силових ключів

Вузол силових ключів побудований на основі мостової схеми плечима якої є транзистори VT4, VT5, VT8 і відповідно VT6, VT7, VT9. Електрична схема вузла силових ключів представлена на рисунку 2.7.

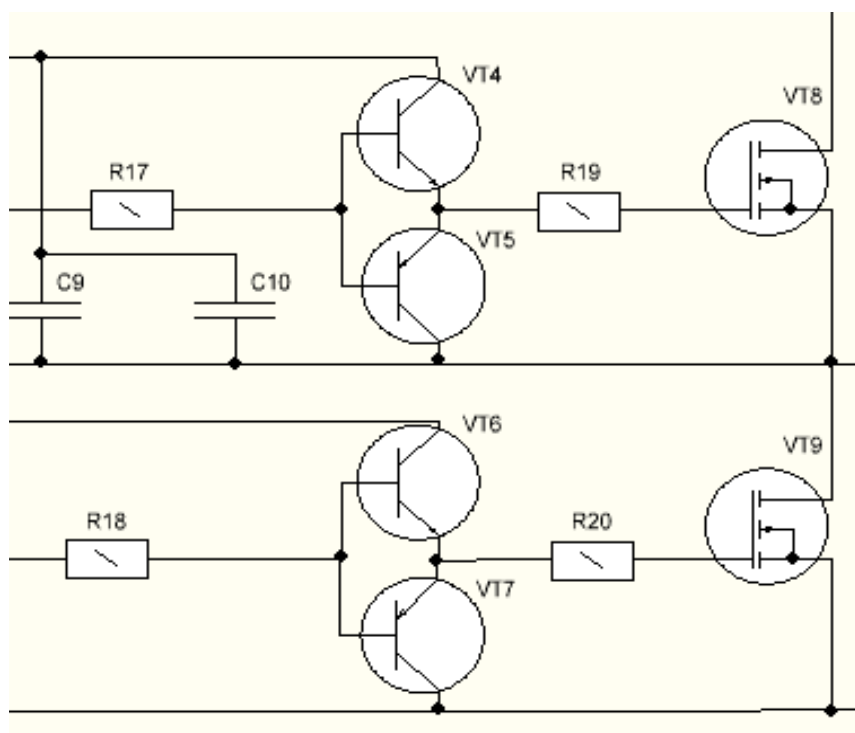


Рисунок 2.7 – Електрична схема вузла силових ключів

Транзистори VT4, VT5, а також VT6, VT7 утворюють комплементарні пари. В якості вихідних транзисторів VT8, VT9 застосовуються високовольтні польові транзистори IGBT. Високочастотна вихідна напруга вузла через трансформатор струму поступає на індуктор.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.2.7 Розробка електричної схеми вузлів елемента зворотного зв'язку та індуктора

Трансформатор струму використовується в якості елемента зворотного зв'язку для живлення схеми стабілізатора вентилятора. Із задаючого генератора на індуктор йдуть високочастотні коливання, в наслідок цього утворюються вихрові струми високої частоти, які і нагрівають стальний радіатор. Електрична схема вузлів наведена на рисунку 2.8.

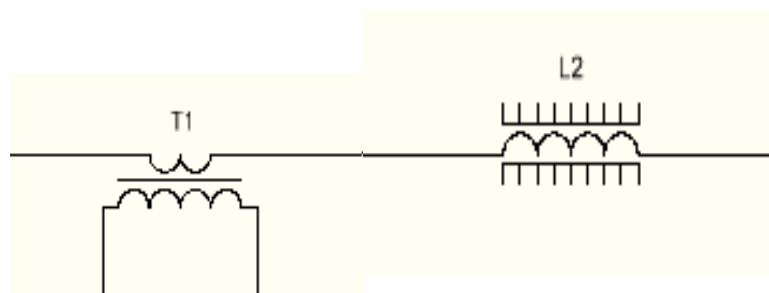


Рисунок 2.8 – Електрична схема вузлів елемента зворотного зв'язку та індуктора

2.2.8 Розробка електричної схеми вузла блоку конденсаторів

Блок конденсаторів з індуктором формують вихідний коливальний контур, який складається із восьми паралельно з'єднаних конденсаторів C17-C24. Вузол показаний на рисунку 2.9.

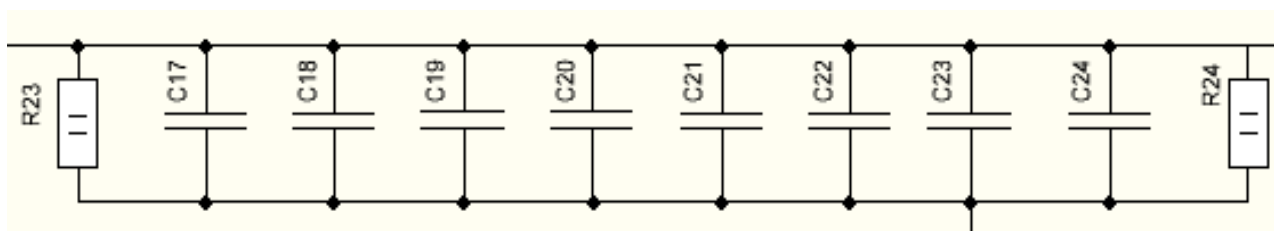


Рисунок 2.9 – Електрична схема вузла блоку конденсаторів

Кількість конденсаторів визначається внутрішнім опором вихідного контура, великими струмами, що проходять через них, та необхідністю запобігти їх

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

перегріву. Підбір кількості конденсаторів здійснюється відповідно до необхідної ємності для забезпечення резонансу контура на потрібну частоту. Якщо частота задаючого генератора на мікросхемі DD1 буде вищою за частоту вихідного контура, продуктивність індуктора буде нижчою, оскільки його магнітне поле не досягатиме максимального значення. Якщо ж частота задаючого генератора буде нижчою за резонансну частоту вихідного контура, котушка почне діяти як активний опір, а не як реактивний. Це призведе до того, що через силові транзистори VT8 і VT9 прохідимуть великі струми, що може призвести до їх перегріву і виходу з ладу. Резистори R23 і R24 шунтують блок вихідних конденсаторів і служать для обмеження та вирівнювання напруги на них.

2.2.9 Розробка електричних схем вузлів вентиллятора, ємнісного фільтра, обмежувального елемента, вентиля живлення генератора

Електрична схема вузлів показана на рисунку 2.10. Вона живиться напругою, що поступає з трансформатора струму T1.

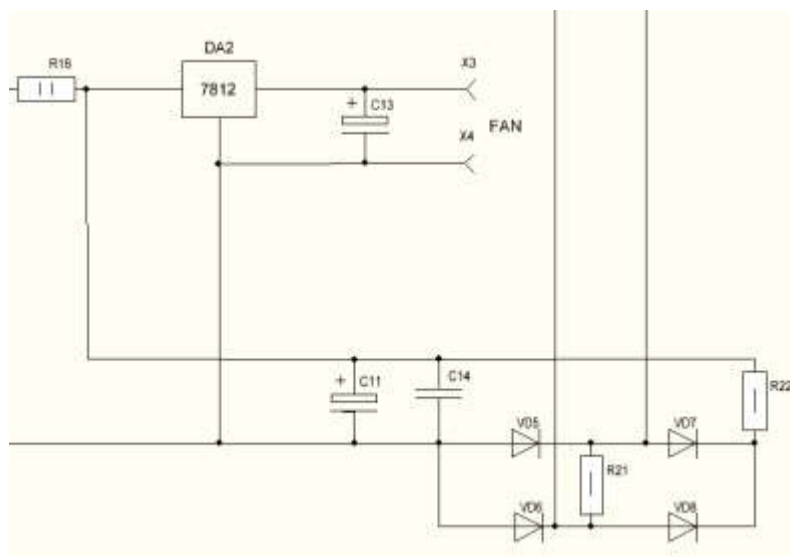


Рисунок 2.10 – Електрична схема вузлів вентиллятора, ємнісного фільтра, обмежувального елемента, вентиля живлення генератора

Напруга з вторинної обмотки трансформатора T1 надходить на діодний міст VD5-VD8. Резистор R21 є навантажувальним. Резистор R22 разом з конден-

саторами C11 і C12 утворюють ємнісний фільтр, напруга з якого надходить на мікросхему стабілізатора DD2. Стабілізована напруга зі стабілізатора згладжується фільтром C13 і використовується для живлення вентилятора. Крім того, напруга через обмежувальний резистор R16 і діод VD3 надходить на живлення плати управління під час роботи генератора. Це важливо, оскільки під час запуску генератора драйвери споживають багато енергії. Напруги резистивного дільника R3, R6, R9 може бути недостатньо, якщо напруга в мережі буде нижчою за 200 В.

2.3 Розробка електричної схеми індукційної нагрівальної установки

На основі розроблених електричних вузлів структурної схеми створено принципову електричну схему ІНУ, яка зображена на рисунку 2.11 (аркуш [БРМА24.00.00.000ЕЗ]).

В процесі роботи індуктора генеруються високочастотні коливання, які можуть проникати в електричну мережу та створювати перешкоди в роботі побутової електронної апаратури. Для запобігання цьому в колі живлення індуктора використовується електричний фільтр на дроселі L1. Як елемент захисту від коротких замикань застосовується запобіжник FU1. Для перетворення змінної напруги мережі в постійну пульсуючу напругу використовується діодний міст VD1. Пульсації вихідної напруги згладжуються ємнісним фільтром на конденсаторі C1.

Параметричний стабілізатор служить для живлення елементів схеми керування стабілізованою постійною напругою 15 В. Основними елементами параметричного стабілізатора є стабілітрон VD2 та регулюючий транзистор VT1. Опори R3, R6, R9 виконують роль баластних резисторів. Резистор R1 задає зміщення напруги на базу транзистора VT1 відносно його емітера. Електролітичні конденсатори C2 і C3 виконують роль фільтра напруги на виході параметричного стабілізатора.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

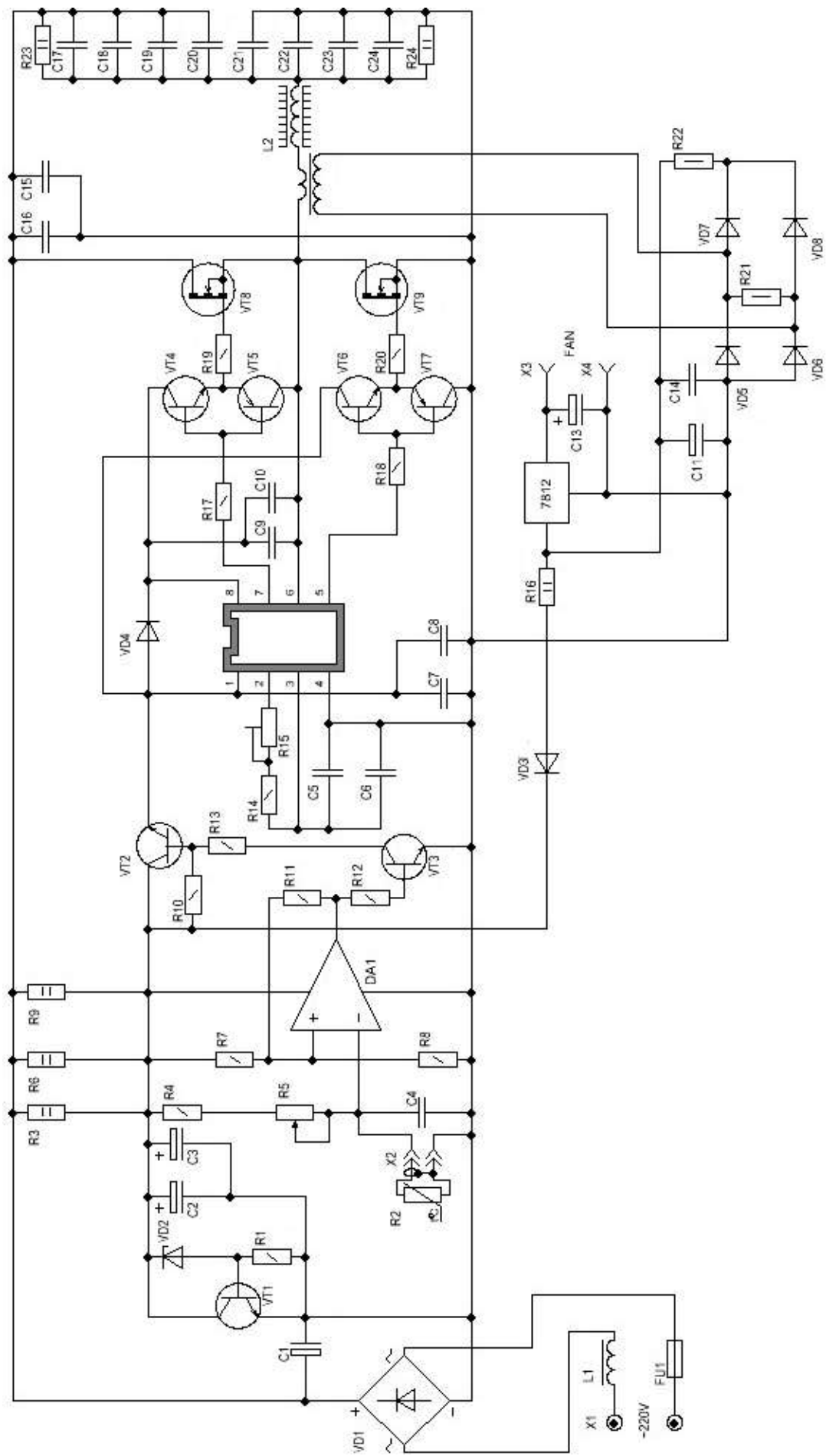


Рисунок 2.11 – Схема електрична принципова індукційної нагрівальної установки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

37

Вузол терморегулятора побудований на операційному підсилювачі DA1, який виконує роль компаратора, та транзисторі VT3. Режим роботи операційного підсилювача DA1 визначається дільником напруги R4, R5, R2, який встановлює напругу на інвертуючому вході, та дільником на резисторах R7 і R8, який встановлює напругу на неінвертуючому вході. Терморезистор R2 встановлюється за вентилятором примусового охолодження і контролює температуру в приміщенні. Якщо температура нижча від заданої резистором R5, то на інвертуючому вході компаратора DA1 напруга стає вищою, ніж на неінвертуючому вході. В результаті на виході компаратора DA1 з'являється напруга, близька до нульової, і транзистор VT3 закривається, підвищуючи напругу на його колекторі, яка надалі керує транзистором VT2. Конденсатор C4 згладжує пульсації напруги на терморезисторі R2.

Електронний ключ на транзисторі VT2 служить для подачі напруги живлення на інтегральну мікросхему DD1. Робота ключа керується напругою з колектора транзистора VT3. При закритті транзистора VT3 напруга на його колекторі збільшується, внаслідок чого транзистор VT2 відкривається, і напруга з параметричного стабілізатора надходить на мікросхему генератора DD1. В результаті генератор запускається і починає генерувати напругу для управління силовими ключами.

Задаючий генератор побудований на інтегральній мікросхемі DD1. Конденсатори C5 і C6 разом з резисторами R14 і R15 утворюють коливальний контур, який задає частоту роботи генератора. Конденсатори увімкнені паралельно, що дає можливість підбирати ємність частото задаючого ланцюга. Резистором R15 можна налаштовувати частоту генератора та визначати необхідність встановлення конденсатора C6. Конденсатори C7, C8, C9 і C10 є елементами ємнісного фільтра. Якщо температура в приміщенні підвищується до такого рівня, що опір терморезистора зменшується настільки, що напруга на інвертуючому вході операційного підсилювача стає нижчою, ніж на неінвертуючому вході, то на виході компаратора DA1 формується низька напруга, близька до напруги живлення. Відповідно, транзистор VT3 відкривається, і на його колекторі з'являється на-

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пруга, близька до нуля, що призводить до зменшення напруги на базі транзистора VT2, і він закривається. У результаті мікросхема генератора DD1 самоблокується і перестає генерувати електричні коливання.

Вузол силових ключів побудований за мостовою схемою, в якій плечима виступають транзистори VT4, VT5, VT8 та VT6, VT7, VT9. Транзистори VT4 і VT5, а також VT6 і VT7 утворюють комплементарні пари. Як вихідні транзистори VT8 і VT9 використовуються високовольтні польові транзистори IGBT. Вихідна високочастотна напруга вузла через трансформатор струму надходить на індуктор.

Блок конденсаторів з індуктором утворюють вихідний коливальний контур, який складається з восьми паралельно з'єднаних конденсаторів C17-C24. Кількість конденсаторів визначається необхідною ємністю для забезпечення резонансу контура на потрібну частоту. Якщо частота задаючого генератора на мікросхемі DD1 буде вищою за частоту вихідного контура, продуктивність індуктора буде нижчою, оскільки його магнітне поле не досягатиме максимального значення. Якщо ж частота задаючого генератора буде нижчою за резонансну частоту вихідного контура, котушка почне діяти як активний опір, а не як реактивний. Це призведе до того, що через силові транзистори VT8 і VT9 проходять великі струми, що може спричинити їх перегрів і вихід з ладу. Резистори R23 і R24 шунтують блок вихідних конденсаторів і служать для обмеження та вирівнювання напруги на них.

Режим роботи трансформатора T1 є досить важким, тому для розвантаження його магнітна система повинна мати зазор. Напруга з вторинної обмотки трансформатора T1 надходить на діодний міст VD5-VD8. Резистор R22 разом з конденсаторами C11 і C12 утворюють ємнісний фільтр, напруга з якого надходить на мікросхему стабілізатора DD2 і згладжується фільтром C13. Крім того, напруга через обмежувальний резистор R16 і діод VD3 надходить на живлення плати керування під час роботи генератора, оскільки, коли він запускається, драйвери споживають багато енергії, і напруги резистивного дільника R3, R6, R9 може бути недостатньо, якщо напруга в мережі буде нижчою за 200 В.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Розробка елементів конструкції індукційного нагрівального приладу

Аналізуючи відомі конструкції індукційних нагрівальних приладів, було запропоновано розробити наступні елементи конструкції. Індуктор (рис. 2.12, аркуші [БРМА24.00.00.000ДІ]) представляє собою плоску котушку діаметром 160 мм, яка складається з витків багатожильного мідного дроту товщиною 2 мм і поміщена в спеціальний пластиковий корпус. Багатожильний дріт покритий електроізоляційним лаком для запобігання короткому замиканню та пробією струму на радіатор.

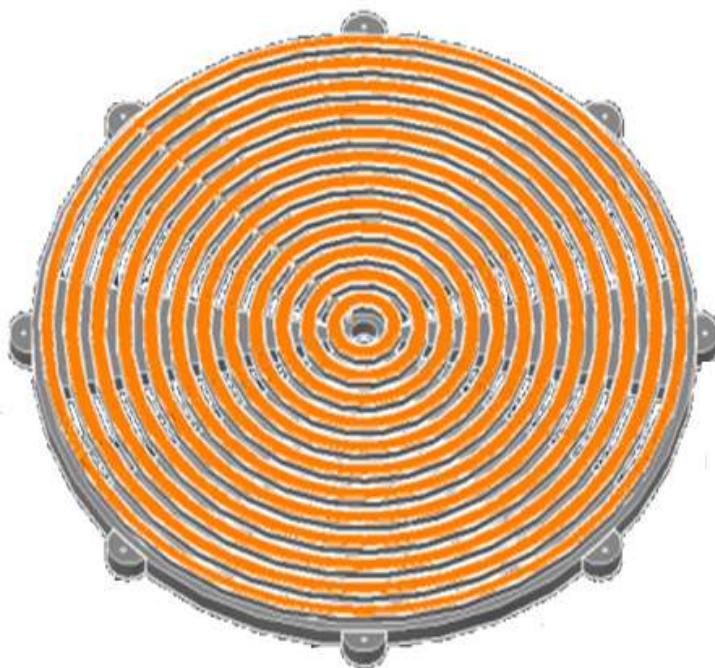


Рисунок 2.12 – Зовнішній вигляд індуктора

Передбачається, що радіатор, який нагрівається, представляє собою лист сталі марки Ст.45 (рис. 2.13, аркуші [БРМА24.00.00.000ДІ]) у формі квадрату розмірами 2 x 430 x 430 мм. На нього приварена металева труба прямокутного перерізу розмірами 20 x 30 x 430 мм. Радіатор покритий термостійкою фарбою марки КО-813 з робочою температурою до + 600 °С. Вона також забезпечує захист від корозії і надає приладу естетичного вигляду.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

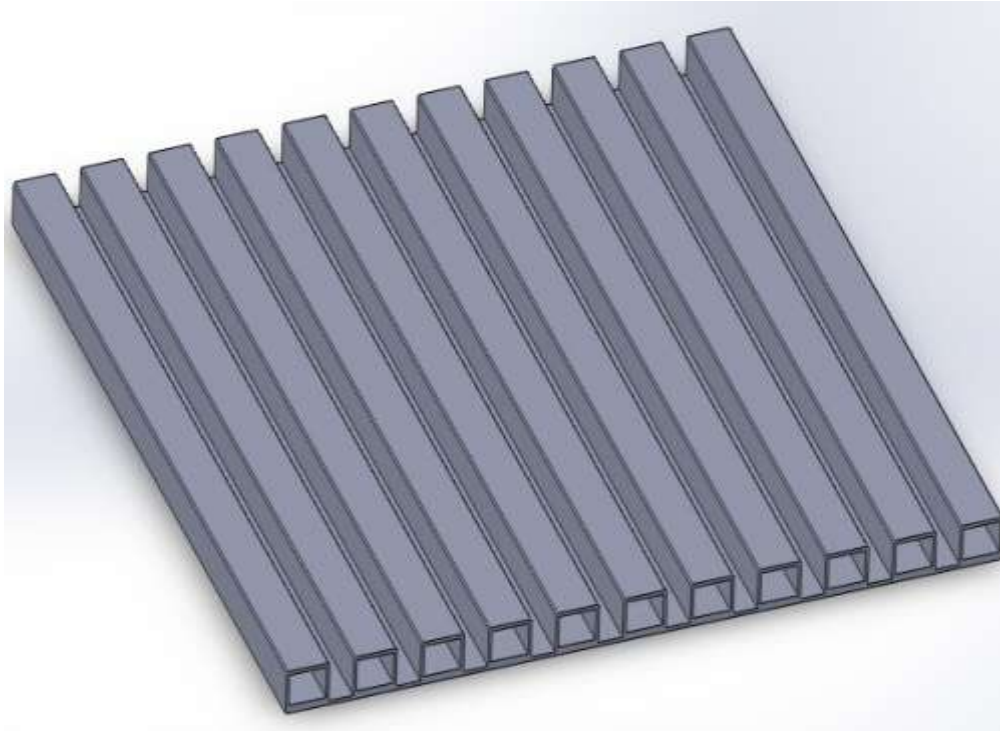


Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд радіатора

Радіатор встановлено на опорних ніжках (рис. 2.14), які виготовлені зі сталюї полоси розмірами 4 x 20 x 500 мм, марки Ст.45. Вони кріпляться до радіатора болтами, що мають діаметр 6 мм.



Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд опорних ножок

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

2.5 Розробка індукційного нагрівального приладу

На основі розроблених елементів було створено індукційний нагрівальний прилад. Габаритне креслення цього пристрою наведено на аркуші [БРМА24.00.00.000ГК].

Технічні характеристики приладу.

1. Напруга живлення однофазна змінна 220 В.
2. Частота електричної мережі 50 Гц.
3. Потужність, що споживається 2000 Вт.
4. Прилад працює в температурному режимі від 80 до 270 °С.

2.6 Розробка системи керування індукційним нагрівальним приладом

Для розробки друкованої плати використовується двосторонній склотекстоліт марки СФ2-Н035Г товщиною 1,5 мм. Конструювання елементів друкованого малюнка включає визначення ширини провідників, форми і розмірів контактних майданчиків. Ширина друкованих провідників у вузьких місцях розрахована з урахуванням густини струму 45-50 А/мм², товщина фольги становить 50 мкм. Монтажні отвори виконані відповідно до найбільш товстих і об'єднаних у групи виводів, їх діаметр становить 2 мм.

Конструкція елементів кріплення друкованої плати передбачає можливість її швидкої заміни. Електрична друкована плата з'єднується пайкою і кріпиться до корпусу гвинтами.

Монтажні отвори на рисунку 2.15 позначені умовним знаком (діаметр 2 мм при масштабі 1:1). Конструювання плати здійснювалося з урахуванням таких вимог, як мініатюризація, технологічність та надійність.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

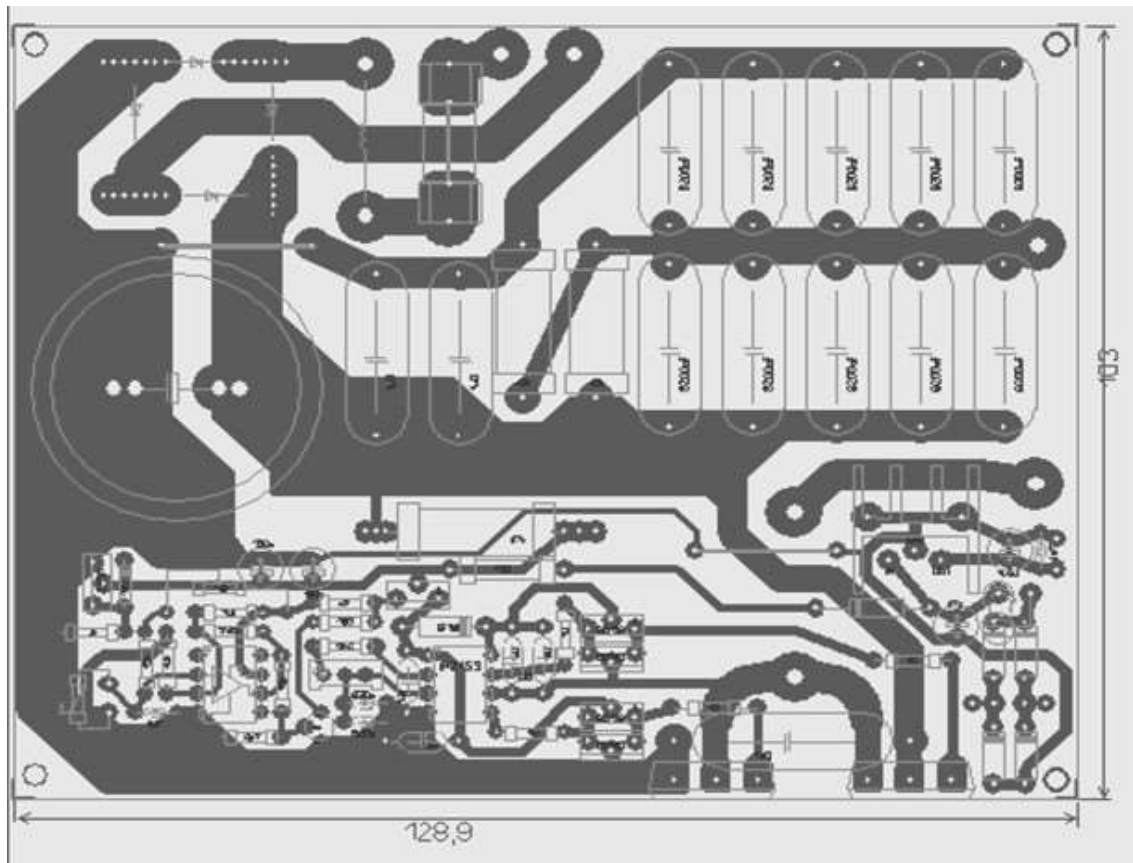


Рисунок 2.15 – Загальний вигляд друкованої плати

Встановлення радіоелементів на платі проводилося з врахуванням ряду факторів: густина монтажу, матеріал корпусу, маса радіоелементів, кількості виводів, тип плати і умовами експлуатації.

2.7 Рекомендації щодо застосування індукційного нагрівального приладу для обігріву приміщень

Для ефективного застосування індукційного нагрівального приладу для обігріву приміщень важливо дотримуватися певних рекомендацій.

Перш за все, необхідно вибрати відповідне місце для встановлення приладу. Важливо, щоб місце було добре вентиляваним, що забезпечить ефективне розсіювання тепла. Не слід встановлювати прилади в сирих або запилених приміщеннях. Це дасть змогу запобігти можливим пошкодженням.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Під час монтажу і підключення приладу обов'язково дотримуйтесь інструкції з експлуатації. Слід переконатися, що електрична мережа витримує навантаження, яке створюється приладом та використовувати належні ізоляційні матеріали для захисту електропроводки. Правильне встановлення та підключення приладу забезпечать його безпечну і стабільну роботу.

Перед початком експлуатації слід перевірити справність усіх компонентів приладу. Встановити потрібну температуру і режим роботи на панелі управління. Слід уникати різких змін температурного режиму, щоб запобігти зношуванню компонентів приладу і забезпечити його довговічність.

Безпека під час експлуатації приладу є пріоритетом. Не можна торкатися нагрівального елемента приладу під час його роботи. Слід забезпечити надійну ізоляцію всіх електричних з'єднань і регулярно перевіряти стан ізоляційних матеріалів, змінюючи їх за потреби.

Регулярне технічне обслуговування дасть змогу підтримувати прилад у належному стані. Слід регулярно очищувати його від пилу та забруднень, що можуть знижувати ефективність. Періодично необхідно перевіряти стан електричних контактів і з'єднань. Раз на рік слід проводити профілактичний огляд приладу з залученням кваліфікованого фахівця.

Для оптимізації роботи приладу необхідно застосовувати термостат для автоматичного регулювання температури в приміщенні. Програмовані режими роботи дадуть змогу економити енергію під час відсутності мешканців. Можна поєднувати застосування приладу з іншими системами опалення для досягнення максимального комфорту та ефективності.

Для економії енергії можна утеплити приміщення, щоб зменшити тепловтрати і таким чином підвищити ефективність роботи приладу. Слід вимикати прилад, коли він не потрібен, або встановлювати його на мінімальний рівень нагріву.

Дотримуючись цих рекомендацій, можна максимально ефективно та безпечно застосовувати індукційний нагрівальний прилад для обігріву приміщень,

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

забезпечуючи таким чином комфортні умови проживання з мінімальними витратами енергії.

2.8 Висновки до розділу

В цьому розділі представлено схему системи управління індукційним нагрівальним приладом, яка керує нею в автоматичному режимі, а також елементи її конструкції, що спрощують монтаж і дозволяють помістити прилад в приміщення любых розмірів.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ

3.1 Основні вимоги до розробки індукційного нагрівального приладу

Представлена у цій роботі методика розроблена на основі інженерних методів розрахунку плоских індукторів індукційних нагрівачів з урахуванням конструктивних особливостей та режимів роботи індукційних нагрівачів [9].

Вихідні дані для розробки моделі:

- геометричні параметри радіатора, що нагрівається (діаметр нагрівання, товщина пластини);
- електрофізичні властивості матеріалу радіатора (питомий електричний опір, магнітні властивості) та їх залежність від температури;
- частота електромагнітного поля і напруга на індукторі;
- потужність, що виділяється в радіаторі, і температура нагріву;
- = вибір основних конструктивних рішень індуктора (зовнішній і внутрішній діаметри індуктора, зазор між індуктором і радіатором, товщина індуктора);
- розрахунок електричних та енергетичних величин (питома поверхнева потужність в радіаторі, напруженість магнітного поля на поверхні індуктора і радіатора, коефіцієнт зв'язку, активна і реактивна потужність в індукторі та в зазорі, повна потужність системи «індуктор-радіатор», електричний ККД, коефіцієнт потужності, сила струму в індукторі, коефіцієнт заповнення та інші);
- визначення числа витків індуктора, розрахунок ширини витка та вибір індукуючого дроту.

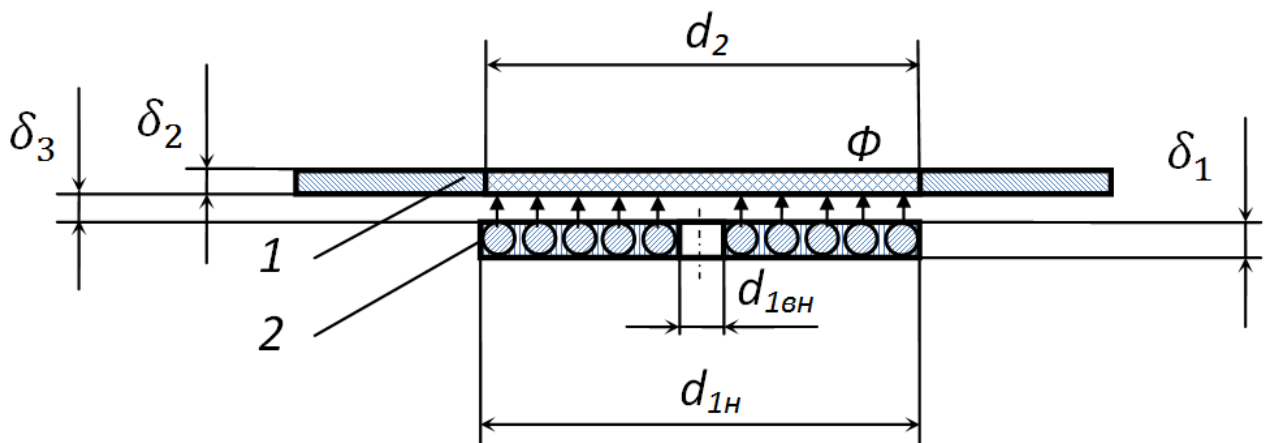
3.2 Фізична модель системи «індуктор-радіатор» індукційного нагрівального приладу

Основним елементом індукційного нагрівального приладу є індуктор, який представляє собою плоску котушку діаметром $d_{1н}$ і складається з витків

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

багато жильного мідного дроту товщиною δ_1 . В індукторі за допомогою генератора наводяться високочастотні коливання. В результаті цього навколо нього виникає електромагнітне поле, що наводить у сталевому радіаторі вихрові струми (струми Фуко). Ці струми, згідно закону Джоуля-Ленца, визивають нагрів радіатора, через те, що його матеріал володіє електричним опором. Ефект нагрівання наростає з ростом напруженості поля і залежить від властивостей матеріалу радіатора, а також відстані індуктора від його поверхні, тобто від геометрії системи «індуктор-радіатор».

Фізична модель системи «індуктор-радіатор» індукційного нагрівального приладу представлена на рисунку 3.1.



1 – радіатор; 2 – індуктор;

Рисунок 3.1 – Фізична модель системи «індуктор-радіатор» індукційного нагрівального приладу:

Система «індуктор-радіатор» являє собою трансформатор без осердя, в якому індуктор 2 є обмоткою первинною. Радіатор 1 є вторинною обмоткою, яка замкнена накоротко. Магнітний потік Φ замикається між двома обмотками по повітряному зазору δ_3 . На високій частоті вихрові струми витісняються ними ж утвореним магнітним полем в тонкі поверхневі шари радіатора Δ (скін-ефект), в результаті чого їх щільність різко наростає і радіатор починає нагріватись. Розташовані нижче шари металу нагріваються за рахунок теплопровідності. В системі «індуктор-радіатор» важливим є не величина струму, а велика його щіль-

ність. У скін-шарі Δ щільність струму збільшується в $e = 2,718$ рази щодо щільності струму в радіаторі, при цьому в скін-шарі виділяється 86,5% тепла від загального тепловиділення в приладі. Глибина проникнення електромагнітних хвиль в сталь (рис. 3.2) відповідає товщині, де індукується 63 % від щільності струму чи виділяється 87% питомої потужності [10].

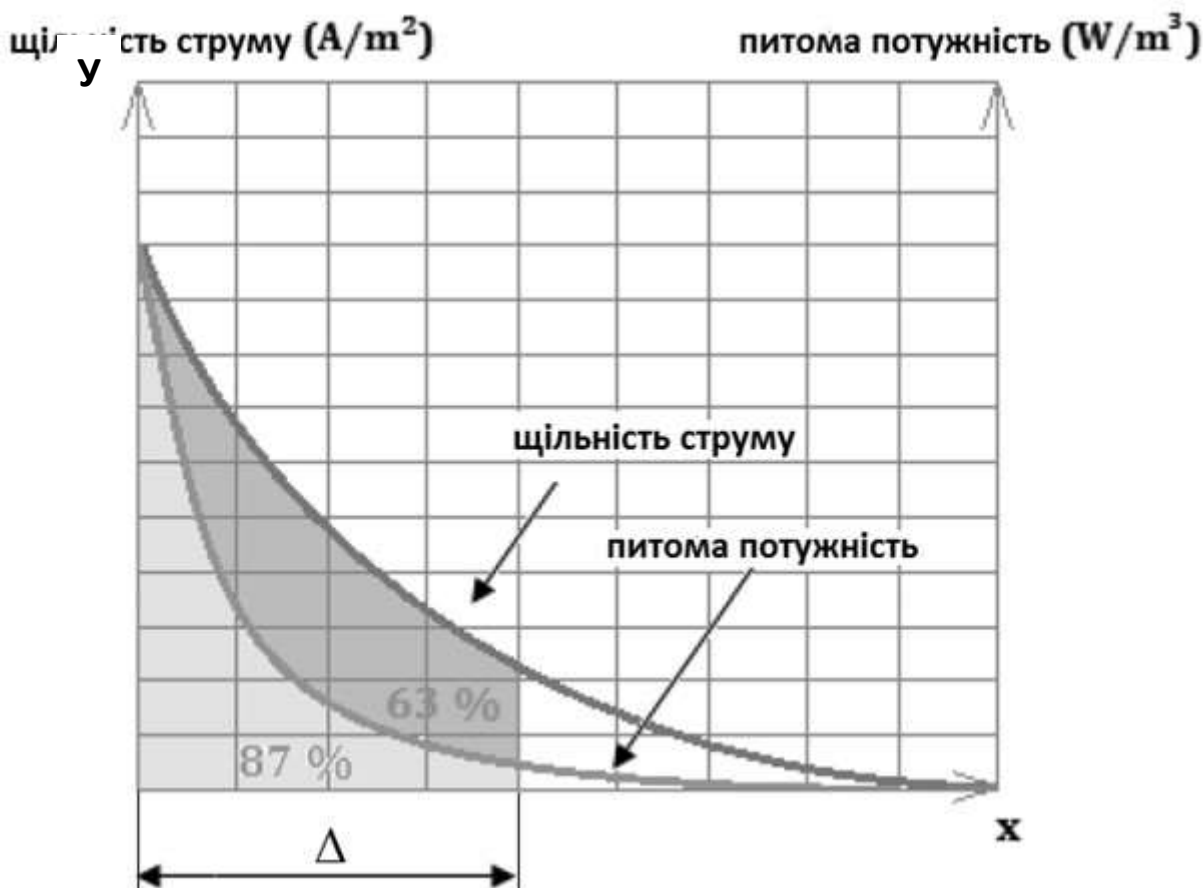


Рисунок 3.2 – Глибина проникнення електромагнітних хвиль
в сталь

Глибина скін-шару залежить від частоти випромінювання: чим вище частота, тим більш тонший скін-шар. Також вона залежить від відносної магнітної проникності μ матеріалу радіатора [11].

3.3 Математична модель системи «індуктор-радіатор» індукційного нагрівального приладу

У роботі здійснено розрахунки вузла «індуктор-радіатор», згідно вихідних даних, які наведені в таблиці 3.1. Передбачається, що радіатор, який нагрівається, представляє собою лист сталі у формі квадрата марки Ст. 45 [9].

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для виконання розрахунків

Найменування величини	Чисельне значення
Діаметр нагрівання радіатора d_2 , м	0,16
Товщина індуктора δ_1 , м	0,002
Зазор між індуктором і радіатором δ_3 , м	0,01
Товщина стінки радіатора δ_2 , м	0,03
Температура нагрівання радіатора t_2 , °С	200
Питомий електричний опір сталі радіатора ρ при 20°С, Ом·м	$18,9 \cdot 10^{-8}$
Потужність, яка виділяється в індукторі P_2 , кВт	2
Питомий електричний опір сталі радіатора при заданій температурі нагріву радіатора ρ_2 , Ом·м	$31,2 \cdot 10^{-8}$
Кількість витків індуктора w	28
Внутрішній діаметр індуктора $d_{1\text{вн}}$, м	0,04
Частота електромагнітних коливань f , кГц	100

Зовнішній діаметр індуктора $d_{1\text{н}}$ є рівним діаметру поверхні, що нагрівається, тобто діаметру ділянки, яка нагрівається d_2 та визначається за формулою:

$$d_{1\text{н}} \approx d_2 = 0,16 \text{ м.}$$

Питома поверхнева потужність в радіаторі P_{02} : визначається із виразу

$$P_{02} = \frac{4P_2}{\pi(d_{1H}^2 + d_{1BH}^2)}; \quad (3.1)$$

$$P_{02} = \frac{4 \cdot 2000}{3,14(0,16^2 + 0,04^2)} = 93,668 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}.$$

Глибина проникнення електромагнітної хвилі в сталь [9] знаходиться із формули:

$$\Delta_\phi = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_p f}}, \quad (3.2)$$

де ρ – питомий електричний опір сталі;

f – частота електромагнітних коливань;

μ_p – розрахункове значення відносної магнітної проникності при зазначеній температурі;

$$\mu_p = \mu_{20} \sqrt[4]{\rho_2 / 20 \cdot 10^{-8}}, \quad (3.3)$$

де μ_{20} – відносна магнітна проникність (знаходиться з залежності від P_{02} по графіку [9, рис.1.12], прийнято $\mu_{20} = 40$);

$$\mu_p = 40 \sqrt[4]{31,2 \cdot 10^{-8} / 20 \cdot 10^{-8}} = 44,7;$$

$$\Delta_\phi = 503 \sqrt{18,9 \cdot 10^{-8} / (44,7 \cdot 100)} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Поправочний коефіцієнт для радіатора знаходиться по графіку [9, рис. 1.14, а]:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{\delta_2}{\Delta_\phi} = \frac{3}{3,3} = 0,91,$$

Відповідно прийнято $F_\phi = 1,2$ і $G_\phi = 1,05$.

Поправочний коефіцієнт для індуктора знаходиться по графіку [9, рис. 1.4]:

$$\frac{\delta_1}{\Delta_\phi} = \frac{2}{3,3} = 0,61,$$

Прийнято $F_1 = 1,8$ і $G_1 = 0,8$.

Напруженість магнітного поля H_{02} на поверхні радіатора знаходиться із виразу:

$$H_{02} = \sqrt{\frac{P_{02} \cdot 10^6}{\sqrt{\rho_2 \mu_p f} F_\phi}}; \quad (3.4)$$

$$H_{02} = \sqrt{\frac{93,668 \cdot 10^6}{\sqrt{31,2 \cdot 10^{-8} \cdot 44,7 \cdot 100 \cdot 1,2}}} = 4,57 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Визначаємо коефіцієнт зв'язку $k_{зв}$, що представляє собою коефіцієнт трансформації в припущенні, що індуктор і радіатор є обмотками повітряного трансформатора [9]. Розрахунок коефіцієнта зв'язку $k_{зв}$ проводиться з використанням виразу (3.5):

$$k_{зв} = 0,523 - 0,104\xi_1 - 1,969\xi_2 + 0,541 \xi_3 - 0,127\xi_4 + \\ + 0,49\xi_1\xi_2 - 0,27\xi_1\xi_3 - 0,696 \xi_2\xi_3. \quad (3.5)$$

$$\xi_1 = \left(\frac{P_{02}}{50}\right)^{-0.18}; \quad (3.6)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\xi_1 = \left(\frac{93,668}{50} \right)^{-0,18} = 0,893;$$

$$\xi_2 = \left(\frac{2\delta_3}{d_{1H}} \right)^{1,25}; \quad (3.7)$$

$$\xi_2 = \left(\frac{2 \cdot 0,01}{0,16} \right)^{1,25} = 0,074;$$

$$\xi_3 = \left(\frac{\delta_2}{10} \right)^{3,35}; \quad (3.8)$$

$$\xi_3 = \left(\frac{3}{10} \right)^{3,35} = 0,018;$$

$$\xi_4 = \frac{t_2}{300}; \quad (3.9)$$

$$\xi_4 = \frac{200}{300} = 0,67;$$

$$k_{зв} = 0,523 - 0,104 \cdot 0,893 - 1,969 \cdot 0,074 + 0,541 \cdot 0,018 - 0,127 \cdot 0,67 + \\ + 0,49 \cdot 0,893 \cdot 0,074 - 0,27 \cdot 0,893 \cdot 0,018 - 0,696 \cdot 0,074 \cdot 0,67 = 0,234.$$

Напруженість магнітного поля H_{01} на поверхні індуктора визначається із формули:

$$H_{01} = \frac{H_{02}}{k_{св}}; \quad (3.10)$$

$$H_{01} = \frac{4,57 \cdot 10^4}{0,234} = 19,53 \cdot 10^4 \frac{A}{M}.$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Активна потужність в індукторі P_1 визначається із виразу:

$$P_1 = \pi \cdot 10^{-6} \cdot H_{01}^2 \frac{d_{1H}^2 - d_{1BH}^2}{4} \sqrt{\rho_1 f} F_{пл1} \frac{1}{k_{зап}}, \quad (3.11)$$

де $k_{зап}$ – коефіцієнт заповнення індуктора, який враховує наявність міжвиткової ізоляції та вибирається попередньо (як правило $k_{зап} = 0,85 - 0,95$ [9]);

$F_{пл1}$ – поправочний коефіцієнт (зазвичай $F_{пл1} = 1$ [9]);

$$P_1 = 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot 195300^2 \frac{0,16^2 - 0,04^2}{4} \sqrt{18,9 \cdot 10^{-8} \cdot 100} \cdot 1 \cdot \frac{1}{0,9} = 4,4 \text{ кВт.}$$

Реактивні потужності в індукторі P_{Q1} , радіаторі P_{Q2} та в зазорі P_{Q3} знаходяться за наступними виразами:

$$P_{Q1} = P_1 \frac{G_1}{F_1}, \quad (3.12)$$

де G_1, F_1 – поправочні коефіцієнти, значення яких визначаються за даними наведеними в технічній літературі [9, табл. 1.14], прийнято $G_1 = 0,8, F_1 = 1,8$;

$$P_{Q1} = 4,4 \frac{0,8}{1,8} = 1,96 \text{ кВАР};$$

$$P_{Q2} = 0,6 P_2 \frac{G_\phi}{F_\phi}, \quad (3.13)$$

де G_ϕ, F_ϕ – поправочні коефіцієнти, значення яких визначаються за даними наведеними в технічній літературі [9, табл. 1.14], прийнято $G_\phi = 1,05, F_\phi = 1,2$;

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

$$P_{Q2} = 0,6 \cdot 2 \frac{1,05}{1,2} = 1,05 \text{ кВАР};$$

$$P_{Q3} = \pi \cdot 10^{-9} H_{01}^2 f \delta_3 d_{1H}^2; \quad (3.14)$$

$$P_{Q3} = 3,14 \cdot 10^{-9} \cdot 195300^2 \cdot 100 \cdot 0,01 \cdot 0,16^2 = 3,07 \text{ кВАР}.$$

Активна P_{Σ} та реактивна потужності $P_{Q\Sigma}$ розглянутої системи «індуктор-радіатор» як суми відповідних потужностей, а також повна потужність системи $P_{S\Sigma}$ знаходяться за виразами за формулою:

$$P_{S\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + P_{Q\Sigma}^2}; \quad (3.15)$$

$$P_{S\Sigma} = \sqrt{4,4^2 + 1,96^2 + 1,05^2 + 3,07^2} = 5,81 \text{ кВАР}.$$

Розрахунок коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ здійснюється за виразом

$$\cos\varphi = \frac{P_{\Sigma}}{P_{S\Sigma}}; \quad (3.16)$$

$$\cos\varphi = \frac{4,4}{5,81} = 0,76.$$

Ширина витка з ізоляцією b_1 знаходиться наступним чином:

$$b_1 = \frac{d_{1H} - d_{1BH}}{2w_1}; \quad (3.17)$$

$$b_1 = \frac{0,16 - 0,04}{2 \cdot 28} = 0,0022 \text{ м}.$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

3.4 Висновки до розділу

В цьому розділі наведено розрахунки системи «індуктор-радіатор» індукційного нагрівального приладу. В результаті здійснених розрахунків встановлено, що:

- геометричні параметри радіатора $d_2 = 0,16$ м;
- напруженість магнітного поля на поверхні радіатора $H_{02} = 4,57 \cdot 10^4$ А/м;
- питома поверхнева потужність в радіаторі $P_{02} = 93,668$ кВт/м²;
- напруженість магнітного поля H_{01} на поверхні індуктора $H_{01} = 19,53 \cdot 10^4$ А/м;
- глибина проникнення електромагнітної хвилі в сталь $\Delta_\phi = 3,3 \cdot 10^{-3}$ м;
- коефіцієнта потужності $\cos\varphi = 0,76$.

Отримані результати розрахунку будуть застосовані на практиці для розробки та конструювання індукційного нагрівального приладу.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі розроблено індукційний нагрівальний прилад. Основні результати роботи включають:

- проведено патентний огляд та аналіз технологічних процесів і відомих конструкцій індукційних нагрівальних пристроїв;

- встановлено, що індукційні нагрівальні прилади є перспективними, оскільки мають високий коефіцієнт корисної дії, малі габарити, що дозволяють розмістити нагрівач у приміщеннях будь-яких розмірів, високу швидкість нагріву теплоносія та відсутність інерції при їх вимкненні;

- розроблено структурну та електричну схему системи керування індукційним нагрівальним приладом в автоматичному режимі, а також елементи її конструкції.

- представлено методику розрахунку індукційних нагрівальних приладів, розроблену на основі інженерних методів розрахунку плоских індукторів з урахуванням конструктивних особливостей та режимів роботи індукційних нагрівачів;

- розроблено фізико-математичну модель системи «індуктор-радіатор» індукційного нагрівального приладу.

Отримані результати розрахунків можуть бути використані на практиці для розробки та конструювання індукційних нагрівачів.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Високочастотний інвертор для індукційного нагріву [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.evm.ua/inventory/visokochastotnij-nvertor-grp-c-high-frequency-solar>.
2. Індукційні нагрівачі. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://surl.li/ugfyl>.
3. Індукційний проточний нагрівач [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://surl.li/uggaj>.
4. Низькочастотний індукційний нагрівач [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://surl.li/uggbq>.
5. Електричні котли [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://teplo-faq.net/lander>.
6. Індукційний нагрівач. Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://uapatents.com/2-60119-indukcijnijj-nagrivach.html>.
7. Пристрій індукційного нагріву з секційним індуктором. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://findpatent.com.ua/patent/224/2240659.html>.
8. Індукційний електрообігрівач [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://uapatents.com/4-64701-indukcijnijj-elektroobigrivach.html>.
9. Індукційний нагрів сталі [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://surl.li/ugghh>.
10. Опалення будинку за рахунок електромагнітної індукції [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://ekonomteplo.com.ua/opalennja-budinku>
11. Методичні вказівки для виконання контрольних та самостійних робіт з навчальної дисципліни «Електротехнологічні установки та пристрої» для студентів за напрямком 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / Укл.: П. Г. Плешков, Р. В. Телюта - Кіровоград: КНТУ, 2014 - 79с.
12. Пірометри. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://protester.com.ua/ua/izmeritel-temperaturi/>.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Побутовий ватметр. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://jak.magey.com.ua/articles/pobutovij-vatmetr.html>.

14. Індукційні установки нагріву [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://weldotherm.if.ua/ua/induction>.

15. Індукційні опалювальні установки. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://opalennia.com/induksijnij-kotel-tsini-ta-vidguki-mozhna-zrobiti-induksijnij-opalyuvalnij/>

16. Індукційний нагрів [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://krypton.ua/ua/g3670890-induktsionnyj-nagrev>

17. Закон Джоуля-Ленца. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Закон_Джоуля_—_Ленца

18. Індукційні печі: Навчальний посібник для студентів ВНЗ./ Козлов Г.О., Тополов В.Л., - Нікополь: НТ НМетАУ, 2008. - 32 с.

19. Індуктивні компоненти [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://filur.net/ua/pasivni-komponenti/induktivni-komponenti>

20. Система індивідуального опалення [Електронний ресурс]. - Режим доступу:

21. Виды и системы отопления. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://surl.li/uggpt>

22. Типи і види систем водяного опалення [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://delta-term.ua/poleznye-stati/tipy-i-vidy-sistem-vodyanogo-otopleniya>

23. Павленко Т. П. Електротехнологічні установки : конспект лекцій для магістрів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Т. П. Павленко, О. М. Петренко, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 130 с.

24. Індукційні обігрівачі для дому [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://bigl.ua/ua/sc-6180821-induktsionnye-obogrevateli-dlya-doma>

25. Особливості індукційного нагріву [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://pema.khpi.edu.ua/article/view/2079-3944.2018.32.17>

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

26. Радіоконструктор [Електронний ресурс]. - Режим доступу:
https://radiokonstruktor.blogspot.com/p/blog-page_78.html

27. Слухоцкий А.Е. Индукторы для індукційного нагріву. –К.: Наукова думка, 1974. - 264 с.

28. Матвійчук В.А., Штуць А.А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти галузі знань 14 «Електрична інженерія» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання. Вінниця: ВНАУ, 2022. 98 с.

29. Електрична індукційна піч. [Електронний ресурс]. - Режим доступу:
<https://uk.dw-inductionheater.com/product/electric-induction-furnace>.

30. Слухоцкий А.Е. Индукторы. –К.: Наукова думка, 1979. – 72 с.

31. Фізичні величини та їх вимірювання [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/50>

32. Автоматика електроустановок електроенергетичних систем. Навчальний посібник / В.М. Баженов, М.М. Одегов. – Харків: Планета-Прінт, 2022. – 186с.

33. Методика розрахунку нагрівальної системи індуктор-магнітопровід для наплавлення тонких елементів конструкцій [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/237216585.pdf>.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		