Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____Автоматики і комп'ютеризованих технологій_____
(повна назва)

Кафедра _____Проектування та експлуатації електронних апаратів_____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

_____другий (магістерський)_____
(рівень вищої освіти)

_____ГЮІК 321531.023ПЗ_____
(позначення документа)

«Розробка структури експериментального пристрою для левітаційної плавки металів»
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи РЕАЗм-21-1

_____Хмелик О.Г._____
(прізвище, ініціали)

спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"___

Тип програми _____освітньо-професійна_____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма __Радіоелектронні апарати та засоби
(повна назва спеціалізації)

Керівник _____проф.Чумаков В.І_____
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ПЕЕА _____ _Хорошайло Ю.Є._____
(підпис) (прізвище, ініціали)

2022

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____Автоматики і комп'ютеризованих технологій_____

Кафедра _____Проектування та експлуатації електронних апаратів_____

Рівень вищої освіти _____другий (магістерський)_____

Спеціальність _____172 "Телекомунікації та радіотехніка"_____
(код і повна назва)

Тип програми_____освітньо-професійна_____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____"Радіоелектронні апарати та засоби"_____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри ПЕЕА
Хорошайло Ю.Є._____
(підпис)

«____»_____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові _____Хмелику Олегу Геннадійовичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи Розробка структури експериментального пристрою для левітаційної плавки металів
затверджена наказом по університету від 14.11 2022 р. № 1475 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 1 грудня 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи Дослідити теплофізичні методи плавки металів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Дослідження властивостей електро-магнітної плавки.
4.2 Ознайомлення з інвенторами
4.3 Створення лабораторного макету
4.4 Проведення експерименту
4.5 Охорона праці
4.6 Висновки
5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних

ілюстрацій (слайдів) _____

Схема електрична принципова надана в додатку А

Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації наведеній в додатку Б

---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання	01.09.22– 03.09.22	виконано
2	Пошук літератури	04.09.22– 10.09.22	виконано
3	Дослідження електро-магнітної плавки	11.09.22– 15.09.22	виконано
4	Дослідження фізичних властивостей	16.09.22– 25.09.22	виконано
5	Огляд інвенторів	26.09.22– 10.10.22	виконано
6	Створення макету	11.10.22– 20.10.22	виконано
7	Проведення експерименту	21.10.22– 03.11.22	виконано
8	Виконання розділу «Охорона праці»	04.11.22– 06.11.22	виконано
9	Висновки	07.11.22– 09.11.22	виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	10.11.22– 25.11.22	виконано
11	Розробка презентації	26.11.22– 29.11.22	виконано

Дата видачі завдання __01__ ___09_____2022 р.

Здобувач _____ _____Хмелик О.Г._____
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ _____проф Чумаков В.І._____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Матеріали кваліфікаційної роботи включають: 70 аркушів, 25 рисунків ,1 таблицю, 2 додатка і 46 джерел.

ЕЛЕКТРО-МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ, ЛЕВІТАЦІЯ, ПЛАВКА МЕТАЛЛІВ, ПРИСТРОЇ, ІНВЕНТОРИ.

Об’єкт дослідження – фізичні властивості електро-магнітної левітації.

Метою дослідження – дослідження та розробка експерементального приладу для плавлення металлів.

Предметом дослідження в даній роботі є процес електро-магнітної левітації та фізичних властивостей.

У результаті проведено аналіз можливостей електро-магнітної левітаційної плавки.

Пояснювальну записку виконано згідно з ДСТУ–3008–15[1].

ABSTRACT

The materials of the qualification work include: 70 sheets, 25 figures, 1 tables, 2 appendix and 46 sources.

ELECTRO-MAGNETIC INDUCTION, LEVITATION, METAL MELTING, DEVICES, INVENTORIES.

The object of research is the physical properties of electromagnetic levitation.
The purpose of the research is research and development of an experimental device for melting metals.

The subject of research in this work is the process of electro-magnetic levitation and physical properties.

As a result, an analysis of the possibilities of electro-magnetic levitation melting was carried out.

The explanatory note was prepared in accordance with DSTU-3008-15[1

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів……..……8
Вступ……9
1 Огляд за літературними джерелами стану питання дослідження…… …10
1.1 Електромагнітна плавка……10
1.2 Медоти застосування ЕМЛ……11
1.3 Принцип дії ЕМЛ……..……13
1.4 Огляд конструкцй для ЕМЛ плавки……17
2 Інвентори……..21
2.1 Інвентор для індукційного нагріву……21
2.2 Інвентори……..21
2.3 Прирнцип дії інвентора……..23
2.4 Оцінка електричного ККД інвентора……...25
3 Опис макету лабораторного інвентора……27
3.1 Випрямовувач……27
3.2 Модуль управління……28
3.3 Силовий модуль……35
4 Експериментальна частина……....39
4.1 Перше включення……...39
4.2 Індукційний нагрів……42
4.3 Додаткова діагностика……...45
4.4 Перевірка роботи макета……...46
4.5 Левітаційна плавка……47
5 Охорона праці……..50
5.1 Аналіз умов……50
5.2 Промислова безпека……..54
5.3 Виробнича санітарія……..55
5.3.1 Розрахунок кондиціювання……...56

5.4 Пожежна безпека в приміщенні науково–дослідної лабораторії……57
Висновки……...….59
Перелік джерел посилань…….……60
Додаток А – Схема електрична принципова..……61
Додаток Б – Презентація.……62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЕМЛ – електромагнітна левітація;

ЕМІ – електромагнітна індукція;

ЛАТР – лабораторний трансформатор;

МОП – метал оксид напівпровідник;

ККД – коефіцієнт корисної дії.

ВСТУП

Плавлення металів бере свій початок у XII столітті до н. е. у сиродутній печі. Вже першому тисячолітті до зв. е. використовувалося ковane залізо. Метали та його сплави одні з основних конструкційних матеріалів сучасної цивілізації. Змінюючи рецептуру сплавів, можна змінювати їх властивості у дуже широких межах.

Вони використовуються як хороші провідники електрики (мідь, алюміній), так і як матеріали з підвищеним опором для резисторів і електронагрівальних елементів (ніхром тощо). Метали та їх сплави широко застосовуються виготовлення інструментів (їх робочої частини).

Плавлення металів – складний та енергоємний процес. Для отримання дуже чистого металу потрібно, щоб він не взаємодіяв із ємністю та атмосферою, в якій він плавиться.

Для цього існує метод плавлення у вакуумних печах у ємностях, та метод плавлення у зваженому стані у вакуумі.

Левітаційна плавка – плавлення за допомогою індукційного нагрівання невеликих зразків металу у зваженому стані для отримання надчистих сплавів.

1 ОГЛЯД ЗА ЛІТЕРАТУРНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ СТАНУ ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Електромагнітна плавка

Створення нових неорганічних матеріалів, зокрема металевих, потребує вдосконалення існуючих і розробки нових методів їх отримання. Новітні методи плавки (вакуумно-дугова, індукційно-електронно-променева, електрошлакова, зонна, плазмова, лазерна та ін.) [2] розплавів металів сприяють подальшому розвитку сучасного матеріалознавства, але мають відомі обмеження.

Універсального методу плавлення, який повністю задовольняв би найрізноманітніші вимоги вчених та інженерів, що займаються цією проблемою, не існує. Тому необхідно використовувати комбінації відомих методів плавлення.

У зв'язку з цим значний інтерес представляє використання нових методів плавки, наприклад, електромагнітної левітації (ЕМЛ) або індукційних плавильних печей з холодним тиглем.

Слід зазначити, що, незважаючи на ряд очевидних переваг, індукційна плавка з холодним тиглем поки не може бути широко застосована через недосконалі енергетичні умови нагріву шихти і значні втрати тепла, хоча в конструкціях печей спостерігається певний прогрес. з використанням принципу холодного тигля [3].

Електромагнітну левітацію металевого розплаву, яку також називають плавленням в електромагнітному тиглі або безконтактним, запропонував Отто Мук у 1923 році. Він дав перше і просте теоретичне пояснення цього явища – здійснення підвішування або левітації металу електромагнітним полем.

Однак лише через 30 років з'явилися перші роботи з теорії та використання цього виду плавлення. Пізніше з'явилися дослідження, спрямовані на розширення

прикладних і наукових функцій левітації металів і сплавів як в лабораторних, так і в напівпромислових масштабах [4]. Цікаво також, що теоретичне обґрунтування методу завжди супроводжувалося розробкою ЕМЛ.

Переваги ЕМЛ:

– регульований час перебування краплі металу в рідкому стані;

– контрольована газова атмосфера і шлакова фаза;

– контрольована температура металу (від температури плавлення до температури кипіння) [5];

– можливість використання додаткового джерела тепла (електронного, лазерного променя або плазми). Інтенсивне перемішування металу електромагнітним полем;

– можливість введення в краплю рідини легуючих добавок;

– сприятливе співвідношення між поверхнею краплі та її об'ємом для проходження гетерогенних реакцій;

– досягнення надзвичайно високих швидкостей кристалізації до 106° С/с.

Можливо, до недоліків методу можна віднести малу масу металу, що не перевищує кількох десятків грамів, що певною мірою обмежує широке промислове застосування методу.

Однак відомі застосування ЕМЛ у нанесенні тонких покриттів в електроніці або виробництві дрібних порошків для адитивних технологій. До речі, для більшості фізичних і фізико-хімічних досліджень мала маса не є перешкодою [6].

1.2 Методи застосування ЕМЛ

Методи ЕМЛ дозволяють безконтактно вивчати теплофізичні властивості в широкому діапазоні температур. У зв’язку з цим представляє інтерес огляд вимірювання ентальпії методом левітаційної крапельної калориметрії за 30 років [7].

Під час ЕМЛ зразок швидко плавиться, розплав зазнає сильного перемішування, і в результаті розплав стає повністю однорідним. ЕМЛ набув

широкого застосування для вивчення процесів рафінування при отриманні металів високої чистоти, активних і з високими температурами плавлення.

Електро-магнітних металів означає електромагнітну взаємодію зразка та магнітного поля. Для цього металеві зразки поміщають в індуктор зі змінним струмом високої частоти, утворюючи електромагнітне поле, в якому зразок піднімається, а потім плавиться.

Індукційний струм, як правило, виникає на поверхні металевих зразків, а взаємодія індукційного струму з магнітним полем високої частоти утворює силу Лоренца, яка знаходиться в рівновазі з силою тяжіння твердого металевого зразка в магнітному полі. певної конфігурації.

В результаті зразок металу зависає в індукторі і реалізується левітація. Одночасна дія індукційного струму або вихрових струмів генерує джоулеву теплоту, що призводить до нагрівання та плавлення зразка [8].

Підйомна сила левітації, температура та стабільність є важливими факторами стану ЕМЛ. У різний час дослідники моделювали вплив конструкції та розташування індукторів на динамічну деформацію та стабільність металевих розплавів, а також коливання металевих крапель у різні моменти часу, для яких довільні рівняння Лагранжа-Ейлера [9] та кінцеві рівняння використовувався елементний метод. Досліджено також вплив другого (поперечного) магнітного поля на стабільність обертання дослідних зразків.

У процесі ЕМЛ зразки одночасно піддаються нагріванню та левітації, і ЕМЛ створює високу температуру, розподілену на та навколо левітованого розплаву. Досліджено фактори, що впливають на температурні характеристики ЕМЛ, плавлення зразків з низькою електропровідністю та високою щільністю при відносно низьких температурах [10].

Видається цікавим вивчити вплив конструктивних розмірів багатовиткових індукторів і розмірів металевого зразка на температурні характеристики ЕМЛ, аналізованих з метою правильного вибору відповідного індуктора для різних застосувань.

Щодо можливих промислових застосувань, то досліджено перспективний процес осадження тонких плівок легких металів на металеві та пластикові поверхні, заснований на левітації провідних матеріалів у високочастотному електромагнітному полі [11].

Автори зосередили увагу на конструкції індуктора, що забезпечує досягнення високих питомих потужностей, і системі раціонального розподілу пари, що сприяє отриманню рівномірного тонкого покриття.

На думку авторів, цей метод найбільш оптимальний при нанесенні тонких покриттів металів з низьким тиском пари, таких як Al, Ni, Cu та їх сплавів. Видається цілком природним і доцільним використовувати ЕМЛ як частину нової технології для високошвидкісного фізичного осадження з парової фази покриттів на металеву стрічку [12].

1.3 Принцип дії ЕМЛ

Метал з діамагнітними властивостями може вільно висіти в постійному магнітному полі за наявності в ньому потенціальної ями, тобто області, де напруженість зменшується від країв до середини.

Взаємодія магнітного поля високої частоти з металом призводить до виникнення в останньому вихрових струмів, які витісняють поле з простору, зайнятого металом, або, іншими словами, поле всередині металу послаблюється вихровими струмами течії [13].

Внаслідок цього в змінному магнітному полі неферомагнітний провідник поводиться як діамагнетик у постійному полі. За рахунок силової взаємодії вихрових струмів і поля метал виштовхується із зони з більшою щільністю поля в область з меншою щільністю, тобто в потенційну яму. Якщо вказані сили досить великі, то метал можна підняти вгору, незважаючи на дію сили тяжіння, і утримувати його в просторі в підвішеному стані[14].

Найпростіша схема поля індукторної системи, що складається з трьох паралельних проводів, показана на рисунку 1.1.

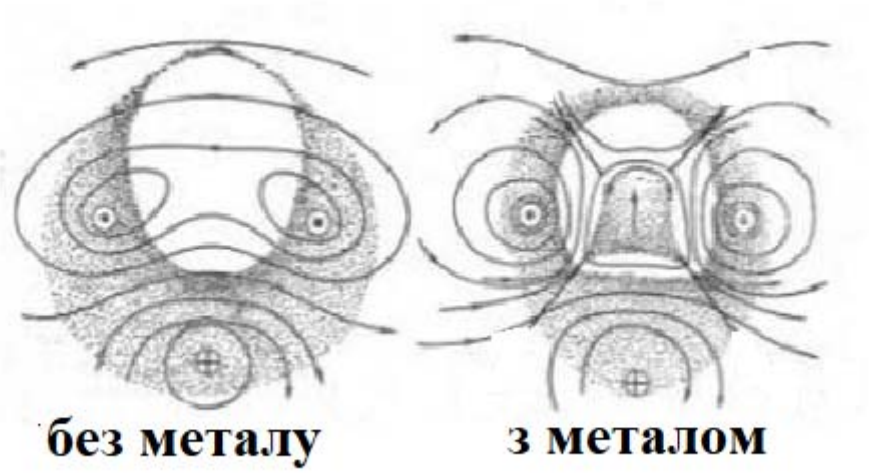


Рисунок 1.1 – Схема індукторної системи

Магнітне поле трьох дротів зі струмами (щільність силових ліній показана ступенем чорноти штрихування і фіксує гідростатичний тиск), де:

Крім розглянутих особливостей взаємодії високочастотного електромагнітного поля і рідкого металу під час левітації, існує група явищ, пов’язаних зі стійкістю металу [15].

Коливання краплі, що висить у магнітному полі, не є специфічною властивістю рідкого стану, а спричинене електромагнітною взаємодією металу з полем. Зміна положення металу відносно індуктора при постійній ЕРС впливає на величину струму, що протікає через індуктор, що викликає зміну сили, що діє на метал [16]. При проведенні експериментів з кульками з алюмінію, плаваючими в повітрі, воді і маслі, були виявлені такі особливості їх поведінки:

– стійка рівновага відносно кінцевих збурень у більш в'язкому середовищі, ніж повітря;

– стійкі незатухаючі коливання з малою амплітудою постійної величини (кулька у воді);

– наростаючі коливання з амплітудою, що перевищує розмір індуктора (кулька в повітрі);

– швидко встановлюється стійка рівновага (для всіх досліджуваних кульок) в маслі.

Характерною особливістю рідкого металу при левітації є інтенсивне перемішування всередині краплі. Модельне дослідження, проведене з рідким натрієм, поміщеним у скляну колбу, яка перебувала в електромагнітному полі (рисунок 1.2), показало існування турбулентного руху металу всередині колби.

За допомогою трубок Піто, а також методів фотографування вимірювали швидкості розплаву. Видно, що основна маса рідини в плаваючій колбі рухається вгору [17]. Уздовж стінок колби метал рухається зі значно більшою швидкістю вниз. Для визначення залежності швидкості металу від напруженості магнітного поля колбу фіксували та вимірювали вертикальну складову швидкості для різних значень струму.

Спеціальні досліди без колби дозволили зробити висновок, що перемішування розплаву при левітації у вакуумі або інертному газі відбувається інтенсивніше, ніж описане вище, оскільки швидкість руху металу на поверхні краплі не дорівнює нулю. Зі збільшенням величини струму в індукторі швидкість металу зростала [18].

Стійкість металу багато в чому залежить від швидкості його обертання. Зазвичай це спостерігається при сферичній формі.

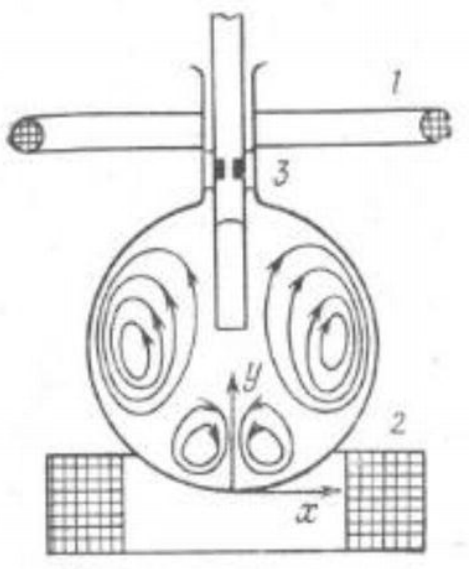


Рисунок 1.2 – Рух розплаву в колбі з рідким натрієм

Повний процес нагрівання і плавлення зразка може складатися з чотирьох етапів. На першому етапі твердий зразок піднімається до фіксації в певному стабільному положенні (рисунок 1.3 a, b) [19].

Ця частина процесу повністю залежить від розташування індуктора, струмів поля та початкового положення зразка. При неправильних параметрах левітації поведінка зразка може виявитися непередбачуваною. Наступним кроком є нагрівання зразка до температури плавлення (рисунок 1.3b).

На цьому етапі при підвищенні температури можлива зміна фізичних властивостей самого матеріалу, що може вплинути як на зміну електромагнітного поля, так і на стабільність положення зразка. Тому цей етап є центральним для тривалості та загальної ефективності процесу левітації. Третій етап складається з плавлення зразка (рисунок 1.3 c) [19].

Відомо, що модель плавлення непроста навіть з геометричної точки зору, але вона характеризується тим, що внутрішній об’єм зразка залишається твердим, а поверхня зразка покривається плівкою рідини за рахунок поверхневий характер реалізації джоулевих втрат.

На четвертому етапі (рисунок 1.3 d) зразок розплавляється, і за рахунок інтенсивного перемішування розплав можна нагріти до заданої температури.

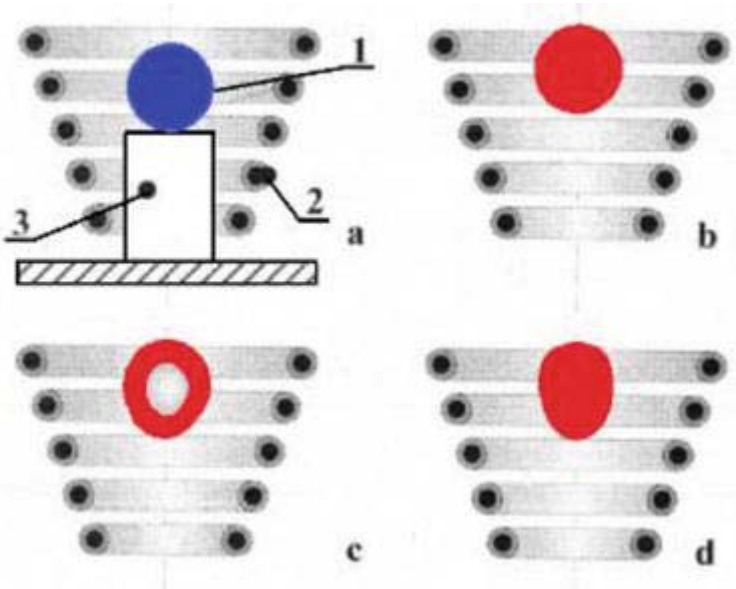


Рисунок 1.3 – Схема індукційної плавки з одним індуктором

Найпростіша схема індукційної плавки з одним індуктором:

– 1 – тверда шихта;
– 2 – індуктор;
– 3 – керамічна підставка;
– a – твердий зразок закріплений у певному стійкому положенні в індукторі;
– b – зразок нагрівають до Tm;
– c – плавлення зразка;
– d — зразок розплавлений, розплав можна нагріти до заданої температури за рахунок інтенсивного перемішування.

1.4 Огляд конструкцій для ЕМЛ плавки

Залежно від напруги в індукторі, його проектування та умов технології та експерименту, усі налаштування для ЕМЛ поділяються на дві групи: з внутрішнім індуктором та зовнішнім індуктором відносно судини реакції [21].

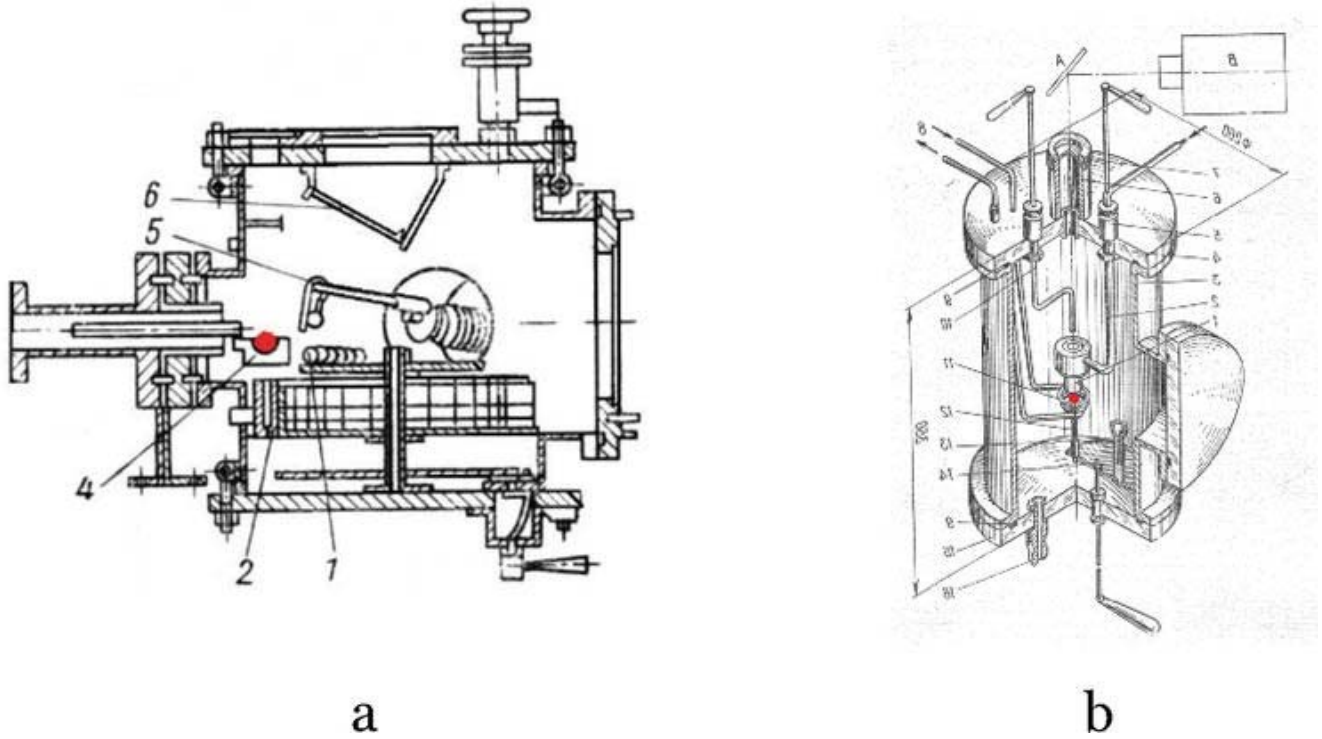
Перша група включає налаштування, що працюють на генераторах гасіння та оснащені індукторами з двома котушками або багатоколінними котушками всіх відомих типів при роботі у вакуумному або інертному газовому середовищі. Друга група включає налаштування з індукторами з багатоколінними котушками, що живиться від генераторів без ланцюга гасіння для роботи при атмосферному тиску або низькому розряді. У середині минулого століття з’явилася установка з двоспіральним індуктором, призначена для отримання зразків, що використовуються при дослідженні металів.

У металевій посудині розміщувався індуктор для левітації, поворотний стіл з мідними формами, столик для вихідних зразків і маніпулятор. Пізніше ті самі автори розробили 27 – позицію для левітації, що складається з високочастотного генератора, реакційного судна та вакууму [22].

Інша реакційна ємність показана на рисунку 1.4 b. Зразок з маніпулятором поміщали в двоспіральний індуктор, де відбувалася левітація та плавлення

металу. Прозора заслінка 6 захищала оглядове скло 8 від конденсації на ньому парів металу.

Після заданої експозиції розплав виливав у форму 2, розташовану коаксіально з індуктором 4. Характерною особливістю таких налаштувань була наявність обертової таблиці з цвілами та маніпулятором.



a b

Рисунок 1.4 – Конструкції для ЕМЛ плавки

a – багатопозиційна установка для левітації та досліджень у системах «розплав-газ»;

b – левітаційна установка для фізико-хімічних досліджень в системах «розплав-газ» і «розплав-шлак-газ».

Ще однією особливістю таких установок були прилади для різноманітних фізико-хімічних досліджень, наприклад, взаємодії елементів у системі розплав-шлак-газ. Реакційна посудина, показана на рисунку 1.4, виготовлена з міді, а фланці посудини закриті кришками з оргскла.

Вода охолоджує індуктор і кільце стабілізатора, розташоване безпосередньо над конічним багатокатушковим індуктором. Для кристалізації краплі з рідким шлаком (в нижній частині краплі) призначений мідний штифтовий кристалізатор,

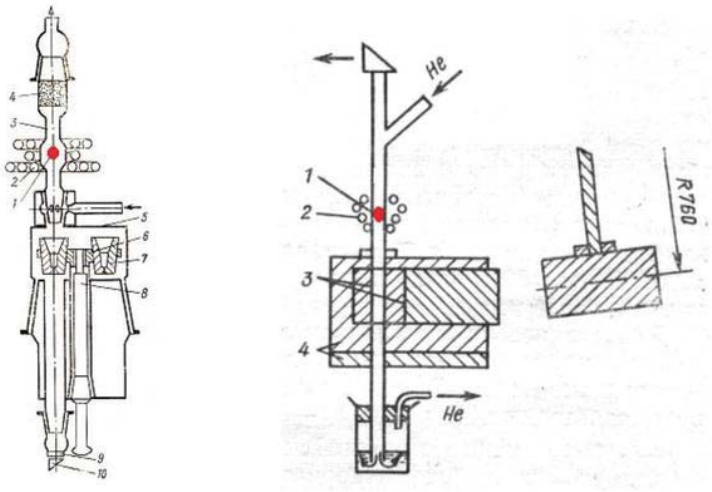
охолоджуваний рідким азотом. Форма могла переміщатися у вертикальній і горизонтальній площинах без порушення герметичності реакційної ємності. Установку живив генератор потужністю 10 кВт з регулюванням потужності на індукторі шляхом опускання первинної котушки, що забезпечувало більш тонке регулювання [23].

Типовим для установок другої групи з зовнішнім індуктором відносно реакційної ємності є використання багатоспіральних індукторів, кварцового скла для реакційної ємності та різноманітних засобів для миттєвої кристалізації металевих розплавів (рисунок 1.5 a,b).

Це пояснюється тим, що такі установки використовувалися для високотемпературних досліджень розчинності газів у розплавах, зокрема азоту в залізовуглецевих розплавах і тиску насичених парів заліза. Корпус реакційної ємності виготовлено з кварцового скла з полірованими стиками окремих елементів. Характерним є розташування реакційної ємності в індукторі – її конфігурація повторює внутрішню форму індуктора, що призвело до незначного збільшення діаметрів верхньої та нижньої котушок індуктора і, як наслідок, до зменшення коефіцієнту корисної дії (ККД) індуктора і збільшення споживаної потужності генератора.

На дні реакційної ємності знаходився поворотний стіл з формами для кристалізації розплаву. Поворотну платформу повертали таким чином, щоб на одній осі з реакційною посудиною залишалося вільне гніздо, що дозволяло вимірювати температуру розплаву за допомогою оптичного пірометра.

Залежно від мети експерименту в установках другої групи змінювали деякі елементи і вводили додаткові пристрої, наприклад, для кристалізації розплаву при випаданні в атмосфері кисню або для кристалізації з підвищеною швидкістю за допомогою молотка. пристрій ковадла.



a b

Рисунок 1.5 – Установка для миттєвої кристалізації

Схеми левітаційних кварцових установок для дослідження розчинності газів у рідких металах з фіксацією розчиненого газу за допомогою:

a — кристалізації у формах;

b — кристалізація молотом і кувалдою.

2 ІНВЕНТОРИ

2.1 Інвентор для індукційного нагріву

У розділі докладно описано схему, конструкцію та наведено поради з виготовлення лабораторного інвертора, призначеного для індукційного нагріву та плавки. Інвертор може бути легко інтегрований в існуюче обладнання лабораторних установок (трубчасті печі, що прогріваються трубопроводи, нагрівання електропровідних тиглів тощо). Він може також використовуватися автономно для загартування та плавки (у тому числі – у зваженому стані) невеликих зразків металів та сплавів (декілька грам).

Потужність інвертора регулюється від 0 кВт до 2 кВт, діапазон робочих частот – від 60 кГц до 300 кГц, живлення від мережі 220В.

2.2 Інвентори

Інверторами називають пристрої, зворотні випрямлячам, тобто – перетворювачі постійної напруги в змінну. Зазвичай термін «інвертор» використовується вужче: генератор змінного напруги, що використовується як джерело живлення. Вихідна напруга інвертора може бути як промислової частоти (50 Гц), і підвищеної (десятки, сотні кГц).

Одне з найважливіших переваг джерел живлення підвищеної частоти це різке зменшення масогабаритних параметрів трансформаторів. Інший позитивний момент пов'язаний з тим, що силові елементи, що перемикають інверторів працюють у ключовому режимі, тобто. основна частина втрат енергії відбувається лише у моменти перемикання.

Таким чином, сучасні швидкодіючі напівпровідникові ключі дозволяють істотно збільшити кпд перетворювачів, наближаючи його до деяких конструкцій до 100 %.

Швидкий розвиток та здешевлення елементної бази силової електроніки призвело до того, що деякі класи інверторів міцно зайняли свої ніші вже навіть у побуті. Це потужні імпульсні блоки живлення сучасних персональних комп'ютерів, електронні баласти для люмінесцентних ламп, зварювальні інвертори та побутові індукційні електроплитки.

Доступність та помірна ціна транзисторних інверторів також могли б сприяти ширшому їх впровадженню та у практику фізико-хімічного експерименту. Ось далеко не повний список можливих додатків інверторів в експериментальній лабораторії:

– джерела живлення для печей із низькоомними трубчастими нагрівачами.

– джерела живлення дугових розрядів (плазмохімічні реактори з дуговим розрядом, електродугова плавка);

– джерела живлення високовольтних нерівноважних розрядів (імпульсні розряди, високочастотні коронні та дугові розряди, бар'єрні розряди (озонатори)).

– індукційне нагрівання (індукційні печі, загартування, плавка);

Наведемо ще кілька міркувань, чому виготовлення саморобного лабораторного інвертора може виявитися непоганим рішенням:

– «навантаження» на лабораторний інвертор зазвичай суттєво менше, ніж на побутові або промислові зразки. Тому лабораторний інвертор може бути скоріше макетом (прототип), ніж промисловий зразок, готовий до серійного виробництва;

– в умовах звичайної дослідницької експериментальної лабораторії немає таких жорстких вимог до надійності та економічності пристрою, як у промисловості чи в побуті. Це суттєво «полегшує обв'язування», пов'язану з автоматичним контролем функціонування пристрої, захистом від позаштатних ситуацій та перевантажень. Цей фактор стає ще більш вагомим, якщо врахувати, що робота з цим обладнанням вестиметься досить кваліфікованим персоналом;

– оскільки не йдеться про серійний випуск відпрацьованого прототипу, то силові комплектуючі можна взяти з великим надмірним запасом міцності. Одночасно можна спростити та схемотехнічні рішення, що підвищують надійність пристрою;

– універсальний лабораторний інвертор може (як «конструктор») являти собою набір окремих модулів, частина з яких може бути виконана у вигляді макетів з навісним монтажем, що спрощує їх модифікацію, аналіз та ремонт. Модернізація та розвиток цих модулів («обв'язування» захисними та діагностичними ланцюгами, автоматизація захисту та контролю) в умовах обмеженого бюджету можна проводити поступово, лише за необхідності [24].

2.3 Принцип дії інвентора

Для прикладу візьмемо полу-мостовий інвентор. На рисунку 2.1 зображено полу-мостовий інвентор.

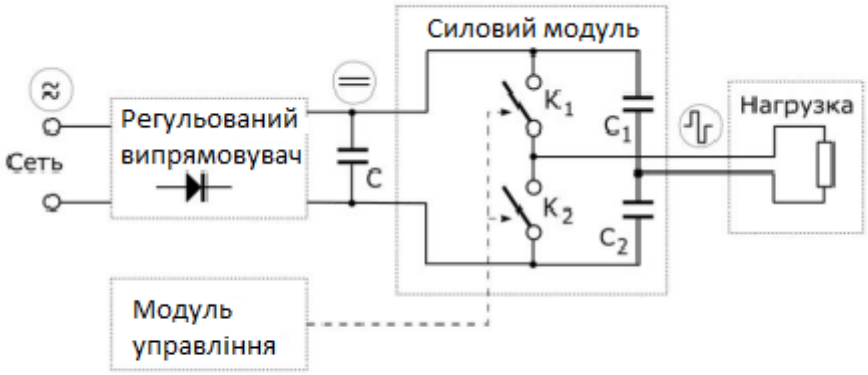


Рисунок 2.1 – Блок схема полу-мостового інвентора

Принцип його роботи дуже простий. Мережева напруга випрямляється і подається на конденсатор С, якому підключено силовий модуль. Силовий модуль містить два напівпровідникові ключі (К1 і К2) і конденсаторний дільник (С1 та С2).

Навантаження підключається до загальних точок ключів та конденсаторів дільника. За допомогою модуля управління ключі К1 і К2 включаються/вимикаються поперемінно із заданою частотою, включаючи

пов'язаний з ними кінець навантаження то до верхньої (за схемою), то до нижньої шини живлення.

В результаті на навантаженні виходить змінна напруга з амплітудою, що дорівнює половині напруги живлення.

Робота такого ідеального інвертора, що складається з ідеальних ключів, дійсно виглядає досить просто. Проблеми починаються тоді, коли ми розпочинаємо виготовлення реального інвертора з реальних компонентів. Ці проблеми призводять не лише до ускладнення схемотехнічних рішень, а й формують цілком певні вимоги до типу використовуваних компонентів, якості монтажу, правил
компонування, запуску та налагодження.

Без урахування більшості цих вимог зробити працездатний інвертор не вдається. Дорогі силові транзистори згорятимуть або відразу при включенні живлення, або в перші секунд роботи.

2.4 Оцінка електричного ККД інвентора

Оцінка електричного ККД пристрою базується на певних припущеннях. Так, по-перше, вважатимемо, що основні втрати електричної потужності мають місце у вихідному каскаді інвертора. По-друге, зневажимо втратами на випромінювання, які безперечно, мають місце, але на частотах роботи промислових інверторів характерні габарити вихідного контуру не відповідають умовам антенного ефекту.

Далі запишимо вираз для потужності втрат вихідного каскаду у вигляді

$$P_{втр} \cong \frac{1}{T}\int_0^T I_{DSS} U_l dt\,, \tag{2.1}$$

де T – період коливань робочої частоти інвертора,

I_{DSS}, U_l – відповідно струм і напруга, які не вносять доданку у магнітне поле, що утримує левітуючий об'єкт.

Формулу (2.1) можна розбити на три частини:

- час, коли транзистор інвертора закритий і через нього протікає лише струм витоку;
- час, коли транзистор інвертора відкритий і на ньому падає напруга, величина якої визначається властивостями напівпровідника;
- час перехідного процесу, протягом якого відбувається чергове перекидання транзистора.

Величини I_{DSS}, U_l є довідковими параметрами, які можна знайти або розрахувати, використовуючи документацію відповідного транзистора. Так, зокрема, I_{DSS} має сенс струма витоку (Drain-to-Source Leakage Current). ВеличинуU_l можна розрахувати, скориставшись довідковим значенням статичного опору стока $I_{\max(on)}$ та максимальним струмом у відкритому стані $R_{DS(on)}$

$$U_l = I_{\max(on)} R_{DS(on)} \tag{2.2}$$

Тепер формулу для ККД можна записати у наступному вигляді

$$\eta \approx 1 - \frac{P_l}{P_{вих}} = 1 - \left(\frac{I^2_{\max(on)} R_{DS(on)} + 0{,}5 I_{DSS} U_0}{I_m U_0} + \frac{t_{tr}}{T} \right). \tag{2.3}$$

Тут U_0 та t_{tr} являють собою, відповідно, напругу живлення та час переключення інвертора.

Підставляючи в (3) типові параметри транзистора IRFR/U3412PbF, отримуємо для напівмостового інвертора при напрузі живлення U_0 100 В на частоті 150 кГц електричний ККД = 0,92.

З виразу (3) випливає, що задля підвищення ККД слід обирати високочастотні транзистори, для яких «мертвий час» t_{tr} має мінімальну величину. Крім того, потрібно використовувати якісні транзистори з мінімальними струмами витоку і мінімальним опором у відкритому стані. Формула (3) також показує, чому надвисокопотужні інвертори характеризуються роботою на низьких частотах ($f = 1/T \leq 50$ кГц).

3 ОПИС МАКЕТУ ЛАБОРАТОРНОГО ІНВЕНТОРА

3.1 Випрямовувач

У цій реалізації інвертора це найпростіший, а й громіздкий вузол. Він містить великий і важкий ЛАТР (лабораторний автотрансформатор) для регулювання вихідної напруги випрямляча та один громіздкий низькочастотний трансформатор, що розв'язує. Вибір такого рішення обумовлений наступними причинами [25].

– на стадії початкового знайомства з силовою електронікою та налагодження бажано мати можливість плавно регулювати постійну напругу, що подається на ключі. Найпростіший спосіб, доступний практично у будь-якій експериментальній лабораторії – це ЛАТР.

– якщо взяти за правило починати і закінчувати роботу інвертора при нульовому положенні ЛАТРа, то можна уникнути необхідності створення спеціальних ланцюгів для початкової зарядки великих електролітичні конденсатори фільтра.

– ЛАТР має велику індуктивність, тому спочатку можна прибрати високочастотні фільтри ланцюга живлення.

– на стадії знайомства з силовою електронікою виникає багато питань, відповіді на які простіше знайти експериментально, шляхом осцилографування сигналів у різних точках схеми. Оскільки силові вузли інвертора не мають

гальванічної розв'язки з мережею живлення, то спочатку її краще зробити. Хоча б для процесу налагодження, під час роботи на малих потужностях.

Найефективніший спосіб – запитати весь інвертор через трансформатор, що розв'язує відповідної потужності. Звичайно, коефіцієнт трансформації його повинен бути близьким до одиниці. Така розв'язка бажана також і для додаткової безпеки самого експериментатора при налагодженні інвертора.

З урахуванням цих міркувань перший варіант регульованого випрямляча для лабораторного інвертора виходить простим. Його схема представлена на рисунку 3.1

Випрямляч не містить якихось дефіцитних деталей та вузлів, надійний і дуже зручний у роботі [26].

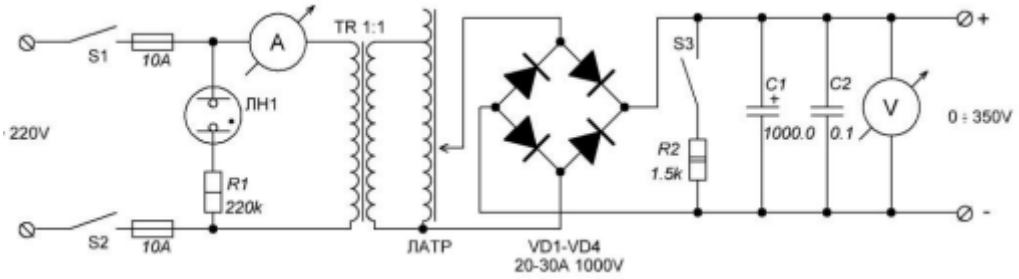


Рисунок 3.1 – Схема випрямовувача

3.2 Модуль управління

Звичайно, схемотехніка модуля управління визначається тим, якими ключами він керуватиме. У цьому інверторі як ключі використовуються потужні польові транзистори з ізольованим затвором, відомі під абревіатурою MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) або польові МОН-транзистори (Метал-Оксид-Напівпровідник).

Однак, для цього розділу досить просто представляти MOSFET як якийсь електронний вимикач, який керується напругою на затворі (щодо початку). У відкритому стані опір між витоком та стоком мало (залежно від типу транзистора – від декількох Ом до сотих часток Ома), а в закритому - велике (десятки МОм і

вище). Для більшості напруга транзисторів на затворі може змінюватися в межах від - 20 Вольт до + 20 Вольт. Якщо напруга на затворі вище граничного (поріг зазвичай від +2 В до +4 В) транзистор відкривається, якщо нижче – закривається.

Таким чином, для керування ключами ми повинні подавати на затвори транзистора позитивні імпульси з напругою від 12 В до 18 В. Це повинні бути дві послідовності імпульсів, що передаються по двом окремим керуючим шинам, зрушені за часом щодо один одного (рисунок 3.2). Як уже зазначалося вище, для усунення наскрізних струмів мають бути передбачені паузи (dead-time).

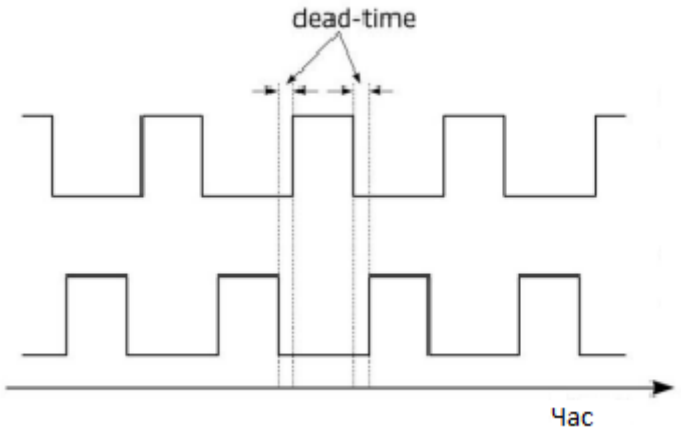


Рисунок 3.2 – Послідовності імпульсів

Існує безліч варіантів таких генераторів імпульсів, що управляють. У цьому проекті застосовано одне з найпростіших рішень на основі поширеної та недорогої мікросхеми IR2153. Ця мікросхема являє собою закінчений автоколивальний драйвер напівмосту для електронних баластів люмінесцентні лампи.

Драйвер має фіксовану тривалість dead-time (1,2 мкс). Максимальне час наростання та спаду імпульсів 150 нс і 100 нс, відповідно. Тому максимальна частота керуючих імпульсів обмежена значенням 300-350 кГц.

Нажаль, потужність вихідних каскадів цього драйвера (Io+- = 200 мА/400 мА) не дозволяє його використовувати безпосередньо як драйвер затворів польових транзисторів нашого інвертора.

Причина в тому, що затвори потужних MOSFET мають досить велику ємність (доходить до кількох тисяч пикофарад), тобто. драйвери змушені працювати на велике ємне навантаження. Тому драйвери повинні видавати великі струми. Інакше час перемикання (теплові витрати) транзисторів будуть великі. Оцінимо ці струми.

У цьому проекті як ключі використовуються транзистори IXFH30N50. Виробник декларує сумарну ємність затвор-витік та затвор-стік Ciss = від 5200 пФ до 5700 пФ. Однак, насправді реальна (ефективна) ємність затвора набагато більше. Тут для оцінки потрібно брати повний заряд, який необхідно передати затвору у тому, щоб транзистор повністю відкрився. Зазвичай ця величина теж наводиться в dataheat. Для IXFH30N50 Qg(on) ~ 200 нКл – 300 нКл. Таким чином, для напруги затвор-виток 10 отримуємо Сеф ~ 20 нФ – 30 нФ. Це у 4-6 разів більше, ніж Ciss! Для того, щоб час увімкнення транзистора було близько 100 нс, драйвер повинен заряджати ємність затвора струмом порядку $(2\text{-}3)\cdot 10^{-7}$ Кл $/10^{-7}$ сек ~ 2-3.

Такий струм драйвер IR2153 видати не може. Тому в даному проекті IR2153 використовується тільки як генератор, що задає, сигнали якого потім будуть посилюватися. Схема генератора представлена на рисунок 3.3.

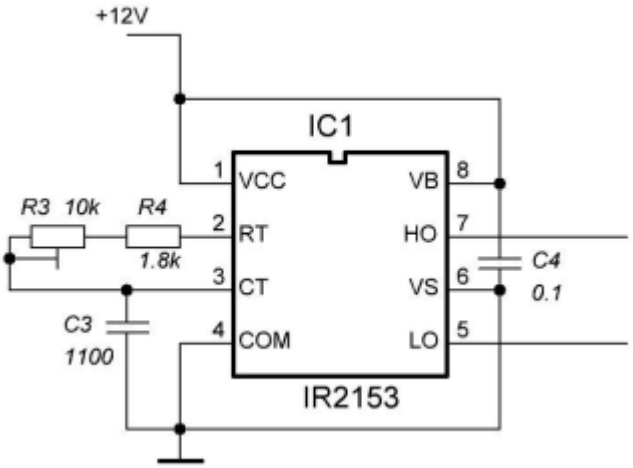


Рисунок 3.3 – Схема генератора

З виходів 5 (LO) і 7 (HO) ми отримаємо сигнали, що точно збігаються з сигналами, представленими на рисунку 3.4 Резистори R3 і R4 та конденсатор C3 визначають частоту генерування імпульсів. Для вказаних номіналів за допомогою резистора R3 цю частоту можна змінювати в межах приблизно від 60 кГц до 300 кГц.

Для посилення сигналів генератора керуючих імпульсів існує безліч схемотехнічних рішень, як на дискретних елементах, і спеціалізовані інтегральні мікросхеми. У даному інверторі був застосований не найдешевший, але дуже простий варіант [26].

Були використані 6-амперні швидкі драйвери MAX4420. Звичайно, замість цих драйверів можна поставити продукти інших виробників або зібрати їх на комплементарних парах транзисторів (польових чи біполярних). Головна умова – вони мають бути швидкодіючими (фронти та спади – до сотні наносекунд) та забезпечувати струми кілька ампер. Однак простіше та економічніше – готові інтегральні драйвери Схема включення драйверів MAX4420 показано на рисунок 3.4

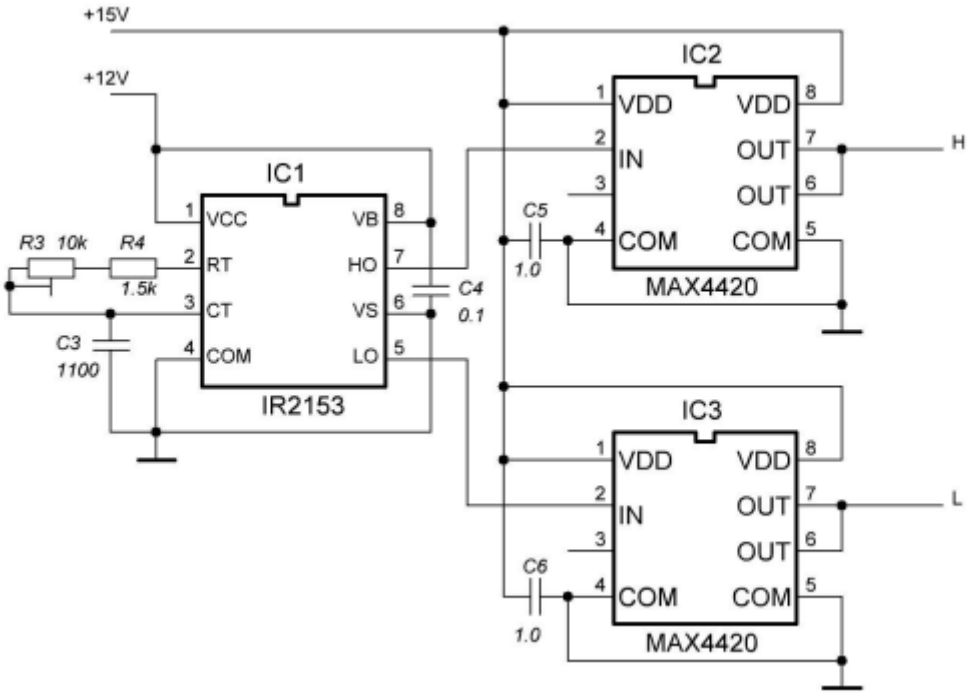


Рисунок 3.4 – Фрагмент схеми модуля управління

З виходів L і H ми отримаємо посилені керуючі імпульси, формою збігаються з сигналами на рисунку 3.2.

Тепер залишилося розглянути дуже важливе та непросте питання - узгодження рівнів керуючих сигналів. Оскільки в основу силового модуля у нас покладено півміст, виникає відома проблема управління верхнім плечем півмоста [28].

Нам потрібно, щоб драйвер верхнього плеча видавав управляючі імпульси щодо землі (як у рисунку 3.4), а щодо рівня початку верхнього транзистора (тобто US1, рисунок 3.5). Це рівень може змінюватися протягом робочого циклу приблизно від 0 (Нижній ключ відкритий, верхній закритий) до напруги живлення (нижній ключ закритий, верхній відкритий).

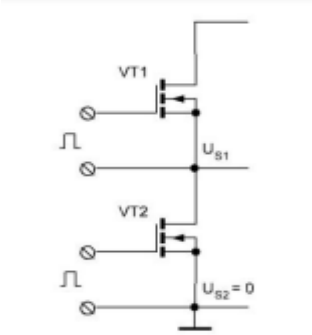


Рисунок 3.5 – Схема ключів живлення

Існує декілька схемотехнічних рішень для зсуву рівня сигналу верхнього плеча. Вони діляться на два класи: з гальванічною розв'язкою та без. До першого класу належать системи з оптичною. розв'язкою та на імпульсних трансформаторах. До другого класу відносяться, зокрема, бутстрепні (Bootstrap) схеми [29].

Не вдаючись у деталі, відзначимо, що бутстрепні схеми зручні при реалізації добре налагоджених рішень. Однак на стадії освоєння силової електроніки вони завдають чимало прикрощів.

Через відсутність гальванічної розв'язки при тепловому пробою силових транзисторів часто вигоряє також і весь модуль управління (аж до генератора, що задає). Тому в цій роботі використаний варіант з гальванічною розв'язкою у вигляді імпульсного трансформатора. На частотах десятки-сотні кілогерц.

Виготовлення імпульсних трансформаторів на феритовому кільці не становить жодних труднощів. При наявності осцилографа немає проблем ні з коригуванням кількості витків, ні з припасуванням параметрів снабберів, що гасять паразитні викиди та осциляції. Повна схема модуля управління з трансформаторною розв'язкою подано на рисунку 3.6.

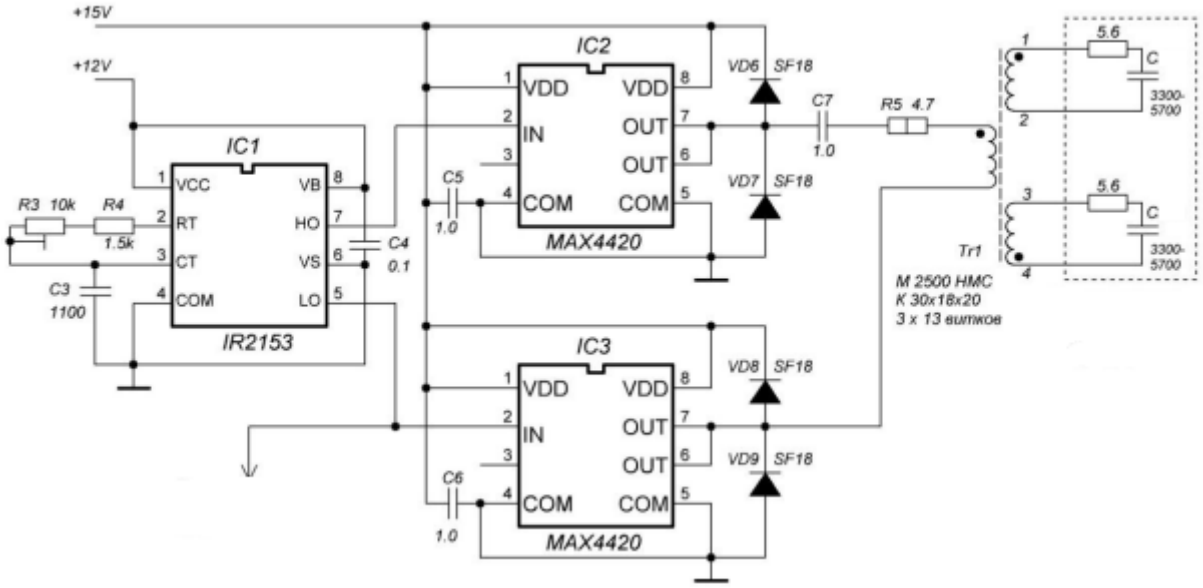


Рисунок 3.6 – Схема модулю управління

Оскільки драйвери MAX4420 працюють на індуктивне навантаження, на їх виходи потрібно встановити діоди.

VD6-VD9. Можна використовувати будь-які швидкі діоди SF, HER, UF тощо. Снаббер C7-R5 призначений для придушення викидів напруги під час роботи на індуктивне навантаження. Крім цього, C7 видаляє постійну складову.

Імпульсний трансформатор можна розрахувати, а можна просто підібрати експериментально формою сигналів на навантаженні, що моделює затвори MOSFET. У всьому робочому діапазоні імпульси повинні мати плоскі вершини та

максимально «круті» фронти. Параметри трансформатора, використаного в цьому інвертор, вказані на схемі. Розміри сердечника дещо надмірні, але для даної конструкції це не важливо. Мотати обмотки краще відразу в три дроти, паралельно або перевівши їх рівномірно розподіляючи витки по сердечнику. На рисунку 3.7 представлений вид модуля управління, зібраного на макетній платі.

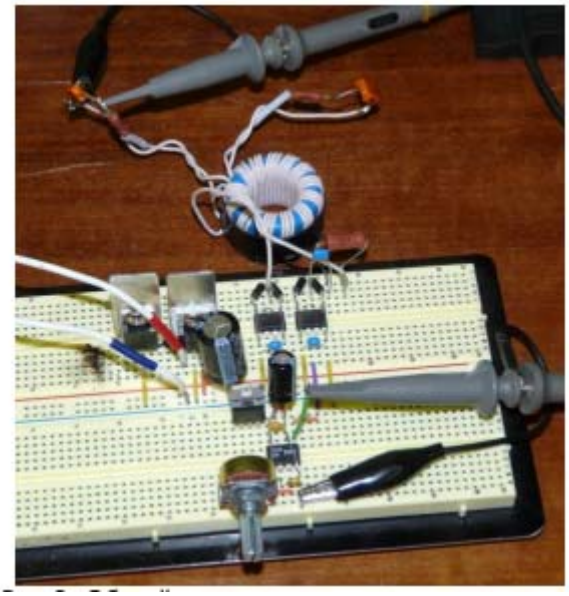


Рисунок 3.7 – Макет модуля управління

Особливих вимог до монтажу немає, крім звичайних правил для імпульсних схем. Потрібно намагатися розташовувати компоненти ближче один до одного, з'єднувальні дроти повинні бути коротшими і прямішими.

Конденсатори С4, С5 та С6 необхідно розташовувати безпосередньо біля корпусів відповідних мікросхем. у ніжок живлення. У цьому інверторі модуль управління непогано працює і просто на макетній платі (як на рисунку 3.7).

Живлення модуля управління здійснюється від єдиного нестабілізованого джерела постійного напруги (20 В, 8 А), що представляє собою накальний трансформатор, випрямний міст і електролітичний конденсатор на 1000 мкФ як фільтр. Для отримання стабілізованих напруг 12 В і 15 В використовуються мікросхеми стабілізаторів LM7812 та LM7815, включених згідно datasheet. У принципі, драйвер IR2153 містить усередині стабілітрон, тому його можна просто запитати через резистор від тих самих стабілізованих 15 В. Але для підвищення

перешкодостійкості краще за нього запитати через окремий стабілізатор. Від цього ж загального нестабілізованого джерела живиться та вентилятор силового модуля (через ще одну LM7812 із невеликим радіатором). На рисунку 3.7 ці стабілізатори знаходяться у лівій частині плати.

На рисунку 3.8 представлена осцилограма сигналу на виході блоку управління (на конденсаторах Сеф = 3300 пФ, на щупі осцилографа – дільник 1:10).

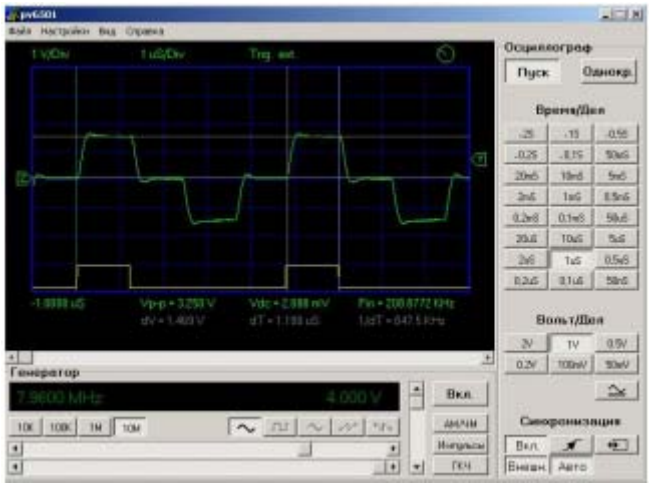


Рисунок 3.8 – Осцилограма сигналу на виході блоку управління

Фронти та спади на ємнісне навантаження порядку 130 нс -160 нс, «полички» добре виражені, викиди не перевищують 0,5 В. Необхідно врахувати, що ефективна ємність реальних транзисторів набагато більша (як правило, в 4 і більше разів), тому при роботі на реальні затвори фронти будуть легшими.

На закінчення цього розділу відзначимо ще один позитивний момент, пов'язаний із застосуванням трансформаторної розв'язки. Таке включення трансформатора, перетворює наш однополярний драйвер у двополярний. Тобто. у напівперіод, коли транзистор силового модуля має бути закритий, з його затвор подається негативний імпульс (а чи не нуль, як і однополярному).

Для приладів з ізольованим затвором це допускається. Подача негативного сигналу на затвор дозволяє суттєво підвищити завадостійкість силового модуля

від наведень, уникнути помилкових спрацьовувань (відкриттів) транзисторів без додаткових «обв'язок» їх затворів.

3.3 Силовий модуль

Як зазначалося раніше, у цьому інверторі силовий модуль є полу-міст. Його повна схема представлена на рисунку 3.9.

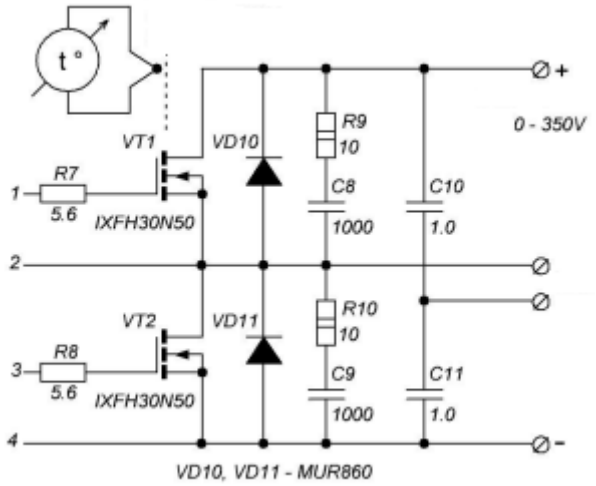


Рисунок 3.9 – Схема силового модулю

Як ключі використані транзистори IXFH30N50 фірми IXYS. Вони чомусь набагато дешевші аналогічних пристроїв інших виробників. Ці транзистори розраховані на струм до 30 А та робоче напруга до 500 В. Опір «витік-стік» у відкритому стані – 0,16 Ом.

Можна було б поставити і менш потужні транзистори, але економія буде несуттєвою, а запас потужності ніколи не завадить.

Єдиною вагомою причиною для використання транзисторів простіше було б зменшення ємності затвора та заряду, необхідного для відкриття транзистора.

Але в даній розробці ми використовуємо драйвери досить потужні і цих транзисторів.

У ланцюгах затворів ми використовуємо лише резистори R7 та R8, які обмежують струми зарядки ємностей затворів і гасять високочастотний «дзвін». В даному варіанті силового модуля жодних додаткових елементів у ланцюгах затворів немає.

Силові транзистори шунтовані зворотними діодами VD10 та VD11. В принципі, їх можна не ставити, тому що використовувані транзистори (IXFH30N50) самі містять не такі вже й погані внутрішні діоди (trr <250 нс). Однак, якщо працювати на підвищених частотах (сотні кілогерц), краще поставити надшвидкі діоди. Під рукою опинилися MUR860 з trr <60 нс, струм 8 А та напруга 600 В. Замість них можна використовувати інші надшвидкі діоди (наприклад, HER або SF), які можна порівняти за параметрами. Можна, можливо взяти і менш потужні (по струму) діоди, але тоді їх бажано розмістити у зоні обдування радіаторів транзисторів[29].

Резистори-конденсатори R9-C8 та R10-C9 також шунтують ключі. Вони служать для придушення викидів і особливо бажані під час роботи на індуктивне навантаження. Резистори R9 і R10 помітно гріються, тому їх краще розмістити в зоні обдування або використовувати потужніші резистори (5 Вт – 10 Вт). Конденсатори C8 та C9 повинні бути розраховані на напругу не менше ніж 600 В – 800 В.

Конденсатори C10 і C11 також повинні бути високовольтними (не менше 400 В) та плівковими. Якщо вони монтуватимуться поза зоною обдування, краще їх зібрати з декількох (3-4) конденсаторів меншою. ємності, включені паралельно. У цьому роботі кожен конденсатор зібраний із трьох по 0,47 мкФ. Їх нагрівання було незначним навіть без обдування.

Розглянемо конструкцію силового модуля.

Незважаючи на те, що ми взяли досить потужні транзистори, нагрівання їх у процесі роботи буде все-таки. відчутним. Високовольтні MOSFET мають, на жаль, все-таки досить високий опір відкритий канал. Навіть у повністю

відкритому стані на транзисторі виділятиметься порядку 10 Вт – 16 Вт тепла (0,16 Ом · (10 А)^2 = 16 Вт). Плюс ще втрати при перемиканні і ще при підвищених частот. Тому ключі обов'язково потрібно розміщувати на радіаторах. Розумні розміри радіаторів виходять за умови їхнього примусового обдування. Дуже зручно використовувати для цієї мети кулери (теплосъемники) потужних комп'ютерних процесорів.

Вони містять радіатор та вентилятор об'єднані в одну конструкцію. В останні роки асортимент кулерів сильно розширився, і вони помітно впали у ціні. Ціна вживаного кулера, навіть з мідним радіатором і непогано працюючим вентилятором, набагато нижчим від вартості великого дюралюмінієвого радіатора. Такий кулер і було покладено основою конструкції силового модуля, представленого на рисунку 3.10.

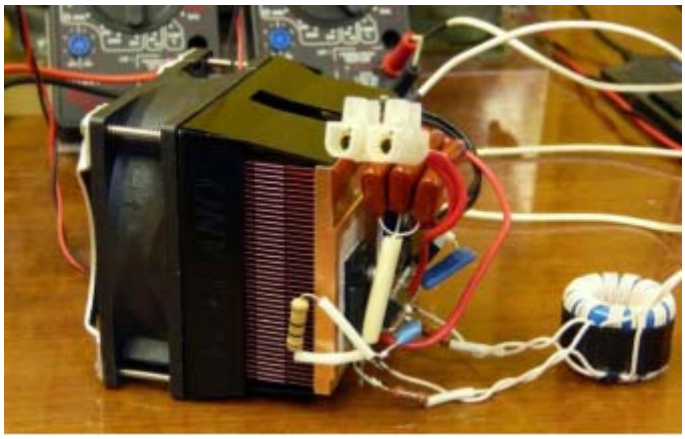


Рисунок 3.10 – Силовий модуль

Транзистори VT1 та VT2 розміщені на ізолюючих прокладках із слюди безпосередньо на підошві радіатора. Інші компоненти припаяні до висновків цих транзисторів і, по суті, на них і тримаються. Термопара для контролю температури транзисторів розміщена зверху і притиснута до мідного підставу радіатора теж через ізолюючу прокладку. Прокладка необхідна для усунення наведень на термопару, тому що радіатор не заземлений і знаходиться під плаваючим потенціалом.

Ну ось, насправді, і весь інвертор. Залишилося з'єднати всі модулі разом і почати випробування [31].

4. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Перше включення

Для першого включення необхідно підключити трансформатор, що розв'язує, і невелику активну навантаження. Як навантаження візьмемо лампу розжарювання на 100 Вт. Загальний вид макету для випробувань інвертора представлено на рисунку 4.1.

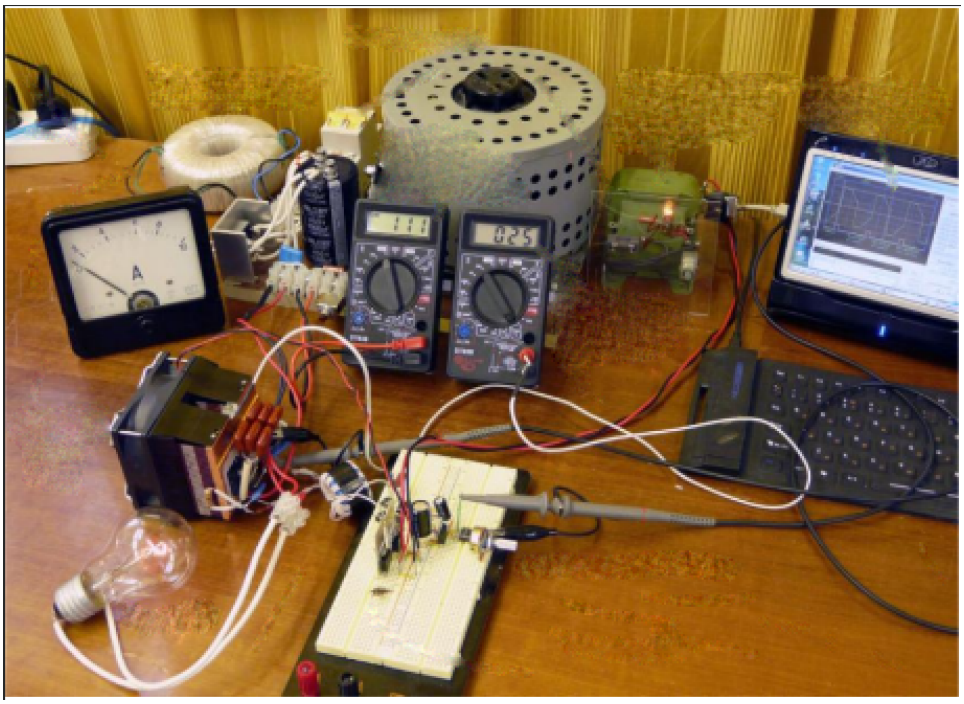


Рисунок 4.1 – Макет

Перше випробування інвертора проводиться кроками.

Крок 1. Ще раз перевіряємо правильність монтажу та складання інвертора. Корисно забрати все зайве зі столу [32].

Крок 2. Включаємо живлення блоку керування. Тільки блок управління! Поки не включається висока напруга.

На екрані осцилографа сигнали на затворах ключів. Земляний роз'єм щупа осцилографа підключається до початку відповідного транзистора. Сигнали мають бути схожі на сигнали, подані на рисунку 4.1. Залежно від використовуваних транзисторів та драйверів фронти можуть бути більш пологі. Обов'язково перевіряємо фазування сигналів.

Для цієї мети, звичайно, краще двопроменевий осцилограф, але можна і однопроменевим. В останньому випадку запуск розгортки осцилографа потрібно виконувати від окремого сигналу синхронізації.

Як такий сигнал зручно використовувати один із виходів IR2153. Обережніше із земляними роз'ємами щупів! В данному разі використовується трансформаторну розв'язку, тому земляний роз'єм щупа в силовому блоці можна. спокійно підключати до витоків обох транзисторів напівмосту. Інакше для сигналу синхронізації необхідно зробити розв'язку. Інакше можуть бути великі іскри.

Крок 3. Якщо крок 2 пройдено успішно, підключаємо щупи осцилографа паралельно навантаженню [33].

Перевіряємо положення ручки Латра. Вона має бути на нулі! Після цього вмикаємо високу напругу. ЛАТРом плавно піднімаємо напругу до 15 В – 20 В. Контролюємо цю напругу по вольтметру випрямляча. На екрані осцилографа зображені імпульси напруги на навантаженні, симетричні відносно нуля (як рисунок 4.2 зліва).

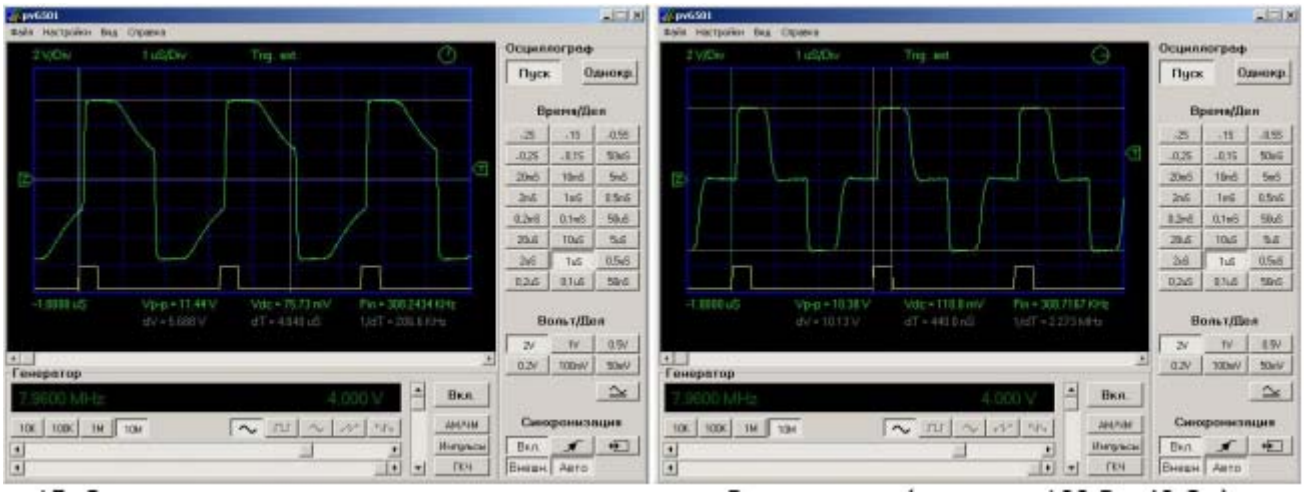


Рисунок 4.2 – Осцилограми при включенні

Насправді це осцилограми з кроку 5. Але на цьому кроці сигнали повинні бути такі самі, тільки меншої амплітуди. Які наведені тут для того, щоб обговорити їхню форму. Бачимо, що повільно спадають протягом dead-time «хвости» на високоомному навантаженні (рисунок 4.2 зліва).

Це з тим, що у перебігу dead-time обидва транзистори закриті. Тому чисто активне навантаження разом із щупом осцилографа просто, як то кажуть, «висить у повітрі». За відсутності навантаження (нескінченний опір) потенціал середньої точки (між ключами) взагалі змінюється протягом dead-time. Тому не потрібно звертати увагу на ці хвости. При зменшенні опору навантаження форма сигналу наближається до класичної (з «плічками» dead-time). Щоб переконатися в цьому можна взяти потужнішу лампочку з меншим опором нитки розжарення або взагалі інше навантаження з опором 10 Ом – 20 Ом.

Осцилограми для лампочки на 500 Вт наведені на рисунку 4.2 праворуч. Ми бачимо, що все працює правильно.

Продовжимо роботу з лампочкою на 100 Вт [34].

Крок 4. Змінюємо частоту інвертора від мінімуму і максимуму. Форма імпульсів не повинна радикально змінюватись. Принаймні вони мають залишатися симетричними щодо нуля.

Крок 5 Якщо на кроці 3-4 все нормально, поступово збільшуємо напругу до 100-120 вольт. Спіраль лампочки почне світитись. Першу потужність від інвертора отримано! "Погоняємо" його так хвилин 30-40.

Температура радіатора не повинна помітно уникати кімнатної.

Крок 6. Якщо осцилограф не дозволяє працювати при високих напругах, то відключимо щуп і плавно виведемо напругу на рівень 300 В – 310 В. Лампочка яскраво світиться. Слідкуємо за температурою радіаторів [35].

Якщо нагрівання суттєве – доведеться все-таки возитися з розрядкою затворів MOSFET. В експериментах протягом години температура радіаторів перевищила кімнатну лише на 2 °С – 3 °С градуси. Не таким вже страшним виявилося наше «недозакриття» транзисторів. Спокійно працюємо далі. Загальний вигляд інвертора під час цього кроку подано на рисунок 4.3.

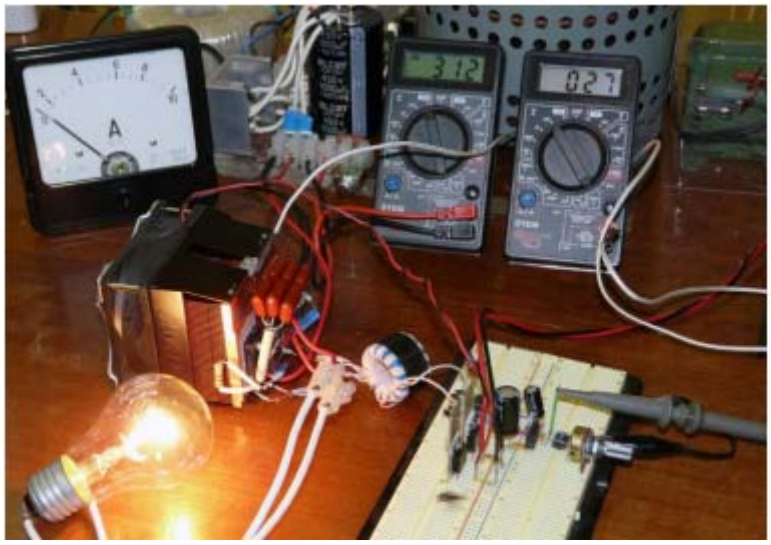


Рисунок 4.3 – Загальний вид інвентора протягом роботи

Крок 7. Швидко виводимо ЛАТР в 0 і швидко вимикаємо все харчування (спочатку високе, потім – живлення модуля керування з вентилятором). Зовнішньою стороною пальця перевіримо температуру резисторів снабберів та конденсаторів дільника (R9, R10 та C10, C11).

Вони не мають бути гарячими. Заодно перевіримо радіатор. Так, про всяк випадок. Раптом термопари мають поганий тепловий контакт.

Перші випробування інвертора закінчено. Тепер можна переходити до індукційного нагрівання.

4.2 Індукційний нагрів

Індукційне нагрівання це технологія, пов'язана з збудженням вихрових струмів у зразках, що проводять. для їхнього нагрівання. В даний час індукційне нагрівання широко використовується в різних галузях. промисловості та навіть у побуті (наприклад, побутові індукційні плитки) [36].

Однак, у дослідницькій лабораторії індукційне нагрівання – поки що екзотика. Можливо лабораторний інвертор, про який йдеться у цій роботі, полегшить впровадження технологій індукційного нагріву у практику фізико-хімічний експеримент. Продемонструємо можливості високочастотних інверторів на одному чудовому прикладі.

Це – плавлення металу (алюмінію) у зваженому стані. Іноді цей процес називають плавкою в електромагнітному тиглі або просто «левітаційною плавкою» (з англомовного терміна "levitation melting").

Тут високочастотне електромагнітне поле не лише гріє та плавить метал, але й утримує його в просторі без будь-яких тиглів або стінок, що обмежують. Для того, щоб здійснити таку плавку, нам необхідно виготовити водоохолоджувальне навантаження з індуктором спеціальної форми та передбачити в системі деяку додаткову діагностику. Почнемо із навантаження [37].

Еквівалентна схема навантаження для індукційного нагріву та плавки представлена на рисунок 4.4.

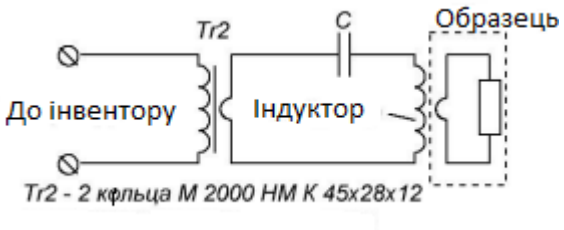


Рисунок 4.4 – Схема навантаження для індукційного нагріву

Трансформатор TR2 виготовлений із двох кілець К 45х28х12. Марка фериту М 2000 НМ. Первинна обмотка – 26 витків дроту МГТФ – 0,75. Ця обмотка приєднується безпосередньо до виходу інвертора. Роль вторинної обмотки, що складається з одного витка, виконує одна з відвідних трубок індуктора (мідь, діаметр 6 мм), що проходить через центр кільця трансформатора. Індуктор є котушкою, містить кілька витків (мідна трубка діаметром 4 мм). Індуктор разом із конденсатором С утворює послідовний коливальний контур, на резонансну частоту якого має бути налаштований інвертор. Зразок, що нагрівається, поміщений в індуктор на еквівалентній схемі можна представити як активний опір, індуктивно пов'язаний із індуктором.

Конструкція зібраного навантаження зі спеціальним індуктором для плавки у зваженому стані показана на рисунку 4.5 зліва [38].

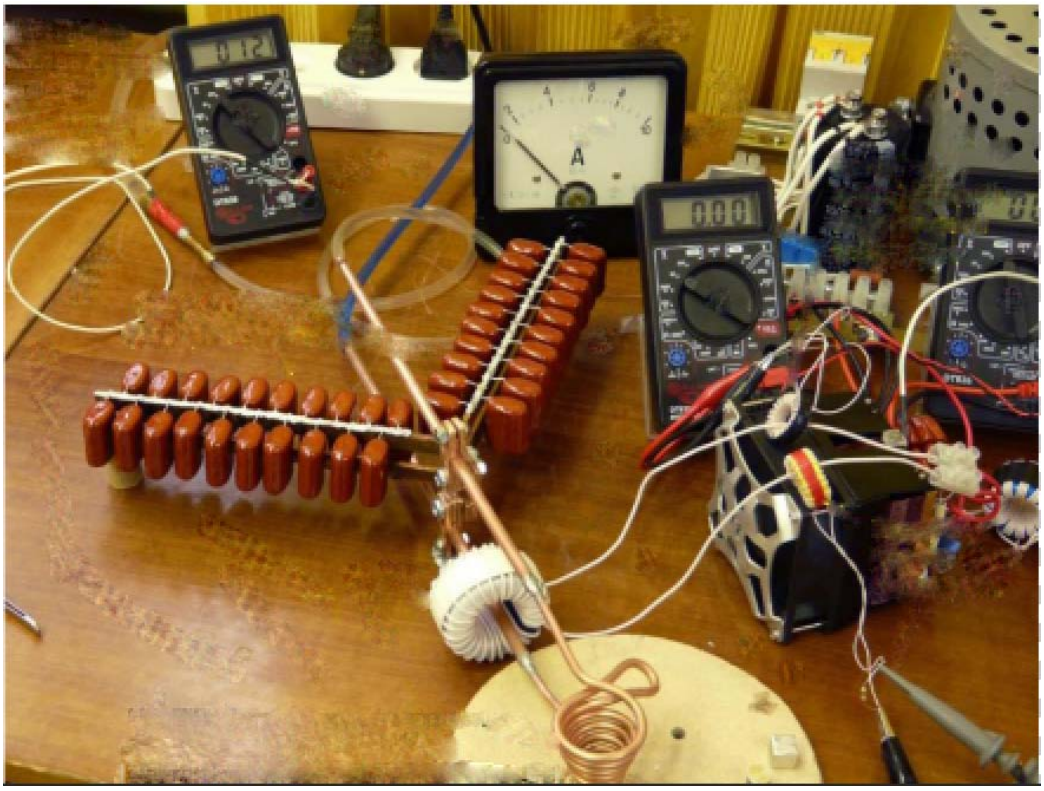


Рисунок 4.5 – Конструкція нагрузки та додаткової діагностики

У коливальному контурі проходять дуже великі струми (сотні ампер). Тому мідні трубки, що утворюють індуктор та підводи до нього, при великих потужностях досить сильно нагріваються. Їх потрібно обов'язково охолоджувати. Найпростіше використовувати водяне охолодження безпосередньо з водопроводу. Оскільки контур має високу напругу, необхідно передбачити електричну розв'язку індуктора від водопроводу Для цього підведення води робимо тонкими довгими діелектричними трубами [39]. Довжина цих труб залежить від провідності водопровідної води. Провідність води у лабораторії автора становить величину близько 100 мкСм/см, тому розв'язка у вигляді трубок діаметром близько 6 мм довжиною 5 м - 6 м має достатній для електричної розв'язки опір (близько 50 Мом).

Бажано також контролювати і температуру води, що охолоджує. Це легко зробити за допомогою металевої вставки у зливальний тракт. До неї можна прикріпити термопару, підключену до недорогого китайського тестеру, в якому є

режим вимірювання температури (рисунок 4.5 у верхньому лівому куті). Дуже зручно – одразу видно, якщо забув увімкнути воду для охолодження.

Конденсатор С коливального контуру повинен бути розрахований на досить велику реактивну потужність. Необхідно використовувати або спеціальні конденсатори для індукційного нагріву, або набирати батарею із досить великої кількості плівкових конденсатором меншої ємності, включених паралельно. У цьому контурі конденсаторна батарея містить 40 поліпропіленових високовольтних конденсаторів СВВ81 Ємність кожного конденсатора – 0,033 мкФ, робоча напруга 2 кВ. Загальна ємність батареї – 1,32 мкФ [40].

Тангенс кута втрат їх становить 0,0008. Тому на кожному конденсаторі виділяються у вигляді тепла лише десяті частки вата. Конденсатори змонтовані вільно та добре охолоджуються конвективними потоками повітря. Тому, навіть після півгодини роботи на максимальної потужності вони нагріваються незначно (на 10 °С - 20 °С).

Для стійкої левітаційної плавки конструкція котушки індуктора повинна мати спеціальну форму. В даному випадку індуктор виконаний із мідної трубки діаметром 4 мм у вигляді конуса [41].

Кут між твірною та горизонталлю дорівнює 65°. Індуктор містить чотири витки у прямому напрямку і один - у зворотному (противовиток). Це потрібно для того, щоб усередині індуктора була область, у якій поле менше, ніж довкола неї. Провідник, поміщений у змінне електромагнітне поле, виштовхується область менших полів. Тому без області з мінімальним полем положення зразка всередині індуктора буде нестійким. Для левітаційної плавки невеликих зразків конічна конструкція індуктора з противітка – одна з найпростіших, але ефективних.

4.3 Додаткова діагностика

Для «ручного» налаштування інвертора на резонанс під час роботи з резонансним навантаженням та оптимізації процесу нагріву корисно додати до

встановлення ще пару вимірювачів, пов'язаних із струмом, що споживається навантаженням.

Перший вимірювач призначений контролю середньоквадратичного струму.

Це трансформатор струму з двонапівперіодним випрямлячем. Первинна обмотка представлена дротом, що йде від інвертора до навантаження і проходить через центр невеликого феритового кільця. На цьому кільці намотана вторинна обмотка (20 – 30 витків дроту з виведенням від середини обмотки). Далі за допомогою двох діодів сигнал випрямляється, фільтрується та вимірюється за допомогою звичайного китайського мультиметра.

Другий вимірювач також є трансформатором струму, що йде в навантаження, але служить для контролю осцилограми сигналу Він влаштований практично так, як і в попередньому випадку, але вторинна обмотка не містить виведення з центру і навантажена на резистор кілька сотень Ом. З цього резистора сигнал подається на осцилограф. Дуже зручно при налаштуванні на резонанс та контроль позаштатних ситуацій.

4.4 Перевірка роботи макета

Включаємо воду охолодження та всі вимірювачі, необхідні для контролю процесу. Далі, спочатку включається живлення модуля управління та вентилятора, а потім – джерело високої напруги (Випрямляч). Плавно за допомогою Латра збільшуємо напругу до 30 В – 50 В.

Потім, повільно змінюючи частоту інвертора, налаштуємо інвертор на резонанс. Резонанс налаштовуємо по максимуму струму, споживаного навантаженням, контролюючи його амплітуду за осцилографом. Після налаштування на резонанс збільшуємо за допомогою ЛАТР напруги на силовому модулі до потрібного рівня. Встановлення для індукційного нагрівання готова до роботи.

Вимкнення відбувається у зворотному порядку. Скидаємо високу напругу (виводимо ЛАТР 0), потім вимикаємо його. Після цього вимикається джерело живлення модуля керування. Далі – у довільному порядку [42].

Налаштування на резонанс доводиться виконувати не так часто. Досвід показав, що при внесенні до індуктора невеликих феромагнітних зразків, розлад контуру не призводить до фатального зменшення поглинається зразком потужності і він гріється досить добре навіть без додаткового підстроювання частоти. Працюючи з немагнітними матеріалами резонансна частота взагалі майже «йде».

На рисунку 4.6 та рисунок 4.7 представлені два приклади, що ілюструють роботу інвертора як індукційного нагрівача Перший варіант - феромагнетик (просто - ручка надфілю), другий - немагнітний (шматок нержавіючої трубки). За посиланнями нижче можна завантажити відео, що показує весь процес. Ні в тому, ні в іншому випадку ніякого додаткового підстроювання частоти не проводилося.

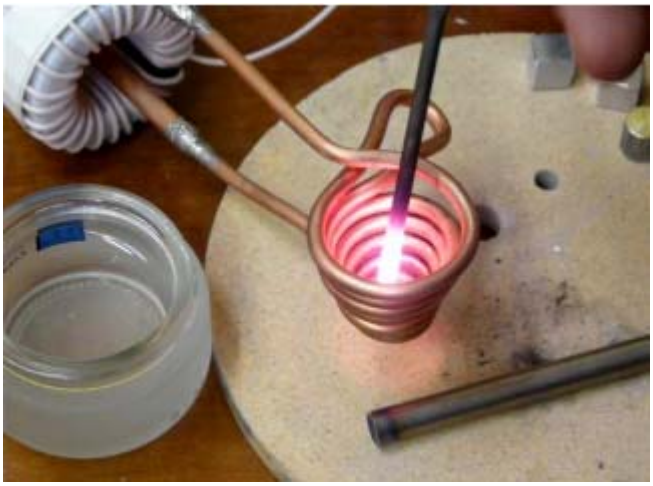


Рисунок 4.6 – Процес нагріву феромагнетичного матеріалу

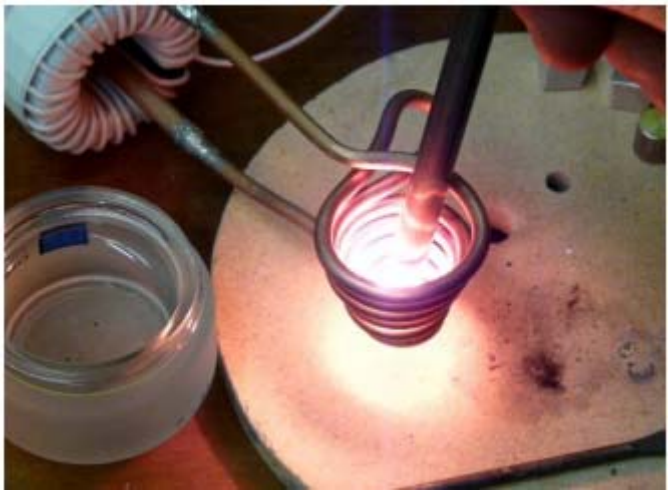


Рисунок 4.7 – Процес нагріву немагнетичного матеріалу

За допомогою пірометра ПД–4–02 була оцінена температура графітового зразка, поміщеного в індуктор, на повітрі без теплоізоляції [43]. За максимальної потужності вона була близько 1300 °С – 1350 °С. Так що для невеликих трубчастих печей із графітовим нагрівачем наш інвертор цілком підходить.

Перейдемо тепер до плавки.

4.5 Левітаційна плавка

Плавка у зваженому стані – досить цікаве заняття. Як зразок для плавки обраний шматочок алюмінію вагою 2,6 гр. Окремі кадри, що ілюструють процес плавки, наведено на рисунку 4.8.

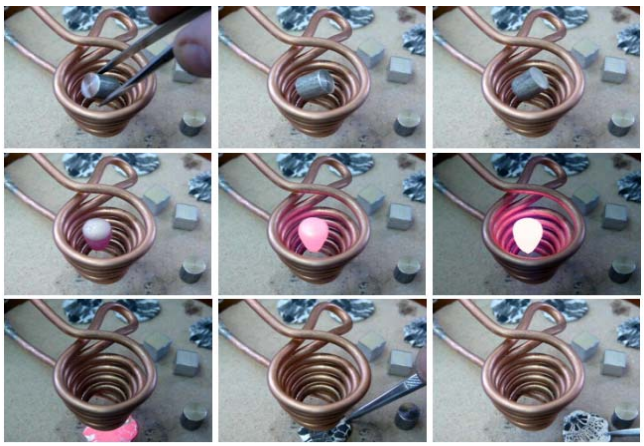


Рисунок 4.8 – Процес плавки алюмінійового зразка

У зваженому стані зразок може бути необмежено довго. Становище його досить стійке. Оцінка температури верхівки зразка (у розплавленому стані за максимальної потужності) була зроблена тим же пірометром ПД–4–02 без поправки на випромінювальну здатність перегрітого алюмінію. Вона дорівнює 1150 °С –1200°С.

За цей час було розплавлено понад півсотні зразків алюмінію, близько десятка зразків стали та кілька зразків міді. Більшість алюмінієвих плавок були виконані у зваженому стані. Маса зразків 2 гр – 3 гр. Маса сталевих та мідних зразків теж становила кілька грамів. Плавки проводилися як і графітових тиглях, і без них.

Інвертор працював стабільно. У всіх цих експериментах не трапилося жодних позаштатних чи аварійних ситуацій. Жодних перегрівів чи вибухів транзисторів та інших компонентів також не сталося. За суті справи, робота з інвертором нічим не відрізнялася від роботи з будь-яким іншим нескладним лабораторним прилад.

Так що можна вважати, що мета створення експериментального інвертора для індукційного нагріву та плавки невеликих зразків металів досягнуто [44].

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це система правил і заходів, які забезпечують безпечну роботу на даному виробництві.

5.1 Аналіз умов

Розглянемо приміщення, у якому проводяться проектувальні роботи та навчальна лабораторія. Розміри кімнати, у якій розробляється система дорівнюють 7,5м х 8,5м х 3,8 м. Приміщення може містити робочі місця для 6–и осіб. Площа дорівнює 63,75 $м^2$, а об’єм дорівнює 242,25 $м^3$. На кожне робоче місце припадає 10,625 $м^2$ площі і 40,375 $м^3$ обсягу. Проаналізувавши ці умови, можна прийти до висновку, що вони відповідають вимогам ДСАН ПІН 3.3.2–007–98, тобто площа на одне робоче місце повинна становити не менше 6 $м^2$, а об'єм не менше 20 $м^3$. Перейдемо до електричної мережі, вона трьохфазна, 4–х провідна змінного струму, напруга досягає приблизно 220 В/380 В, частота 50 Гц, режим нейтралі – глухо заземлена.

Машиною виступає персональний комп’ютер, середа приміщення – лабараторія. Предмет праці це пристрій, на яких працюють людини. Елементи «Л–М–С» безпосередньо впливають один на одного, також деякі зв’язки можуть бути небезпечними та можуть нашкодити.

У результаті аналізу «Л–М–С» було визначено, що в поміщенні є шкідливі фактори, відповідно до ГОСТ 12.0.003−74:

– понижена рухливість повітря;

– висока вологість;

– підвищені рівні шуму, вібрації, ультразвуку та різних випромінювань (теплових, іонізуючих, електромагнітних, інфрачервоних і ін.);

– недостатня освітленість робочих місць;

– підвищена яскравість світла та пульсація світлового потоку;

– висока температура повітря у поміщенні (домінуючий фактор);

– підвищене значення напруги в електричному ланцюзі та замикання, яке може відбутися через тіло людини (небезпечний фактор).

Психофізіологічні шкідливі фактори поділяються на:

– Фізичне перевантаження, яке поділяється на:

а) статичне;

б) динамічне.

– Нервово–психічні перевантаження, які поділяються на:

а) розумові перенапруження;

б) перенапруження аналізаторів;

в) монотонність праці;

г) емоційні перевантаження [45].

5.2 Промислова безпека

У приміщенні лабораторії використовується трьохфазна 4–х провідна мережа змінного струму, напруга якої становить 380 В/220 В, а частота 50 Гц, режим нейтралі – глухо заземлена. Відповідно до НПАОП 40.1−1.21−98 лабораторія належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки.

Щоб захистити працівників від ураження струмом у приміщенні застосовується система заземлення та захисне відключення електричного струму згідно до ДБН В.2.5−27−2006.

Відповідно до НПАОП 40.1−1.32−01 роботу захисного відключення робить електромагнітний роз’єднувач, котрий знаходиться у легкодоступних місцях, тобто, правої сторони від вхідних дверей на висоті приблизно 1,5 метри від підлоги приміщення. Також, приміщення має розподільний щиток, який знаходиться у десяти метрах від приміщення. Електропроводка у лабораторії виконана з можливістю заміни за необхідністю, тобто, вона прихована в каналах будівельних конструкцій.

Передбачено проведення інструктажів, згідно з вимогами НПАОП 0.00−4.12−05, а саме: вступний, первинний на робочому місці, повторний, позаплановий та цільовий. Факт проведення інструктажу фіксується у журналі з підписами осіб, котрі проводили інструктаж, та тих хто його слухав.

5.3 Виробнича санітарія

Праця, яка виконується у лабораторії, проводиться сидячі та не потребує важких фізичних напружень(підняття, перенесення важких предметів). Завдяки таким умовам роботи енерговитрати працівників не перевищують 120 ккал / год. Склавши ці факти, виконувані роботи відносяться до категорії 1А, тобто легкої.

Шкідливим фактором при проектуванні приміщення було розумове перенапруження.

Існують заходи щодо захисту від розумового перенапруження людини:

– регулярно, через кожні 40−50 хвилин робочого часу робити технологічні перерви, для розрядки розумового напруження;

– проведення фізичних вправ (зарядки, розминки) під час перерви.

У робочій зоні лабораторії має бути установлене поєднання параметрів мікроклімату. Згідно з ДСН 3.3.6.042−99 та для робіт категорії ІА повинні дотримуватися наступні умови мікроклімату:

– температура повітря не повинна бути більше ніж 23−25 ° С в літній період та 22−24 ° С в зимовий період;

– відносна вологість приміщення повинна бути в межах від 40 % до 60 %;

– швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,1 м / с.

Зорова робота працівника являє собою роботу високої точності, згідно з ДБН В.2.5−28−2006. Рекомендована штучна освітленість повинна складати від 300 лк. До 500 лк., а коефіцієнт природного освітлення дорівнює 1,5 %.

Рівень шуму у приміщеннях, де виконується робота пов’язана з виробленням концепції, створенням нових програм, викладацькою роботою, творчістю, повинен не перевищувати 50 дБА, згідно до ДСН 3.3.6.037−99.

5.3.1 Розрахунок кондиціювання

Метою перевірочного розрахунку є вибір кондиціонера, який забезпечить оптимальні значення мікрокліматичних параметрів в приміщенні.

При виділенні надлишкової явної теплоти кількість повітря визначають з умов асиміляції надлишків цієї теплоти. Розрахунок можна застосовувати і для вибору кондиціонера (продуктивність по повітрю).

Кількість припливного повітря (м^3/ год):

$$L_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{изб}}}{cp(t_{\text{уд}} - t_{\text{пр}})}, \quad (5.1)$$

де $Q_{\text{изб.}}$ – надлишкове виділення явної теплоти;

c – питомий теплоємність повітря при постійному тиску, що дорівнює 1,009 кДж / кг град або 0,24 Ккал / кг град;

p – питома вага повітря в приміщенні, кг / м3 (при нормальних умовах 1,2928 кг / м3);

$t_{\text{уд}}$ – температура повітря, що видаляється;

$t_{\text{пр}}$ – температура припливного повітря.

Температура повітря, яке потрапляє до приміщення, при наявності надлишку явної теплоти повинне бути від 5 °C до 8 °C нижче температури повітря в робочій зоні.

У приміщенні джерелами надлишкового тепла $Q_{\text{изб}}$ є:

– надходження тепла від людей;

– виділення тепла від устаткування і допоміжної апаратури;

– надходження тепла від сонячної радіації;

– виділення тепла від електричного освітлення.

$$L_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{изб}}}{cp(t_{\text{уд}} - t_{\text{пр}})} = \frac{1470}{0{,}24 \cdot 1{,}2928(28-22)} = 789{,}5 \text{ м}^3/\text{ч},$$

де tуд. = 28 ℃ температура повітря, що видаляється;

t пр. = 22 ℃ температура припливного повітря.

Виходячи з розрахованих показників вибираємо кондиціонер, який забезпечує необхідну кількість припливного повітря, до відповідних технічних показників, обираємо кондиціонер LG AQ09TSBN.

5.4 Пожежна безпека в приміщенні науково–дослідної лабораторії

Пожежна безпека у приміщенні забезпечується системою протипожежного захисту та запобіганням пожежі згідно з ГОСТ 12.1.004−91. Відповідно до НАПБ Б.03.002−2007 − дане приміщення за пожежною небезпекою відноситься до категорії В (використовуються тверді горючі матеріали). Приміщення лабораторії відноситься до II ступеня вогнестійкості будинку, тому що виконано переважно з цегли і залізобетону відповідно до ДБН В.1.1.7−2002. За категорією зони по пожежонебезпеки −П− IIа згідно НПАОП 40.1−1.01−97. [46]

Згідно НПАОП 40.1−1−21−98 причиною пожежі може стати один із проявів дії електричного струму, а саме теплове, іскрове, в умовах, сприятливих для зайняття техніки або інших займистих матеріалів.

Для пожежогасіння необхідно установити у приміщенні 2 ручних вуглекислотних вогнегасники типу ВВК−3,5, використання яких зумовлене необхідністю гасіння електроустановок, які знаходяться під напругою не більше 1000 В, розміщених в приміщенні. З розрахунку один вогнегасник на 3 ПЕОМ, але в одному приміщенні вогнегасників повинно бути не менше одного (згідно до НАПБ Б.03.001−2004), та один сповіщувач ДІП−1, який контролює площу до 86 м^2 і реагує на дим, що виділяється у великій кількості при горінні пластикових корпусів ПЕОМ.

У лабораторії є один вихід шириною 1,2 м. При наявності працюючих, цей вихід можна використовувати як евакуаційний. Схема евакуації розташована на видному місці біля дверей.

У приміщенні проводяться інструктажі, які спрямовані на детальне ознайомлення з правилами пожежної безпеки в приміщенні, навчання використанню засобів пожежогасіння, порядку оповіщення про пожежу, викликам пожежної охорони і дій під час пожежі. Виконується встановлений режим експлуатації електричних мереж та обладнання, забороняється куріння в лабораторії.

ВИСНОВКИ

Основною перевагою, яка привернула увагу дослідників, була відсутність контакту рідкого металу з вогнетривкою футеровкою, що забезпечувало усунення одного з основних джерел забруднення металу такою шкідливою домішкою, як кисень. Це особливо важливо для плавлення тугоплавких високоактивних металів і напівпровідників.

Порівняно з іншими способами плавлення, які також забезпечували відсутність контакту рідкого металу з тиглем, ЕМЛ рідких металів має ряд істотних переваг: регульований час перебування краплі металу в рідкому стані; контрольована газова атмосфера і шлакова фаза; контрольована температура металу (від температур плавлення до кипіння); можливість використання додаткового джерела тепла (електронного променя, лазерного променя або плазми); інтенсивне перемішування металу електромагнітним полем; можливість введення в краплю рідини легуючих добавок; сприятливе співвідношення між поверхнею краплі та її об'ємом для проходження гетерогенних реакцій; і досягнення надзвичайно високих швидкостей кристалізації до 106°C/c. Безконтактність рідкого зразка є суттю ЕМЛ у поєднанні з ультрачистим середовищем, яке є чудовим інструментом для досліджень.

Крім того, ЕМЛ є одним із найстаріших безконтактних методів левітації, який використовується в матеріалознавчих експериментах протягом десятиліть. ЕМЛ є найдосконалішим з усіх методів безконтактного плавлення, який десятиліттями використовувався в наземних експериментах, а також у мікрогравітаційних експериментах із широким діапазоном сплавів.

ЕМЛ в умовах гравітації має деякі проблеми, пов’язані з гравітаційними силами, тому, якщо левітація виконується в умовах мікрогравітації, для компенсації залишкових прискорень потрібні лише невеликі сили левітації. З індуктором, оптимізованим для мікрогравітації, нагрівання та позиціонування зразків можна здійснювати майже незалежно.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ–3008–15.
2. Okress EC, Wroughton DM, Comenetz G, Brace PH, Kelly JCR. Electromagnetic levitation of solid and molten metals. Journal of Applied Physics. 1952;23:545-552
3. Lohöfer G. Theory of an electromagnetically levitated metal sphere. SIAM Journal of Applied Mathematics. 1989;49:567-581
4. Lewis JC, Neumayer HRJ, Ward RG. The stabilization of liquid metal during levitation melting. Review of Scientific Instruments. 1962;39:569-575
5. Vuzens AP. The use of physical modeling to study the soaring of liquid metal over parallel coils. Magnetic Hydrodynamics. 1971;3:19-22
6. Kirko IM. Liquid Metal in the Electromagnetic Field. Moscow: Energy Publishing; 1964. p. 160
7. Vogel AA, Pavlov NA, Korkin IV, Sidorova TA. Inductors for heating and melting metals by levitation. Russian Metallurgy (Metalli). 1961;5:51-61
8. Glebovsky VG, Burtsev VT. Levitation Melting of Metals and Alloys. Moscow: Metallurgy Publishing; 1974, p. 176
9. Zeitsch K. Rotary electromagnetic levitation for high-temperature testing. High Temperatures-High Pressures. 1970;2:419-428
10. Nordine PC, Weber JKR, Abadie JG. Properties of high-temperature melts using levitation. Pure Applied Chemistry. 2000;72:2127-2136
11. Busse FH. Oscillations of a rotating liquid drop. Journal of Fluid Mechanics. 1984;142:1-8
12. Frohberg MG. Thirty years of levitation melting calorimetry—A balance. Thermochimica Acta. 1999;337:7-17
13. Baptiste L, van Landschoot N, Gleijm G, et al. Electromagnetic levitation: A new technology for high rate physical vapor deposition of coatings onto metallic strip.

Surface & Coatings Technology. 2007;202:1189-1193. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.05.075

14. Zhu XR, Harding RA, Campbell J. Calculation of the free surface shape in the electromagnetic processing of liquid metals. Applied Mathematical Modelling. 1997;21:207-214
15. Lv Q, Jiang H, et al. Simulation analysis and experimental study of the temperature characteristics of electromagnetic levitation. AIP Advances. 2018;8:105127
16. Spitans S, Jakovics A, Baake E, Nacke B. Development, verification and application of numerical model for coupled free surface and liquid metal flow calculation in EM field. In: 7th International Conference on Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow: MPF 2013: 3-5 July, 2013. A Coruna, Spain: Elsevier B.V. WIT Transactions on Engineering Sciences. Vol. 79. 2013. pp. 49-61
17. Spitans S et al. Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. Part II: Conventional electromagnetic levitation. Metallurgical and Materials Transactions B. 2015;47:522-536
18. Spitans S et al. Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. Part I: Implementation and verification of model. Metallurgical and Materials Transactions B. 2013;44:593-605
19. Spitans S et al. New technology for large scale electromagnetic levitation melting of metals. Magnetohydrodynamics. 2015;51:121-132
20. Spitans S. Investigation of turbulent free surface flow of liquid metal in electromagnetic field [PhD thesis]. Riga: University of Latvia; 2015
21. Spitans S, Franz H, Baake E. Numerical modelling and optimization of the electrode induction melting for inert gas atomization (EIGA). In: Proceedings of 11th PAMIR International Conference. “Fundamental and Applied MHD”, (Reims, France). 2019. pp. 327-331
22. Okomura T, Shibata T, Okochi N. Production of gas atomized Ti alloy powder by levitation melting furnace with electromagnetic nozzle. In: Ninomi M et al.,

editors. Ti-2007 Science and Technology. Tokyo, Japan: The Japan Institute of Metals; 2007. pp. 997-1000

23. Okumura T, Yamamoto K, Shibata M. Large scale cold crucible levitation melting furnace with a bottom tapping nozzle. In: Proceedings of 6th International Conference “Electromagnetic Processing Materials” (Dresden, Germany). 2009. pp. 521-524
24. Розанов, Ю.К. Основы силовой электроники [Текст] / Ю.К. Розанов. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. - 296 с.
25. Зайцев, А.И. Силовая промышленная электроника [Текст]: учеб. пособие/ А.И. Зайцев, А.С. Кожин, А.С. Плехов. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – 280 с.
26. Зайцев, А.И. Экономия электроэнергии и улучшение качества потребляемой электроэнергии преобразовательной техникой [Текст]: учеб. пособие / А.И.Зайцев. –Горький: ГПИ, 1984. – 80 с.
27. Богданов, Н.Н. Автономные инверторы и преобразователи частоты[Текст]: учеб. пособие. / Н.Н. Богданов [и др.]. – Москва: МЭИ, 1977. – 69 с.
28. Забродин, Ю.С. Автономные тиристорные инверторы с широтно-импульсным регулированием [Текст] / Ю.С. Забродин. – Москва: Энергия, 1977. –135 с.
29. А.с. No 1577030 СССР. Трехфазный резонансный инвертор [Текст]/ Иванов А.Б., Мещеряков В.Н., Теличко Л.Я., Пивоваров И.В. // Опубл.07.07.90 Бюл. No25.
30. Мещеряков, В.Н. Система управления автономным инверторомтока с релейным формированием напряжения на конденсаторах выходного фильтра для частотно-управляемых асинхронных электроприводов [Текст]/
31. В.Н. Мещеряков, Д.В. Пешков // Известия вузов. Электромеханика. – 2010– No2. – С. 39-42.
32. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления [Текст] / Н.В. Донской [и др.] под ред А.Д. Поздеева. – Москва: Энергоиздат, 1984. – 352 с.

33. Серия силовых модулей на полевых и биполярных транзисторахс изолированным затвором [Текст]. – Москва: Интеллектуальная силоваяэлектроника. 1991. – 3 с.
34. Алтарев, М.С. Управляемые выпрямители для автоматизированного электропривода [Текст]: учеб. пособие / М.С. Алтарев. – Чебоксары: Copyright ОАО «ЦКБ «БИБКОМ» & ООО «Агентство Книга-Сервис»94сЧувашский ун-т, 1996. – 192 с.
35. Калашников, Б.Е. Проблема «длинного кабеля» в электроприво- дах с IGBT-инверторами [Текст] / Б.Е. Калашников // Электротехника. –2002.– No3. – С. 24-26.
36. Справочник по автоматизированному электроприводу [Текст / под ред.В.А Елисеева, А.В. Шинянского. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
37. Langmann R. et al. Workshop: The TATU Lab & smart education //2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). – IEEE, 2016. – С. 400-402.
38. ПВ Галкин, ВВ Гавриленко, АИ Монько Исследование дальности и скорости передачи данных по витой паре в промышленных сетях RS-485 и PROFIBUS // Харків: ХНУРЕ 2016
39. Reinhard Langmann, Yuliya Makarova, Leandro Rojas-Peña, Pavlo Galkin, Igor Klyuchnik, Viktoriya Voropaeva, Valerii Pozepaev, Lyubov Zinyuk, Rostislav Skrypyuk, Elena Shaporina, Volodymyr Shaporin, Vladlen Shapo, Sergii Gorb. 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV) – IEEE 2016/2/24 – С 400-402.
40. Pavlo Galkin, Lydmila Golovkina, Igor Klyuchnyk Analysis of single-board computers for IoT and IIoT solutions in embedded control systems // 2018/10/9 IEEE –С. 297-302
ВЛ Колосков, ИЮ Павлов, ЕБ Иванов - Системный администратор, 2016
41. SH Leitner, W Mahnke - ABB Corporate Research Center, 2006
42. MH Schwarz, J Börcsök - 2013 XXIV International Conference, 2013
43. R Henssen, M Schleipen - Procedia Cirp, 2014 – Elsevier

44. MA Rosid, A Rachmadany, MT Multazam… - IOP Conference, 2018
45. АА Козлов, АВ Батищев - Территория науки, 2017
46. Кухтецкий С.В. Простой лабораторный инвертор для индукционного нагрева.