

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

" _____ " _____ 2024р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

на тему

"Автоматизована система керування електродуговою піччю типу ДС-5МТ"

"Automated control system for electric arc furnace type DS-5MT"

Виконав: здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-21-3ск

ОПП «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

спеціальність 151 «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

_____ Олександр ШЕРЕМЕТ

" _____ " _____ 2024р.

Керівник роботи

професор, канд. техн. наук

_____ Віктор КАЛІЧ

" _____ " _____ 2024р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Опис технологічного процесу виплавки сталі.....	5
1.1 Аналіз сучасних автоматизованих технологічних процесів плавки сталі.....	5
1.1.1 Індукційна плавка.....	5
1.1.2 Електрошлаковий переплав (ЕШП).....	8
1.1.3 Електронно-променева плавка.....	9
1.1.4 Плазмена плавка.....	14
1.1.5 Електродугова плавка.....	17
1.2 Технологічний процес плавки сталі електродуговим способом.....	21
1.2.1 Заправка печі.....	22
1.2.2 Завалка шихти.....	23
1.2.3 Плавка.....	24
1.2.4 Окислення.....	25
1.2.5 Відновлення.....	26
1.2.6 Рафінування та випуск.....	27
2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу.....	29
2.1 Задачі по автоматизації електроприводу переміщення електроду.....	29
2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна.....	30
2.2.1 Вибір і перевірка електродвигуна.....	31
2.3 Розрахунок механічної частини електроприводу переміщення електроду.....	34
3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій.....	37
3.1 Розрахунок позиційної САК положення електродів печі.....	37

3.1.1	Визначення параметрів структурної схеми двигуна постійного струму.....	37
3.1.2	Структурна схема контуру регулювання струму.....	39
3.1.3	Структурна схема контуру регулювання швидкості.....	42
3.1.4	Визначення параметрів контуру регулювання положення системи з підпорядкованими контурами швидкості і струму.....	45
3.2	Розрахунок силової частини та вибір стандартного регулятора потужності.....	46
3.2.1	Вибір пічного трансформатора.....	46
3.2.2	Вибір регулятора потужності.....	47
4	Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи.....	52
4.1	Розрахунок перехідних процесів у АСК положенням електродів печі.....	52
4.2	Аналіз стійкості САК.....	55
4.2.1	Критерій Гурвіца.....	55
4.2.2	Критерій Найквіста.....	56
	Висновок.....	58
	Література.....	60

ВСТУП

Металургія є важливим стовпом економічної та оборонної потужності будь-якої країни, і вона представляє собою складну та різнопланову галузь господарства. Україна не є винятком, займаючи важливе місце у світовій металургійній індустрії. Багато з металургійних підприємств колишнього СРСР розташовані в Україні, що призводить до значного фінансового внеску цієї галузі в бюджет країни. Ключовим елементом у виробництві металургійних виробів є плавильна піч.

У поточний час для плавлення металів у печах використовують різноманітні джерела теплової енергії, такі як вуглецеве тверде і рідке паливо, газоподібне вуглеводневе паливо та електрична енергія. При виборі типу енергоносія для нових плавильних печей необхідно враховувати технічні вимоги до плавленого металу, а також матеріальні та енергетичні ресурси. Наприклад, вартість одиниці теплоти, що виділяється у печі при використанні електричної енергії, може бути вищою порівняно з виділеною теплотою при згоранні вуглецевого палива. У деяких випадках капітальні витрати на будівництво електропечей можуть перевищувати витрати на будівництво печей, які працюють на паливі.

Проте, стратегічні плани розвитку енергетичних ресурсів країни передбачають поступове збільшення частки електричної енергії серед зазначених видів палива. Крім того, важливо пам'ятати, що для виплавки металів і сплавів переважно використовують найякісніші, але дефіцитні види палива, наприклад, кокс для плавлення чавуну. У зв'язку з цим, економічно доцільним є використання електричної енергії.

Отже, разом з процесом кисневої конверсії, електрометалургійний процес стає найбільш перспективним методом масового виробництва сталі, і тому відсоток виробництва електросталі у світі постійно зростає.

Важним чинником, що сприяє зростанню значення електроплавлення у ливарному виробництві, є високі стандарти якості металу, які сучасне машинобудування вимагає. Крім того, збільшення витрат на виплавку сталі вищої якості компенсується економічними перевагами, що виникають під час подальшої обробки та використання виробів у національному господарстві. Це через зменшення вмісту металу в виробах та підвищення їх надійності та тривалості служби.

Зазначимо переваги електроплавки згідно з [1]:

- Можливість досягнення високих температур і швидкого нагріву за рахунок сконцентрованої енергії у невеликих обсягах.
- Зупинення циркуляції повітря в робочому приміщенні печі з викидами від спаленого палива.

Це сприяє зниженню випаровування металу під час плавлення і підвищенню його чистоти, що створює більш сприятливі умови для автоматизації технологічного процесу плавлення металу.

На цьому етапі розвитку ливарного виробництва в Україні варто відзначити, що дугові сталеплавильні печі були введені в експлуатацію у різний період часу і піддавалися реконструкції в процесі роботи. Електроприводи і системи їх управління вже застаріли з технічної точки зору, їх надійність зменшилась, і виникла похибка у керуванні. Всі ці аспекти значно впливають на якість виробленої сталі, збільшують енергетичні затрати та знижують продуктивність електродугових сталеплавильних печей.

Тому основною метою кваліфікаційної бакалаврської роботи є автоматизація електродугової печі та забезпечення як ручного, так і автоматичного режимів процесу плавлення сталі за допомогою передових технічних засобів.

1 Опис технологічного процесу виплавки сталі

1.1 Аналіз сучасних автоматизованих технологічних процесів плавки сталі

Прогрес у ливарному виробництві переважно обумовлений поліпшенням існуючих методів та впровадженням новаторських технологій плавлення сталі.

Згідно з [3], ефективним шляхом отримання високоякісних ливарних сплавів є застосування висококонцентрованих джерел тепла, таких як електронний промінь та плазма. У виробництві відливок з алюмінієвих сплавів широко використовуються індукційні печі в ливарних цехах. Для плавлення сталей та мідних сплавів ефективним є використання комбінованого плазменно-індукційного нагріву. Високу чистоту сталей забезпечує метод електрошлакового переплаву. Глибоке очищення (рафінування) сталі від газів та неметалевих домішок досягається шляхом плавлення у вакуумі.

Проте найпоширенішим застосуванням користуються електродугові печі, які використовуються для виробництва до 70% всіх сталених відливок.

Тож, давайте розглянемо ці сучасні технологічні процеси плавлення сталі більш докладно.

1.1.1 Індукційна плавка

Процес індукційного плавлення металів є одним з найбільш універсальних методів електроплавлення. Цей метод застосовується для плавлення металів та сплавів з різноманітними діапазонами температур плавлення і фізико-хімічними властивостями.

Принцип індукційного нагріву ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, яке полягає у тому, що у провіднику, що перебуває у змінному магнітному полі, виникає електрорушійна сила, що призводить до виникнення

електричного струму у замкнутому контурі. У випадку індукційного нагріву через обмотку (катушку), що містить провідник і називається індуктором, пропускається струм, що призводить до появи змінного у часі магнітного поля навколо індуктора. У цьому магнітному полі розміщується метал, який потрібно розплавити. Силкові лінії магнітного поля перетинають метал та стимулюють в ньому вихрові струми, які нагрівають та розплавляють метал. Цей процес відбувається з високими швидкостями та температурами нагріву, оскільки теплове виділення відбувається безпосередньо у металі.

Індукційні печі поділяються на каналні та тигельні залежно від місця розташування металу у печі, де відбувається індукція вихрових струмів.

У каналних печах індукція викликає утворення вихрових струмів та випромінення теплової енергії в розплавленому металі, який перебуває в каналі, утворюючи кільце або витік навколо магнітопроводу з обмоткою індуктора. Під впливом магнітного поля, оскільки канал з'єднаний з ванною печі, метал, що перебуває у ванні, також втягується в цей рух. Загалом, пристрій каналної індукційної печі аналогічний схемі звичайного електричного трансформатора, де первинною обмоткою виступає індуктор, а вторинною – кільцевий канал з розплавленим металом.

На рисунку 1.1 показана схема індукційної каналної печі, що складається з основних компонентів: ванни 1, яка має вогнетривку оббивку та розташована у кожусі, кільцевого каналу 4, індуктора 5 та магнітопроводу 3. Кільцевий канал, виготовлений з вогнетривкого матеріалу, розташований в підлоговому камені та разом з індуктором формує так звану індукційну одиницю.

Тигельні індукційні печі відрізняються тим, що обмотка індуктора розміщена навколо тигля і не має магнітного проводу. Це означає, що індукція вихрових струмів та виділення тепла відбувається у металі (незалежно від того, чи він рідкий, чи твердий), який знаходиться безпосередньо в тиглі. Завдяки так званому "поверхневому ефекту" тепло генерується переважно в поверхневому

шарі металу, оскільки він має менший опір для вихрових струмів, ніж глибокішарові частини металу. Також, подібно до каналних печей, розплавлений метал активно переміщується у тиглі під впливом магнітного поля. Це призводить до рівномірності температури та хімічного складу розплаву по всьому обсягу ванни.

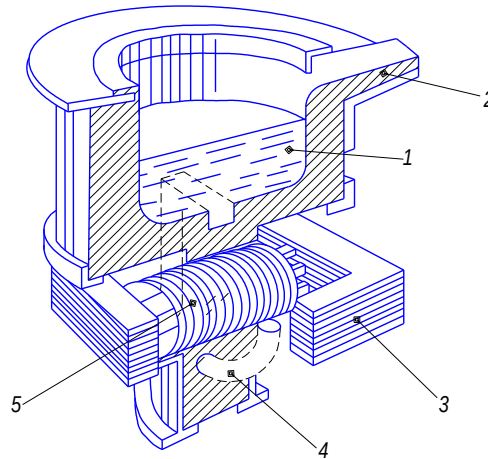


Рисунок 1.1 – Індукційна канална піч

На рис.1.2 зображено схему індукційної тигельної печі, яка складається з основних компонентів: плавильного тигля 1, індуктора 2 та зовнішнього магнітопроводу. 3.

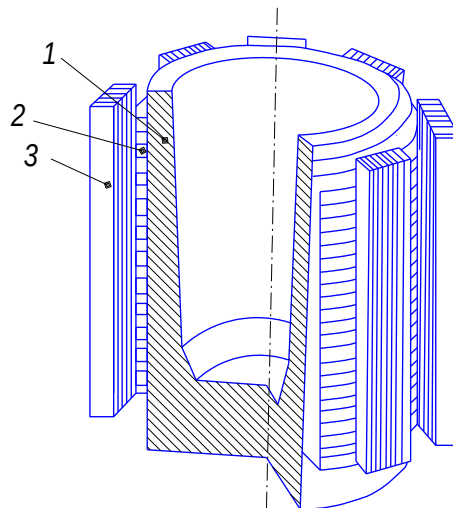


Рисунок 1.2 – Індукційна тигельна піч

1.1.2 Електрошлаковий переплав (ЕШП)

В електрошлакових печах виробляють виливки з високоякісних сталей різних типів, таких як конструкційні, шарикопідшипникові, нержавіючі, жаростійкі та інші.

На рис.1.3 показана схема електрошлакового переплаву. Принцип дії полягає в тому, що електрод 1, який підлягає розплавленню, опускають у шар 2 рідкого електропровідного флюсу шлаку, що знаходиться на поверхні рідкої ванни 3 для виливки 6. Змінний електричний струм подається на електрод та піддон 5, проходячи через шлак, нагріваючи його і утримуючи його у рідкому стані при температурі 16000 - 20000 С. При цьому частина тепла передається електродові, один кінець якого розплавляється. Крапля металу, яка стікає з одного кінця, проковтується через шар шлаку, очищається від шкідливих домішок під впливом фізико-хімічної взаємодії зі шлаком, і потім потрапляє у ванну для виливки.

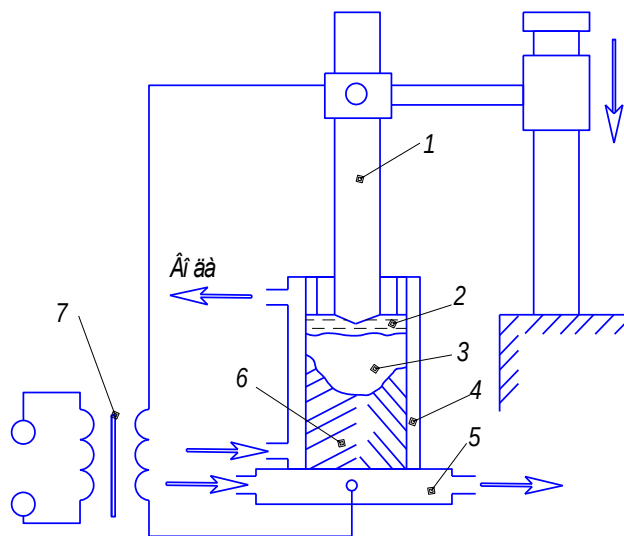


Рисунок 1.3 – Схема електрошлакового переплаву

Ефективність електросталеплавильного процесу в більшості випадків залежить від складу та властивостей шлаку. Для електросталеплавильних печей вимагається наступне: шлак повинен мати електропровідність, достатню для забезпечення потрібних температур плавлення шлаку та металу за мінімального

витрачання електроенергії; його в'язкість повинна сприяти утворенню тонкого та рівномірного шару сажу на поверхні виливку та полегшувати вивід газів з металу. Також, шлак повинен добре прилипати до металу та взаємодіяти з неметалевими включеннями для їх ефективного видалення; він не повинен містити легковідновлювальних оксидів, щоб запобігти окисленню розплавленого металу, і має захищати його від дії атмосфери повітря. Крім того, шлаки повинні мати певну температуру плавлення та кипіння, а також бути відносно доступними та економічно доцільними.

Електростатичний спосіб лиття виявляє ефективність як у випадку виготовлення відливок по одному, так і у масовому виробництві. Простота установок для електростатичного лиття та їх відносно невелика вартість сприяють швидкому окупанню витрат на новий проект.

1.1.3 Електронно-променева плавка

Електронно-променеве нагрівання відбувається шляхом перетворення кінетичної енергії електронів, які прискорюються у електричному полі до великих швидкостей (60-100 тис. км/с), у теплову енергію при їх гальмуванні на поверхні металу. Електрони, що виходять із розігрітого катоду з вольфраму, прискорюються у полі високої напруги (20-40 кВ), яке створене між катодом і анодом. Фокусування потоку електронів для досягнення необхідної густини на металевій поверхні здійснюється за допомогою фокусуючої електромагнітної системи пушки. Отже, у електронній пушці відбувається випромінювання, прискорення та фокусування електронів у щільний пучок, який називається електронним променем.

На рис.1.4 показана найбільш поширена схема для електронно-променевого плавлення з боковим (а) та вертикальним (б) напрямом подачі заготовки. У цій схемі використовуються наступні компоненти: 1 - електронна

пушка, 2 – електронний промінь, 3 – заготовка, яка піддається плавленню, 4 – охолоджуваний водою кристалізатор, 5 – литва.

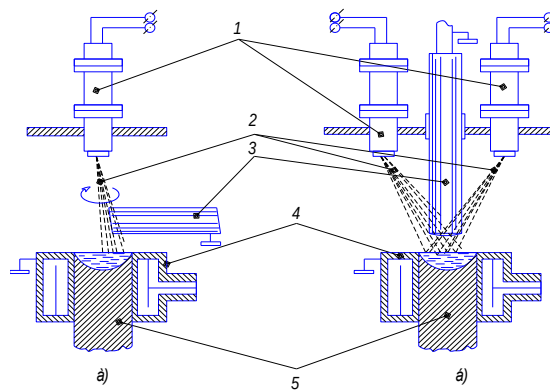


Рисунок 1.4 – Схема електронно-променевої плавки із боковою (а) та вертикальною подачею (б) заготовки, що переплавляється

На рис.1.5 показана схема електронно-променевої плавки з подачею шихти за допомогою шнекового механізму (а) та вібраційного лотка (б):

1. електронна пушка;
2. електронний промінь;
3. шихта, що переплавляється;
4. трубчаста направляюча, що обертається;
5. контейнер зі шнеком;
6. бункер;
7. вібраційний лоток;
8. кристалізатор;
9. виливок.

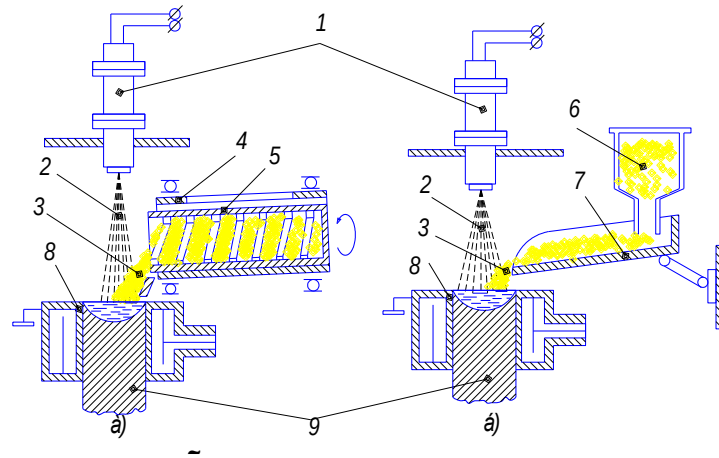


Рисунок 1.5 – Схема електронно-променевої плавки із подачею шихти шнековим механізмом (а) та вібраційним лотком (б)

Використання електронно-променевої плавки сприяє впровадженню нових технологічних процесів, серед яких важливе місце займає отримання суцільних та багатошарових плоских виливок. Для цього використовується електронно-променева плавка з проміжною ємністю (рис. 1.6, а). Також ефективною є використання тієї ж схеми електронно-променевої плавки для технологічного процесу отримання гранул із заготовки, яка розплавляється (рис. 1.6, б). Об'яснення до малюнку:

- 1- електронна пушка;
- 2- заготовка, що розплавляється;
- 3- проміжна ємність;
- 4- водоохолоджувана ємність;
- 5- виливок, що наплавляється;
- 6- водоохолоджуваний барабан, що обертається;
- 7- гранули.

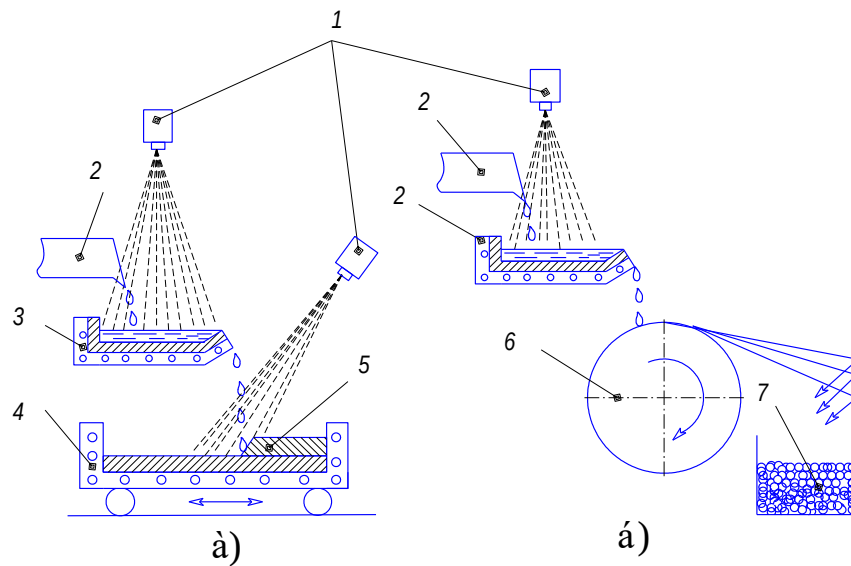


Рисунок 1.6 – Схема електронно-променевої плавки із проміжною ємністю (а) та для отримання гранул із заготовки (б)

На рис. 1.7 зображена схема електронно-променевої плавки із проміжною ємністю (а) та холодним подом (б):

- 1-електронні пушки;
- 2-заготовка, що переплавляється;
- 3-рідкий метал;
- 4-проміжна ємність;
- 5-водоохолоджуваний под;
- 6-кристалізатор;
- 7-виливок;
- 8-піддон.

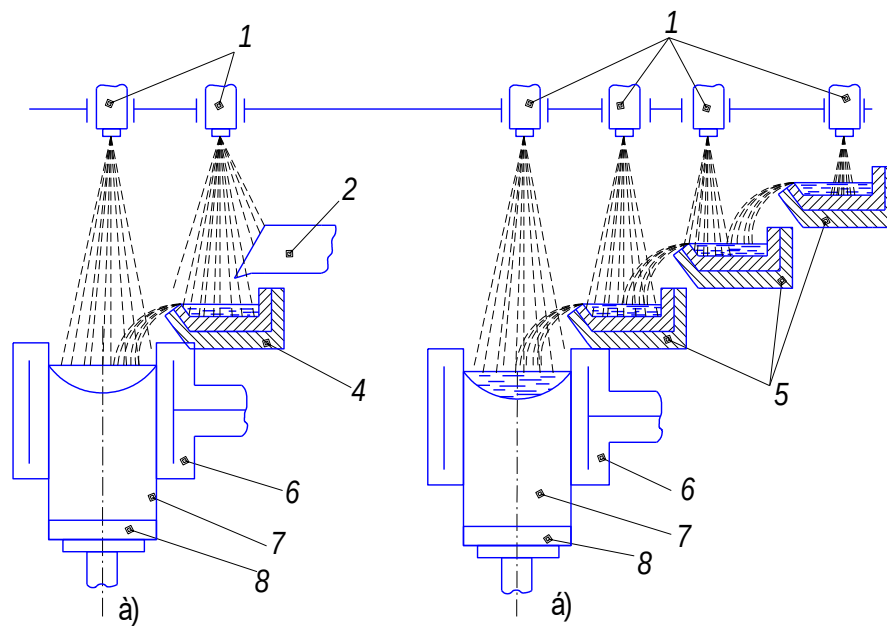


Рисунок 1.7 – Схема електронно-променевої плавки із проміжною ємністю (а) та холодним подом (б)

Розглянемо деякі недоліки електронно-променевого плавлення. По-перше, спостерігаються значні втрати металу через випаровування, що призводить до зміни хімічного складу сталі або сплаву за основними компонентами. Відбувається інтенсивне видалення компонента сплаву, тиск пару якого перевищує тиск пару основного металу у 10 разів при даній температурі. Збільшення потужності електронного променя призводить до зростання швидкості випаровування через підвищення температури поверхні рідкого металу. Зміна хімічного складу плавленого сплаву потребує відповідного коригування складу початкового матеріалу. Крім того, продуктивність електронно-променевих печей часто залишає бажати кращого, що призводить до збільшення витрат на одиницю продукції порівняно з іншими методами плавлення.

Метод електронно-променевої плавки використовується для виготовлення виливків зі сталі, жаростійких сплавів на основі нікелю і кобальту, а також важкоплавких металів, а також для виготовлення формованих відливок, переважно з важкоплавких металів.

1.1.4 Плазмена плавка

Плазмовий нагрів базується на використанні потоку плазми як теплоносія. Плазма представляє собою іонізований квазінейтральний газ (загальний заряд якого дорівнює нулю). Іонізація газу відбувається під дією зовнішнього джерела енергії (теплого або електричного), що призводить до процесів дисоціації та іонізації нейтральних частинок газу і підвищує його температуру. Чим більша ступінь іонізації, тим вища температура. У металургії використовують "холодну" (низькотемпературну) плазму зі ступенем іонізації приблизно 1% і температурою від 50 000 до 150 000 градусів Цельсія. Ступінь іонізації "гарячої" плазми дорівнює 1, а температура може досягати сотень тисяч градусів. Для створення плазми використовують пристрої, що називають плазмотронами. В залежності від методу нагріву газу до іонізованого стану виділяють дугові, індукційні, електронні та паливні плазмотрони. Найбільш широко застосовуються дугові плазмотрони, оскільки газ можна легше нагріти до високої температури, пропускаючи його через електричну дугу.

Більшість дугових плазмотронів працюють на постійному струмі, що забезпечує стабільність горіння дуги. У таких умовах нагрів може відбуватись за допомогою плазмової струї або плазмової дуги. Плазмова струя формується у плазмотронах, де дуга горить між електродами всередині цього пристрою.

На рис.1.8 наведено діаграму дугового плазмотрону, складеного із наступних елементів: 1 – оболонка з водяним охолодженням, 2 – тримач катоду, 3 – стержні з вольфраму.

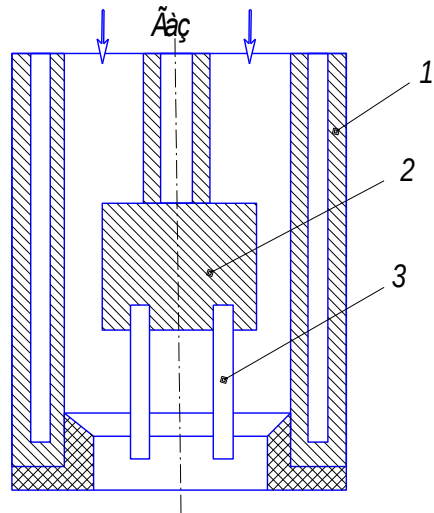


Рисунок 1.8 – Схема дугового плазмотрону

У плазмотронах з плазмовою струмом, корисно використовується лише та частина енергії дуги, яка передається плазмі.

На рис. 1.9 зображена схема пустого багатоканального катоду: а – свердлений, б – набірний.

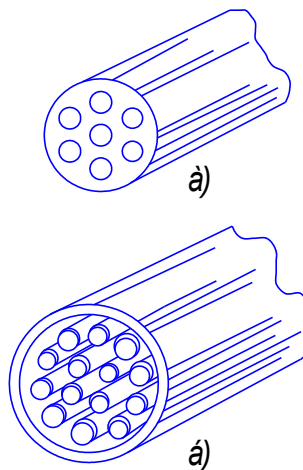


Рисунок 1.9 – Схема пустого багатоканального катоду:

а – сверлений, б – набірний

Для генерації плазми використовуються гази, такі як аргон, азот, водень та інші, залежно від фізико-хімічних властивостей металу, що піддається розплавленню. Розхід плазмоутворюючого газу становить 7–16 літрів за хвилину на кожні 100 кіловат потужності плазмотрону. На сьогоднішній день для плазмотронів постійного струму в основному використовуються тиристорні джерела живлення.

Одним із найбільш розповсюджених методів запалювання дугових плазмотронів є коротке замикання між катодом і соплом, при цьому сопло виступає в якості анода.

Плавка з використанням плазмової дуги подібна до плавки з використанням електроду, який не плавиться. Однак, порівняно з нею, вона має значні переваги: покращену стабільність горіння дуги, більшу її довжину, що запобігає попаданню випаровувань та розбризкуванню розплавленого металу на електрод; а також вищу температуру та інтенсивність тепловіддачі дуги.

Використання плазмово-дугових печей у сучасній металургії і ливарному виробництві безперервно супроводжується інтенсифікацією технологічних процесів та значним підвищенням якості виплавленого металу. Плавильні плазмово-дугові печі можуть мати вогнестійке футерування, аналогічне сталеплавильним печам, або кристалізатор, подібно електронно-променевим печам. У плазмово-дугових печах встановлені дугові плазмотрони, які замінюють електроди у першому випадку, та електронні пушки у другому.

На рис.1.10 зображена схема ПДП із керамічним тиглем (а) та кристалізатором (б): 1- плазмотрон, 2 - звод, 3 - піщаний затвор, 4 - корпус, 5 - ванна рідкого металу, 6 - подовий електрод, 7 - заготовка, що переплавляється, 8 - кристалізатор, 9 - виливок, 10 - піддон.

Схема (а) передбачена переважно для плавлення сталей та сплавів на основі нікелю, а також для переплаву легованих відходів. Схема (б) може бути використана для виплавки виливків з практично будь-яких матеріалів та сплавів: сталей, титану, важкоплавких металів, сплавів з легкоплавкими додатками, а також для переплаву відходів.

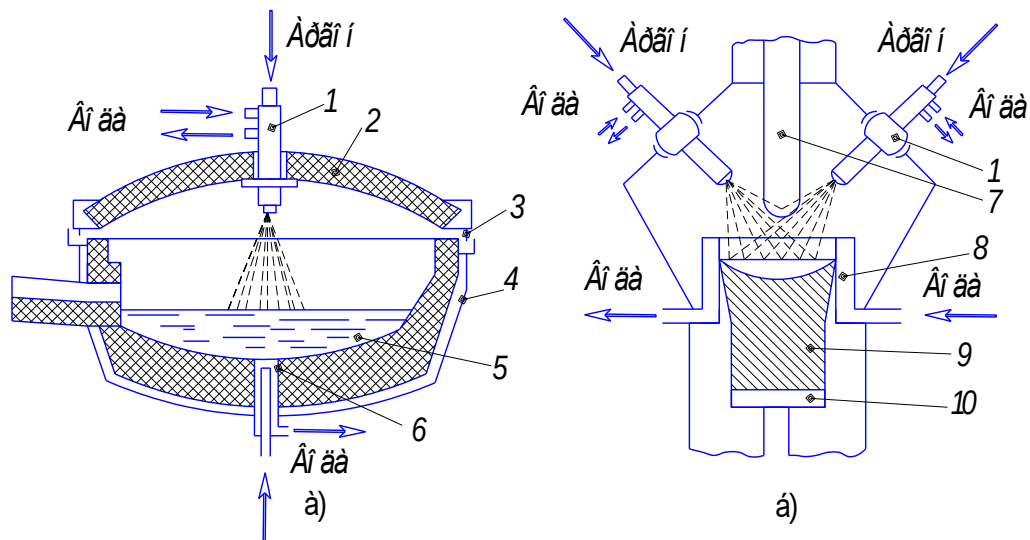


Рисунок 1.10 – Схема плазмено-дугової плавки із керамічним тиглем (а)
та кристалізатором (б)

Витрати на переплавку в плазмових печах наразі перевищують витрати в дугових печах. Це обумовлено значними витратами електроенергії, оскільки плавильні плазмотрони характеризуються низьким коефіцієнтом корисної дії через велику кількість водоохолоджуваних компонентів. Також на вартість переплавки в плазмовій дуговій печі впливає значне споживання аргону, вартість якого відносно велика, особливо для аргону підвищеної чистоти.

1.1.5 Електродугова плавка

Згідно з [2], дугові печі з'явилися лише у останній чверті XIX століття, оскільки необхідні умови для їх створення були відкриті саме у цей період. Це включало винахід електромашин і трансформатора, а також відкриття трифазного струму. Однак промислове використання дугових печей стало можливим лише за наявності великої кількості доступної електроенергії, яка могла бути трансформована, оскільки процес плавлення сталі вимагав певних параметрів енергії - значної сили струму і відносно невисокої напруги. Перша дугова сталеплавильна піч в Росії з місткістю 3,5 тонни була споруджена в 1910 році. На початковому етапі розвитку дугові печі були однофазними. Подальше їх

вдосконалення показало перевагу печей з трьома фазами, живлених змінним струмом.

Дуга може горіти як при постійному, так і при змінному струмі. При використанні змінного струму дуга загоряється та гасне двічі протягом кожного періоду струму, коли полярність на електродах змінюється, а напруга на дузі досягає нуля. Якщо в момент зміни полярності температура катоду стає недостатньою для емісії електронів, дуга переривається. Непостійна дуга, яка часто переривається, небажана, оскільки це призводить до збільшення витрат електроенергії та уповільнення процесу плавлення металу.

Дугові печі для плавлення сталі працюють на змінному струмі, де дуга створюється між вугільними (для печей об'ємом до 5 тонн) або графітованими електродами циліндричної форми та металічною шихтою в ванні. У початкових етапах плавлення, коли металева шихта ще не розігріта, дуга може горіти нерівномірно. При зміні полярності, коли метал стає катодом, його температура може бути недостатньою для підтримки емісії електронів, що призводить до гасіння дуги. Для регулювання цих переривчастих затримок у дуговій ділянці використовують дросель, який є електромагнітною котушкою з залізним сердечником. Дросель накопичує запас електромагнітної енергії, що стабілізує горіння дуги. Общий вигляд дугової печі ДС – 5МТ представлено на кресленні.

Плавлення металів у рідкому стані, таких як титан, молібден, ніобій, вольфрам, а також жаростійких сплавів та спеціальних сталей, здійснюють у вакуумних дугових печах (ВДП) зі змінними електродами при використанні постійного струму. У вакуумних умовах стабільність горіння дуги знижується, оскільки використання змінного струму для живлення стає неможливим.

Плавка в умовах вакууму забезпечує високу ступінь очищення рідкого металу від газів та інших домішок. Це призводить до значного покращення властивостей вакуумної сталі порівняно зі звичайною. Наприклад, стійкість підшипників, виготовлених з вакуумної сталі, збільшується удвічі. Переплавка в вакуумно-дуговому печі допомагає підвищити втомну міцність конструкційних

сталей і подовжити міцність жаростійких сплавів. Сплави на основі титану, молібдену, ніобію в рідкому стані хімічно реагують з атмосферними газами, тому їх можна плавити лише в умовах вакууму.

На рис. 1.11 зображена вакумна дугова гарнісажна піч із розливкою металу після відключення дуги: 1-вакуумна камера, 2- тигель, 3-механізм переміщення електроду, 4-направляючий лоток, 5-контейнер із ливарними формами, 6-вікно, 7-поворотний кран, 8-електромеханічний привід відцентрованої машини.

Для вакуумних печей використання дуги постійного струму вимагає встановлення дорогих джерел живлення. У 60-х роках були розроблені напівпровідникові пристрої для перетворення постійного струму, які характеризуються вищими техніко-економічними показниками та надійністю в експлуатації. Крім того, вони працюють безшумно.

У дугових сталеплавильних печах відбувається плавлення сталі, яка може бути вуглецевою або легованою, з метою подальшого виливання у виливки для наступної обробки або для виготовлення заготовок для машинобудівних потреб. В металургійній галузі нашої країни використовують печі різної місткості: від 0.5 до 200 тонн. Печі місткістю від 0.5 до 10 тонн переважно використовуються для фасонного лиття, тоді як печі місткістю від 12 до 200 тонн — для виробництва виливок. Усі ці печі є трьохфазними, трьохелектродними і мають круглу ванну.

Недоліками плазмової плавки є високі витрати на іонізуючий газ та низький коефіцієнт корисного використання енергії. У випадку електронно-променевої плавки великі втрати металу відбуваються через випаровування. Щодо індукційних печей, вони відомі своєю високою енергоефективністю, але вимагають значних енергетичних витрат.

Серед ключових технологічних переваг електродугових печей особливе значення має два аспекти. По-перше, вони забезпечують високу температуру, яка майже не втрачається через екранування від стін та зводу, що дозволяє швидко

нагрівати та підтримувати розплавлену ванну у необхідних межах температур. По-друге, вони здатні створювати в робочому просторі електропечі як окислювальну, так і відновлювальну атмосферу. Ці два фактори дозволяють здійснювати плавлення з ефективною очисткою металу від непотрібних домішок та його легування з мінімальними втратами дорогоцінних домішок.

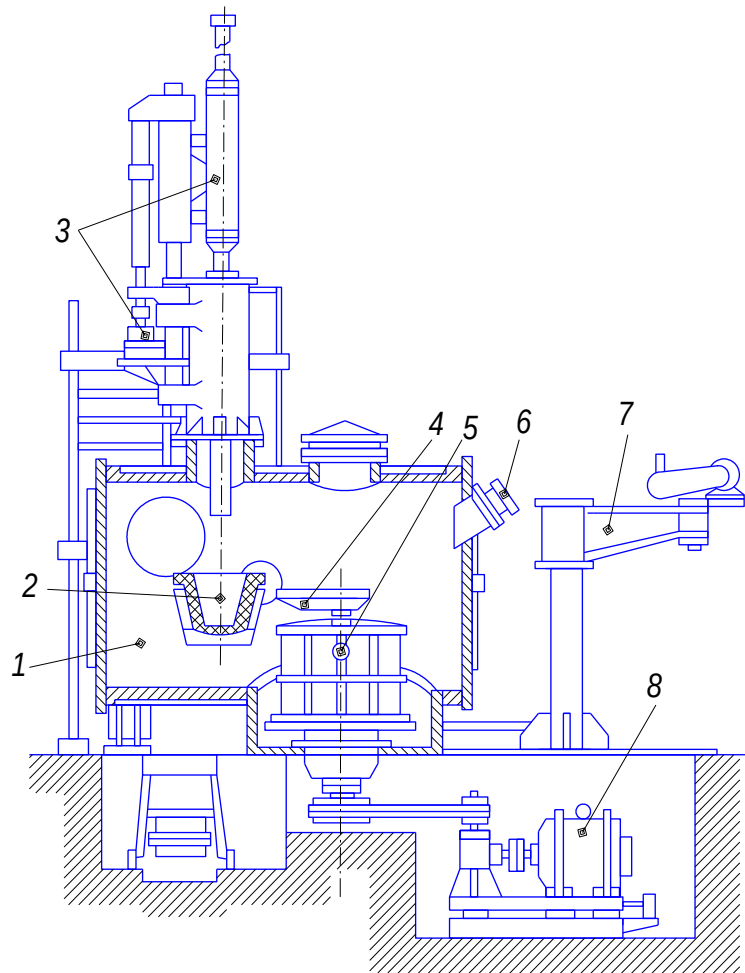


Рисунок 1.11 – Схема вакуумної дугової гарнісажної печі

За допомогою електродугової печі можна плавити більшість середньолегованих, високолегованих марок сталі і спеціальних сплавів, використовуючи різноманітні види футеровки.

Як бачимо, електродуговий метод плавки металу отримав значну популярність у металургійній галузі, тому електродугова піч була обрана як основний об'єкт модернізації даної бакалаврської роботи.

1.2. Технологічний процес плавки сталі електродуговим способом

Розглянемо цей технологічний процес на прикладі печі ДС-5МТ 3МЗ, яка призначена для виплавки легованих сталей марок 12Х18Н9ТЛ та 12Х18Н12МЗТЛ. Згідно з джерелом [5], ці сталі використовуються для виготовлення запірної, захисної та запобіжної арматури в нафтохімічній промисловості. Хімічний склад сталі повинен відповідати вимогам, наведеним у табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Необхідний хімічний склад

Марка сталі	Хімічний склад, %								
	С, не більше	Mn	Cr	Ni	Si	Mo	Ti	S	P
								не більше	
12Х18Н9ТЛ	0,12	1,0-2,0	17-20	8-11	0,2-1	-	Від (5·С) до 0,7	0,03	0,035
12Х18Н12МЗТЛ	0,12	1,0-2,0	16-19	11-13	0,2-1	0,2-1	Від (5·С) до 0,7	0,03	0,035

Відповідно до джерела [6], весь процес технологічної плавки легованої сталі методом електродугової обробки можна умовно поділити на наступні етапи:

- 1) заправка печі
- 2) завалка шихти
- 3) плавка
- 4) окислення
- 5) відновлення
- 6) рафінування та випуск

Графік тривалості плавки наведений у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Тривалість плавки

Назва операцій	тривалість операцій, год.	
	гаряча піч	холодна піч
заправка печі	0,1	0,1
завалка шихти	0,1	0,1
плавка	0,45-0,55	1,1
окислення	1,0	1,2-1,3
відновлення	0,25-0,3	0,25
рафінування та випуск	0,25	0,25
тривалість плавки	2,05-2,2	2,3-2,45

Розглянемо технологічний процес плавки сталі за допомогою електродугового методу.

1.2.1 Заправка печі

Після завершення процесу плавлення сталі необхідно відразу ж ретельно очистити дно та нахилки, випускний отвір і жолоб від залишків металу та шлаку.

Очищення ванни виконувати металічним скребком;

Почати заправку дрібнозернистим магнезитовим порошком до того, як піч охолоне.

Бокові стінки можна заправляти за допомогою заправної ложки, а задню стінку та дно - за допомогою совкової лопати.

Якщо виявлені глибокі ушкодження на дні, необхідно уважно очистити їх від залишків металу й шлаку за допомогою металевого скребка, додаючи магнезитовий порошок для змішування з металом.

На початку процесу плавки необхідно заповнити поріг робочого вікна і закрити випускний отвір.

1.2.2 Завалка шихти

Уся шихта перед загрузкою до печі обов'язково повинна зважуватись;

За допомогою крана та грейферної тари розмістити дрібні шматки сталюого лому (від 2 до 10 кг) у кількості 350–400 кг на дно печі. Додати 3% вапняку, 0,6–0,8% плавикуого шпату та 0,2% електродного бою від ваги шихти.

Для сталі 12Х18Н9ТЛ, треба встановити велику партію матеріалу в центрі, під електродами: відновлений власний продукт - 2400-2700 кг, сталевий лом - 150-200 кг, а зверху - великий шматок вуглецевого лому - 350-400 кг. Для сталі 12Х18Н12М3ТЛ, на днище печі слід завантажити дрібну частку зі сталевого лому у кількості 350-400 кг, апроксимуючи 3% ваги суміші вапняку. Натомість, в центр під електродами, слід встановити велику та середню партії: повернення власного виробництва - 2200-2500 кг; сталевий лом вуглецевого типу - 150-200 кг, додавши сверху дрібний лом - 350-400 кг, нікель - 200-220 кг, та феромолібден - 120-140 кг.

Необхідно переконатися, що шар матеріалу розташований щільно і зосереджено у центрі днища. Нікель та феромолібден слід розміщувати не під електродами, а ближче до нахилів. Контейнер з матеріалом потрібно опустити якомога нижче, бо під час падіння він може пошкодити стінки та днище печі. У випадку, якщо матеріал розташований не по центру або перешкоджає встановленню кришки, його слід вирівняти за допомогою металевого крюка. Рішуче заборонено вирівнювати матеріал за допомогою кришки печі.

Після завантаження шихти відзначте уважно стан електродів. Затягніть їх на з'єднаннях, змініть, якщо необхідно, або здійсніть нарощування. Необхідно підготувати електроди так, щоб вони вистачали до кінця процесу плавлення без додаткового нарощування.

Для покращення процесу запалювання дуги на початковому етапі плавлення рекомендується розміщувати шматки електродного матеріалу на шихті під електродами.

Зверху підводиться струм повітря з компресора до зовнішнього залізобетонного накриття печі, з особливою увагою на електроподачу до електродних тримачів.

Перед запуском печі слід перевірити систему водяного охолодження, переконатися у стані звода та належному кріпленні електродів, цілісності ізоляції електродних тримачів та затягнути зазори між економайзером та зводом. Використання печі без економайзера заборонено.

Заповніть випускний отвір магnezитним порошком та збільште висоту порогу робочого вікна.

Перевірити роботу маслonaпорної станції;

Дозвіл на включення печі дає мастер плавильної ділянки;

Перевірити відсутність сторонніх осіб, а потім увімкнути піч.

1.2.3 Плавка

У перші п'ять хвилин плавлення трансформатор працює на зниженій потужності (положення 9), щоб уникнути перегріву зводу. Після цього трансформатор переключається на максимальну потужність (положення 1) до моменту завершення падіння сировини. Після цього плавлення продовжується при потужності трансформатора 5 до повного розплавлення сировини.

Сталевар повинен уважно контролювати процес розплавлення сировини, вчасно видаляти плавлені куски та мости з відкосів, попередньо розслабивши напругу і піднявши електроди. Ці заходи спрямовані на запобігання пошкодження днища, відкосів і електродів.

При розплавленні шихти на 75%, до печі потрібно додати наступні складові: вапняку у кількості 15 кг/т.р., феросиліцію у концентрації 45% - 3 кг/т.р., для сталі марки 12X18H9TЛ - нікелю 38 кг/т.р., і для сталі марки 12X18H12H3TЛ - феромолібдену 21 кг/т.р.

Після того, як вся суміш розплавиться, вимкніть піч. Підніміть електроди, замішайте металеву ванну за допомогою металевої скребки та візьміть зразок для експрес-аналізу, щоб визначити склад сталі.

За допомогою металевого прутка перевірте, чи залишилися на днищі нерозплавлені металеві домішки. Якщо вони виявлені, це означає, що процес плавлення не завершено. У випадку повного розплавлення сировини, необхідно переходити до наступного етапу - окислювального.

Після забору проби необхідно додати 1,5 кг/т розчину феросиліцію ФС75 та 1 кг/т порошку алюмінію для відновлення шлаку. Після цього необхідно розбавити шлак до 70%.

1.2.4 Окислення

Починати окислювальний процес слід після формування рідкого рухомого шлаку та під час підігріву металу до температури від 1580 до 1600 градусів Цельсія. Протягом періоду продувки піч слід вимкнути, а електроди підняти.

Процес продувки металу газоподібним киснем виконується за допомогою металевої труби (з діаметром 3/4 або 1/4 дюйма), яка облицьована сифонною трубкою марки С-69-40. Це відбувається шляхом поглиблення футерованого кінця труби в метал через спеціальне робоче вікно на глибину 150 – 200 мм. Для уникнення місцевого перегріву та пошкодження футерівки необхідно регулярно перемішувати трубку в горизонтальному напрямку. Тиск кисню повинен становити не менше 12 – 14 кг/см².

Початок процесу окислення вуглецю проявляється у викиданні бурого диму, подальше поява яскравого білого полум'я свідчить про інтенсивність окислення. Завершення продувки відзначається згасанням яскравого полум'я та збільшенням об'єму бурого диму. Після виникнення бурого диму рекомендується припинити продувку через 1–2 хвилини. Вміст вуглецю після

продувки має становити 0,09–0,1%. Швидкість окислення вуглецю при продувці киснем складає 0,03–0,04% за хвилину. Кількість оксиду хрому, виділена протягом продувки, становить близько 25% від його вмісту в сировині або приблизно 3% в абсолютному значенні.

1.2.5 Відновлення

Після очищення металу продувкою, необхідно використати феросиліцій з вмістом 45% у кількості 5 кг на тону відновленого металу. Також слід обробити шлак, додаючи подрібнений феросиліцій ФС75 у кількості 2 кг на тону.

Після проведення хімічного аналізу необхідно додати 140 кг ферохрому на тонну розплав у піч поетапно. Присадку ферохрому потрібно вводити швидко, ретельно перемішуючи металеву ванну. Щоб обробити шлак під час введення ферохрому, використовують 2 кг феросиліцію на тонну розплав. Після завершення останньої порції ферохрому, в піч додають розкислену суміш з наступним складом:

вапняк 15 кг/т.р.

плавиковий шпат – 5 кг/т.р.

порошок з алюмінію – 2 кг/т.р.

Потрібно змішати метал і шлак. Якщо ферохром розплавився нерівномірно, потрібно перемкнути трансформатор печі на 9 позицію. Взяти зразок металу для хімічного аналізу на вміст вуглецю, марганцю, хрому, нікелю та, при необхідності, молібдену.

Витримайте протягом 10 хвилин, уникайте перегріву металу. Температура металу має бути між 16000 і 16500 градусів Цельсія. Для обробки шлаку використовуйте порошок з алюмінію в кількості 0,4 кг на тонну розплавленого металу. Ретельно перемішуйте метал за допомогою металевого скребка. Після цього вимкніть піч і підніміть електроди.

1.2.6 Рафінування та випуск

Навести шлак, додавши у піч вапняк 27 кг/т.р. й плавиного шпату 6 – 10 кг/т.р.

Обробити шлак силікокалієм – 2 кг/т.р. й порошком з алюмінію 1 кг/т.р.;

Скоригувати хімічний склад металу, додавши марганець, хром, кремній і молібден. Після цього внести необхідну кількість металічного марганцю, феросиліцію, нікелю, ферохрому і феромолібдену до печі. Здійснити витримку протягом 10 хвилин. Взяти пробу шлаку, його перелом повинен мати світло-коричневий колір. Продовжити процес розкислення, якщо шлак залишається зеленого кольору.

Використовуйте металевий скребок для ретельного перемішування ванни з металом. Вимірюйте температуру металу у печі за допомогою термопари, яка занурюється. Проведіть два виміри. У разі значної різниці між результатами цих двох вимірів здійсніть третій. Два з трьох результатів повинні знаходитися в межах встановленого температурного діапазону металу у печі: від 16200 до 16400 градусів Цельсія. Якщо температура металу нижче вказаного діапазону, потрібно підігріти метал.

Перед нагріванням введіть 15 кг феротитану на кожную тонну розплав у стопорний ковш. Розігрійте ковш разом з феротитаном до температури 750 градусів Цельсія протягом 1,5 години.

Створити випускний отвір і видалити сміття совком так, щоб воно не потрапило до ковша, а потім пробити отвір залізним ломом.

Під час випуску плавки необхідно швидко нахилити піч. Спочатку викинути частину металу, а потім метал із шлаком. Після того, як ковш наповниться металом, необхідно розподілити дрібнотою з коксу шлак навколо стопору й розробити його. Після того, як ковш наповниться на третину, додайте 1 кг/т.р. алюмінію АВ92 та 2,5 кг/т.р. силікокалію.

Виміряйте температуру металу в ковші за допомогою термопари ТПР-2075. Для форм ХТС, температура металу повинна бути в межах 16100 - 16300 °С, а для оболонкових форм - від 15700 до 16000 °С. При необхідності зниження температури металу у ковші, додавайте куски висушеного повернення власного виробництва вагою не більше 10 кг. Через 3 – 5 хвилин після додавання виміряйте температуру металу у ковші. Додавати повернення власного виробництва можна лише у ковш, який знаходиться у ямі.

Проби металу, внесені всередину заливки, призначено для подальшого хімічного аналізу та механічних випробувань. Сталевар відбирає пробу з ковша для подальшого хімічного аналізу.

Всі етапи плавлення, стан футерівки печі, ковша, витрати електроенергії та результати хімічного аналізу фіксуються у плавильній карті з відображенням часу та інформацією про виконавця.

Майстер (сталевар) плавильного відділу відповідає за нагляд за правильним проходженням плавильного процесу.

У відповідності до технологічного процесу плавки легованої сталі методом електродугового сплавлення ми розробимо алгоритм управління. Сам алгоритм відображений на малюнку.

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу

2.1 Задачі по автоматизації електроприводу переміщення електроду

У трьохфазних електродугових печах електричні дуги виступають як активне навантаження, з'єднане за схемою "зірка", при цьому нульова точка розташована в твердій шихті, що розплавляється, або в рідкому металі.

Початково, при запуску дуги, стабільність її роботи низька. Шматки сировини розташовуються випадково, що призводить до частого переходу дуги з одного шматка на інший, обривів при швидкому розплавленні малих шматків та короткого замикання при обвалах. Довжина дуги не перевищує декількох міліметрів, і середнє значення напруженості електричного поля складає 10-12 В/мм. Дуги горять всередині сировини, яка ефективно екранує стінки печі від теплового випромінювання потужних дуг, що дозволяє подавати максимальну потужність без ризику перегріву футерівки. При кожному короткому замиканні корисна потужність для нагріву матеріалів практично нульова, при максимальній потужності втрат. Тому підняття електроду та усунення короткого замикання потрібно проводити якнайшвидше. Коли рідкого металу на днищі накопичується достатньо, і дуги горять між електродами та рідкою ванною, електричний режим стабілізується, довжина дуги збільшується, а напруженість електричного поля зменшується до 3,5-4,0 В/мм. Шматки сировини, що знаходяться подалі від дуги, починають контактувати з рідким металом, нагріватися та плавитися, опускаючись все нижче та відкриваючи стінки тепловому впливу електричних дуг. У цей момент існує реальна загроза перегріву стін. Для зменшення теплового потоку в кінці періоду плавлення зменшують довжину дуги, поступово знижуючи ступені напруги трансформатора.

Період окислювання відрізняється більш стабільним палінням дуги порівняно з плавінням, хоча поверхня ванни постійно рухається через кипіння.

Під час цього періоду частіше виникають обриви дуг та короточасні замикання. Температура металу швидко зростає, особливо при використанні кисню для продувки.

Під час відновлювального етапу плавлення металу його покривають товстим стабільним шаром електропровідного шлаку, що гарантує постійне горіння дуги. Напруга електричного поля в дугах поступово знижується до рівня 1,0 – 1,2 В/мм. Також напругу живлення послідовно зменшують до 50 % від номінального значення, використовуючи переключення ступенів напруги трансформатора.

Виходячи з вищезазначеного, можна сформулювати основні завдання автоматичного управління електричним режимом плавлення сталі:

1. Забезпечення максимально можливого вводу корисної потужності протягом будь-якого періоду плавки за рахунок регулювання напруги пічного трансформатора або зміни струму на постійному рівні.
2. Зменшення електричних втрат під час роботи печі шляхом стабілізації параметрів електричного режиму та скорочення часу усунення коротких замикань.
3. Підвищення стійкості підкладки печі шляхом збереження оптимального електричного режиму.
4. Підвищення ефективності техніко-економічних показників плавки за рахунок зменшення тривалості технологічного процесу та зниження споживання електроенергії.

2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна

Для переміщення електроду використовується контурно-позиційне керування у приводах. Однією з ключових особливостей роботи виконавчих електродвигунів є їх здатність працювати у режимі повторно-короткочасного дії. Електропривод є переважним варіантом приводу для контурно-позиційного

керування виконавчим механізмом. Здійснимо розрахунок потужності та на його основі виберемо відповідний тип електродвигуна.

Давайте розрахуємо потрібну силу для натягу, необхідну для підняття механізму переміщення електроду

$$F_H = k_P \cdot F_{HB} + m \cdot (m_1 + m_2) \cdot g + F_{HP} \quad (2.1)$$

де k_P – коефіцієнт запасу, приймаємо рівним 1,5; F_{HB} – зусилля натягу вздовж вертикальної вісі, за умовою дорівнює 60 кН; μ – загальний коефіцієнт тертя в усіх рухомих частинах механізму переміщення електроду, приймаємо рівним 0,04; F_{HP} – зусилля попереднього натягу, що за умовою дорівнює 6,5 кН; m_1, m_2 – маса механізму переміщення електроду і протизаги відповідно

$$F_H = 1,4 \cdot 60 \cdot 10^3 + 0,04 \cdot (300 + 95) \cdot 9,81 + 6500 = 96655 \text{ Н}$$

Потужність, яка застосовується до вала виконавчого органу під час підняття

$$P_{POZ} = F_H \cdot v_{роб}, \quad (2.2)$$

де F_H – зусилля натягу; $v_{роб}$ – швидкість переміщення електроду, за умовою 0,033 м/с.

$$P_{POZ} = 96655 \cdot 0,033 = 3189,6 \text{ Вт.}$$

2.2.1 Вибір і перевірка електродвигуна

Ми відбираємо двигун на підставі розрахункової потужності, згідно з [7].

Потужність обраного двигуна має перевищувати розрахункову потужність, проте незначно. Це дозволяє досягти кращої сумісності між двигуном та виконавчим механізмом у динамічних режимах роботи.

Таблиця 2.1 – Попередній вибір двигуна

Тип	$P_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ об/хв	$M_{ном},$ Н·м	$\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$J_{дв},$ кг·м ²	$\eta,$ %
2ПН132М	3,2	1800	21,5	5	0,039	83

Загальне передавальне відношення між виконавчим механізмом та двигуном становить

$$i = \frac{\omega_{dmax}}{\omega_{роб}} \quad (2.3)$$

де $\omega_{д.мах}$ – максимальна швидкість двигуна, яку приймаємо рівну номінальній,
 $\omega_{дмах} = \omega_{ном} = 193$ рад/с.

$$i = \frac{193}{0,033} = 5848 \quad 1/м.$$

Момент, що утворюється на валу двигуна за дії сили натягу, визначається наступним чином.

$$M_{HT} = \frac{F_{HB}}{i \cdot \eta} \quad Н·м, \quad (2.4)$$

де η - ККД механізму підйому, рівний 0,85.

$$M_{HT} = \frac{60 \cdot 10^3}{5848 \cdot 0,85} \quad Н·м.$$

Момент, який діє на валу двигуна, утворюється з моментів тертя в напрямку руху та від опорного напругу.

Момент тертя в направляючих визначається виразом

$$M_{TH} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g \cdot \mu}{i} = \frac{(300 + 95) \cdot 9,81 \cdot 0,04}{5848} = 0,032 \quad Н·м, \quad (2.5)$$

Момент сил тертя, який утворюється внаслідок попереднього натягу, визначається.

$$M_{PH} = \frac{0,032 \cdot F_{HP} \cdot S_{HT}}{3} = \frac{0,032 \cdot 6500 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{3} = 0,025 \quad Н·м, \quad (2.6)$$

де S_{HT} – площа поперечного перерізу натяжного тросу, рівна $3,14 \cdot 10^{-4}$ м;

Момент опору визначається таким чином

$$M_1 = M_{HT} + M_{TH} + M_{HП} = 12,1 + 0,032 + 0,025 = 12,2 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.7)$$

Статичний момент (момент опору) на валу двигуна

$$M_2 = M_{TH} + M_{HП} = 0,32 + 0,025 = 0,057 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.8)$$

Динамічний момент на валу двигуна, що розвивається при розгоні

$$M_{дин} = (1,2 \cdot J_{дв} + J_{вм}) \cdot \varepsilon_d, \quad (2.10)$$

де J_d – момент інерції двигуна, $= 0,039 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, (коефіцієнт 1,2 враховує приведений момент механічної передачі); $J_{вм}$ – приведений момент інерції виконавчого механізму; ε_d – прискорення вала двигуна.

Приведений момент інерції механізму

$$J_{вм} = (m_1 + m_2) \cdot \frac{g_{\max}^2}{\omega_{ном}^2} = (300 + 95) \cdot \frac{0,033^2}{193^2} = 0,000012 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.11)$$

Прискорення вала двигуна

$$\varepsilon_d = a \cdot \frac{\omega_{ном}}{g_{роб}} = 1,3 \cdot \frac{193}{0,033} = 7603 \text{ рад/с}^2. \quad (2.12)$$

Необхідний динамічний момент на валу двигуна

$$M_{дин} = (1,2 \cdot 0,039 + 0,000012) \cdot 7603 = 35,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент, необхідний на валу двигуна для досягнення максимальної швидкості, становить

$$M_3 = M_{дин} + M_2 = 35,6 + 0,057 = 35,657 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.13)$$

Значення M_1 , M_2 і M_3 , які були знайдені, мають бути меншими, ніж відповідні допустимі моменти двигуна.

$$M_{доп1} = M_{доп2} = 1,2 \cdot M_H = 6,24 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.14)$$

$$M_{доп3} = \lambda \cdot M_H = 5 \cdot 5,16 = 25,8 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.15)$$

Висновок про відповідність обраного двигуна роблять, якщо виконуються наступні умови:

$$M_1 < M_{1\text{доп}}; \quad 12,2 < 25,8 \quad \text{виконується};$$

$$M_2 < M_{2\text{доп}}; \quad 0,032 < 25,8 \quad \text{виконується};$$

$$M_3 < M_{3\text{доп}}; \quad 24,857 < 107,5 \quad \text{виконується}.$$

Отже, двигун обрано правильно, тому що всі умови виконуються.

2.3 Розрахунок механічної частини електроприводу переміщення електроду

Механізм переміщення електродів має надзвичайно важливе значення для роботи печі, оскільки він здебільшого визначає якість автоматичного регулювання електричного режиму плавки, а отже, впливає на потужність, $\cos\varphi$ та ККД печі. Від якості цього механізму залежить продуктивність печі, питома втрата електроенергії та ступінь науглецювання металу. Загальний вигляд механізму переміщення електродів представлено на кресленні 2.

Роль механізму переміщення електродів є надзвичайно важливою, оскільки будь-яке відхилення електричного режиму від заданого необхідно усувати шляхом переміщення електродів протягом часток або одиниць секунд. При цьому, електрод має бути встановлений з точністю до одного або кількох міліметрів при заданій довжині дуги, яка може становити всього 10-20 мм.

Механізми переміщення електродів обладнані електромеханічними або гідравлічними приводами. Виконавчий механізм з електромеханічним приводом включає електродвигун, редуктор (черв'ячний або циліндровий), механічну передачу (канатно-барабанну, рейкову або гвинтову) та конструкції, що підтримують електрод. У електромеханічних приводах зазвичай використовуються шунтові двигуни постійного струму з лінійною залежністю кількості обертів двигуна від сили струму навантаження або двигуни змінного струму з застосуванням магнітних і напівпровідникових підсилювачів, а також електромагнітних муфт тертя.

Визначимо експлуатаційний коефіцієнт електропривода K_e за формулою

$$K_e = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8, \quad (2.16)$$

де K_1 – коефіцієнт характеру роботи приймаємо за рівний 1; K_2 – коефіцієнт частоти пусків встановлюємо рівним 1; K_3 – Коефіцієнт терміну експлуатації для добового періоду роботи, що перевищує 14 годин, приймаємо рівним 1.; K_4 – коефіцієнт реверсивних пусків встановлюємо на рівні 1; K_5 – Коефіцієнт режиму введення в експлуатацію при поступовому підвищенні навантаження від 0,7 до 1,0 Тном протягом 100 годин приймаємо рівним 1. K_6 – коефіцієнт розташування циліндричної пари в просторі приймаємо рівним 1; K_7 – Коефіцієнт змащування для синтетичного мастила становить $K_1 = 1,0$. K_8 – Коефіцієнт температурної залежності, який дорівнює 1,14 при температурі навколишнього середовища 200 °С у режимі роботи з повторними короткочасними навантаженнями.

Таким чином маємо, що

$$K_e = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,14 = 1,14.$$

Тепер ми встановлюємо розрахункове значення обертового моменту на вихідному валу електроприводу за допомогою даної формули.

$$T_{KP} = T_{K.HOM} \cdot K_e, \quad (2.17)$$

де $T_{K.HOM}$ – Максимальний обертовий момент на вихідному валу електроприводу складає 286 Нм.

Після підстановки числових значень у формулу (2.17) маємо

$$T_{KP} = 286 \cdot 1,14 = 326,04 \text{ Нм.}$$

Кутову швидкість вихідного вала електропривода $\omega_{K.HOM}$ визначаємо за формулою

$$\omega_{K.HOM} = \frac{\pi \cdot n_{K.HOM}}{30}, \quad (2.18)$$

де $n_{K.HOM}$ - Номінальна швидкість обертання вихідного вала електроприводу становить 18 обертів на хвилину.

$$\omega_{K.HOM} = \frac{\pi \cdot 18}{30} = 1.884.$$

Виходячи із попередніх обчислень і згідно з [8], ми вибираємо редуктор 4ДПМ 100/180, варіант 2, з такими технічними характеристиками:

- 180 – число зубців вхідної шестерні;
- 100 - число зубців вихідної шестерні;
- 18 – передавальне число редуктора;
- 21 кг – вага редуктора;
- 0,84 – коефіцієнт корисної дії.

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій

3.1 Розрахунок позиційної АСК положенням електродів печі

3.1.1 Визначення параметрів структурної схеми двигуна постійного струму

Згідно з [12] для двигуна побудуємо структурну схему на базі рівнянь

$$U_a = R_{a\Sigma} \cdot i_a \cdot (1 + T_a p) + E$$

$$U_s = \frac{R_{s\Sigma}}{\kappa \Phi} \cdot (1 + T_s p) \cdot \Phi$$

$$M = \kappa \Phi \cdot i_a$$

де T_a – постійна часу якоря; T_s – постійна часу ланцюга збудження; $\kappa \Phi$ – Коефіцієнт, що визначає зв'язок між потоком та струмом збудження. $R_{a\Sigma}$ – активний сумарний опір якоря.

$$R_{a\Sigma} = 1.2 \cdot R_{яд} + R_{дж.жив}$$

$$R_{дж.жив} = R_{тр} + R_A = 0.06 \cdot \frac{U_{2л}}{I_2}$$

де $R_{дж.жив}$ – опір джерела живлення (трансформатора); $R_{тр}$ – опір обмоток трансформатора, Ом; R_A – опір, за рахунок перекриття анодних струмів, Ом; $U_{2л}$ – вторинна лінійна напруга трансформатора.

$$U_{2л} = k_\alpha \cdot k_e \cdot k_{мережі} \cdot k_R \cdot U_{ном},$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга двигуна. $U_{ном} = 220$ В; k_α – Коефіцієнт запасу, який враховує неповне відкриття вентилів при максимальному сигналі, приймається на рівні 1,2. k_e – Коефіцієнт відношення між напругою на вторинній обмотці силового трансформатора та середнім значенням випрямленої напруги приймаємо рівним 0,857. $k_{мережі}$ – Коефіцієнт безпеки по напрузі, що враховує

можливе зниження напруги, встановлюється на рівні 1,15. k_R – Коефіцієнт запасу, який враховує втрати напруги в вентилях та обмотках трансформатора, а також враховує наявність кутів комутації, має значення 1,06. I_2 – струм вторинної обмотки трансформатора.

$$I_{2л} = K_i \cdot K_2 \cdot I_{яном},$$

де K_i – Коефіцієнт прямокутності струму враховує відхилення форми струму від прямокутної. У нашому випадку цей коефіцієнт приймається рівним 1,1. K_2 – Коефіцієнт визначається як співвідношення діючого значення лінійного струму на вторинній обмотці силового трансформатора до середнього значення випрямленого струму. У даному випадку він становить 0,578.

Таким чином

$$U_{2л} = 1,2 \cdot 0,857 \cdot 1,15 \cdot 1,06 \cdot 220 = 276 \text{ В}$$

$$I_{2л} = 1,1 \cdot 0,578 \cdot 38 = 24,16 \text{ А}$$

$$R_{\text{док. жмш}} = R_{\text{мр}} + R_A = 0,06 \cdot \frac{276}{24,16} = 0,685 \text{ Ом}$$

$$R_{3\Sigma} = 1,2 \cdot 0,22 + 0,685 = 0,949 \text{ Ом}$$

де $R_{3\Sigma}$ – активний сумарний опір обмотки збудження; E – Ефективний радіус Стокса двигуна визначається як добуток кутової швидкості двигуна на коефіцієнт, що відображає взаємозв'язок між потоком та струмом збудження.

$$E = \kappa \Phi_H \cdot \omega_H.$$

Індуктивність якірного кола може бути визначена з виразу

$$L_a = k \cdot \frac{U_H}{2p \cdot n_H \cdot I_H},$$

де k – коефіцієнт компенсації, який лежить у межах 8..12. Приймаємо $k=10$; $2p$ – число полюсів, ця величина рівна 2.

Отже

$$L_a = 10 \cdot \frac{220}{2 \cdot 1800 \cdot 28} = 0,0212 \text{ Гн.}$$

Загальна індуктивність якірного кола має вигляд

$$L_{a\Sigma} = L_a + L_{\text{дж.жив}},$$

де $L_{\text{дж.жив}}$ – індуктивність джерела живлення (трансформатора).

Значення електромеханічної сталої двигуна $T_a = 0,063 \text{ с}$.

Знайдемо $\kappa\Phi$, виходячи із рівняння

$$\kappa\Phi_n = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} \cdot R_{a\Sigma}}{\omega_n},$$

$$\kappa\Phi_n = \frac{220 - 38 \cdot 0,949}{193} = 0,953 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

Отже ЕРС двигуна дорівнює

$$E = \kappa\Phi_n \cdot \omega_n = 0,953 \cdot 193 = 183,94 \text{ В}$$

Ми розробимо статичну електромеханічну характеристику двигуна, використовуючи дане виразове вираження.

$$\omega(I) = \frac{U_{\text{ном}}}{\kappa\Phi_n} - \frac{R_{a\Sigma}}{\kappa\Phi_n} \cdot I.$$

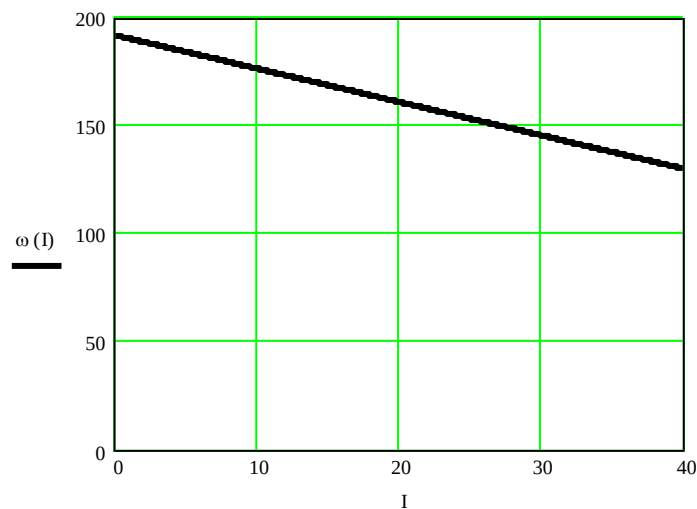


Рисунок 3.1 – Статична електромеханічна характеристика двигуна.

3.1.2 Структурна схема контуру регулювання струму

Функціональна схема регулятора струму наведена на рис. 3.2:

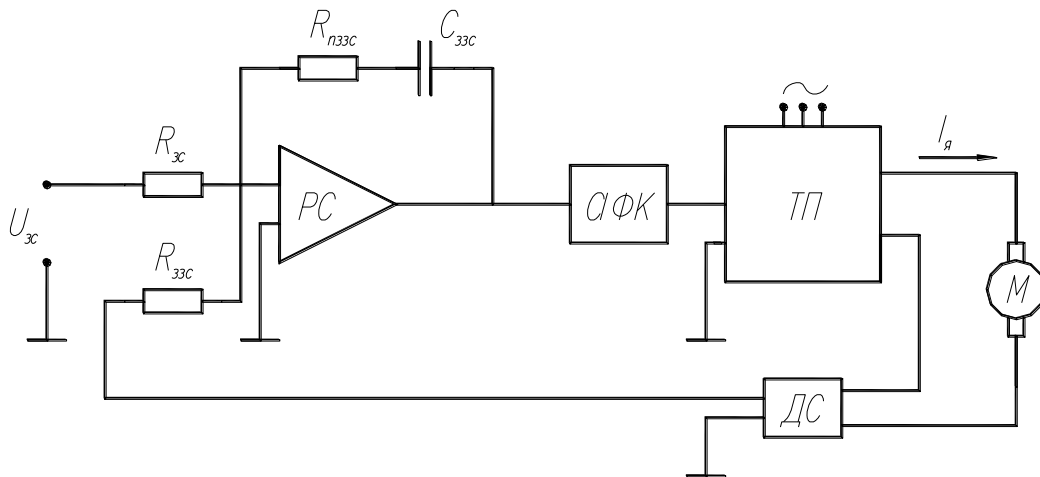


Рисунок 3.2 – Функціональна схема регулятора струму

Давайте здійснимо розрахунок параметрів структурної схеми контуру регулювання струму. Значення електромеханічної постійної часу регулювання складає.

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{a\Sigma}}{K\Phi_n^2},$$

де J_{Σ} – Загальний момент інерції двигуна, тахогенератора та виконавчого механізму маніпулятора.

$$J_{\Sigma} = 1,2 \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{тг}} + J_{\text{вм}} = 1,2 \cdot 0,039 + 62 \cdot 10^{-7} + 0,000012 = 0,047 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$T_M = \frac{0,047 \cdot 0,979}{0,953^2} = 0,05 \text{ с.}$$

Передаточна функція об'єкта регулювання у системі СІФК враховує постійну часу ТПЧ (тп) та постійну часу інерційного фільтру (тф).

$$T_{\mu} = \tau_{mn} + \tau_{\phi} = 0,01 \text{ с}$$

має вигляд

$$W_{opc} = \frac{K_{mn}}{(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{1}{T_a p + 1},$$

де $K_{тп}$ – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача, який визначається

$$K_{mn} = \frac{U_{\text{дв.ном}}}{U_{\text{к.мах}}} = \frac{220}{10} = 22,$$

де $U_{\text{к.мах}}$ – максимальне значення напруги керування тиристорним перетворювачем. Приймаємо $U_{\text{к.мах}} = 10$ В.

Передаточна функція об'єкта регулювання дорівнює

$$W_{opc} = \frac{22}{(0,01p+1)} \cdot \frac{1,054}{0,063p+1}$$

$$W_{opc} = \frac{8,58}{(0,01p+1) \cdot (0,063 \cdot p+1)}$$

Об'єктом регулювання буде лише контур регулювання струму.

На основі співвідношення T_μ і T_a знайдено передаточну функцію розімкнутого контуру регулювання

$$W_{poz.c} = \frac{1/K_{33c}}{a_c \cdot T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)}.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку визначається так

$$K_{33c} = \frac{U_{3c.max}}{2,5 \cdot I_{\text{дв.ном}}} = \frac{10}{2,5 \cdot 38} = 0,105,$$

де $U_{3c.max}$ – максимальне значення напруги задання струму, приймаємо 10 В.

З урахуванням технічного оптимум передаточна функція розімкнутого контуру дорівнює

$$W_{poz.c} = \frac{1/0,105}{2 \cdot 0,01p \cdot (0,01p+1)} = \frac{9,52}{p(0,01p+1)}$$

Передаточна функція регулятора струму

$$W_{p.c} = \frac{W_{poz.c}}{W_{opc}} = \frac{\frac{1/K_{33c}}{a_c \cdot T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)}}{\frac{1}{\frac{K_{mn}}{(T_\mu p + 1)} \cdot \frac{R_{a\Sigma}}{T_a p + 1}}} = \frac{T_a p + 1}{\frac{K_{33c} K_{mn}}{R_{a\Sigma}} \cdot a_c T_\mu p},$$

$$W_{p.c} = \frac{T_a}{T_{ic}} + \frac{1}{T_{ic}p},$$

де T_{ic} – постійна часу контура регулювання струму

$$T_{ic} = \frac{K_{ззс} \cdot K_{mn}}{R_{a\Sigma}} \cdot a_c \cdot T_\mu = \frac{0,105 \cdot 22}{0,949} \cdot 2 \cdot 0,01 = 0,049 \text{ с}$$

$$W_{p.c} = \frac{0,063}{0,049} + \frac{1}{0,049 \cdot p} = 1,286 + \frac{1}{0,049 \cdot p}.$$

Ми побудуємо структурну схему з використанням ПІ-регулятора струму, налаштованого на технічно оптимальні параметри.

Тоді

$$R_{пззс} = \frac{T_a}{C_{ззс}} = \frac{0,063}{8,2 \cdot 10^{-6}} = 7,683 \text{ кОм}, \quad R_{зс} = \frac{T_{ic}}{C_{ззс}} = \frac{0,049}{8,2 \cdot 10^{-6}} = 5,976 \text{ кОм},$$

де $R_{пззс}$ – опір у ланцюзі зворотного зв'язку ПІ-регулятора струму.

$$R_{зс} = R_{зс} \cdot K_{dc} / K_{ззс} = 5,976 \cdot 3,5 / 0,105 = 199 \text{ кОм},$$

де K_{dc} – коефіцієнт передачі датчика струму.

На рис. 3.3 зображена структурна схема контуру регулювання струму.

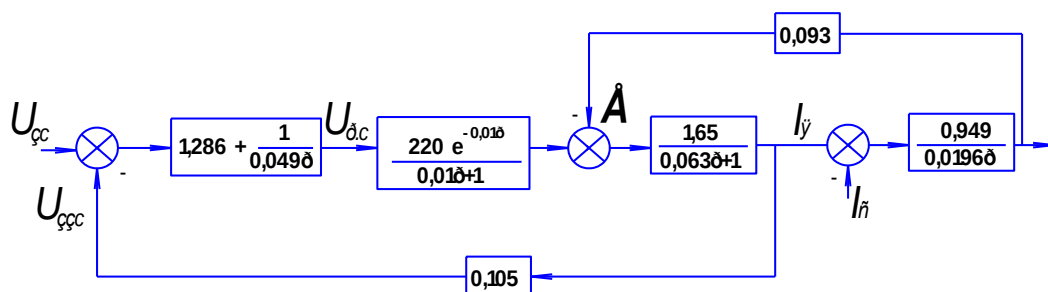


Рисунок 3.3 – Структурна схема контуру регулювання струму

3.1.3 Структурна схема контуру регулювання швидкості

На рисунку 3.4 наведено функціональну структурну схему контуру регулювання швидкості.

Передаточна функція замкненого контуру дорівнює

$$W_{\text{зам.с}} = \frac{1/K_{\text{ззс}}}{a_c \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu p + 1) + 1} = \frac{0,105}{0,02 p \cdot (0,01 \cdot p + 1) + 1}.$$

В даній схемі контур струму і виконавчий механізм складають об'єкт регулювання для контуру швидкості.

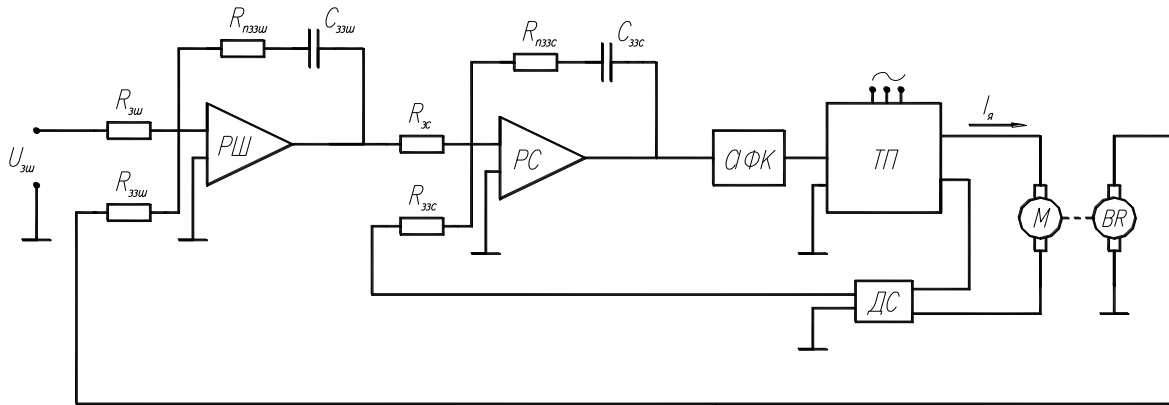


Рисунок 3.4 – Функціональна схема контуру регулювання швидкості

Для збільшення ефективності цього контуру ми скористаємося симетричним оптимізаційним методом.

Ми плануємо використати ПІ-регулятор як регулятор швидкості, чис перехідне число дорівнює.

$$W_{p.ш} = K_{пш} \cdot \frac{1 + T_{пш} p}{T_{пш} p}.$$

При досягненні симетричного оптимуму налаштування регулятора швидкості враховує такі параметри:

$$T_{p.ш} = 8 \cdot T_\mu = 8 \cdot 0,01 = 0,08 \text{ с},$$

$$a_{ш} = \frac{T_{пш}}{T_\mu} = 8,$$

$$K_{p.ш} = \frac{\kappa \Phi_n \cdot K_{зс} \cdot T_m}{4 T_\mu \cdot K_{зш} \cdot R_{a\Sigma}},$$

де $a_{ш}$ – швидкодія контуру регулювання; $K_{ззш}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.

$$K_{зш} = k_{тз} \frac{R_{зш}}{R_{зш}} = \frac{U_{зш.мах}}{\omega_0} = \frac{U_{зш.ном}}{\omega_{ном}} = \frac{10}{193} = 0,052$$

$$U_{зш.мах} = U_{зш.ном} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_{ном}} = U_{зш.ном} \cdot \frac{U_{дв.ном}}{K\Phi_n \cdot \omega_{ном}} = 10 \cdot \frac{220}{0,953 \cdot 193} = 11,96 \text{ В}$$

$$K_{p.ш} = \frac{0,953 \cdot 0,105 \cdot 0,05}{4 \cdot 0,01 \cdot 0,052 \cdot 0,949} = 2,53$$

$$W_{p.ш} = 2,53 \cdot \frac{1 + 0,08p}{0,08p} = 2,53 + \frac{23,56}{p}$$

Структурна схема контуру регулювання швидкості наведена на рис. 3.5.

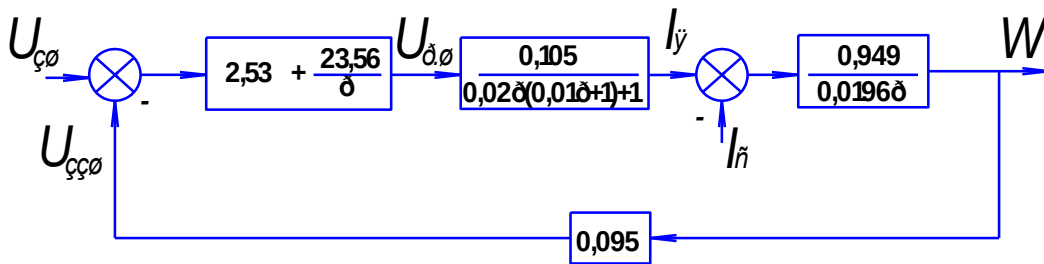


Рисунок 3.6 – Структурна схема контуру регулювання швидкості

Значення пасивних елементів зворотного зв'язку визначаються з виразів

$$T_{рш} = R_{зш} \cdot C_{зш}, \quad T_M = R_{пзш} \cdot C_{зш},$$

де $R_{пзш}$ – опір в ланцюгу зворотного зв'язку регулятора.

Завдяки незначному перерегулюванню (4,3%), перехідні процеси в контурі струму майже аперіодичні, тому передавальна функція матиме такий вигляд

$$W_{зам.с}(p) \approx \frac{1/K_{зс}}{1 + 2T_{\mu}p} = \frac{0,105}{1 + 0,02p};$$

У цьому випадку передаточна функція розімкненого контуру швидкості виглядає наступним чином

$$W_{роз.ш}(p) = \frac{1}{0,052} \cdot \frac{1 + 0,08p}{32 \cdot 0,01^2 p^2 (1 + 0,02p)} = 19,23 \frac{0,08p + 1}{32 \cdot 10^{-4} p^2 \cdot (2 \cdot 0,01p + 1)};$$

Регулятор компенсує значну постійну часу T_M , тому властивості цього контуру залежать лише від постійної часу. Передаточна функція замкнутого контуру швидкості

$$W_{зам.ш}(p) = 19,23 \frac{0,08p + 1}{64 \cdot 10^{-6} p^3 + 32 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,08p + 1}.$$

Наявність форсуючої ланки в передаточній функції призводить до значного перерегулювання, яке може сягати 43%. Це перерегулювання можна зменшити до 8% шляхом додавання аперіодичного фільтра з постійною часу $T_f = 8T_\mu$ на вхід. Таким чином, передаточна функція контуру швидкості виглядає наступним чином:

$$W_{зам.ш}(p) = \frac{1}{K_{зш}} \cdot \frac{1}{64T_\mu^3 p^3 + 32T_\mu^2 p^2 + 8T_\mu p + 1},$$

$$\omega(I_a) = \frac{U_{зш. max}}{K_{зш}} - \frac{R_{a\Sigma}}{K\Phi_H} \cdot \frac{a_{ш} \cdot a_c \cdot T_\mu}{T_M} \cdot I_a.$$

3.1.4 Визначення параметрів контуру регулювання положення системи з підпорядкованими контурами швидкості і струму

Об'єктом регулювання положення було обрано дворазово інтегруючу систему регулювання швидкості. Передаточна функція в цьому випадку дорівнює

$$W_{опн}(p) = 19,23 \cdot \frac{1}{64 \cdot 10^{-6} p^3 + 32 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,08 p + 1} \cdot \frac{1}{p}.$$

Передавальна функція розімкненого контуру регулювання положення визначається за формулою

$$W_{роз.п} = \frac{1/K_{зш}}{a_n \cdot a_{ш} \cdot a_c \cdot T_\mu \cdot p \cdot (a_{ш} \cdot T_\mu p + 1)},$$

де a_n – коефіцієнт швидкодії контуру; $K_{зш}$ – коефіцієнт підсилення каналу зворотного зв'язку за положенням.

$$K_{зш} = \frac{1}{i_n} = \frac{g_{роб}}{\omega_{об}} = \frac{0,033}{193} = 0,00017 \text{ м/рад.}$$

де i_n – передаточне число між ВМ і двигуном.

$$W_{poz.n} = \frac{1/0,00017}{4 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 0,01 \cdot p \cdot (8 \cdot 0,01 \cdot p + 1)} = \frac{5882}{p \cdot (0,08 \cdot p + 1)}.$$

Для досягнення бажаної передавальної функції контуру положення необхідно знехтувати певними доданками. $64 \cdot 10^{-6} p^3 + 32 \cdot 10^{-4} p^2$.

П-регулятор положення можна описати виразом

$$W_{p.n} = K_{pn} = \frac{0,052}{0,00017 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 0,01} = 477,9.$$

Наступним етапом є розрахунок параметрів регулятора позиції.

$$R_{zn} = 20 \text{ кОм},$$

$$R_{33n} = \frac{K_{pn}}{K_{zn}} \cdot R_{zn} = \frac{477,4}{38,4} \cdot 20 \cdot 10^3 = 248,64 \text{ кОм};$$

$$R_{133n} = \frac{K_{33n}}{K_{zn}} \cdot R_{33n} = \frac{0,00017}{38,4} \cdot 248,64 \cdot 10^3 = 1 \text{ Ом}.$$

де $K_{дп}$ – коефіцієнт передачі датчика положення.

3.2 Розрахунок силової частини та вибір стандартного регулятора потужності

3.2.1 Вибір пічного трансформатора

Відповідно до вихідних даних, номінальний струм однієї фази дуги становить $I_n = 6 \text{ кА}$. Тому, керуючись [9], обираємо трансформатор серії "ЭТМПК". Трансформатори цієї серії постачаються з струмообмежуючими реакторами для захисту від коротких замикань, які конструктивно об'єднані з трансформаторами в загальному баці, утворюючи трансформаторний агрегат. Технічні дані обраного трансформатора наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики пічного трансформатора

Тип трансформатора	Максимальна на потужність кВ·А	Номін. первинна напруга, В	Граничне значення вторинної напруги при х.х., В	Вид охолодження
ЭТМПК-3200/10-71У3	2000	6000-10000	243 – 116	М

У всіх трансформаторах з цієї лінійки використовується природне масляне охолодження, яке забезпечується природною конвекцією масла.

3.2.2 Вибір регулятора потужності

Згідно з попередніми розрахунками, обираємо стандартний регулятор потужності АРДМТ - Т034.

Регулятор може працювати в автоматичному або ручному режимах. При переміщенні електродів вниз зі швидкістю не менше 2м/хв, він має пропорційну характеристику, а при переміщенні електродів вгору зі швидкістю не менше 5м/хв використовується релейно-пропорційна характеристика, з регульованою зоною нечутливості від 3 до 10%. Регулятор дозволяє змінювати потужність в межах від 20% до 125%.

Пристрій і робота регулятора.

Система регулювання потужності складається із контрольного щита та пульта управління.

Щит шафи керування двостороннього обслуговування складається з двох секцій. У цих секціях розташовані панелі управління, на яких розміщені станції керування двигунами електродів та відповідна апаратура керування. На дверях шаф керування встановлено наступне: засоби підключення регулятора до мережі, обладнання для активації резервного каналу управління, контрольно-вимірювальні пристрої та сигнальні світлодіоди.

На пульті управління знаходиться обладнання для керування регулятором та пічним трансформатором, а також контрольно-вимірювальні прилади та сигнальні лампи. У пульті також встановлений трансформатор живлення регулятора для шафового виконання. Для підключення зовнішніх дротів і кабелів до щита і пульта управління використовуються клемні затиски.

Схематично показана електрична функціональна схема регулятора потужності для однієї фази дугової печі на малюнку.

Регулятор потужності однієї фази дугової печі складається із наступних компонентів:

а) Керуючі пункти з тиристорним перетворювачем, які використовуються для управління рухом електроду.

б) задавача потужності;

в) блоку введення по струму

г) блоку введення по напрузі.

Давайте побудуємо блок-схему для одного етапу регулятора потужності з пропорційно-релейною характеристикою та використанням тиристорних перетворювачів для живлення електродвигунів, які керують переміщенням електродів. Схема регулятора зображена на малюнку.

У першому блоку порівняння відбувається конвертація сигналів, які пропорційні струму і напрузі дуги. Результативний сигнал з цього блоку, що визначає швидкість переміщення електродів електродвигуна, надходить на вхід напівпровідникового підсилювача через другий елемент порівняння. Цей вхід отримує від'ємний зворотний зв'язок та напругу на якорі двигуна.

У ланцюзі від'ємного зворотного зв'язку присутній обмежувальний елемент 5, який обмежує рівень зворотного зв'язку при піднятті електроду на певну, передбачену наперед величину. При невеликих відхиленнях режиму роботи печі від заданого, швидкість двигуна невелика, і напруга на його якорі менша за установлену величину обмежувального елемента 5. Регулятор працює в режимі пропорційної дії. При значних відхиленнях режиму роботи печі напруга на якорі

двигуна перевищує величину, установлену для обмежувального елемента, що веде до обмеження від'ємного зворотного зв'язку згідно напруги та повному відмиканню напівпровідникового підсилювача 3 за допомогою сигналу з блоку порівняння. Двигун працює на максимальній швидкості, щоб усунути відхилення від заданого режиму роботи печі. Зменшення відхилення режиму роботи дугової печі від заданого до такої величини, коли напруга на якорі двигуна стає меншою за установлену для обмежувального елемента, переводить регулятор в режим пропорційної дії.

При подальшому зменшенні відхилення від налагодженого режиму роботи печі, швидкість двигуна автоматично знижується. Регулятор забезпечує корекцію невеликих відхилень (зміни в сигналі порівняння) у пропорційному режимі, тоді як при значних відхиленнях, наприклад, у випадку короткого замикання (коли сигнал від вихідного блоку потужності перевищує обмежений сигнал зворотного зв'язку), регулятор працює у режимі релею з максимальною швидкістю.

На рисунку 3.6 наведено графік статичної характеристики регулятора потужності при русі угору, де $U_{в\dot{1}} - cI$ - це сигнал на виході блоку порівняння; $U_{об.с.мах}$ - максимальний сигнал негативного зворотного зв'язку за напругою.

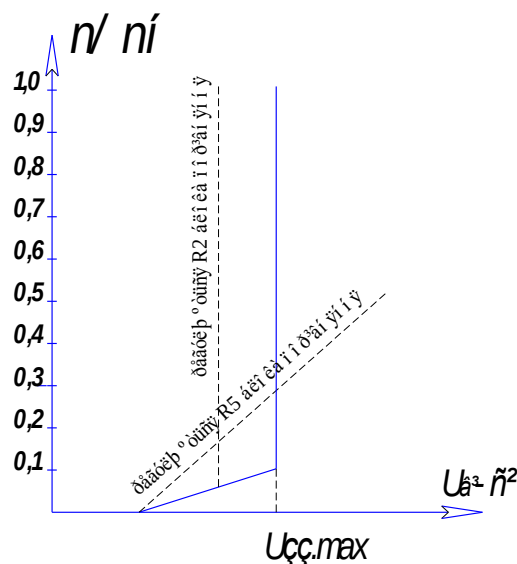


Рисунок 3.9 – Статична характеристика регулятора потужності при русі електроду вгору.

За допомогою резисторів R5 і R2, що знаходяться в блоку БПР, налаштовується пропорційна область (відображена пунктирними лініями на рис. 3.9).

Під час опускання електроду регулятор потужності працює лише у пропорційному режимі.

Устрій та принцип роботи складових частин регулятора

Опис роботи станції керування з тиристорним перетворювачем

Принцип функціонування станції керування з тиристорним перетворювачем ґрунтується на властивостях керованих вентилів, які можуть значно змінювати середнє значення випрямленої напруги, затримуючи момент відкривання тиристорів у порівнянні з ковзаючим періодом додатної півхвилі живучої змінної напруги.

Станція керування включає наступні блоки :

- а) силовий вентильний блок (СВБ);
- б) блок системи імпульсно-фазового керування (СІФК);
- в) блок живлення і керування СІФК (БЖК);
- г) блок живлення (БЖ);
- д) блок напівпровідникового підсилювача (БП);
- ж) блок струмової відсічки (БЗ);
- з) блок порівняння (БПР).

Давайте створимо блок-схему керуючої станції. Вона представлена на кресленні, де:

БЖ – блок живлення;

БП – блок підсилення;

БЖК – блок живлення та керування;

СІФК1 та СІФК2 представляють собою системи управління першою та другою групами тиристорів відповідно, здійснюючи імпульсно-фазове керування.

СВБ - силовий вентильний блок;

ТА – датчик струму;

ТМ – пічний трансформатор.

На вхід напівпровідникового підсилювача БП подається управляючий сигнал $U_{вх}$, що визначається як різниця між заданим значенням і напругою зворотного зв'язку $U_{зад} - U_{зз}$.

Підсилений сигнал управління $U_{вих}$ подається до блоку БЖК, який відповідає за управління блоком формування імпульсів (СІФК) та обмеження кутів регулювання в межах мінімуму та максимуму під час синхронізації імпульсів з напругою живлення. Блок СІФК перетворює вихідну напругу БЖК (U_k) на прямокутні імпульси додатньої полярності відповідної фази, які потім подаються на керуючі електроди тиристорів. На станції встановлено два блоки СІФК, необхідні для управління реверсивним силовим вентильним блоком.

Плавне варіювання фази керуючих імпульсів призводить до зміни середнього значення вихідної напруги на навантаженні у силовому вентильному блоку.

Для контролю струму, що надходить до навантаження, встановлюються датчики змінного струму ТА, які взаємодіють з системою управління. Обмеження струмів короткого замикання здійснюється за допомогою силових вентилів, що регулюються через потужність E_k силового трансформатора.

Полярність випрямленої напруги визначається різницею між вхідною та вихідною напругою: $U_{вх} = U_{зад} - U_{зз}$. Водночас лише одна група вентилів завжди активна, що керує провідним струмом навантаження, тоді як у другій групі вентилів встановлюється кут управління $\alpha_{тах}$. При зміні полярності стан групи вентилів змінюється: тепер група вентилів з кутом $\alpha_{тах}$ переймає керування струмом навантаження, а у попередньо активної групи кут управління переводиться у $\beta_{мін}$. Це призводить до зміни напрямку струму навантаження та полярності випрямленої напруги.

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи

4.1 Розрахунок перехідних процесів у АСК положенням електродів печі

Під час роботи регулятор впливає на привід механізму переміщення електродів, відновлюючи довжину дугового проміжку, що відповідає заданій потужності печі. Перемикання ступенів напруги пічного трансформатора для регулювання потужності печі в різні періоди плавки виконується оператором або автоматичними пристроями.

На практиці широко застосовуються струмові та диференційні регулятори потужності. У першому випадку параметром регулювання обрана сила струму печі. Регулятор підтримує постійну силу струму печі, її реактивну потужність та потужність електричних втрат. Диференційний регулятор підтримує постійне співвідношення напруги до сили струму печі, тобто опір фази. При одночасній зміні напруги та сили струму положення електроду залишається незмінним.

Диференційний регулятор, встановлений на нашій дуговій сталеплавильній печі, має низку значних переваг порівняно зі струмовим.

При відключенні напруги на печі (відключенні головного вимикача) сигналу розбалансу в плечах струму і напруги регулятора немає, і електроди залишаються нерухомими. У разі зникнення напруги струмовий регулятор активує опускання електродів, що вимагає наявності спеціального пристрою для запобігання їх опусканню.

При увімкненні струмового регулятора електроди трьох фаз опускаються. Дуги запалюються лише тоді, коли два або три електроди одночасно торкаються металу. В інших випадках можливі поломка електрода або науглерожування металеві ванни. На печах з встановленим струмовим регулятором запуск печі здійснюється вручну, а регулятор підключається, коли всі дуги вже горять.

Диференціальний регулятор дозволяє автоматизувати запуск печі: при зіткненні першого електрода із шихтою напруга знижується, і регулятор зупиняє електрод. Під час наближення другого електрода запалюються дуги у двох фазах печі.

Недоліком струмової системи регулювання є те, що за відсутності нульового проводу або при підключенні низьковольтної сторони пічного трансформатора в трикутник, система працює нестабільно.

Випадкові зміни сили струму в одній фазі призводять до змін сили струму в двох інших фазах. Це викликає непотрібні переміщення електродів, нерівномірний розподіл навантаження між фазами та встановлення дуг різної довжини. В результаті електрод з найкоротшою дугою може зануритися у ванну.

При диференціальному регулюванні, зі збільшенням сили струму в одній із фаз, переміщення електродів інших фаз значно менше або взагалі відсутнє, оскільки збільшення сили струму у двох інших фазах супроводжується одночасним підвищенням напруги в них через "перекіс" зірки напруг.

Чутливість диференціального регулятора є вищою за інших рівних умов, оскільки зі збільшенням сили струму знижується напруга відповідної фази, і навпаки.

Недоліком диференціального регулятора є його висока залежність від коливань напруги в мережі. При зниженні напруги мережі регулятор, підтримуючи постійним відношення напруги до сили струму, зменшить значення останнього, що призведе до більшого зниження потужності печі, ніж зниження напруги. На відміну від нього, струмовий регулятор знижує потужність печі пропорційно до першого ступеня зниження напруги.

Для уникнення різких змін струму під час плавлення сировини необхідно швидко піднімати електроди. Швидкість піднімання залежить від швидкості руху сталого і від часу, необхідного для розгону механізму. Інерційність та затримка в автоматичній системі регулювання залежать від конструкції виконавчого механізму.

Давайте знайдемо закон, за яким змінюється вихідна величина замкненої системи при застосуванні ступінчастої задаючої функції та врахуванні нульових початкових умов.

ПФ замкненої системи буде

$$W_3(p) = \frac{3.06e^{-5 \cdot 10^{-4} p}}{p(1 + 0.002p)(1 + 0.005p)(1 + 0.0021p) + 3.06e^{-5 \cdot 10^{-4} p}}. \quad (4.1)$$

Знайдемо розв'язки.

Отже

$$p(1 + 0.002p)(1 + 0.005p)(1 + 0.0021p) + 3.06 \cdot e^{-5 \cdot 10^{-4} p} = 0; \quad (4.2)$$

$$p_1 = -9572.71; \quad p_2 = -2.771; \quad p_3 = -19.2542; \quad p_4 = -6.31302;$$

де p – Для повернення до вихідного виразу ми використовуємо теорему розгортки для оператора Лапласа.

$$W(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}, \quad (4.3)$$

де $F_1(p)$ - чисельник передаточної функції розімкненої системи; $F_2(p)$ - знаменник передаточної функції розімкненої системи.

Тоді оригінал може бути знайдений як

$$h(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{n=1}^k \frac{F_1(p_k)}{p_k \cdot F_2'(p_k)} \cdot e^{p_k t}; \quad (4.4)$$

$\frac{F_1(0)}{F_2(0)} = 1$; Після проведення відповідних обчислень була отримана функція

перехідного процесу.

$$h(t) = 1 - 6.61 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-9572.71 \cdot t} + 0.81 \cdot e^{-2.771 \cdot t} + 0.00754 \cdot e^{-19.2542 \cdot t} + 3.53 \cdot e^{-6.31302 \cdot t};$$

За допомогою програми MathCAD 2000 побудуємо графік перехідного процесу.

Графік перехідного процесу зображено на слайді.

4.2 Аналіз стійкості САК

4.2.1 Критерій Гурвіца

ПФ замкненої системи має вигляд

$$W_3(S) = \frac{3.06 \cdot e^{-5 \cdot 10^{-4} S}}{S(1 + 0,002S)(1 + 0,005S)(1 + 0,0021S) + 3.06 \cdot e^{-5 \cdot 10^{-4} S}}. \quad (4.5)$$

Система буде стійкою, якщо головний визначник Гурвіца та його усі діагональні мінори є додатніми числами.

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} > 0; \quad (4.6)$$

Отже, при урахуванні такої заміни, ми отримаємо поліном, що представляє знаменник, у вигляді:

$$S^4 \cdot 2.1 \cdot 10^{-7} + S^3 \cdot 1.57 \cdot 10^{-4} + S^2 \cdot 0.028 + S \cdot 0,0005 + 1 = 0;$$

Тут $a_0 = 2.1 \cdot 10^{-7}$; $a_1 = 1.57 \cdot 10^{-4}$; $a_2 = 0,028$; $a_3 = 0,0005$; $a_4 = 1$;

$$a_1 = 1,57 \cdot 10^{-4} > 0;$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1,57 \cdot 10^{-4} & 0,0005 \\ 2,1 \cdot 10^{-7} & 0,028 \end{vmatrix} = 4,39 \cdot 10^{-6} > 0;$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1,57 \cdot 10^{-4} & 0,0005 & 0 \\ 2,1 \cdot 10^{-7} & 0,028 & 1 \\ 0 & 1,57 \cdot 10^{-4} & 0,0005 \end{vmatrix} = 7.103 \cdot 10^{-2} > 0$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1,57 \cdot 10^{-4} & 0,0005 & 0 & 0 \\ 2,1 \cdot 10^{-7} & 0,028 & 1 & 0 \\ 0 & 1,57 \cdot 10^{-4} & 0,0005 & 0 \\ 0 & 2,1 \cdot 10^{-7} & 0,028 & 1 \end{vmatrix} = 2,35 \cdot 10^{-2} > 0$$

Висновок: система стійка за критерієм Гурвіца.

4.2.2 Критерій Найквіста

Замкнута система буде стійкою, якщо розімкнена система є стійкою і її амплітудно-фазова характеристика (АФХ) не містить точку з координатами $(-1; j0)$. У нашому випадку наявність запізнення у системі не впливає на стійкість розімкненої системи через присутність запізнювальної ланки. Тому ми можемо досліджувати передаточну функцію розімкненої системи без запізнення.

$$W(S) = \frac{3,06}{S(1 + 0,002S)(1 + 0,005S)(1 + 0,0021S)}. \quad (4.7)$$

Для створення амплітудно-фазової характеристики потрібно розкласти дану функцію на її дійсну та уявну частини, тобто представити у вигляді:
 $W(S) = U(\omega) + jV(\omega)$.

Ураховуючи, що $S = j\omega$, а відповідно $S^2 = -\omega^2$; $S^3 = -j\omega^3$; $S^4 = \omega^4$.

Після введення всіх виконаних трансформацій у нашу передавальну функцію, отримаємо

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{3,06}{(\omega^4 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6} - \omega^2 \cdot 0,028) - j \cdot (\omega^3 \cdot 0,157 \cdot 10^{-3} - \omega)} = \\ &= \frac{3,06 \cdot (\omega^4 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6} - \omega^2 \cdot 0,028)}{(\omega^4 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6} - \omega^2 \cdot 0,028)^2 + (\omega^3 \cdot 0,157 \cdot 10^{-3} - \omega)^2} + \\ &+ j \frac{3,06 \cdot (\omega^3 \cdot 0,157 \cdot 10^{-3} - \omega)}{(\omega^4 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6} - \omega^2 \cdot 0,028)^2 + (\omega^3 \cdot 0,157 \cdot 10^{-3} - \omega)^2}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Виділимо окремо дійсну і уявну частину виразу

$$U(\omega) = \frac{3,06 \cdot (\omega^4 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6} - \omega^2 \cdot 0,028)}{(\omega^4 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6} - \omega^2 \cdot 0,028)^2 + (\omega^3 \cdot 0,157 \cdot 10^{-3} - \omega)^2} \quad (4.9)$$

$$V(\omega) = \frac{3,06 \cdot (\omega^3 \cdot 0,157 \cdot 10^{-3} - \omega)}{(\omega^4 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6} - \omega^2 \cdot 0,028)^2 + (\omega^3 \cdot 0,157 \cdot 10^{-3} - \omega)^2} \quad (4.10)$$

Давайте побудуємо годограф за допомогою програми MathCAD2000. Графічне зображення годографа представлене на слайді.

Як можна помітити, графік не проходить через точку $(-1 ; j0)$, що свідчить про стійкість системи за критерієм Найквіста.

Давайте побудуємо графіки амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик і визначимо запас стійкості як за фазою, так і за амплітудою.

За даними графіків, наведених на схемі, видно, що запас за амплітудою складає: $\Delta L = 12 \text{ Дб}$ і за фазою $\Delta \varphi = 71^\circ$.

ВИСНОВОК

Метою кваліфікаційної бакалаврської роботи було здійснення автоматизації процесу плавлення легованої сталі в електродуговій печі ДС – 5МТ, а саме:

1. Забезпечення максимально можливого введення корисної потужності протягом будь-якого періоду плавки за рахунок регулювання напруги на пічному трансформаторі або зміни струму на постійному рівні.
2. Зменшення електричних втрат у роботі печі шляхом стабілізації параметрів електричного режиму та скорочення часу усунення коротких замикань.
3. Підвищення стійкості футеровки печі шляхом оптимізації електричного режиму.
4. Підвищення ефективності та економічності плавлення за рахунок скорочення тривалості технологічного процесу і зменшення споживання електроенергії.

Для вирішення поставлених завдань було ретельно вивчено всі стадії технологічного процесу електродугової плавки, включаючи визначення тривалості самої плавки та аналіз існуючого електрообладнання на працюючій установці. На основі цього технологічного процесу було розроблено алгоритм керування автоматичним процесом плавки легованої сталі, що дозволяє уважно врахувати всі особливості кожної стадії плавки.

На основі вимог автоматичного управління було розроблено позиційну трьохконтурну систему автоматичного керування для регулювання положення електродів у печі. Для цього були розроблені функціональні та структурні схеми кожного контуру окремо. Крім того, було проведено заміну двигуна механізму переміщення електродів і побудована його статична електромеханічна характеристика.

Відповідно до результатів попередніх обчислень, був обраний серійний автоматичний регулятор потужності АРДМТ – Т034. Потім були побудовані статичні характеристики регулятора потужності, графіки струмів, напруги та потоку у вхідних трансформаторах системи управління, а також регулювальні характеристики СІФК.

Перевірка якості перехідних процесів у системі автоматичного керування підтвердила, що система відповідає умовам стійкості.

Таким чином, створена автоматизована система контролю положення електродів печі відповідає всім сучасним стандартам автоматизації і може бути рекомендована для впровадження під час модернізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник для металург. спец. вищ. навч. закл. / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський [та ін.]; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. - Київ : Вища шк., 2006. - 503 с.
2. Проектування і обладнання електросталеплавильних і феросплавних цехів : підручник для вищ. навч. закладів / В. А. Гладких, М. І. Гасик, А. М. Овчарук, Ю. С. Проїдак. - Дніпропетровськ : Системні технології, 2004. - 692 с.
3. Улитенко А. Н. Теория и расчеты высокотемпературных теплофизических процессов (в металлургических системах) : учебное пособие для студентов технич. вузов : рек. МОНУ / А. Н. Улитенко, С. Б. Беликов, В. В. Лунев ; под. ред. В. В. Лунева. - Запорожье : Мотор Сич, 2003. - 606 с.
4. Губін Г. В. Сучасні промислові способи без коксової металургії заліза / Г. В. Губін, В. О. Півень ; під наук. ред. Г. В. Губіна. - Кривий Ріг , 2010. - 336 с.
5. Медовар Б. И. Металлургия вчера, сегодня и завтра / Б. И. Медовар. - 2-е изд., доп. и перераб. - Киев : Наук. думка, 1990. - 189 с.
6. Дурягіна З. А. Сплави з особливими властивостями: навчальний посібник для студ. вищ. навч. закладів / З. А. Дурягіна, О. Я. Лизун, В. Л. Пілюшенко. - Львів: Львівська політехніка, 2007. - 236 с.
7. Орлов И.Н. Электротехнический справочник в 3-х томах. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Теорія автоматичного управління : підручник для внз / Г. Ф. Зайцев та ін.; за заг. ред. Г. Ф. Зайцевевої. Київ : Техніка, 2002. 686 с.
9. Г.С. Щербина, О.Ю. Потап, О.П. Єгоров Автоматизація виробничих процесів. Принципи побудови систем автоматизації: навчальний посібник.- НМетАУ, 2008.- 47с.

10. Автоматичне управління металургійними процесами: Підручник для вузів / Бельський А.М., Бердишев Б.Ф., Блінков О.М., Каганов В.Ю. – М.: Металургія, 1989.

11. Шульга О.В. Системи керування електроприводами: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Полтава: ПНТУ, 2002.

12. Теорія автоматичного управління. Навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

13. Основи електропривода: підручник / Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.В. Савченко, І.М. Голодний.– К.: Видавництво Ліра-К, 2017. — 524 с.

14. Сорока К.О. Теорія автоматичного керування і комп'ютерне моделювання (неперервні лінійні системи). Частина перша. Основи теорії систем автоматичного керування. : навч. посібник. – Харків : ФОП Тімченко, 2010. – 218 с.