

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

БАЛЬКАН ПЕТРО БОГДАНОВИЧ
КОВАЛЬЧУК ВІТАЛІЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 621.793

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ**

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Автореферат
кваліфікаційної роботи магістра

Тернопіль 2020

Роботу виконано на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Керівник роботи: кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій
Чихіра Ігор Вікторович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Рецензент: кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв
Трембач Ростислав Богданович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Захист відбудеться 21 грудня 2020 р. о 08⁰⁰ годині на засіданні екзаменаційної комісії № 24 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, навчальний корпус №1, ауд. 401

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми роботи. Процес зварювання в захисному газі на даний час є одним з найпоширеніших видів зварювання, оскільки забезпечує хорошу якість самого зварного шва та хороші його характеристики.

Проте внаслідок нестабільності напруги в самій мережі та недотриманні хорошої якості зварного дроту, якість роботи такого класу може значно погіршитись

У зв'язку з цим актуальним є розробка та дослідження систем забезпечення стабільності напруги зварювальної дуги.

Мета роботи: розробити та оптимізувати роботу автоматизованої системи керування напругою зварювальної дуги.

Об'єкт, методи та джерела дослідження. Система керування напругою зварювальної дуги на базі ПЛК.

Отримані результати:

- було проаналізовано основні параметри, які впливають на процес зварювання;
- розглянуто схеми регулювання напруги дуги та стабільності процесу зварювання;
- розроблено систему регулювання напругою дуги з інтегруючо диференціальними ланками для зменшення тривалості перехідних процесів;
- проведено оптимізацію стабільності роботи системи;
- Розроблено математичну модель для забезпечення ефективного керування.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблена система та результати досліджень можуть бути використані при впровадженні систем автоматизацію процесів зварювання в захисних газах.

Апробація. Окремі результати роботи доповідались на IX Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 6 частин, висновків, переліку посилань та додатків. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 70 арк. формату А4, графічна частина – 15 аркушів презентації формату А4.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі описано актуальність задачі розробки та дослідження систем управління процесом зварювання.

В аналітичній частині описано типи існуючих систем контролю напруги зварювальної дуги.

В технологічній частині описано яким чином функціонує система автоматизованого контролю зварювальної дуги.

В конструкторській частині розроблено систему для автоматизованого керування напругою зварювальної дуги, перевірено її на стійкість.

В науково-дослідній частині досліджено можливість регулювання дуги за рахунок контролю струму.

В спеціальній частині приведено результати дослідження на стійкість розробленої системи із застосуванням коригуючих елементів.

В частині «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано питання охорони праці та безпеки життєдіяльності при роботі з системою.

У загальних висновках до кваліфікаційної роботи магістра описано прийняті в роботі технічні рішення і організаційно-технічні заходи, які забезпечують виконання завдання; оригінальні технічні рішення, прийняті автором в процесі роботи; технічні рішення роботи, які можуть бути впроваджені у виробництво.

В графічній частині приведено схему автоматизованої системи, основні результати проведених досліджень, структурні схеми розробленої системи.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було розроблено автоматизовану систему регулювання напруги зварювальної дуги для забезпечення оптимального параметру процесу зварювання та високих якісних характеристик зварного шва. Було проаналізовано основні параметри, які впливають на процес зварювання, розглянуто схеми регулювання напруги дуги та стабільності процесу зварювання. Зроблений аналіз вихідної САР, в результаті якого було встановлено, що представлена базова реалізація системи є нестійкою та не задовольняє заданим показником якості. В результаті був проведений синтез коректуючого пристрою, завдяки якому система зв'язку стала стійкою, її перехідний процес та статистична помилка встановили режими перестановки не виходять за допустимі межі. Розроблено систему регулювання напругою дуги з інтегруючо диференціальними ланками для зменшення тривалості перехідних процесів. Проведено оптимізацію стабільності роботи системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. П.Б. Балькан. Дослідження системи автоматизованого регулювання напруги зварювальної дуги / П.Б. Балькан, І.Д. Винник, В.В. Ковальчук, Ю.С. Чміль, В.С. Деревянко // IX Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року — Т. : ТНТУ, 2020 — Том 2. — С. 5.

АНОТАЦІЯ

П.Б. Балькан, В.В. Ковальчук. Розробка та дослідження системи автоматизованого регулювання напруги зварювальної дуги. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – Тернопіль, 2020.

У роботі було розроблено автоматизовану систему регулювання напруги зварювальної дуги для забезпечення оптимального параметру процесу зварювання та високих якісних характеристик зварного шва. Було проаналізовано основні параметри, які впливають на процес зварювання, розглянуто схеми регулювання напруги дуги та стабільності процесу зварювання..

Ключові слова: ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА, КЕРУВАННЯ, КОНТРОЛЕР, ЗВАРЮВАННЯ, ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ.

ANNOTATION

P.B. Balkan, V.V. Kovalchuk. Development and study of welding arc voltage automatic control system. 151 - automation and computer integrated technologies. - Ivan Puliuyi Ternopil National Technical University. - Ternopil, 2020.

An automated arc voltage control system was developed to ensure the optimal parameter of the welding process and high quality characteristics of the weld. The main parameters influencing the welding process were analyzed, the schemes of arc voltage regulation and stability of the welding process were considered.

Keywords: ELECTRIC ARC, CONTROL, CONTROLLER, WELDING, DIFFERENTIATION.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини роботи становить ___ слайдів.

Об'єм пояснювальної записки складає ___ друкованих сторінок формату А4 (210×297), об'єм додатків – ___ друкованих сторінок формату А4.

Робота складається з шести розділів, в яких нараховується ___ рисунків та ___ таблиць з даними.

В роботі використано ___ літературних джерел.

У магістерській роботі було розроблено автоматизовану систему регулювання напруги зварювальної дуги для забезпечення оптимального параметру процесу зварювання та високих якісних характеристик зварного шва. Було проаналізовано основні параметри, які впливають на процес зварювання, розглянуто схеми регулювання напруги дуги та стабільності процесу зварювання. Зроблений аналіз вихідної САР, в результаті якого було встановлено, що представлена базова реалізація системи є нестійкою та не задовольняє заданим показником якості. В результаті був проведений синтез коректуючого пристрою, завдяки якому система зв'язку стала стійкою, її перехідний процес та статистична помилка встановили режими перестановки не виходять за допустимі межі. Розроблено систему регулювання напругою дуги з інтегруючо диференціальними ланками для зменшення тривалості перехідних процесів. Проведено оптимізацію стабільності роботи системи.

Ключові слова: ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА, КЕРУВАННЯ, КОНТРОЛЕР, ЗВАРЮВАННЯ, ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1. <i>Характеристика процесу дугового зварювання в захисних газах</i>	11
1.2. <i>Особливості зварювання в захисних газах</i>	13
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	13
2.1. <i>Методи регулювання напруги дуги при зварюванні</i>	20
2.2. <i>Регулювання напруги дуги за допомогою дрoселя насичення</i>	27
2.3. <i>Регулювання напруги дуги за допомогою рoтoтpолу</i>	29
2.4. <i>Схеми з регулюючим трансформатором</i>	32
2.5. <i>Головка з автоматично регульованою швидкістю подачі</i>	34
2.6. <i>Головка з постійною швидкістю подачі</i>	37
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	41
3.1 <i>Фoмaлізація поставленої задачі</i>	41
3.2. <i>Аналіз стійкості розробленої системи автоматичного керування</i>	44
3.3. <i>Критерій Гурвіца</i>	46
3.4. <i>Критерій Михайлова</i>	47
3.5. <i>Критерій Найквіста</i>	48
3.6. <i>Синтез коригувального пристрою</i>	49
3.6.1. <i>Побудова бажаної ЛАЧХ системи</i>	49
3.7. <i>Побудова коригуючого пристрою для системи управління</i>	53
3.8. <i>Вибір електричного аналога і розрахунок його номіналів</i>	53
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	56
5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	62
5.1. <i>Побудова графіків перехідного процесу в скоригованій системі</i>	62
5.2. <i>Побудова області стійкості адаптованої системи</i>	63
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	66
6.1 <i>Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії</i>	66
6.1.1 <i>Мікроклімат та склад повітря робочої зони</i>	66
6.1.2 <i>Виробниче освітлення</i>	68
6.2 <i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	70
6.3 <i>Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля в умовах надзвичайних ситуацій</i>	71

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА.....	73
БІБЛІОГРАФІЯ.....	74

ВСТУП

У цій роботі метою є оптимізація алгоритмів управління системами зварювання для покращення процесу газової дугової зварки (Gas Metal Arc Welding – GMAW) для підвищення якості зварних з'єднань. Щоб мати можливість розробити контролери для процесу GMAW, а також для забезпечення можливості моделювання процесу було розроблено математичну модель, що описує вказаний процес.

Вона включає опис електричного струму, динаміку падіння та швидкість плавлення, а також критерії скидання розривів дуги.

Як правило електрична схема зварного апарату складається зі зварювального пристрою, дроту, електроду та електричної дуги. Крапля моделюється як система пружинно-демпферної маси, на яку впливає ряд зовнішніх сил. З цих зовнішніх сил електромагнітна сила є найбільш значущою. Швидкість плавлення витратного матеріалу електроду моделюється як зі статичної (стаціонарної) точки зору, так і з динамічно точки зору.

Статична модель - це просте рівняння, що описує швидкість плавлення, тоді як динамічна модель є більш складною.

Обговорюється структура контролю за GMAW, і на основі цього обговорення представлена генеральна структура системи. Ця структура включає контролер довжини дуги і контролер передачі металу, а також внутрішній контур, що контролює струм зварювання. Для управління довжиною дуги, пропонується нелінійний контролер, заснований на лінеаризації зворотного зв'язку. Для контролю передачі металу пропонується підхід на основі отримання рівномірного розміру краплі перед ініціюванням імпульсу. Це здійснюється шляхом обчислення кількості розплавленого

електрода між імпульсами струму в процесі зварювання. В роботі ми намагались підвищити стійкість процесу відриву крапель. Також було запропоновано реалізації контролера довжини дуги, контролера передачі металу, алгоритм мінімізації довжини дуги, алгоритм для посилення здатності фокусувати дугу, мінімізації надходження тепла в заготовку.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

Дугове зварювання в захисних газах (GMAW) - це процес, який використовується для з'єднання кусків металу, і, мабуть, це найуспішніший і широко застосовуваний метод зварювання в промисловості на сьогоднішній час. Якість зварного шва є ключовим питанням зварювання, і в багатьох випадках зварювальний шов повинен володіти деякими важливими особливостями. Однак це дуже складно контролювати процес GMAW для зварника (оператора-людини), тому досягти бажаної якості зварного шва може бути неможливо. Щоб полегшити його може бути посилено внутрішнє машинне управління процесом.

1.1. Характеристика процесу дугового зварювання в захисних газах

Механізоване зварювання за допомогою дроту однакового поперчного перерізу в захисному газі - вид електродугового зварювання, коли подавання, власне, електродного дроту відбувається автоматично та характеризується сталою швидкістю і автоматично, а пальник, втім, рухається вздовж зварного шва рукою зварювальника. Для запобігання впливу навколишнього середовища електрична дуга, зварювальна ванна і її кристалізована частина захищені газом, який поступає в зону зварювання.

Електрична дуга розплавляє зварювальний дріт і кромку виробу, утворюється зварювальна ванна, в якій відбувається перемішування металу основи і металу зварного дроту. В процесі переміщення електричної дуги метал ванни, який є рідким, кристалізується і відбувається утворення зварного шва, який з'єднує краї виробу.

Механізоване зварювання в захисних газах, зазвичай, виконується на постійному струмі, як правило, зворотної полярності.

В якості джерела живлення використовують апарати, що мають жорстку або пологопадаючу вольт-амперну характеристику.

Жорстка характеристика сприяє автоматичному відновленню заданої протяжності дуги в разі її порушення, наприклад, через, власне, коливання руки зварника.

Для виконання процесу зварювання в захисних газах є широкий діапазон вибору електродного дроту, який відрізняється по хімічному складу різний за поперечним перерізом. Хімічний склад останнього залежить від хімічного складу сталі, яку зварюють і частково від природи захисного газу. Хімічний склад зварного дроту має відповідати і, власне, залежить від хімічного складу металу, який зварюють. Поперечний переріз такого дроту залежить від товщини металу, положення, в якому проводиться зварювання, і типу зварного з'єднання.

Захисний газ запобігає прямому контакту навколишнього середовища з розплавленим металом ванни і електричною дугою. Захисний газ впливає на стабільне горіння електричної дуги, геометричну форму шва, глибину проплавлення, міцність зварного шва.

Схема такого процесу приведена на рис 1.1

При такому типі зварювання застосовують інертні гази, а також активні гази (вуглекислий газ, водень, кисень, і азот) гази, можливе застосування сумішей газів в різних пропорціях.

Завдяки широкому діапазону застосовуваних захисних газів, які мають різні теплофізичні властивості, технологічні можливості цього способу, як щодо процесу зварювання, так і їх товщини зварного шва більші, ніж при використанні інших способів. Причиною цього є те, що теплофізичні властивості захисних газів впливають на технологічні властивості дуги і форму швів.

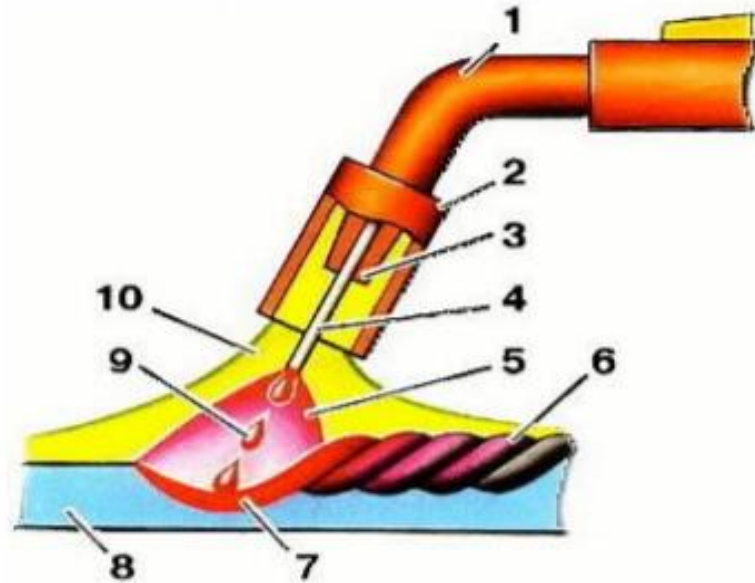


Рисунок 1.1 - Схема механізованого процесу зварювання в захисному газі з плавким електродом:

1 - пальник; 2 - сопло; 3 – струмопровідний наконечник; 4 - електродний дріт; 5 - зварювальна дуга; 6 - зварювальний шов; 7 - зварювальна ванна; 8 - основний метал; 9 - краплі електродного металу; 10 - газовий захист.

1.2. Особливості зварювання в захисних газах

Дугове зварювання в захисних газах займає провідне місце при виробництві зварних конструкцій, тому багато дослідників працюють в цій галузі над підвищенням якості зварних з'єднань, приділяючи особливу увагу питанням управління процесом зварювання. Накопичений великий досвід у вирішенні цих питань призвела до необхідності систематизації даних.

В даному розділі наведено короткий огляд способів управління процесом дугового зварювання в захисних газах.

Керуючий вплив обумовлено перерозподілом комплексу сил, що діють на краплю електродного металу при дуговому зварюванні, і в залежності від його застосування можна виділити наступні способи управління:

- накладення зовнішнього магнітного поля;
- програмування швидкості подачі електрода;
- імпульсна подача газу (ів);
- імпульсна зміна струму.

Управління процесом дугового зварювання за рахунок накладення зовнішнього магнітного поля.

В численних роботах на основі експериментальних досліджень проведена оцінка ефективності управління процесами формування і кристалізації швів за допомогою зовнішніх електромагнітних впливів, заснованих на застосуванні імпульсних магнітних полів, визначені параметри імпульсних електромагнітних дій для керування процесом переносу електродного металу і оптимальні градієнти і амплітуди індукції для ефективного управління процесом перенесення електродного металу. Авторами встановлено, що застосування ЕМВ на основі аксіальних імпульсних магнітних полів дозволяє збільшити частоту переносу крапель і відповідно зменшити їх розміри. При цьому ефективність даних ЕМВ підвищується зі збільшенням частоти імпульсів УМП. В результаті існує можливість зниження втрат металу електродного дроту на розбризкування.

При дослідження булавикористана високошвидкісна кінокамера для отримання залежності між режимами переносу металу і різними магнітними полями. Вивчено різні режими перенесення металу в умовах різних магнітних полів і зварювальних параметрів. Експеримент показав чіткість зображення перенесення краплі і вплив поздовжнього магнітного поля на перенос металу і форму крапель.

За допомогою високошвидкісної камери вивчали умови дії на краплю сили в залежності від параметрів режиму зварювання, а також механізм прискорення перенесення металу. Виявлено, що електромагнітне поле надає найбільш важливий вплив на процес перенесення електродного металу, так як тип перенесення металу змінюється з крупнокрапельна на струменевий.

Управління процесом дугового зварювання за рахунок програмування швидкості подачі електрода.

В роботі [15] проведено порівняльний аналіз руху краплі електродного металу при зварюванні з імпульсною подачею дроту і при безперервному подаванні, але з імпульсним керуванням зварювальної дуги. Встановлено, що при імпульсному управлінні зварювальним струмом і безперервної подачі електродного дроту переміщення краплі електродного металу має циклічний характер.

В роботі [16] визначено загальні та приватні задачі, що виникають при дугового механізованої зварюванні алюмінію і його сплавів. Виявлено переваги процесу з керованою імпульсною подачею електродного дроту, що забезпечує підвищення якості та електропровідних властивостей зварного шва. Авторами розглянуто можливість регулювання процесу дугової механізованої зварки в захисному газі з короткими замиканнями дугового проміжку по тимчасовим характеристикам процесу перенесення електродного металу. Як сигнал стану дугового процесу обрана шпаруватість напруги зварювання, і за цим параметром запропоновано регулювати зварювальний процес в оптимальній області. В роботі [17] проаналізовані технічні і технологічні характеристики процесів дугового зварювання й наплавлення, отримані із застосуванням регульованих імпульсних механізмів подачі електродного дроту. Показано, що застосування таких механізмів дозволяє істотно поліпшити формування металу шва і його структуру, знизити втрати електродного металу на угар і розбризкування, розширити

зону оптимальних режимів. Встановлено, що імпульсна подача електродного дроту при зварюванні сталей в середовищі вуглекислого газу точками з'єднань внапуск на вертикалі робить істотний вплив на стабілізацію процесу, формування зварного з'єднання, його повторюваність, істотно покращуючи ці характеристики процесу при оптимально обраних параметрах імпульсної подачі. Автори вважають, що імпульсна подача, що забезпечує керований перенесення електродного металу, істотно впливає на енергетичні характеристики зварювального процесу, значно знижуючи витрати електроенергії (в 1,3-1,8 рази) в широкому діапазоні зміни параметрів зварювального кола та імпульсів подачі електродного дроту. Також розглянуті переваги систем з керованою імпульсною подачею електродного дроту, які перебуваючи в швидкій адаптації їх технічних і технологічних можливостей до постійно змінюваних завданням зварювального виробництва, високу надійність та спроможність відтворювати імпульси з параметрами, які при використанні джерел зварювального струму різних типів і характеристик одночасно б задовольняли двома основними критеріями: отримання якісного зварного з'єднання з мінімальними втратами електродного металу і подальшого зниження енерговитрат.

В роботі [18] показано, що при зварюванні з імпульсною подачею електродного дроту відбувається зниження тепловкладення і освіту більш сприятливою структури металу шва і ОШЗ, що сприяє підвищенню механічних характеристик.

Управління процесом дугового зварювання за рахунок імпульсної подачі газу (ів).

Авторами [17] розроблена нова технологія дугового зварювання в захисних газах на основі застосування пульсацій газових потоків і пульсацій потенціалів іонізації, коли вперше в зварювальній технології використані окремо позитивні властивості гелію і аргону. Це швидкість частинок в плазмі

дуги, довжина їх пробігу, ступінь іонізації, дія і вплив іонізаторів. Ці параметри визначають теплову потужність дуги і тиск газів. Гелій, володіючи високою плинністю, проникає в стик між крайками і забезпечує захист і підігрів зворотної сторони шва. У порівнянні з традиційною технологією дугового зварювання в захисних газах без пульсацій нова технологія більш ефективна для отримання бездефектних швів. Нова технологія реалізується без істотних витрат на підприємствах машинобудування і особливо на підприємствах, які застосовують дугове зварювання в захисних газах. Показано, що застосування при дугового зварювання в захисних газах поперемінної імпульсної подачі різнорідних газів (гелію і аргону) дозволило створити принципово новий технологічний процес, що поєднує гідність аргонодугового (АДС) і гелієводугової (ГДС) зварювання. Завдяки пульсуючому зміні тиску в стовпі дуги, викликаному різницею щільності і потенціалів іонізації аргону і гелію, виникає ефект періодичного ударного впливу на зварювальну ванну, що забезпечує отримання металу зварного шва з дрібнозернистою структурою, високими пластичністю і міцністю металу.

Управління процесом дугового зварювання за рахунок імпульсного зміни струму

В роботі [19] досліджені просторова стійкість і проплавляючої здатність малоамперної дуги змінного струму при зварюванні тонколистового алюмінію. Харчування дуги здійснюється від інверторного джерела, що забезпечує прямокутну форму вихідної напруги і можливість зміни амплітуди і тривалості імпульсів струму прямої і зворотної полярності. Встановлено, що для поліпшення форми провару (зменшення ширини швів) зварювання необхідно виконувати при мінімально можливих значеннях амплітуди і тривалості імпульсів струму зворотної полярності виходячи із забезпечення потреби якості катодного очищення зварюваної поверхні і стабільних повторних збуджень дуги.

Розглянуті особливості адаптивних імпульсних процесів зварювання в різних просторових положеннях стосовно зварювально-монтажних робіт при спорудженні магістральних трубопроводів. Показані їх переваги в порівнянні з традиційними способами дугового зварювання та обґрунтовано перспективи їх застосування.

В роботі [20] запропонований варіант автоматизації процесу ІДСПЕ шляхом стабілізації середніх значень зварювального струму і напруги на дузі, а також застосування системи автоматичної стабілізації середніх значень напруги на дузі при наплавленні швів з вуглецевих сталей зменшує кількість коротких замикань під час дії лінійних збурень, що дозволяє поліпшити зовнішній вигляд швів і знизити розбризкування.

Для визначення деяких властивостей електричної дуги на підставі наявних даних різних робіт досліджена реакція дуги на обурення, характерні для імпульсних процесів зварювання - з короткими замиканнями дугового проміжку і імпульсно-дугового зварювання.

В роботі [21] представлена система дослідження і синхронного виявлення впливу параметрів зварювання на якість зварювання і крапельний перенесення для отримання і аналізу електричного сигналу і миттєвого одночасного зображення перенесення крапель. Система заснована на розробленому програмному перемикачі інверторе. Результати показують, що миттєві форми хвилі і статистичні дані електричного сигналу сприяють отриманню повної оцінки якості зварювання і оптимізованих високошвидкісних зображень процесу перенесення краплі.

В роботі [22] представлені сучасні імпульсні джерела живлення з синергетичним управлінням процесом ІДСПЕ, які дозволяють розширити діапазони товщин зварюваних металів в сторону менших їх значень. При цьому оптимізація режимів зварювання, що забезпечують стабілізацію

рівномірного формування кореня шва, призводить до підвищення якості з'єднань тонколистових алюмінієвих сплавів.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Методи регулювання напруги дуги при зварюванні

Електричний режим автоматичного зварювання визначається двома основними величинами: напругою і струмом дуги. Зв'язок між цими величинами задається зовнішньою характеристикою джерела живлення. У процесі зварювання напруга і струм дуги повинні підтримуватися незмінними. Для цієї мети служать зварювальні головки і їх електричні схеми.

Неодмінною умовою стійкої роботи зварювальної головки є рівність швидкостей подачі і плавлення електродного дроту. Швидкість плавлення електрода визначається напругою і струмом дуги, а також рядом технологічних факторів. Слід підкреслити, що швидкість плавлення електрода однозначно не визначається потужністю дуги.

Однієї і тієї ж потужності можуть відповідати різні швидкості плавлення електрода в залежності від напруги і струму дуги. До числа технологічних факторів належать хімічний склад, діаметр електрода і довжина його ділянки, що виступає за контактні точки мундштука, хімічний склад і грануляція флюсу, тепловідвід в виріб, швидкість пересування дуги вздовж шва і ін.

На рис. 2.1 представлена залежність швидкості плавлення електрода від напруги дуги 1 для певної зовнішньої характеристики і незмінних технологічних факторів. Стійкий режим роботи зварювальної головки визначається точкою перетину кривої 1 з статичною характеристикою зварювальної головки, т. Е. Залежністю швидкості подачі від напруги дуги 2.

Залежно від схеми зварювальної головки ця характеристика може мати різний кут нахилу до горизонтальної осі. Для головок з постійною швидкістю подачі ця характеристика буде прямий, паралельній горизонтальній осі 3. Статизм цієї системи регулювання дорівнює нескінченності.

У разі схеми автоматичного регулювання швидкості подачі електрода, що володіє статизмом близьким до нуля, залежність між швидкістю подачі і напругою дуги перетворюється в пряму, практично перпендикулярну горизонтальній осі 4.

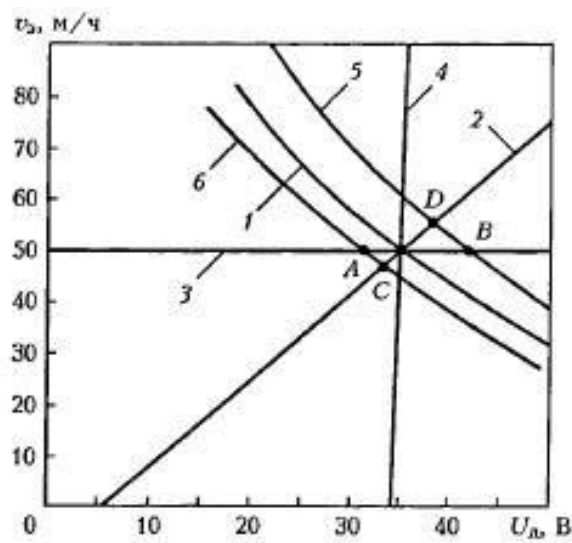


Рисунок 2.1 – Залежність швидкості плавлення електрода від напруги дуги при зварюванні

Всі розглянуті головки незалежно від статизму можуть відновити заданий режим при його відхиленні, викликаних змінами довжини дуги. У всіх цих випадках швидкості плавлення, відповідні змінилася довжині дуги, визначаються кривою 1. Різниця схем полягає в швидкості встановлення заданого режиму зварювання.

Інша справа при змінах швидкостей плавлення, викликаних перерахованими вище технологічними факторами або коливаннями напруги мережі. У цих випадках змінюється залежність швидкості плавлення електрода від напруги дуги. Зі збільшенням напруги мережі, ділянки

електрода, що виходить за контактні точки мундштука, зі збільшенням зерна флюсу та ін., Швидкість плавлення електрода збільшується (крива 5 рис. 2.1). При протилежних зміни перерахованих факторів швидкість плавлення електрода зменшується (крива 6 рис. 2.1).

З рис. 4.1 ясно, що в цих випадках головка з постійною швидкістю подачі не може відновити заданої напруги дуги і продовжує стійко працювати при нових значеннях напруги дуги (точки А, В рис. 2.1).

Заданий режим відновлюється тільки в тих випадках, коли в процесі регулювання зникає причина, яка викликала зміна швидкості плавлення. Наприклад, місцевий зазор, вихват в крайках зварюється, прихватка в обробленні шва і ін.

Цікаво відзначити, що більшість зварювальних головок з автоматично регульованою швидкістю подачі також не в змозі відновити колишню напруга дуги при змінах напруги мережі і перерахованих вище технологічних факторів. Нові значення напруг дуги визначаються точками С, D (рис. 2.1) перетину кривої 2 з кривими 5, 6.

Тільки головки з статизмом близьким до нуля можуть відновити заданий напруга дуги незалежно від причин, що викликають його зміну. Однак при цьому значно змінюється швидкість подачі електрода, що часто неприпустимо з технологічних міркувань.

Наведений короткий аналіз показує, що в залежності від статизму регуляторів зварювальних головок вони з тією або іншою точністю можуть відновити заданий напруга дуги, незалежно від причин, що викликають його відхилення. Однак при змінах напруги мережі відновлення заданої напруги дуги, здійснюване регулюванням швидкості подачі, призводить до змін струму дуги і кількості розплавленої електродного дроту. Метою є розгляд способів, що дозволяють підтримувати незмінним режим зварювання при коливаннях напруги мережі. Створення схем, що забезпечують зварювання

на постійному режимі при змінах зазначених вище технологічних факторів, ми вважаємо недоцільним. При правильно обраної технології та уваги з боку зварника ці фактори залишаються постійними в процесі зварювання.

Незалежно від типу зварювальної головки для підтримки заданого режиму зварювання при коливаннях напруги мережі, необхідно ввести в схему регулювання нову регулюючу величину. Такими величинами можуть бути напруга низької сторони зварювального трансформатора або індуктивний опір зварювального кола. У першому випадку метою регулювання є підтримання незмінним напруги низької сторони зварювального трансформатора, у другому - зміна індуктивності за законом, що дозволяє зберегти заданий режим зварювання при коливаннях напруги мережі (рис. 4.2). Практично більш простим і раціональним є другий спосіб, так як перший спосіб пов'язаний з складними релейно-контакторних схемами і не може забезпечити безступеневого регулювання напруги.

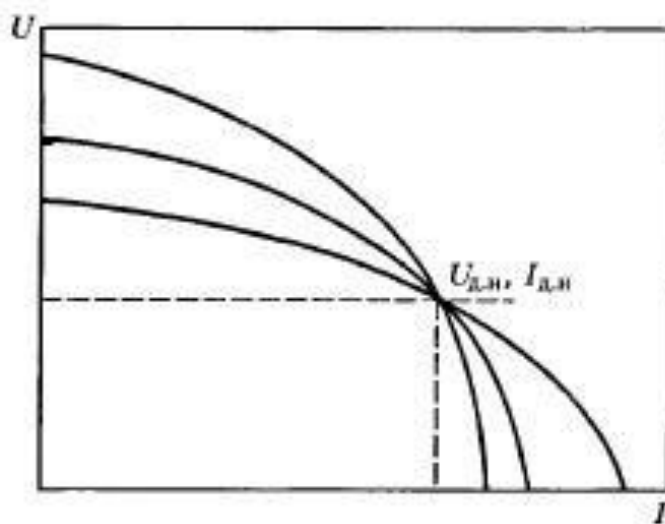


Рисунок 2.2 – Залежність зміни індуктивності при коливаннях напруги

Схеми регулювання залежать від принципу дії і конструкції зварювального трансформатора, дроселя і головки. Нижче ми розглянемо три

схеми регулювання, однаково придатні для зварювання головками з постійною і автоматично регульованою швидкостями подачі.

1. Розглянемо схеми, до складу яких може входити один з перерахованих нижче зварювальних апаратів:

а) дроселі, індуктивний опір яких регулюється шляхом зміни повітряного зазору;

б) трансформатори з підвищеним індуктивним опором розсіювання, регульованим шляхом зміни взаємного розташування обмоток на магнітопроводі;

в) трансформатори з підвищеним індуктивним опором розсіювання, регульованим за допомогою рухомих магнітних шунтів, розташованих на шляху потоків розсіювання.

Для того щоб перераховані апарати могли застосовуватися в схемах автоматичного регулювання режиму зварювання, вони повинні забезпечуватися електроприводом для переміщення сердечника дроселя а, обмоток б або магнітних шунтів с.

Система автоматичного регулювання може бути представлена скелетної схемою (рис. 2.3). До складу схеми входять вимірвальний, що задає, підсилювальний, виконавчий елементи і регульований зварювальний агрегат. Регульованою величиною найдоцільніше прийняти напруга дуги. При відхиленні напруги дуги від заданого значення на підсилювальний елемент подається різниця між існуючим напругою дуги і його заданим значенням. Ця різниця посилюється і подається на виконавчий орган - електропривод зварювального апарату.

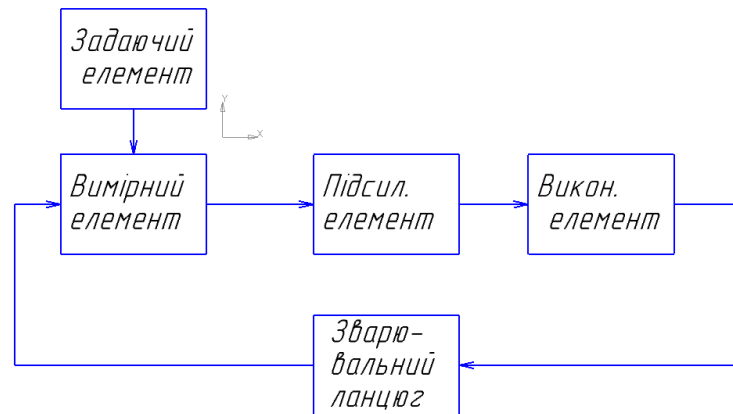


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи керування

На рис. 2.4 представлений варіант принципової схеми регулювання. Вимірювальним елементом схеми є чутливе реле РН електромагнітного типу. Електромагнітна сила тяжіння якоря реле врівноважується силою пружини, яка є задає елементом схеми.

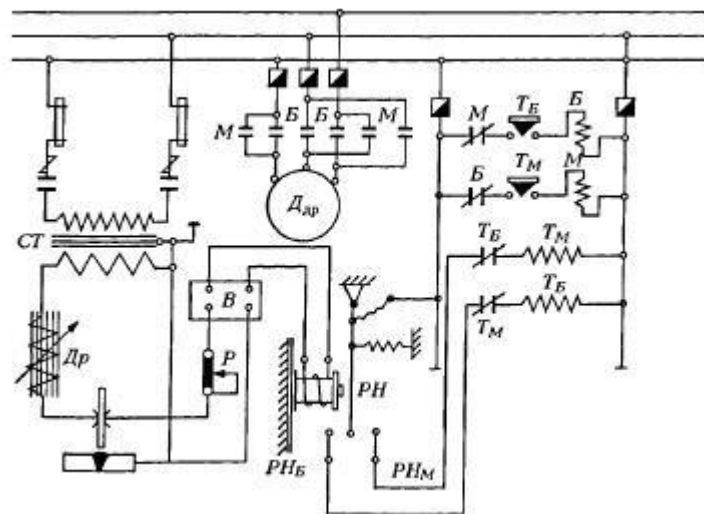


Рисунок 2.4 – Принципова схема регулювання напруги зварювального апарату

При відхиленні напруги дуги від заданої величини рівність електромагнітної сили і сили пружини порушується і замикається один з контактів реле в ланцюзі котушки найпростішого електромагнітного таймера з регульованим повітряним демпфером. Таймер забезпечений одним

нормально розімкненим контактом, замикається з витримкою часу. Цей контакт включений в ланцюг котушки реверсивного магнітного пускача, керуючого двигуном зварювального агрегату. Витримка часу необхідна для полегшення режиму роботи двигуна і керуючих їм пускачів. Навіть при дуже стійкому режимі зварювання напруга дуги коливається щодо середнього значення в межах ± 2 В. Коливання напруги викликають помилкові включення контактів реле РН. Якщо всі ці включення РН будуть передаватися на двигун, то число його включень може досягти 60 і більше в хвилину. Наявність витримки часу між включенням РН і подачею напруги на котушку пускача, керуючого електроприводом зварювального апарату, дозволяє відсіяти помилкові включення РН, викликані короточасними коливаннями напруги дуги. Схема буде реагувати тільки на тривалі зміни напруги дуги, викликані коливаннями напруги мережі.

Принцип дії схеми абсолютно ясне при розгляді рис. 4. При замиканні одного з контактів реле напруги РН проводиться включення двигуна ДДР. Напрямок обертання двигуна ДДР залежить від того, включився чи контактор Б або М. При падінні напруги мережі замикається контактор РНм реле напруги, в результаті чого спрацьовується контактор Б і двигун починає обертатися в напрямку, відповідному зменшенню індуктивного опору. Напруга дуги зростає. Як тільки напруга дуги досягає величини, при якій розмикається контакт реле РНм, двигун ДДР зупиняється. Таким чином електропривод джерела живлення включається, коли $U_d = / = U_{д.н}$, і вимикається, коли U_d близько до заданої величині напруги $U_{д.н}$. Точність відновлення заданого режиму зварювання визначається чутливістю реле напруги, т. Е. Різницею напруг, при яких відбувається розмикання контакту РНм і замикання контакту РНб.

Швидкість відновлення режиму залежить від швидкості зміни індуктивного опору при переміщенні сердечника дроселя, котушок

трансформатора або магнітних шунтів. Слід, однак, мати на увазі, що прагнення до скорочення часу відновлення режиму може привести до порушення стійкості роботи схеми (з'являться так звані гойдання).

Наведена схема може бути використана в тих випадках, коли напруга мережі змінюється плавно, без стрибків.

Розглянута схема не є єдиною; можливий цілий ряд інших схем, що відрізняються від схеми рис. 2.4 як принципово, так і за конструктивним оформленням.

Розібрана схема цілком придатна і для головок зі змінною швидкістю подачі за умови заміни реле напруги реле струму, 5 реагує на зміни струму дуги.

2. У тих випадках, коли напруга мережі змінюється різкими, часто повторюваними стрибками, як регульованого зварювального апарату доцільно використовувати дросель насичення. Зміна індуктивного опору дроселя насичення проводиться електромагнітним шляхом за допомогою зміни магнітної проникності сталевого сердечника. Розберемо коротко принцип дії дроселя насичення.

2.2. Регулювання напруги дуги за допомогою дроселя насичення

Дросель насичення (рис. 2.5) має тристержневую магнітну систему. На двох крайніх стрижнях розташовуються обмотки змінного струму, на середньому - обмотка постійного струму. Обмотки змінного струму зазвичай з'єднуються паралельно. Завдяки узгодженим включенню обмоток змінного струму, в обмотці постійного струму змінна електрорушійна сила не наводиться. Постійне магнітне поле, створюване обмоткою, розташованою на середньому стрижні, збільшує насичення муздрамтеатру. Змінюючи величину постійного струму, можна регулювати ступінь насичення

муздрамтеатру і, отже, регулювати індуктивний опір дроселя. При порівняно малій потужності, споживаної обмоткою постійного струму, індуктивний опір дроселя насичення може бути змінено в значних межах. Так, для дроселів потужністю 70 кВ-А цілком достатня потужність джерела постійного струму 200 ... 300 Вт.

На цьому ж принципі може бути сконструйований зварювальний трансформатор з магнітними шунтами. Магнітна проникність шунтів змінюється за допомогою постійних магнітних полів, створених спеціальними обмотками. Змінюючи величину струму в цих обмотках, можна в широких межах регулювати індуктивний опір зварювального кола.

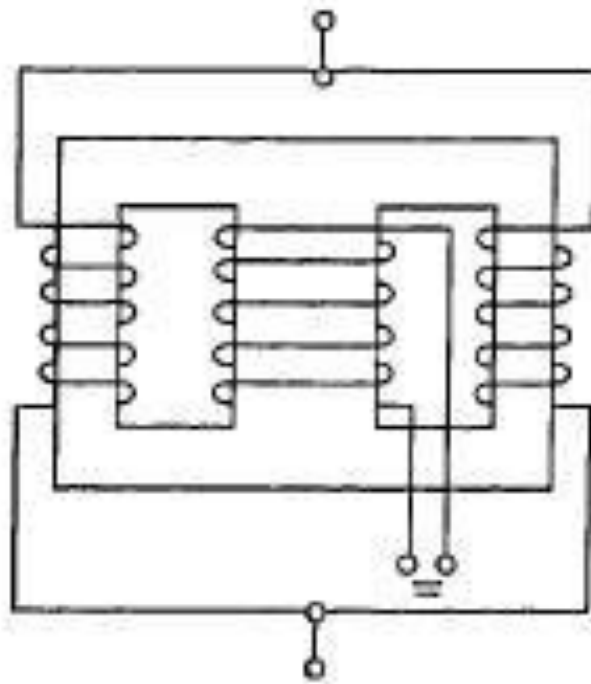


Рисунок 2.5 –Схема дроселя насичення

Схеми автоматичного регулювання для трансформатора з насичуються шунтами аналогічні схемам з дроселями насичення.

Найбільш доцільне застосування статичних регуляторів, що випускаються промисловістю комплектно з генераторами постійного струму

невеликої потужності. Можливі схеми з вугільними, вібраційними і електромашинними регуляторами. В інституті досліджені схеми з вібраційним регулятором Тірріля, релейно-контакторная схема астатического регулювання і схема з рототролом.

2.3. Регулювання напруги дуги за допомогою рототролу

Як приклад на рис. 2.6 приведена схема з рототролом, забезпеченим трьома обмотками збудження $W_{рш}$, $W_{р1}$, $W_{р2}$. Обмотки $W_{р1}$ і $W_{р2}$ включені в схему рівноплечого містка. Обмотка постійного струму дроселя насичення розділяється на дві абсолютно однакові частини $w_{п1}$ і $w_{п2}$, що з'єднуються з опорами R в схему рівноплечого містка. В одну з діагоналей цього містка включається якір рототрола.

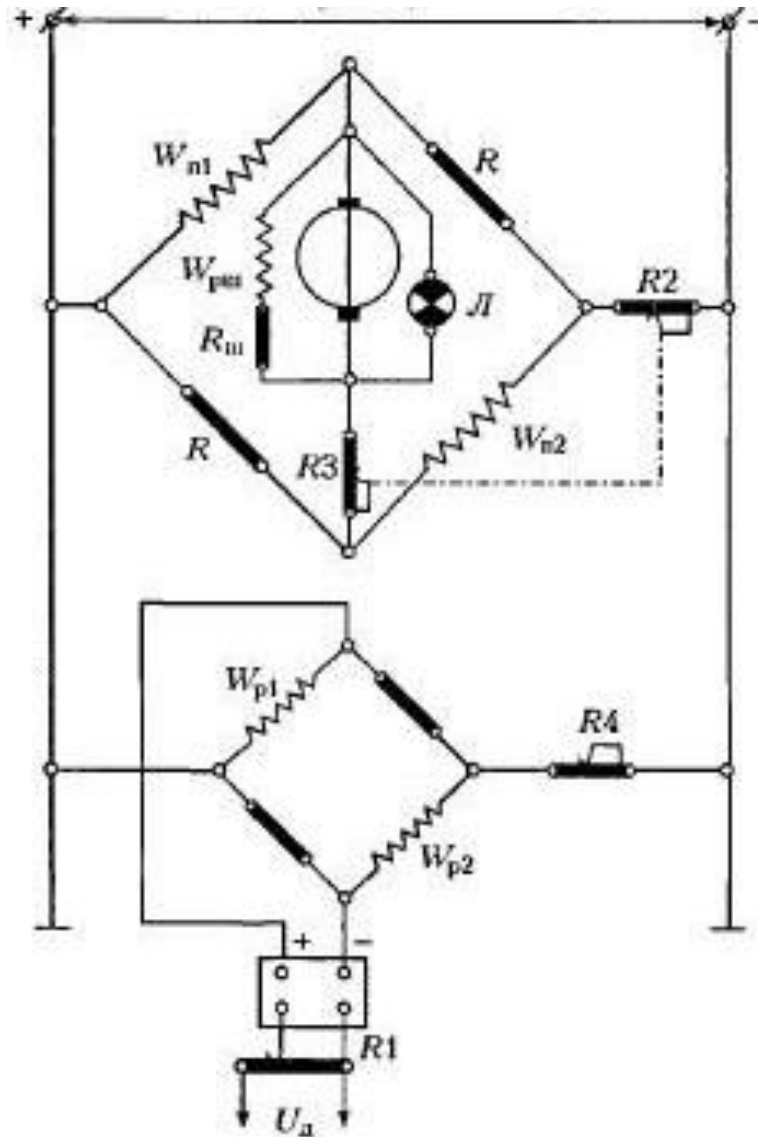


Рисунок 2.6 – Схема регулювання напруги з рототролом.

Опір шунтової обмотки рототрола підбирається таким, щоб рототрол перебував на порозі самозбудження.

У тому випадку, коли напруга дуги одно заданому значенню, струми в обмотках w_{p1} і w_{p2} , обумовлені напругою дуги і напругою незалежного джерела (мережа постійного струму), майже повністю компенсують один одного.

Включення обмоток рототрола w_{p1} і w_{p2} за схемою рівноплечого моста дозволяє значно підвищити чутливість схеми, так як відносно невеликі зміни напруги дуги викликають значні зміни ампер витків обмоток w_{p1} і

wp2. При нормальному режимі роботи струми, що протікають в обмотках wp1 і wp2, близькі до нуля, тому перетин цих обмоток вибирається невеликим.

При відхиленні напруги дуги від заданого значення різко змінюються сумарні Ампервітки обмоток wp1 і wp2, в результаті чого роторол збуджується. Змінюється ток в обмотках подмагнічення дроселя wp1 і wp2 в напрямку, відповідному відновленню заданого напруги дуги. Схема має невелику статизмом на всьому діапазоні регулювання і працює досить стійко при толчкообразних зміни напруги мережі.

Деяким недоліком схеми є складність настройки при переході на новий режим зварювання. Порядок операцій при налаштуванні наступний:

1. Потенціометр R1 встановлюється в положення, відповідне заданому напрузі дуги.

2. У процесі дослідної зварювання реостатом R2 встановлюється мінімально можлива величина напруги на ротороле при заданому струмі в обмотках wp1 і wp2 (при цьому лампа Л не горить). Така настройка доцільна для максимального використання роторола.

У схему, наведену на рис. 2.6, введено додатковий опір R3, механічно пов'язане з ползушки реостата R2. Зв'язок між ползушки R2 і R3 вибирається такий, щоб при обриві дуги струми в обмотках подмагнічення, обумовлені напругою незалежного джерела (мережа постійного струму) і роторолом, взаємно компенсувалися.

Наведена схема не вимагає спеціальних машин - роторол може бути виготовлений із звичайної генератора постійного струму потужністю до 0,5 ... 1 кВт. Великою перевагою схеми є повна відсутність контактів. Недоліком схеми є необхідність в додатковому джерелі постійного струму.

Крім схеми рис. 2.6, в є дослідження схем зі звичайним регулятором Тірріля, комплектно з генератором ГС-350 потужністю 350 Вт, а також

релейно-контакторна схема, виконавчим елементом якої є реостат з повзуном, що пересувався двигуном змінного струму. Ці схеми працюють цілком задовільно, однак, менш надійно, ніж схема з рототролом.

2.4. Схеми з регулюючим трансформатором

Розглянуті вище схеми регулювання відрізняються порівняльної складністю і вимагають деякого досвіду і уважності від обслуговуючого персоналу. В умовах зварювальних цехів такі схеми небажані.

Є дослідження можливості застосування для підтримки постійного режиму зварювання трансформатора з високою індуктивністю розсіювання, що має одну незакріплену обмотку. Як відомо, такий трансформатор підтримує постійний струм, незалежно від навантаження і напруги, прикладеного до його первинної обмотці. Розглянемо коротко принцип дії такого трансформатора (рис. 2.7).

Електромагнітне зусилля, що діє між обмотками трансформатора в напрямку o , так само похідною від енергії магнітного поля в цьому напрямку.

$$F_a = \frac{dw}{da}$$

(2.1)

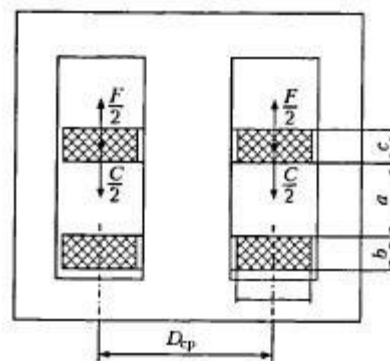


Рисунок 2.7 – Схема трансформатора з високою індуктивністю розсіювання

Енергія магнітного поля трансформатора (рис. 2.7) виражається формулою

$$w = \frac{I^2 W^2}{2} \frac{\mu_0 \pi D_{\text{ср}}}{h} \left(a + \frac{b}{3} + \frac{c}{3} \right) K_R, \quad (2.2)$$

де K_R - коефіцієнт, який є функцією габаритних розмірів і відносного розташування обмоток.

Отже, сила, що діє між обмотками в вертикальному напрямку,

$$F_a = \frac{dw}{da} = \frac{I^2 W^2}{2} \frac{\mu_0 \pi D_{\text{ср}}}{h} K_R. \quad (2.3)$$

Випажаючи F_a в кілограмах, отримуємо

$$F_a = 6,4 \cdot 10^{-8} I^2 W^2 \frac{\pi D_{\text{ср}}}{h} K_R. \quad (2.4)$$

При закріпленій нижній котушці верхня котушка під дією електромагнітного зусилля, спрямованого вгору, буде переміщатися. Положення рівноваги настане за однакової кількості електромагнітного зусилля і ваги рухомого (верхньої) котушки.

Спеціальною конструкцією трансформатора і ретельно розрахунком можна домогтися того, що K_R залишається приблизно постійним при зміні відстані a в широких межах. Тому з достатньою точністю можна сказати, що положення рівноваги можливо тільки при постійному струмі

$$6,4 \cdot 10^{-8} I^2 W^2 \frac{\pi D_{\text{ср}}}{h} K_R = G, \quad (2.5)$$

де G - вага верхньої котушки.

З цього виразу випливає, що $I = AVG$, де $A = V_h / 10^4 W * V_{6,4} D_{cd} K_R$.

Будь-яка зміна напруги, прикладеного до первинної обмотці або зміна навантаження, призводить до деякої зміни струму. При цьому змінюється електромагнітне зусилля. В результаті верхня котушка отримує прискорення і переміщається до тих пір, поки електромагнітне зусилля не стане рівним вазі котушки.

Отже, в ідеальному трансформаторі при відсутності тертя і постійному значенні коефіцієнта K_r положення рівноваги можливо тільки при строго постійному струмі. У реальному трансформаторі є тертя, завдяки якому трансформатор працює з похибкою. Якщо трансформатор відрегульований на $I = AVG$, то при русі котушки вгору рівновагу настане при $I' = AVG + F_T$ де F_T - сила тертя спокою. При русі котушки вниз рівновагу настане при $I'' = AVG - F_T$. Наближено можна вважати похибка

$$\Delta I = 0,5 \left(\sqrt{\frac{G + F_T}{G - F_T}} - 1 \right) 100 \%, \quad (2.6)$$

звідки видно, що зі збільшенням тертя похибка значно зростає.

При малому терті вільна котушка схильна до коливань, для усунення яких трансформатор забезпечується демпфером.

2.5. Головка з автоматично регульованою швидкістю подачі.

Принцип дії зварювальних головок з регульованою швидкістю подачі (ТСК), їх робота при коливаннях напруги мережі достатньо вивчені. Всі головки цієї системи побудовані за принципом підтримки незмінним напруги дуги. Трансформатор ТСК підтримує незмінний струм незалежно від напруги, прикладеного до його первинної обмотці і опору навантаження.

Тому незалежно від статизму головки така система буде підтримувати заданий режим зварювання при коливаннях напруги мережі.

Дійсно, при живленні дуги від ТСК, що підтримує постійний струм, швидкість плавлення електрода буде функцією напруги дуги $v_e = f(U_d)$ (рис. 2.9). Стійкий режим зварювання визначиться точкою перетину статичної характеристики головки 2 і кривої $v_e = f(U_d)$ 1. При ідеальному ТСК, що працює без похибки, стійкий режим можливий тільки при строго постійному режимі зварювання.

При зміні технологічних факторів, як-то: хімічний склад, діаметр електрода і його довжина, яка виступає за контактні точки мундштука, хімічний склад і грануляція флюсу та ін., Змінюється залежність $K = f(U_p, I_d)$. При цьому змінюється залежність швидкості плавлення електрода від напруги дуги (пунктирна крива 3 рис. 2.9). В результаті змінюється і напруга дуги. Ці відхилення напруги дуги від заданої величини тим більше, чим вище статизм головки.

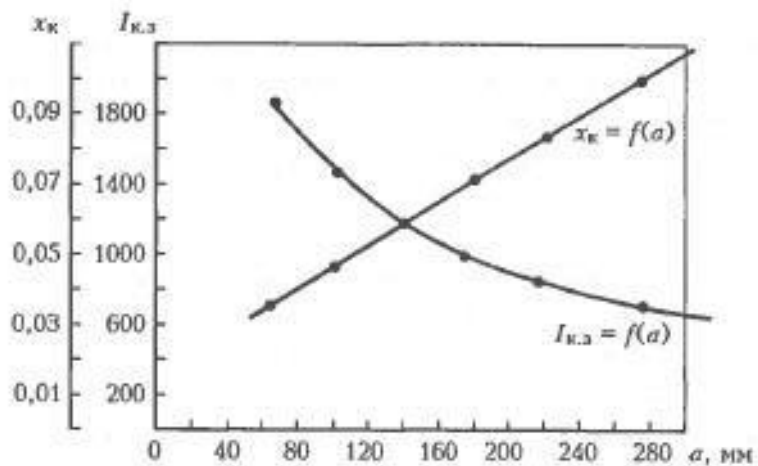


Рисунок 2.8 – Залежність струму дуги від подачі дроту

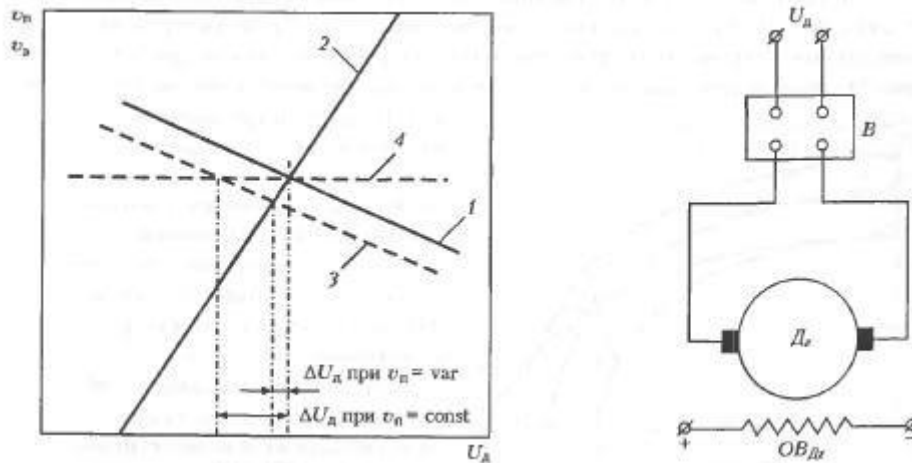


Рисунок 2.9 – Залежність швидкості плавлення електроду від напруги дуги та схема руглювання швидкості подачі.

Перераховані технологічні чинники в виробничих умовах змінюються досить рідко. Практично можливим є зміна ділянки електроду, що знаходиться під струмом. Однак навіть при найпростішою схемою регулювання швидкості подачі (рис. 2.9), що володіє відносно високим статизмом (100%), досить великі зміни вильоту електроду призводять до незначних змін напруги дуги. Так, при досвідчених сварках на режимі $U_d = 35$ В, $I_d = 900$ А, що супроводжувалися Осцилографування, збільшення вильоту на 25 мм привело до збільшення напруги тільки на один вольт. Така зміна цілком допустимо.

Вплив інших факторів ми не розглядаємо, тому що їх зміна є прямим порушенням технології і не повинно допускатися.

Швидкість встановлення заданого режиму зварювання при живленні головки с $v_n = \text{var}$ від ТСК цілком достатня як при толчкообразних, так і плавних змінах напруги мережі. Це дозволяє з успіхом застосувати таку систему для зварювання відкритою дугою голим або обмазаним електродом на відносно малих токах.

Робота головки з $v_{п} = \text{var}$ і ТСК при різних причинах, що викликають відхилення заданого режиму зварювання, досліджувалася нами за допомогою великої кількості осцилограм, які ми не маємо можливості тут помістити за браком місця.

Перейдемо до розгляду роботи головки з постійною швидкістю подачі в комбінації з ТСК, що представляє найбільший практичний інтерес.

2.6. Головка з постійною швидкістю подачі.

Нашим завданням є підтримка незмінним режиму зварювання при коливаннях напруги мережі. Вище, на рис. 2.9, ми показали в загальному вигляді, що при незмінних технологічних факторах, трансформатор ТСК відновлює заданий режим незалежно від статизму головки. Головка з постійною швидкістю подачі володіє нескінченно великим статизмом. Однак і в цьому випадку ТСК відновлює строго заданий режим (в межах своєї похибки).

При розгляді того ж рис. 2.9 (крива 4) ми бачимо, що при зміні технологічних факторів, перерахованих вище, головка з $v_{п} = \text{const}$, що живиться від ТСК, дає найбільші зміни напруги дуги. Наприклад, при зварюванні головкою з $v_{п} = \text{const}$ і ТСК на режимі $U_{д} = 35 \text{ В}$; $I_{д} = 900 \text{ А}$ зміна вильоту електрода на 25 мм призводить до підвищення напруги дуги на 6 ... 8 В при постійному струмі. Тому при зварюванні головкою з $v_{п} = \text{const}$ і живленні її від ТСК необхідно підтримувати по можливості незмінним виліт електрода.

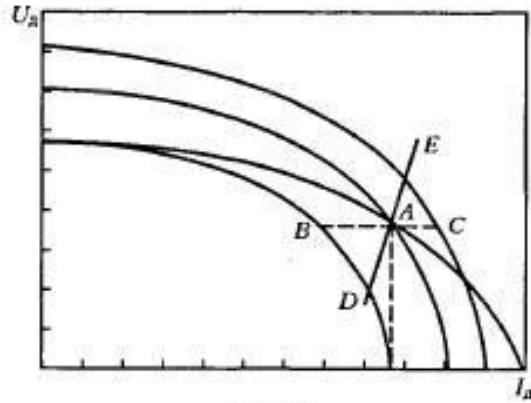


Рисунок 2.10 – Залежність напруги дуги від струму при востійній подачі дроту

Перейдемо до більш докладного розгляду роботи головки з $v_{п} = \text{const}$ і ТСК при коливаннях напруги мережі. Схематично перехідний процес може бути представлений таким чином (рис. 12). При різкому зниженні напруги мережі в перший момент часу струм падає до значення, обумовленого точкою В. При цьому зменшується електромагнітне зусилля між обмотками. Вільна обмотка опускається; зменшується індуктивний опір зварювального кола. Струм зростає до заданого значення, після досягнення якого система знову приходить в рівновагу.

Неважко показати, що за інших рівних умов рівновагу в ТСК може наступити тільки при колишньому напрузі дуги.

Стійка робота головки можлива тільки при $v_{п} = v_e K_{п} I_{д} / G$. В межах своєї точності ТСК відновлює заданий струм $I_{д} = \text{const}$. Тому головка може стійко працювати тільки при $K_{п} = \text{const}$, що можливо при заданій напрузі дуги.

Для ілюстрації того, наскільки змінився б режим зварювання при наявності в зварювального ланцюга постійного індуктивного опору, на рис. 12 нанесена крива сталої роботи головки DAE.

Можливість відновлення головкою з $v_{п} = \text{const}$, що живиться від трансформатора ТСК, заданого режиму зварювання при толчкообразних коливаннях напруги мережі, була перевірена нами експериментальним шляхом. Результати досвідчених сварок на режимі $U_{д} = 35 \text{ В}$; $I_{д} = 740$ зведені в таблицю. З таблиці видно, що режим $U_{д} = 25 \text{ В}$; $I_{д} = 740$ практично точно відновлювався при зміні напруги холостого ходу на 50% (60 ... 90 В).

Необхідно відзначити, що мала похибка в отриманих результатах значною мірою пояснюється різкою зміною напруги холостого ходу. Кожен досвід при новому $U_{х.х}$ починався з збудження дуги; при цьому вільна котушка отримувала значне прискорення, і рівновагу наступало при заданому значенні струму (740 А).

При плавних змінах напруги мережі, що імітувалося плавним зміною індуктивного опору додаткового дроселя в зварювального ланцюга, виходять гірші результати. У цьому випадку на точність роботи ТСК більш сильний вплив робить тертя.

При досвідчених сварках найкращі результати були отримані при малому протидії вантаж в ТСК (35 кг). В цьому випадку шкідливий тертя було зведено до мінімуму і трансформатор з точністю до 3 .. .5% відновлював заданий режим зварювання $I_{д} = 1200 \text{ А}$; $U_{д} = 39 \text{ В}$ при зміні додаткової індуктивності від 0,005 до 0,035 Ом. При цих дослідах $U_{х.х} = 110 \text{ В}$.

На підставі викладеного ясно, що головка з $v_{п} = \text{const}$, що живиться від ТСК, може досить надійно і точно підтримувати заданий режим зварювання при коливаннях напруги мережі.

Нам залишається розглянути питання про швидкість встановлення заданої довжини дуги при її випадкових змінах в процесі зварювання головкою з $v_{п} = \text{const}$, що живиться від ТСК.

Відомо, що під час зварювання головка з $v_{п} = \text{const}$ і постійному індуктивному опорі зварювального кола інтенсивність процесів регулювання

визначається формою зовнішньої характеристики і кривої стійкої роботи головки. Швидкість протікання перехідних процесів збільшується зі зменшенням напруги холостого ходу і збільшенням струму короткого замикання.

Висновки

1. Можна побудувати велику кількість схем автоматичного регулювання, що забезпечують сталість режиму зварювання при коливаннях напруги мережі. У цих схемах можуть застосовуватися зварювальні головки з постійною і автоматично регульованою швидкостями подачі.

2. Схеми, що містять в якості регульованого зварювального апарату дросель насичення, однаково придатні як при плавних, так і частих толчкообразних коливаннях напруги мережі.

3. Схеми, що містять в якості зварювального апарату трансформатор або дросель з регульованим електроприводом, дають кращі результати при тривалих плавних змінах напруги мережі.

4. Найбільшою простотою і надійністю відрізняються схеми, що містять спеціальний трансформатор з вільно переміщається котушкою ТСК. У цьому випадку роль регулятора виконує сам трансформатор.

5. Схеми, що містять головки з автоматично регульованою, в функції від напруги дуги, швидкістю подачі і ТСК, дають однаково хороші результати при толчкообразних і плавних змінах напруги мережі.

6. Схеми, що містять головки з постійною швидкістю подачі і ТСК, дають хороші результати тільки при підвищених щільності струму в електроді.

7. Необхідне подальше вдосконалення і спрощення схем автоматичного регулювання, що забезпечують сталість режиму зварювання.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Фомалізація поставленої задачі.

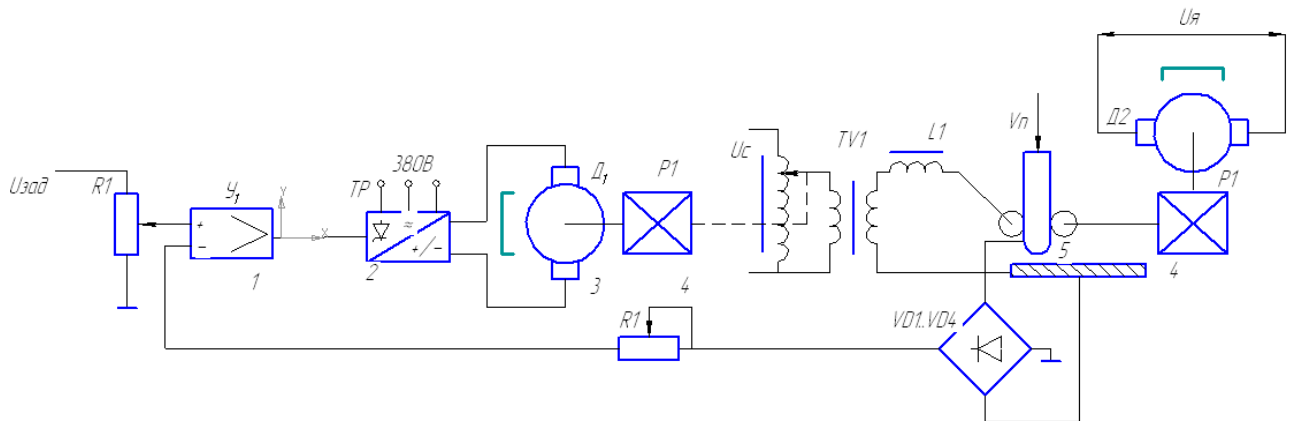


Рисунок 3.1 – Схема електрична принципова автоматизованої системи регулювання напруги зварювальної дуги.

Приведена схема має у своєму складі такі функціональні елементи (рис. 3.2):

- розглядуваний об'єкт управління - зварювальний дуга (ЗД);
- елементи перетворення та підсилення напруги - тиристорний регулятор (ТР), що перетворює напругу; двигун постійного струму (Д1), який задає регулювання трансформатора і керується по ланцюгу якоря; редуктор (Р), який передає зусилля на рухомий якір;
- власне, суматор: електронний підсилювач (У1), який підсилює та додає задану напругу з напругою виходу системи;
- пристрої вимірювання вихідного сигналу - діодний міст (VD1 ... VD4);

В загальному випадку $U_{зад}$ – напруга, задана режимами зварювання, визначає необхідне значення напруги зварювальної дуги (для подальших розрахунків приймемо $U_{зад} = 0$ це не змінить принцип регулювання стабільності системи);

Як видно з вище сказаного метою системи є забезпечення підтримки в певних межах заданої технологічно напруги зварювальної дуги.

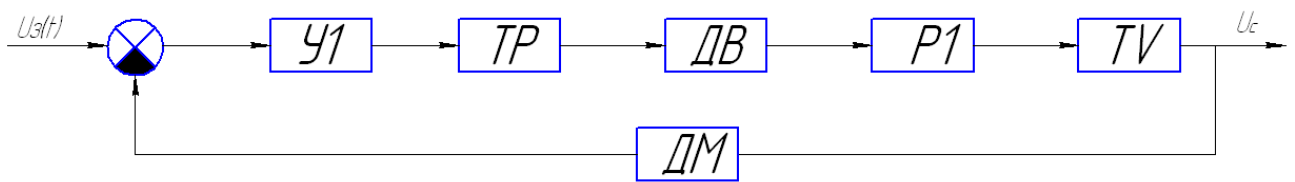


Рисунок 3.2 - Функціональна схема автоматизованої системи напруги зварювальної дуги.

Для початку моделювання приймемо припущення, що параметри усіх елементів нашої системи стали в часі.

Аналізуючи функціональну схему будемо реалізовувати систему управління замкнутого типу, тобто зворотні зв'язок задається на вхід системи. В нашому випадку для такого процесу таке керування є найбільш оптимальним. Виходячи з цього процес керування відбувається по негативному зворотньому зв'язку. Вказана система відноситься до класу звичайних систем при сталості параметрів. Проте для забезпечення кращої точності в подальшому також буде враховано змінність параметрів такої системи. В загальному випадку функціонування ядра системи можна забезпечити класичними законами регулювання, проте потрібно забезпечити її стійкість. Для цього перед процесом моделювання проведемо процес оптимізації структурної схеми методами класичної теорії та модернізуємо її для забезпечення стійкості регулювання. Після цього проведемо аналіз та дослідження системи при зміні характеристик її компонентів.

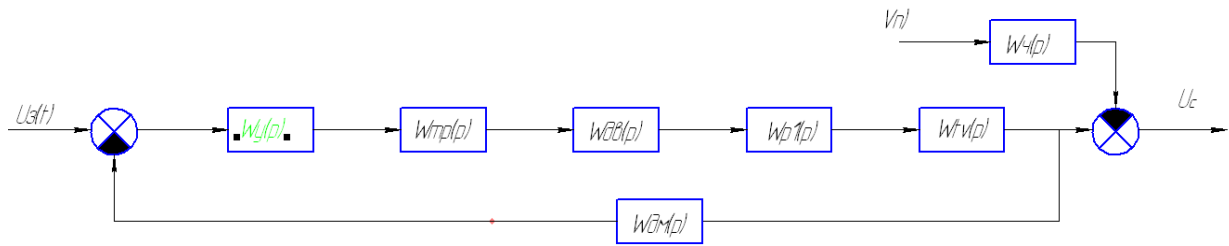


Рисунок 3.3 - Структурна схема САР напруги зварювальної дуги.

В результаті нашу систему можна привести до формалізованої форми. Формалізація системи у вигляді структурної схеми дозволяє проаналізувати проходження сигналу через елементи схеми і допускає хорошу фізичну інтерпретацію процесів, що протікають в системі управління.

Перетворимо нашу структурну схему до вигляду системи з одиничним зворотним зв'язком. Так як зворотний зв'язок у нашому випадку власне жорсткий, то є можливість згідно класичних правил перенести ланку зі зворотного зв'язку в прямий ланцюг із застосуванням масштабування. САР напруги зварювальної дуги після перенесення діодного моста в прямий ланцюг нашої системи є вже напругою його виходу, і структурна схема перетворюється у показану на рис. 3.4.

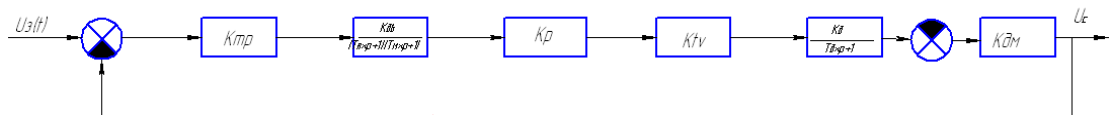


Рисунок 3.4. Перетворена структурна схема САР напруги зварювальної дуги.

Параметри системи мають наступні значення:

$K_{ДМ} = 0,8 \text{ В / мм}$; $K_{ТР} = 2500$; $K_{ДВ} = 1,2 \text{ рад / Нд}$; $K_P = 0,002 \text{ мм / рад}$;
 $K_{Д} = 0,8 \text{ В / мм}$; $K_{TV} = 0,1$; $T_{Я} = 0,01 \text{ с}$; $T_M = 0,08 \text{ с}$; $T_{Д} = 0,002 \text{ с}$.

Передавальна функція розімкнутої системи набуде вигляду:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{(T_{я}p+1)(T_M p+1)(T_D p+1)} \quad (3.1)$$

Коефіцієнт підсилення розімкненої системи:

$$K_p = K_{дм} K_{тр} K_{дв} K_p K_{тв} K_d \quad K_p = 0,384 \text{ с-1}$$

3.2. Аналіз стійкості розробленої системи автоматичного керування.

При аналізі самої системи кбрування є, в першу чергу, дослідження її стійкості, тобто можливої реакції на зубруючий вплив або за зміну регулюованої величини. При цьому наша систему повинна виконувати ряд вимог по динаміці та точності.

При стійкою вихідної САР потрібна перевірка задоволення динамічних і точностних вимог, висунутих до неї. Для оцінки стійкості нашої системи застосуємо власне алгебраїчні критерії Гурвіца; відомий частотний метод, заснований на побудові логарифмічних частотних характеристик (ЛЧХ); методи аналізу стійкості Михайлова і, власне кажучи, Найквіста. Ці критерії роблять висновок про стійкість на основі характеристичного рівняння за рахунок аналізу його коренів. При цьому беруться до уваги як дійсні, так і комплексні корені.

Проведемо аналіз за допомогою критерію, що має в основі ЛЧХ.

Проведемо спочатку аналіз вихідної системи за допомогою частотного методу, заснованого на логарифмічних частотних характеристиках системи. Передавальна функція нашої розімкненої системи набуде вигляду:

$$W_p(p) = \frac{0.384}{(0.002p+1)(0.08p+1)(0.01p+1)}$$

Для побудови ЛАЧХ знаходимо сполучаються частоти елементів системи:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_M} = \frac{1}{0.08} = 12.5 c^{-1}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{T_J} = \frac{1}{0.01} = 100 c^{-1}$$

$$\omega_3 = \frac{1}{T_D} = \frac{1}{0.002} = 500 c^{-1}$$

$$20 \lg K_p = -8.31$$

Вираз для ЛАЧХ має наступний вигляд:

$$L(\omega) = 20 \lg(0.384) - 20 \lg \sqrt{T_J^2 \omega^2 + 1} - 20 \lg \sqrt{T_M^2 \omega^2 + 1} - 20 \lg \sqrt{T_D^2 \omega^2 + 1}$$

Для побудови ФЧХ скористаємося наступним математичним виразом, отриманим з (1):

$$\phi(\omega) = -\arctg(0.08\omega) - \arctg(0.01\omega) - \arctg(0.002\omega)$$

ЛАЧХ ФЧХ розімкнутої системи зображені на рис. 5.

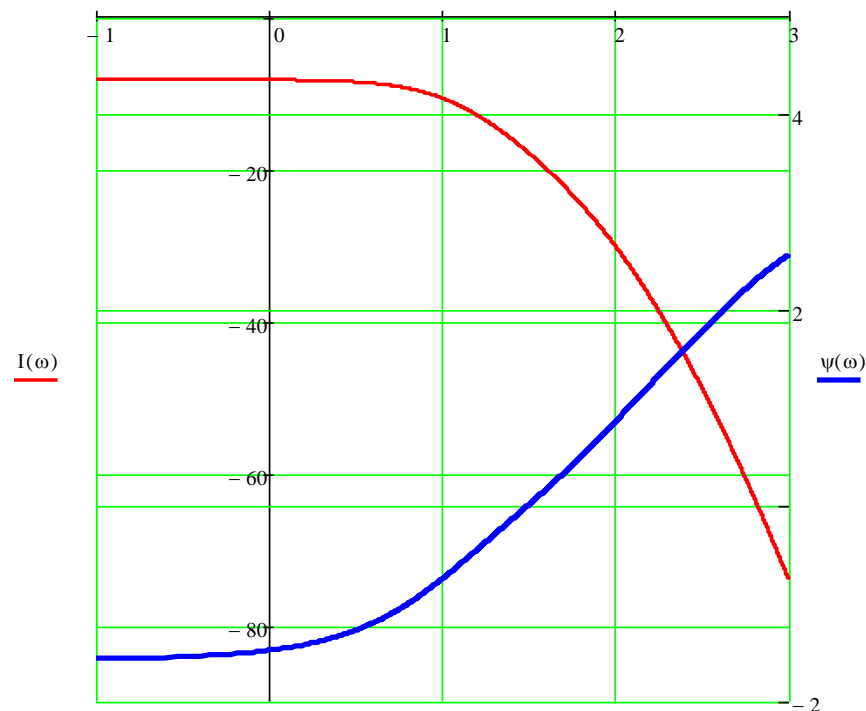


Рисунок 3.5 - ЛАЧХ і ФЧХ вихідної розімкнутої системи

За отриманими ЛАЧХ і ФЧХ можна зробити висновок про те, що система стійка (ФЧХ перетинає вісь -180° пізніше, ніж ЛАЧХ - вісь 0 дБ).

3.3. Критерій Гурвіца.

Дана система 4-го порядку. Передавальна функція розімкнутої системи напруги зварювальної дуги має наступний вигляд:

$$W_p(p) = \frac{K_{DM} K_{TP} K_{DB} K_p K_{TV} K_D}{(T_{Я} p + 1)(T_M p + 1)(T_D p + 1)}; \quad (3.2)$$

Передавальна функція замкнутої системи:

$$\Phi(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{K_p}{(T_{Я} p + 1)(T_M p + 1) + (T_D + 1)K_p}, \quad (3.3)$$

де - $K_p = K_{DM} K_{TP} K_{DB} K_p K_{TV} K_D$ коефіцієнт посилення розімкнутої системи.

Характеристичне рівняння системи має вигляд:

$$D(p) = (T_{Я} \cdot T_M \cdot T_D) p^3 + (T_{Я} \cdot T_M + T_{Я} \cdot T_D + T_M \cdot T_D) p^2 + (T_{Я} + T_M + T_D) p + K_p = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0 \quad (3.4)$$

Представимо коефіцієнти рівняння через параметри елементів системи.

$$\begin{aligned} a_3 &= (T_{Я} \cdot T_M \cdot T_D) = 0,0000016; \\ a_2 &= (T_{Я} \cdot T_M + T_{Я} \cdot T_D + T_M \cdot T_D) = 0,00098; \\ a_1 &= (T_{Я} + T_M + T_D) = 0,092; \\ a_0 &= 1 + K_p = 1,384. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Відповідно до критерію Гурвіца необхідно скласти його основний визначник:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}$$

Для стійкості системи необхідно і достатньо, щоб були позитивні всі коефіцієнти характеристичного рівняння і все визначники Гурвіца, які відповідно рівні:

$$\Delta_1 = a_2 = 0,00098 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_2 \cdot a_1 - a_0 \cdot a_3; \Delta_2 = 0,00097 > 0;$$

$$\Delta_3 = a_0 \Delta_2; \Delta_3 = 0,0013 > 0;$$

Оскільки всі визначники системи більше нуля, то замкнута система стійка.

3.4. Критерій Михайлова.

Перевіримо отриманий раніше висновок про нестійкості системи за допомогою критерію Михайлова. Відповідно до (3)

$$\begin{aligned} D(j\omega) &= a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + a_0 = \\ &= -ja_3\omega^3 - a_2\omega^2 + ja_1\omega + a_0 = \operatorname{Re}(\omega) + j\operatorname{Im}(\omega) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Підставляючи відповідні числові значення отримаємо

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\omega) &= -a_2\omega^2 + a_0 = -0,00098 \cdot \omega^2 + 1,384; \\ \operatorname{Im}(\omega) &= -a_3\omega^3 + a_1\omega = -0,0000016 \cdot \omega^3 + 0,092 \cdot \omega. \end{aligned} \quad (3.7)$$

На підставі отриманих залежностей можна побудувати годограф Михайлова на комплексній площині (рис. 3.6)

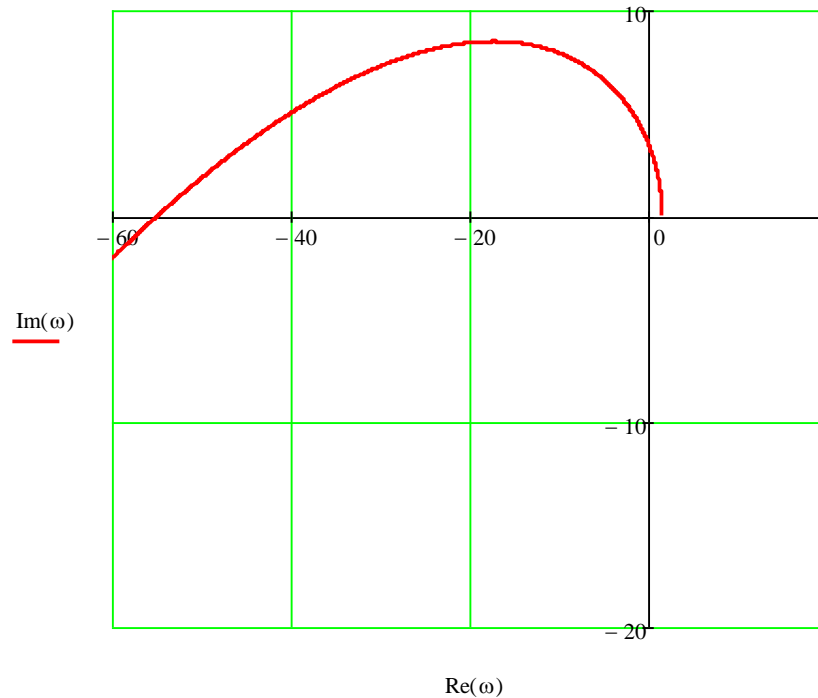


Рисунок 3.6 - Годограф Михайлова для системи автоматичного регулювання напруги зварювальної дуги

Дійсна і уявна частини рівняння (3.6) показують, що крива Михайлова починається на позитивному напрямку дійсної осі (рис. 3.6), і проходить послідовно всі квадранти. Отже, система в замкнутому стані стійка.

3.5. Критерій Найквіста.

Комплексна частотна характеристика розімкнутої системи може бути отримана шляхом заміни $p = j\omega$ в передавальній функції розімкнутої системи. Вона представлена наступним чином:

$$W(j\omega) = W_p(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega) = A(\omega) \cdot e^{i\varphi(\omega)} \quad (3.8)$$

Для досліджуваної системи з передавальною функцією:

$$W_p(j\omega) = \frac{K_p}{(-a_2\omega^2) + j(a_1\omega - a_3\omega^3)} \quad (3.9)$$

Тоді алгебраїчна форма запису годографа:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\omega) &= \frac{K_p(-a_2\omega^2)}{(-a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2} = \frac{1,384(-0,00098\omega^2)}{(-0,00098\omega^2)^2 + (0,092\omega - 0,0000016\omega^3)^2}; \\ \operatorname{Im}(\omega) &= \frac{-K_p(a_1\omega - a_3\omega^3)}{(-a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega - a_3\omega^3)^2} = \frac{-1,384(0,092\omega - 0,0000016\omega^3)}{(-0,00098\omega^2)^2 + (0,092\omega - 0,0000016\omega^3)^2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

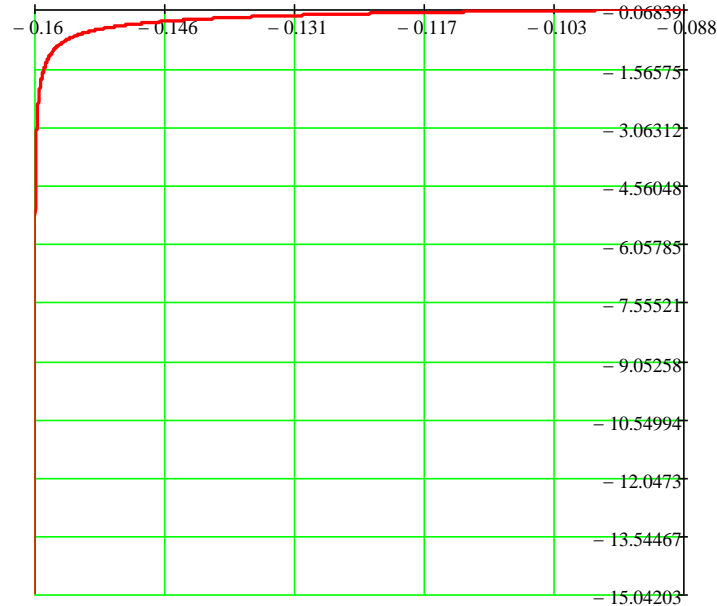


Рисунок 3.7 - Годограф Найквіста для системи автоматичного регулювання напруги зварювальної дуги

З аналізу годографа Найквіста видно, що він не охоплює точку з координатами $(-1, j0)$. Це підтверджує раніше отримане висновок про стійкість даної системи. Вже згадана система стійка, але вона вимагає коригування її параметрів, для виконання вимог, що пред'являються до системи за якістю процесу регулювання.

3.6. Синтез коригувального пристрою.

3.6.1. Побудова бажаної ЛАЧХ системи.

Методика формування бажаної ЛАЧХ визначається характером задають впливів і необхідними показниками якості. Так як в вихідних даних

задані коефіцієнт помилки S_1 , час перехідного процесу $t_{\text{пн}}$ і максимальне перерегулювання, то будемо будувати бажану ЛАЧХ за методикою В.В.Солодовнікова.

Для побудови низькочастотної частини бажаної ЛАЧХ необхідно, вибрати порядок астатизма і коефіцієнт посилення розімкнутої системи.

Для побудови середньочастотної частини бажаної ЛАЧХ треба скористатися функціональною залежністю перерегулювання $\sigma\%$ і відносного часу перехідного процесу $\omega_c t_{\text{пн}}$ від величини максимального сплеску абсолютної частини частотної характеристики (ВЧХ) P_{max} , тобто графіками $\sigma\% = f(P_{\text{max}})$ і $\omega_c t_{\text{пн}} = f(P_{\text{max}})$ (рис. 3.8).

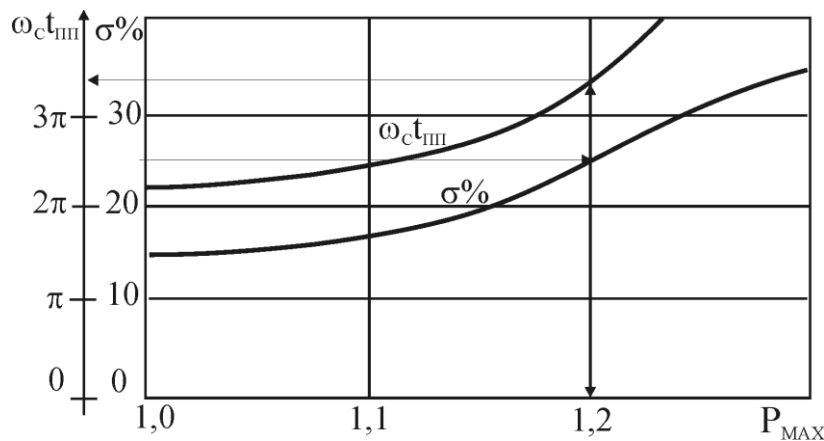


Рисунок 3.8 - Залежність перерегулювання і відносного часу перехідного процесу від максимального значення ВЧХ.

З

цих графіків по заданому значенню $\sigma\%$ визначаємо M_{max} , після чого визначаємо $\omega_c t_{\text{пн}}$ і по $t_{\text{пн}}$ частоту зрізу бажаної ЛАЧХ:

$$\omega_c = \frac{K\pi}{t_{\text{пн}}} \quad (3.11)$$

Значення мінімуму ВЧХ приймаємо рівним:

$$P_{\text{min}} = 1 - P_{\text{max}} \quad (3.12)$$

$\sigma\% = 30\%$ і $t_{\text{пн}} < 0,5$ то з рис. 3.10 і рівнянь (3.11) і (3.12) знаходимо $P_{\text{max}} = 1,25$ $P_{\text{min}} = -0,25$ а

$$\omega_c = \frac{4\pi}{t_m} = 25,1 \text{ с}^{-1}$$

Для того щоб виконувалася умова $P_{\max} > P(\omega) > P_{\min}$, необхідно на діаграмі для $P(\omega)$ (рис. 3.9) побудувати заборонену область у вигляді прямокутника, сторони якого є дотичними до кривих з індексами P_{\min} і P_{\max} . За параметрами забороненої зони визначаються необхідні запаси по модулю L_1 і L_2 , і фази $\Delta\varphi(\omega_1)$ і $\Delta\varphi(\omega_2)$.

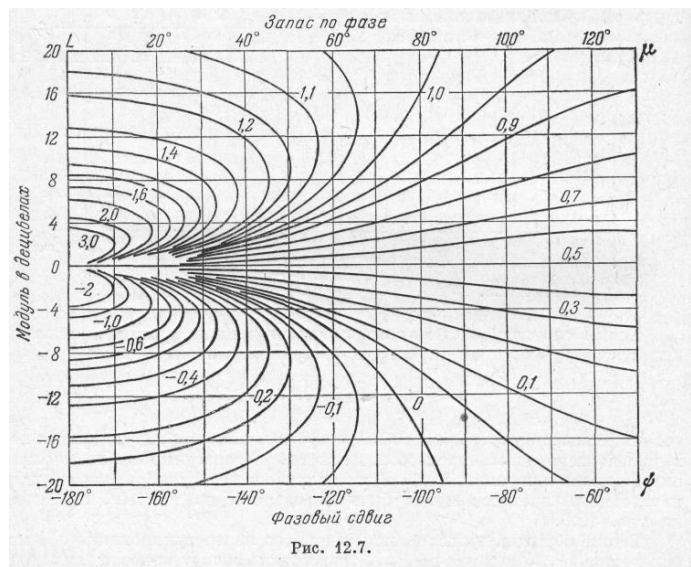


Рисунок 3.9 - Номограми для визначення запасів по модулю і фази.

При $P_{\min} = -0,25$ $P_{\max} = 1,25$ знаходимо $L_1 = L_2 = 14$ дБ.

$$K_v = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{0,01} = 100;$$

$$20 \lg K_v = 20 \lg(100) \approx 40 \text{ дБ}.$$

Середньочастотний ділянку будується під нахилом -20 дБ / дек і проходить через нуль на частоті зрізу системи $\omega_{cp} = 25,1 \text{ с}^{-1}$. На рівні значень запасів стійкості визначаємо середньочастотний ділянку бажаної ЛАЧХ і відповідні сполучні частоти, зокрема, для 14 дБ отримуємо $\omega_2 = 12,6 \text{ с}^{-1}$ і для -14 дБ отримуємо $\omega_3 = 50 \text{ с}^{-1}$. Для сполучення з низькочастотної асимптотою

вибираємо нахил -40 дб / дек. Точка її перетину з низькочастотною асимптотой вихідної ЛАЧХ виходить на частоті $\omega_1 = 0,24 \text{ с}^{-1}$.

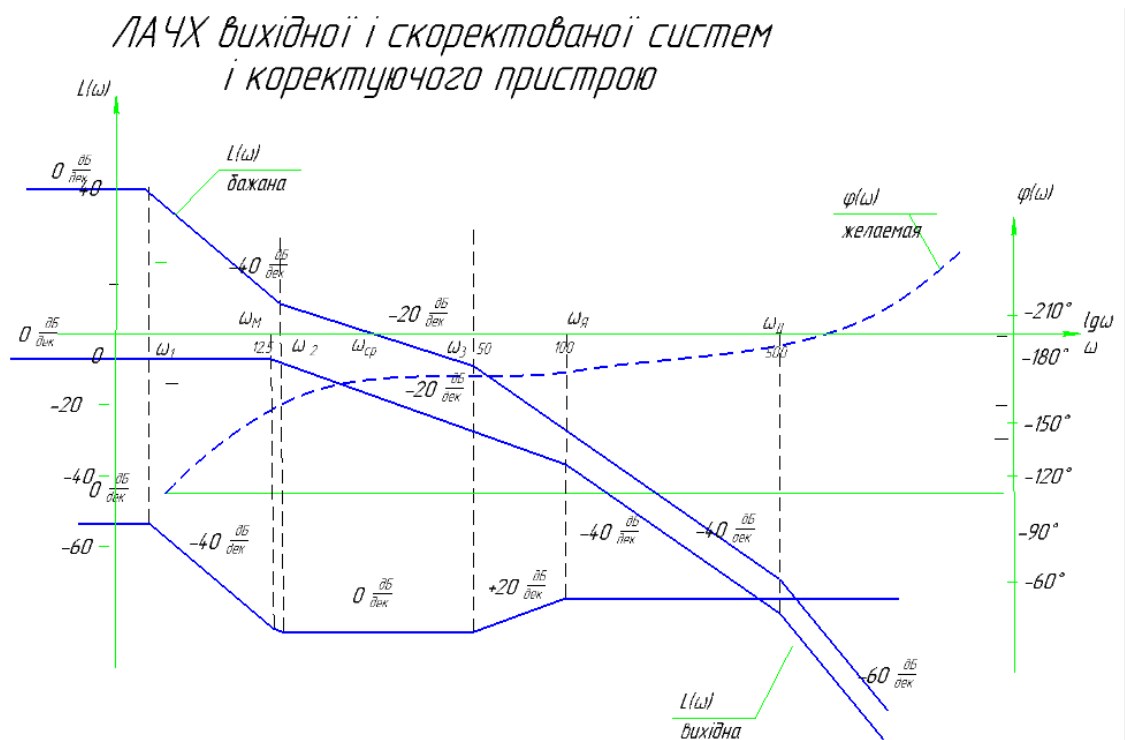


Рисунок 3.10 – ЛАЧХ вихідної і скоригованої систем і коригуючого пристрою.

На підставі побудованої бажаної ЛАЧХ системи передавальну функцію розімкненої скоригованої системи з урахуванням отриманих постійних часу $T_{11} = 4,2$, $T_{12} = 0,08$, $T_{13} = 0,02$ можна представити в наступному вигляді:

$$W_{ж}(p) = \frac{K_v(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1) \cdot (T_3' p + 1)^2} = \frac{100(0,08 p + 1)}{(4,2 p + 1) \cdot (0,02 p + 1)^2}. \quad (3.13)$$

Отримана передатна функція скоригованої системи забезпечує задані показники якості процесу регулювання. Для перевірки запасів стійкості необхідно побудувати ФЧХ:

$$\phi(\omega) = \arctg(\omega T_2) - \arctg(\omega T_1) - 2\arctg(\omega T_3).$$

Аналіз ФЧХ наведеної на рис. 3.12 показує, що скоригована система стійка і має, такі запаси по амплітуді $\Delta L = 45$ дб, по фазі $\Delta \varphi = 35^\circ$.

3.7. Побудова коригуючого пристрою для системи управління.

Як спосіб включення коригуючого пристрою виберемо послідовне, для якого найбільш просто визначається структура.

$$L_{KY}(\omega) = L_{Ж}(\omega) - L_{И}(\omega). \quad (3.14)$$

За графіками вихідної і бажаної ЛАЧХ будуюмо ЛАЧХ і визначаємо передавальну функцію коригуючого пристрою (рис. 3.12).

$$W_{KY}(p) = \frac{W_{Ж}(p)}{W_{И}(p)} ; \quad (3.14)$$

$$W_{KY}(p) = \frac{K_{KV}(T_{12}p+1)(T_M p+1)(T_{Я} p+1)}{(T_{11}p+1)(T_{13}p+1)^2} .$$

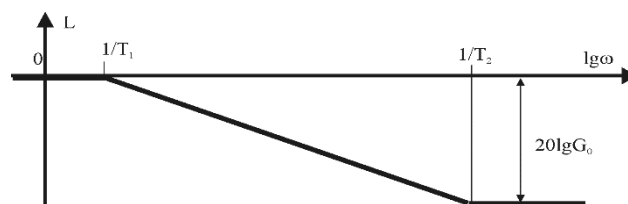
$$K_{KY} = \frac{K_V}{K_P} = \frac{100}{0,384} = 260$$

Після того, як отримана ЛАЧХ і визначена передатна функція коригувального пристрою, слід перейти до вибору її технічного аналога.

3.8. Вибір електричного аналога і розрахунок його номіналів.

В якості технічної реалізації коригувальних пристроїв, що забезпечують отримання цих ЛАЧХ, виберемо пасивні чотирьохполюсники постійного струму, показані на рис. 3.11. З аналізу ЛАЧХ коригувального пристрою можна бачити, що для його реалізації буде потрібно одне інтегруюча ланка і два диференціюють. Визначимо їх параметри.

Перша коригуюча ланка - інтегратор



$$W_{ky}(p) = \frac{(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)}$$

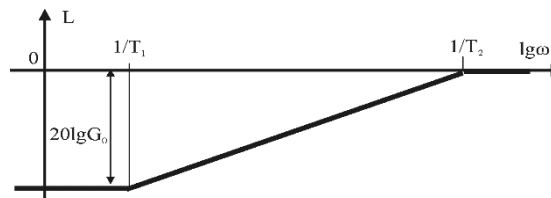
$$G_\infty = \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$G_\infty = \frac{0,08}{4,2} = 0,02; \quad 20 \lg G_\infty = 20 \lg 0,02 = -34 \text{ дб}$$



Рисунок 3.11 - Принципові схеми коректуючих пристроїв: а) КУ₁-інтегруючий; б) КУ₂-диференціюючий.

2. Друга, третя коригуючий ланка - диференціюючі



Друга коригуюча ланка:

$$G_\infty = \frac{0,08}{0,02} = 4; \quad 20 \lg G_\infty = 20 \lg 4 = 12 \text{ дб}$$

Третє коригуючий ланка:

$$G_0 = \frac{0,01}{0,02} = 0,5; \quad 20 \lg G_0 = -6 \text{ дб}$$

Для того, щоб зробити розрахунок параметрів ланок КУ, необхідно задатися в кожному з них будь - яким одним елементом, наприклад, вхідним опором $R1 = 50 \text{ кОм}$. Це пов'язано з тим, що число невідомих параметрів ланок перевищує число зв'язують їх рівнянь. Щоб забезпечити необхідне значення коефіцієнта посилення КУ на високих частотах, необхідно послідовно з ним включити підсилювач з коефіцієнтом посилення $K_u = 260$.

Таким чином, інтегруюча ланка, два диференціюють ланки і підсилювач з коефіцієнтом посилення 260 встановлюємо послідовно в вихідну схему САР в слабкострумому ланцюг між підсилювачем порівняння і тиристорним регулятором (рис. 3.14). Щоб виключити вплив параметрів елементів і пристроїв, що коректують на передавальні функції один одного необхідно перед елементарними коректуючими пристроями і після них встановити розв'язують підсилювачі.

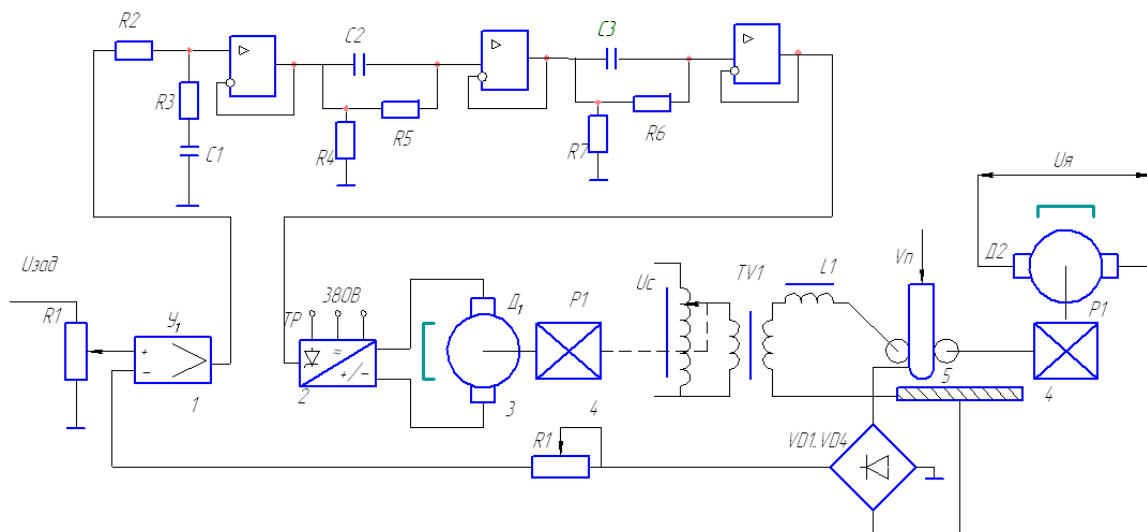


Рисунок 3.12 - Скоригована система регулювання напруги зварювальної дуги.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

У нашому дослідженні зварювальний струм буде забезпечуватися традиційним джерелом живлення змінного струму постійного струму 160 А з а дуже крутим нахилом вихідної характеристики сили струму, як показано на рис. 4.1. Це обумовлено тим, що необхідно забезпечити нормальний робочий діапазон. Такі блоки використовуються для багатьох типав зварок, проте для нашого випадку є найбільш актуальними, оскільки при зварюванні в захисному газі великий вплив має стабільність струму.

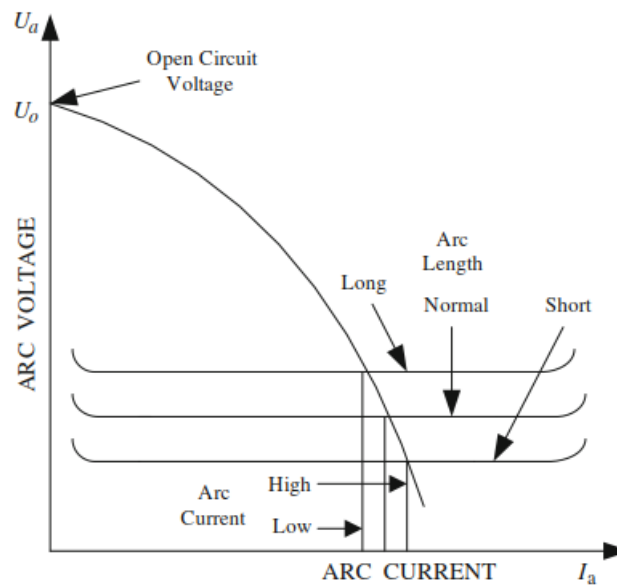


Рисунок 4.1 - Поточні вихідні характеристики джерела струму та дугові статичні характеристики для процесу зварювання

У системі контролю, запропонованій у цьому дослідженні, заданий зварювальний струм досягається за допомогою адаптованого контролера ковзного режиму для регулювання швидкості подачі електродів на основі сигналу зворотного зв'язку, отриманого від датчика струму.

При дуговому зварюванні бажана постійна довжина дуги між електродом і заготовкою.

$$v_{fr} \cong v_{mr}, \quad (4.1)$$

де v_{fr} – швидкість подачі електрода;

а v_{mr} – швидкість плавлення електрода.

Швидкість плавлення електрода є функцією струму дуги, I_a , і напруги дуги V_a :

$$v_{mr} = k_{mr} I_a - k_v V_a \quad (4.2)$$

де k_{mr} - коефіцієнт відношення швидкості плавлення до струму дуги і k_v коефіцієнт відношення швидкості плавлення до напруги дуги. Підставивши рівняння 4.1 у рівняння 4.2, матимемо:

$$I_a = \frac{v_{fr}}{k_{mr}} + \frac{k_v}{k_{mr}} V_a. \quad (4.3)$$

З рівняння 4.3, зрозуміло, що при постійній швидкості подачі електрода процес зварювання, зварювальний струм, I_a , залежить від обох факторів - швидкості подачі електрода, v_{fr} , та напруги дуги, V_a . Рівняння 4.3 являє собою взаємозв'язок між струмом дуги та напругою дуги в робочому стані, де знаходиться електрод. При цьому швидкість подачі дорівнює швидкості плавлення електрода. Іншими словами, робочі точки I_a та V_a завжди повинні підтримуватися на характеристичній кривій, описаній рівнянням 4.3. Сам процес зварювання полягає у задоволенні умови $v_{mr} = \sim v_{fr}$. Будь-які відхилення від цієї характерної кривої неминуче призведе до небажаної флуктуації довжини дуги.

Наш процес, власне, класифікується як процес зварювання з довгою дугою.

У таких процесах вибирається відповідна подача електрода, швидкість, v_{fr} , залежить більше від зварювального струму, I_a , ніж від напруги дуги, V_a . Отже, поточну систему для проведення моделювання можна спростити, враховуючи напругу дуги V_a , як сталу і струм дуги, I_a , практично пропорційний швидкості подачі електрода, v_{fr} , тобто

$$I_a = \frac{v_{fr}}{k_{mr}} \quad (4.4)$$

У цьому дослідженні тримач електрода приводиться в рух кульовис гвинтовим столом, що приводиться в дію сервомотором. Така реалізація може бути описана динамічною системою швидкості першого порядку з передавальною функцією наступної форми:

$$\frac{V_f(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{Js + a} \quad (4.5)$$

де K_m - константа двигуна, J - повна інерція, a - коефіцієнт в'язкого демпфування приводного механізму.

Призначення цього приводного механізму - керувати швидкістю подачі електрода, v_{fr} , щоб вона завжди дорівнювала розплаву електрода.

Вхідним сигналом до приводного механізму є керована напруга, V , прикладена до вхідної клеми сервомотора. При цьому вихід - швидкість подачі електрода, v_{fr} .

В результаті отримаємо залежність:

$$G(s) = \frac{K_m}{k_{mr}(Js + a)} \quad (4.6)$$

На рис 4.2 представлена блок-схема запропонованого автомата.

Система управління включає систему зворотнього зв'язку, контролер режиму роботи та датчик струму. Сигнал напруги зворотного зв'язку, прямо пропорційний величині вихідного струму дуги, отримується за допомогою датчика струму. Сигнал зворотного зв'язку віднімається від вхідного для отримання сигналу про помилку, $E(s)$, який потім поступає в контролер $C(s)$. Контролер видає керуючий вплив, застосовуючи відповідний вихідний сигнал, $V(s)$, до вхідного сервомотору, який приводить в дію механізм подачі електроду для забезпечення нормальної довжини дуги, тобто струм, підтримується стабільним по мірі витрати електроду.

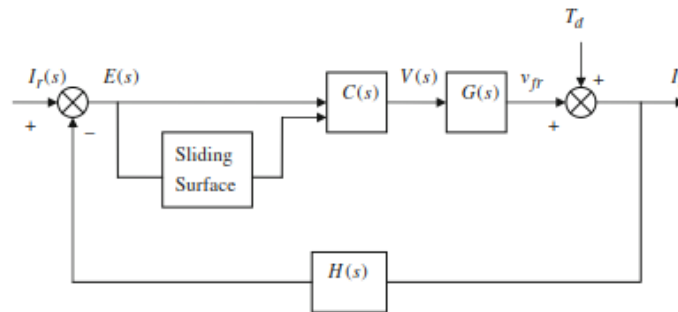


Рисунок 4.2 – Блок схема автомата регулювання довжини дуги при керуванні струмом

Номаніальна математична модель, отримана при емуляції роботи системи в Matlab має вигляд:

$$G(s) = \frac{1563000}{s^2 + 583.3s + 1575000}. \quad (4.7)$$

Адаптивний регулятор струму дугового режиму.

У поточному контролері режиму виражається збурення, яке включає відхилення T_d як:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + T_d, \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [c \ 0] \end{aligned} \quad (4.8)$$

Функція похибки задається наступним співвідношенням:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2, \\ \dot{e}_2 &= a_0(r - e_1) - a_1 e_2 - cu + \bar{e}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

При проведенні симуляції перехідних процесів було отримано наступні залежності.

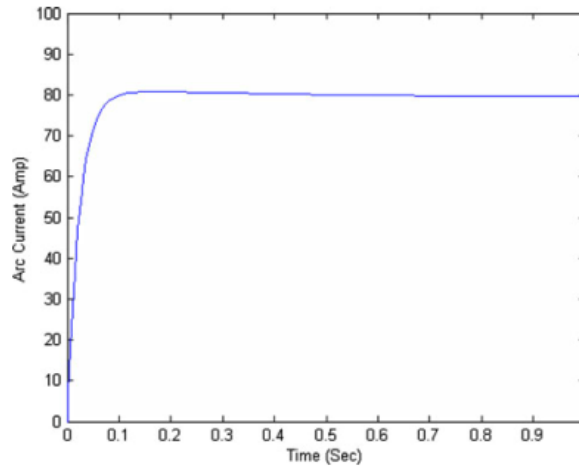


Рисунок 4.3 – Симуляція адаптивного режиму контролера

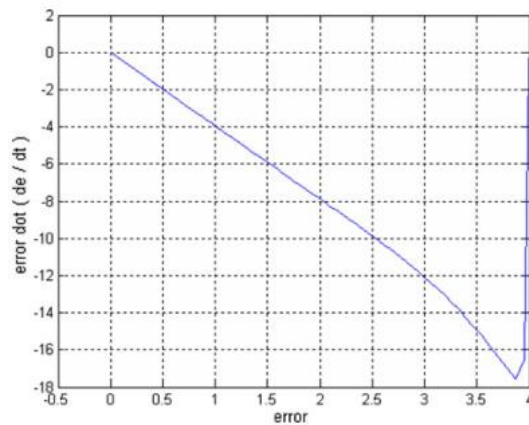


Рисунок 4.4 – Статична похибка процесу.

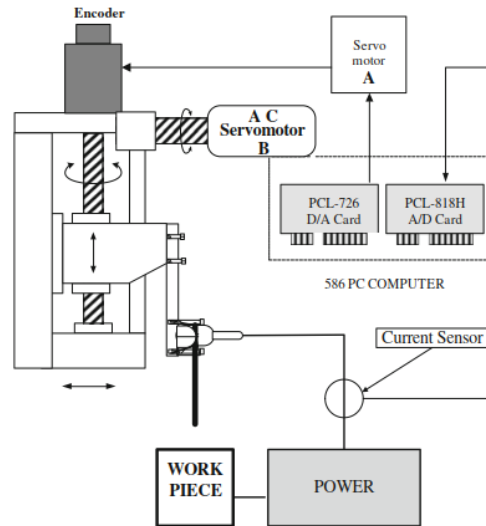


Рисунок 4.5 – Можлив реалізація стану для проведення досліджень

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1. Побудова графіків перехідного процесу в скоригованій системі

На даний час відомо кілька способів побудови, власне, перехідних процесів: зазвичай, пряме рішення, власне кажучи, однорідного диференціального рівняння для класичної замкнутої системи; Розв'язок рівняння розробленої замкнутої системи в відомій операторній формі при застосуванні методі оберненого перетворення Лапласа і використання, втім, методу трапецій для апроксимації до ВЧХ для досліджуваної замкнутої системи.

Нижче приведено власне однорідне диференціальне рівняння для нашої скоригованої замкнутої системи з притаманною їй передавальною функцією:

$$W_{ж}(p) = \frac{K_v(T_2p+1)}{(T_1p+1) \cdot (T_3p+1)^2} = \frac{100(0,08p+1)}{(4,2p+1) \cdot (0,02p+1)^2} \quad (5.1)$$

Для реалізації і вивчення цих процесів використаємо пакет mathcad із застосуванням відомих чисельних методів. В результаті було отримано наступні залежності (рис. 5.1).

При аналізі отриманих результатів встановлено, що тривалість перехідного процесу при зварюванні дорівнює 0,5 с, а перерегулювання взагалі відсутнє. Це свідчить про хорошу оптимізацію системи. Також встановлено, що наш процес носить аперіодичний характер, що задовольняє поставленим вимогам, які ми пропонували для системи управління.

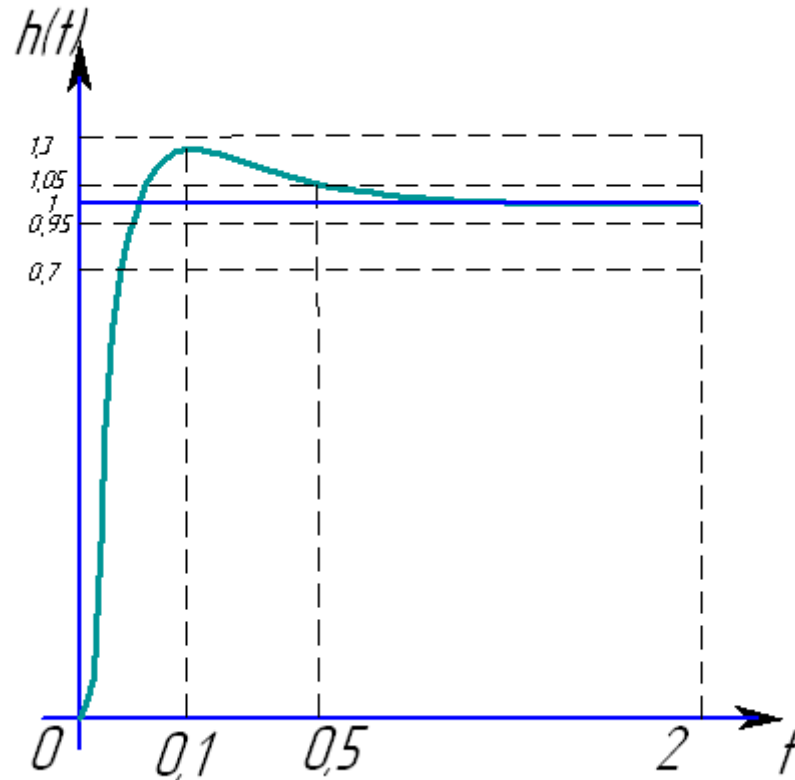


Рисунок 5.11 – Перехідний процес в скоригованій системі.

5.2. Побудова області стійкості адаптованої системи

З метою виділення областей стійкості необхідна побудова меж, власне, стійкості першого (нульовий корінь характеристичного рівняння) і також другого (уявні корені залежностей) типів. Однак часто буває достатнім побудова тільки межі стійкості другого типу (коливальної). Для розрахунку коливальної межі стійкості можна використовувати різні характеристичні критерії.

У нашому випадку зручно застосувати критерій Михайлова. В цьому випадку межі стійкості відповідає умова рівності нулю характеристичного комплексу, власне, передавальної функції замкнутої системи

$$Q(j\omega, A, B) = \operatorname{Re}(j\omega, A, B) + j\operatorname{Im}(j\omega, A, B) = 0 \quad (5.2)$$

де A, B - наші параметри розробленої системи, які в найбільшій мірі впливають на стійкість.

У цьому випадку отримане рівняння можна, власне, розкласти на два рівняння:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(j\omega, A, B) = 0 \\ \operatorname{Im}(j\omega, A, B) = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Вони є параметричними залежностями коливальної межі стійкості в площині з координатами A і B при наявності виконання умови заперечності дійсних частин решти отриманих коренів, за виключенням уявних. Кожній точці на межі стійкості ставиться у відповідність своє значення уявних коренів i , отже, своя частота, власне кажучи, коливань вихідної величини.

У нашому випадку з отриманою функцією передачі розімкнутої системи характеристичний поліном прийме вигляд:

$$D(p) = (T_{11}p + 1)(T_{13}p + 1)^2 + K_v(T_{12}p + 1)$$

Тоді рівняння можна переписати:

$$D(j\omega) = (T_{11}j\omega + 1)(T_{13}j\omega + 1)^2 + K_v(T_{12}j\omega + 1) = 0 \quad (5.4)$$

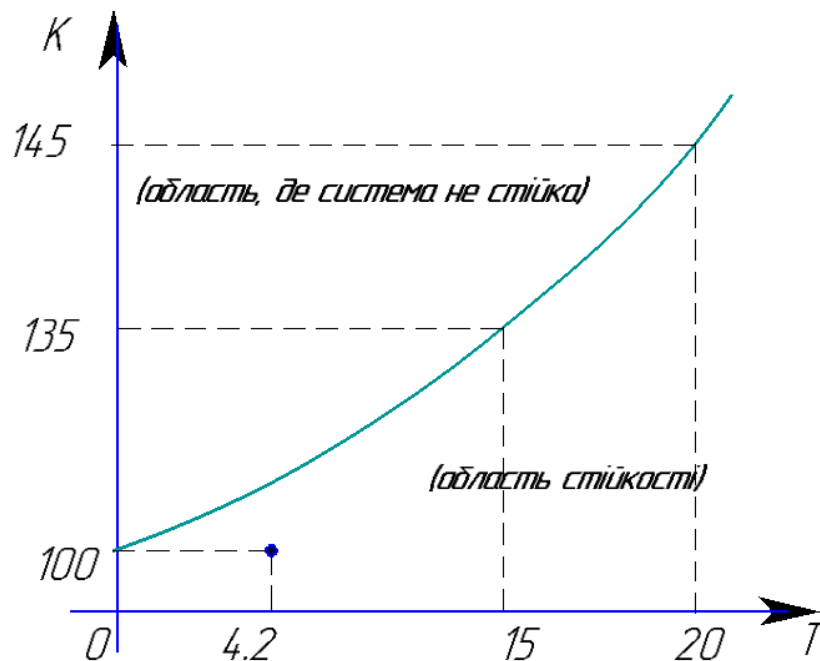


Рисунок 5.2 – Відносна границя стійкості в площині параметрів розроблених коригувальних елементів

Стійкої зоною є зона, власне, нижче кривої. Межею такої стійкості є обмежуюча лінія $K_p = 0$, оскільки в такому випадку вказане рівняння нашої системи має нульовий корінь. Якщо коливальну межу продовжити до границі стійкості I роду, то така область буде ділянкою стійкості в площині налаштувань розробленого регулятора.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Промислова безпека, що її розглядає охорона праці, має велике значення для працюючих, оскільки саме вона контролює фізичний стан працівника, що не може не позначитись на його житті, здоров'ї, а також продуктивності праці в тому числі і у галузі радіоелектроніки. Незадовільний стан охорони праці може викликати соціальноекономічні проблеми працюючих та їх родин. Саме тому соціальноекономічне значення охорони праці полягає в наступному: зростанні продуктивності праці, збільшенні валового внутрішнього продукту, зменшенні витрат на оплату лікарняних і виплат компенсацій за шкідливі умови праці та інше. В цьому розділі проводиться аналіз небезпечних та шкідливих для людини і навколишнього середовища чинників, які виникають під час проведення дослідження радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля. Тут висвітлюються, зокрема, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, розрахунок безпечної відстані від джерела магнітного поля, технічні рішення з безпеки при проведенні дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

6.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони.

Під мікрокліматом виробничих приміщень розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, який визначається діючими на організм людини поєднаннями температури, вологості та швидкості руху повітря, а також інтенсивності теплового випромінювання. Якщо з технічних чи економічних міркувань оптимальні норми не забезпечуються, то встановлюються допустимі величини показників мікроклімату. Вибираємо

для приміщення для проведення дослідження радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іб. Відповідно допустимі показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для холодного та теплого періодів року приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Допустимі показники мікроклімату в приміщенні.

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	≤0,2
Теплий		21-28	19-30	60 при 27°С	0,1-0,3

При опроміненні менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м².

Повітря робочої зони не повинно містити шкідливих речовин з концентраціями вище гранично допустимих концентрацій (ГДК) в повітрі робочої зони та підлягає систематичному контролю з метою запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

При використанні ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, що знаходяться в повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів мають відповідати та приведені у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

Число іонів в 1 см³ повітря приміщення під час роботи на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
позитивний	400	1500-3000	50000
негативний	600	3000-5000	50000

Для встановлення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату і складу повітря робочої зони передбачено такі заходи:

- 1) у приміщенні повинна бути розміщена система кондиціонування для теплого і опалення для холодного періодів року;
- 2) припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

6.1.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях значні вимоги висуваються до якісних та кількісних параметрів освітлення. З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводиться робота з дослідження радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля, знаходимо, що вони відповідають IV розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – середній та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт в. Нормовані значення коефіцієнта

природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості при штучному освітленні наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

Нормовані значення КПО і мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Сумщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	v	середній	середній	400	200	200	1,5	0,9

Так як приміщення знаходиться у м. Тернопіль (друга група забезпеченості природним світлом), а світлові проєми орієнтовані за азимутом 270, то для таких обставин КЕО бде становити:

$$e_N = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 (\%).$$

З метою забезпечення нормованих значень параметрів освітлення передбачено такі заходи: 1) за недостатнього природного освітлення у світлу пору доби доповнення штучним за допомогою люмінесцентних ламп з утворенням системи сумщеного освітлення; 2) застосування загального штучного освітлення в темну пору доби.

6.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Визначення області працездатності радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Вплив різних загрозливих чинників надзвичайних ситуацій може загрожувати роботі розроблюваних перетворювачів і цим вплинути на роботу систем в складі яких вони застосовуються. В РЕА, зокрема в радіовимірювальних перетворювачах магнітного поля застосовуються елементи, до складу яких входять такі матеріали: метали, неорганічні матеріали, провідники і різноманітні органічні сполуки (діелектрики, смоли і т.д.). Серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв. Іонізуючі випромінювання в радіоелектронній апаратурі, викликають зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можуть відбуватися порушення роботи електричних елементів, що призводять до виходу з пристрою. Проходячи через елементи РЕА, потік гамма-випромінювань створює в них вільні носії електричних зарядів, який призводить до спрацьовування пристрою. При великих дозах випромінювання втрачають працездатність комплектуючі елементи систем радіоелектроніки і електроавтоматики. В транзисторах змінюється обернений струм і коефіцієнт підсилення, у конденсаторах знижуються напруги пробою та опір стікання, змінюється провідність і внутрішній нагрів; руйнується електрична ізоляція дротів з полімерних матеріалів. В органічних діелектричних матеріалах змінюються електрична провідність, діелектрична

проникність і тангенс кута втрат. Неорганічні матеріали менш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань. Найбільш піддаються впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) системи управління і сигналізації. ЕМІ ушкоджують напівпровідникові прилади, резистори, конденсатори. ЕМІ має велику небезпеку для апаратури, добре захищеної від впливу інших загрозливих чинників. Слід також пам'ятати, що механічний захист апаратури не захищає від впливу ЕМІ. Апаратура може бути знищена навіть знаходячись у надійних спорудах.

6.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля в умовах надзвичайних ситуацій.

Дослідження, які були проведені як у нашій країні, так і за кордоном, показали, що зміна параметрів радіоелектронних пристроїв може відбуватися в широкому діапазоні потоків іонізуючих випромінювань. Тому в багатьох випадках при експлуатації виникає необхідність вживати додаткові заходів по підвищенню радіаційної стійкості роботи радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля. Головними заходами щодо підвищення радіаційної стійкості є: застосування в апаратурі радіаційностійких елементів і матеріалів, спеціальних радіаційних екранів або активного захисту від впливу потоків заряджених частинок. При імпульсному впливі іонізуючих випромінювань, крім перерахованих способів використовують: застосування схем, мало критичних до змін електричних параметрів; зниження напруги живлення на аноді і збільшення від'ємної напруги зсуву сіток газорозрядних приладів; застосування пристроїв, які містять додаткові радіотехнічні схеми на період впливу радіації; збільшення відстані між елементами, які знаходяться під навантаженням і інші. В захисті від іонізуючого опромінення

використовують алюмінієві сплави, леговані елементами з високим атомним номером (лантаноїдами і рідкоземельними елементами), сплави на основі тугоплавких і рідкоземельних елементів і багат шарові матеріали. Для боротьби з впливом іонізуючого випромінювання можна використати новітній, що полягає в захисному покритті на поверхнях даних елементів, які опромінюються покриттям з включенням атомів рідкоземельних елементів, введених в структуру армованої атомно-молекулярної захисної металічної матриці. Аналізуючи вищенаведені розрахунки, можна зробити висновок, що електричні кола радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля будуть зберігати працездатність при значеннях іонізуючих випромінювань від 0 до $1,8 \cdot 10^3$ Р/с, також розраховано термін безпечної роботи пристрою 28467 год. Найкращим серед заходів по підвищенню стійкості роботи перетворювачів магнітного поля від дії ЕМІ є повне укриття апаратури у екранованому металевим екраном приміщенні. Але перетворювач магнітного поля може експлуатуватись на транспортних засобах, то бажані інші заходи по захисту, такі як струмопровідні сітки та плівкові покриття вікон, стільникові металічні конструкції для повітрозбірників та вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, що розміщуються по периметру дверей і люків. Для захисту від проникнення електромагнітного імпульсу в апаратуру через різні кабельні вводи використовується перехід від електричних до волоконно-оптичних систем зв'язку, на які практично не має вплив ЕМІ. Також для захисту кабельних вводів є встановлення в конструкції вбудованих зенерівських діодів. Досить важливе значення має захист вводів до споруд таких як: електричних лінії зв'язку включаючи електромережу, водопровідні й опалювальні труби, по яким можливе проникнення наведеного ЕМІ. При оцінці стійкості роботи електротехнічних і електронних систем було визначено, що безпечна робота розроблювального пристрою можлива при умові $E_v \leq 70$ В/м.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

У магістерській роботі було розроблено автоматизовану систему регулювання напруги зварювальної дуги для забезпечення оптимального параметру процесу зварювання та високих якісних характеристик зварного шва. Було проаналізовано основні параметри, які впливають на процес зварювання, розглянуто схеми регулювання напруги дуги та стабільності процесу зварювання. Зроблений аналіз вихідної САР, в результаті якого було встановлено, що представлена базова реалізація системи є нестійкою та не задовольняє заданим показником якості. В результаті був проведений синтез коректуючого пристрою, завдяки якому система зв'язку стала стійкою, її перехідний процес та статистична помилка встановили режими перестановки не виходять за допустимі межі. Розроблено систему регулювання напругою дуги з інтегруючо диференціальними ланками для зменшення тривалості перехідних процесів. Проведено оптимізацію стабільності роботи системи.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.
2. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
3. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
4. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
5. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966. – 359с.
6. Львов Н. С., Гладков Э. А. Автоматизация и автоматика сварочных процессов. –М.: Машиностроение , 1982, – 302с.
7. Лебедев А. В. Супрун С. А. Выбор привода подачи электродной проволоки полуавтомата дуговой сварки // Автомат. сварка. – 1977. – № 3. – С. 4 – 8.
8. Система автоматического регулирования вылета электрода трактора АДПГ – 500 / Ю. Н. Кутепов, Д. С. Кассов, Ю. И. Рейдерман, А. И. Михеев // Сварочное пр-во. – 1968 № 12 С. 39.
9. Сергацкий Г. И., Дубовецкий С. В., Касаткин О.Г. Модели для разомкнутого управления формированием шва при сварке в СО₂ // Автомат. Сварка. – 1983. – № 2. – С. 22 – 26.

10. Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О.Г. Оптимизация режима сварки угловых швов и СО₂ в различных пространственных положениях // Автомат. сварка. – 1982. – № 5. – С. 34 – 38.
11. Львов С.И. Автоматизация контроля и регулирования сварочных процессов. – М.: Машиностроение, 1973. – 128 с.
12. Применение телевизионных установок ПТУ-37 в станах для сварки внутренних швов на трубах / В. А. Тимченко, Н. И. Усик, В. К, Долиненко и др. // Автомат. сварка. – 1977. – № 4. – С. 62 – 64.
13. Воронин Ф. Б., Шаринов В. И. Электромагнитная совместимость сварочного и телевизионного оборудования . Электротех. Пром-сеть. Сер. Электросварка. – 1974. – № 1 (22) – С. 19 – 21.
14. Сварка с электромагнитным перемещением / Под ред.В. П.Черныша. – К.: Техніка, 1983. – 128 с.
15. Федько В.Т., Брунов О.Г., Соколов П.Д. Сварка с импульсной подачей сварочной проволоки как частный случай импульсно-дуговой сварки // Сварочное производство. – 2006. – № 7. – С. 6-8.
16. Лебедев В.А. Некоторые особенности дуговой механизированной сварки алюминия с управляемой импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. – 2007. – № 11. – С. 26-30.
17. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Пичак В.Г. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки // Сварочное производство. – 2002. – № 2. – С. 24-31.
18. Крюков А.В., Павлов Н.В., Зеленковский А.А. Особенности сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. – 2013. – № 5. – С. 37-39.
19. Лапин И.Е., Косович В.А., Потапов А.Н., Русол О.А. Пространственная устойчивость дуги и формирование шва при сварке тонколистового

алюминия разнополярными импульсами тока прямоугольной формы // Сварочное производство. – 2001. – № 5. – С. 3-6.

20. Патон Б.Е., Шейко П.П., Жерносеков А.М. Стабилизация процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 2003. – № 8. – С. 3-6.

21. Тазетдинов Р.Г., Новиков О.М., Персидский А.С. Дуговая сварка в защитных газах с попеременной импульсной подачей разнородных газов // Сварочное производство. – 2012. – № 1. – С. 38-42.

22. Машин В.С., Пашуля М.П., Шонин В.А. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в аргоне тонколистовых алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. – 2010. – № 5. – С. 49-53.