

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНІ енергетики,
Автоматики і
енергозбереження
(назва кафедри)

_____ В.В. Каплун
(підпис) (ПІБ)

" " _____ 2025р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

_____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" " _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему **"КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ МЕТАЛЕВИХ
КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРА."**

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., проф.
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Заєць Н.А.
(П.І.Б.)

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

Д.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Іващук В.В.
(П.І.Б.)

Виконав

_____ (підпис)

Наконечний І.А.
(П.І.Б.)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ПОГОДЖЕНО

Директор ННІ енергетики,
Автоматики і
енергозбереження
(назва кафедри)

_____ В.В. Каплун
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2025р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

_____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту
Наконечному Ігорю Андрійовичу.
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування процесом контактного зварювання металевих конструкцій із використанням логічного контролера".

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" 11 2024 р. № 2056"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "29" травня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Технологія і промислове обладнання для виробництва натурального деревного шпону.

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу контактного зварювання.

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування зварювальним струмом.

5.2. Система автоматизації керування зварювальним струмом. Схема електрична принципова.

5.3 Система автоматизації керування зварювальним струмом. Схема електрична з'єднань.

5.4. Система автоматизації керування зварювальним струмом. Схема електрична підключень.

5.5. Система автоматизації процесу керування зварювальним струмом. Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "21" листопада 2024 року

**Керівник
кваліфікаційної
бакалаврської роботи**

(підпис)

**Іващук.В.В
(П.І.Б.)**

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

**Наконечний І.А.
(П.І.Б.)**

ЗМІСТ

Contents

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1	8
ТЕХНОЛОГІЯ І ПРОМИСЛОВЕ ОБЛАДНАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ.....	8
1. Загальні відомості про конструкцію.....	8
1.2. Контактне зварювання металевих конструкцій: технологія та обладнання.	9
1.3. Постановка задачі автоматизації.	21
Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування зварювальним струмом.	22
РОЗДІЛ 2	23
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	23
ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ.	23
2.1. Математичні моделі для прогнозування якості зварних з'єднань.....	23
2.2. Визначення передатної функції процесу контактного зварювання для каналу керування зварювальним струмом.	28
РОЗДІЛ 3	31
ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ.....	31
ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ	31
3.2. Реалізація алгоритму керування	34
3.2.1. Вибір мікронтроллера.	35
Розробка програми реалізації алгоритму керування	36
струмом зварювання.	36
3.2.2. Вибір трансформатора.	42
3.2.3. Обґрунтування вибору чутливого елемента.	44
3.2.4. Обґрунтування вибору виконавчого механізму.....	47
РОЗДІЛ 4	50
РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	50
4.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК	50
4.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування	52
Рис. 4.2. Структурно-алгоритмічна схема ПІД-регулятора:	53
РОЗДІЛ 5	58
СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	58

5.1. Розробка схем електричних принципової, з'єднань та підключень системи керування роликовою сушаркою для шпону	58
5.2. Вибір автоматичних вимикачів для живлення трансформатора та системи керування.....	58
5.2.1. Вибір електротехнічного обладнання кола керування.....	60
5.3. Вибір проводів та кабелів.....	62
5.4. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу.....	63
6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	66
ВИСНОВКИ.....	67
ЛІТЕРАТУРА.....	68

ВСТУП

Контактне зварювання - процес утворення нерозбірного зварного з'єднання шляхом нагрівання металу електричним струмом, що проходить через нього, та пластичної деформації ділянки з'єднання під впливом стискаючого зусилля.

Контактне зварювання переважно застосовують у промисловому масовому або серійному виробництві однотипних виробів. Використовується на підприємствах машинобудування, оборонно-промислового комплексу, авіаційної промисловості та інш.

Процес контактного зварювання складний з точки зору динаміки теплових та електричних процесів. На якість зварного з'єднання впливають багато параметрів, від тиску і тривалості імпульсу до якості поверхонь деталей і стану електродів. Щоб їх компенсувати, необхідне впровадження сучасних систем автоматичного керування.

Світовий досвід свідчить, тенденція останніх років — це глибока інтеграція комп'ютерних технологій в процес зварювання. З'являються так звані комп'ютерно-інтегровані виробничі системи, в яких процеси контролю, керування і діагностики реалізовані за допомогою цифрових технологій.

На практиці впровадження таких систем часто стикається з рядом труднощів: недостатньою точністю датчиків, складністю програмної реалізації, а також недостатньо гнучкими методами керування. Це створює потребу в подальших дослідженнях, спрямованих на підвищення ефективності та надійності автоматизованих зварювальних комплексів.

Отже, тема цієї роботи є актуальною з огляду на загальний напрямок розвитку автоматизованого виробництва, потребу в підвищенні стабільності зварювальних процесів та зниженні відсотку браку.

У межах даної роботи розглядається розробка комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування установкою контактного зварювання, зокрема — на завершальному етапі виробництва, де відбувається з'єднання конструкції з основою.

Рама виконує критично важливу функцію: забезпечує стабільність конструкції. Вона складається з декількох елементів, які жорстко фіксуються до корпусу через контактне зварювання. Це з'єднання повинно витримувати значні механічні навантаження, також не порушувати баланс і симетрію.

У рамках даної роботи буде проаналізовано процес контактного зварювання, з урахуванням жорстких геометричних і технологічних допусків. Особлива увага приділяється розробці автоматизованої системи керування, яка дозволяє стабілізувати параметри зварювання в режимі реального часу..

Об'єктом дослідження є керування струмом зварювання під час процесу зварювання.

Предметом дослідження є залежність параметрів зварювання та якості вихідного продукту, за для забезпечення стабільного виробництва відповідного нормам продукту.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є удосконалення системи автоматичного керування установки контактного зварювання конструкцій, що забезпечить стабільний випуск відповідних до норм виробів.

Задачі бакалаврської кваліфікаційної роботи:

- з допомогою вивчення літературних джерел та аналізу машини контактного зварювання як об'єкта керування, знайти методи покращення управління процесом контактного зварювання;

- розробити функціональну схему автоматизації системи керування зварювальним струмом ;

- дослідити кінетику процесу зварювання та визначити передатну функцію установки для процесу керування зварювальним струмом.

- обґрунтувати вибір алгоритму керування та технічних засобів для реалізації САК;

- дослідити показники якості роботи САК;

- розробити електричні схеми системи керування та створити операторський інтерфейс системи контролю та керування установкою;

- здійснити техніко-економічне обґрунтування прийнятих інженерних рішень.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЯ І ПРОМИСЛОВЕ ОБЛАДНАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ.

1. Загальні відомості про конструкцію.

Для виробництва конструкції застосовують леговані та вуглецеві конструкційні сталі, що поєднують високу міцність, жорсткість, зварюваність і корозійну стійкість. Найбільш поширені марки сталі:

- Сталь 30ХГСА — високоякісна конструкційна легована сталь з підвищеною пружністю, використовується для виготовлення хвостової трубки завдяки високій ударній в'язкості;
- Сталь 65Г або 60С2А — пружинні сталі, що використовуються для виготовлення пір'їв стабілізатора, забезпечують добру еластичність і не деформуються;
- Сталь 08Х18Н10Т (нержавіюча) — може застосовуватись у виробництві стабілізаторів із підвищеною стійкістю до вологи та корозії;

- Сталь 10 або 20 — низьковуглецеві сталі, іноді використовуються для трубки за умови додаткової термообробки та зміцнення;
- Сталь 09Г2С — низьколегована зварювана сталь, добре себе показує в умовах серійного виробництва з високими вимогами до точності зварних швів.

Конструкція виготовляється із листового прокату, яке проходить гнуття, вирубку, обробку країв та точкове або шовне контактне зварювання до корпусу. Для запобігання деформаціям під час зварювання застосовується проміжне охолодження та термообробка готового вузла.

Високоточна фіксація пір'їв та дотримання кутів нахилу є критично важливими: навіть незначне відхилення може спричинити дестабілізацію. Саме тому в сучасних виробництвах активно впроваджуються комп'ютерно-інтегровані системи контролю та керування процесом зварювання, що дозволяє забезпечити повторюваність параметрів з'єднання та зменшити відсоток браку.

1.2. Контактне зварювання металевих конструкцій: технологія та обладнання.

Для отримання надійних і якісних з'єднань необхідно розуміти фізико-хімічні процеси, які відбуваються під час їх утворення, адже саме вони становлять основу технології зварювання. Щоб краще проаналізувати процес формування з'єднання, його умовно поділяють на окремі стадії, де розглядаються фізичні явища, що сприяють виникненню міжатомних зв'язків у зоні контакту заготовок та визначають властивості готового з'єднання.

Контактне зварювання характеризується дуже коротким часом впливу високого зварювального струму та значного стискаючого зусилля. Це забезпечує швидкий нагрів, локальне розплавлення металу та істотну пластичну деформацію в зоні з'єднання. У деяких випадках зв'язок між атомами може виникати навіть без утворення рідкої фази — у твердому стані.

Для більшості методів контактного зварювання ключовою умовою формування якісного з'єднання є створення спільної зони розплавлення певного розміру. Саме вона гарантує основні експлуатаційні властивості — міцність та герметичність з'єднання.

Загальна схема формування з'єднання при точковому, шовному та рельєфному зварюванні:

Перший етап – встановлення початкового контакту

Процес починається з моменту притискання деталей між електродами. У результаті виникає пружнопластична деформація мікронерівностей у зонах контактів «електрод–деталь» та «деталь–деталь». Це забезпечує початковий електричний контакт.

Після подачі струму відбувається нагрівання металу, що знижує опір деформації. Завдяки цьому вирівнюється мікрорельєф поверхонь, руйнуються оксидні та забруднюючі плівки, покращується електричний контакт між деталями.

Другий етап – формування зварного ядра

Цей етап починається з моменту плавлення металу в зоні зварювання. У процесі подачі зварювального струму відбувається утворення зварного ядра, яке поступово збільшується до максимально можливих розмірів — як у висоту, так і в діаметр.

Під час росту ядра метал активно переміщується в рідкій фазі, залишкові поверхневі плівки та домішки витісняються до периферії, утворюються міжатомні зв'язки в розплавленому металі, продовжуються процеси пластичної деформації навколо ядра, метал розширюється внаслідок нагрівання.

Третій етап – охолодження та кристалізація

Заключний етап починається після вимкнення зварювального струму. У цей момент метал у зоні зварювання поступово охолоджується, і розплавлене зварне ядро переходить у тверду фазу — відбувається кристалізація.

У результаті утворюється єдине лите ядро, що з'єднує обидві деталі. Під час охолодження метал зменшується в об'ємі, що спричиняє виникнення залишкових напружень у зоні зварювання.

Щоб зменшити ці напруження та запобігти утворенню усадочних тріщин і порожнин, необхідно прикладати значне зусилля стискання до повного завершення охолодження.

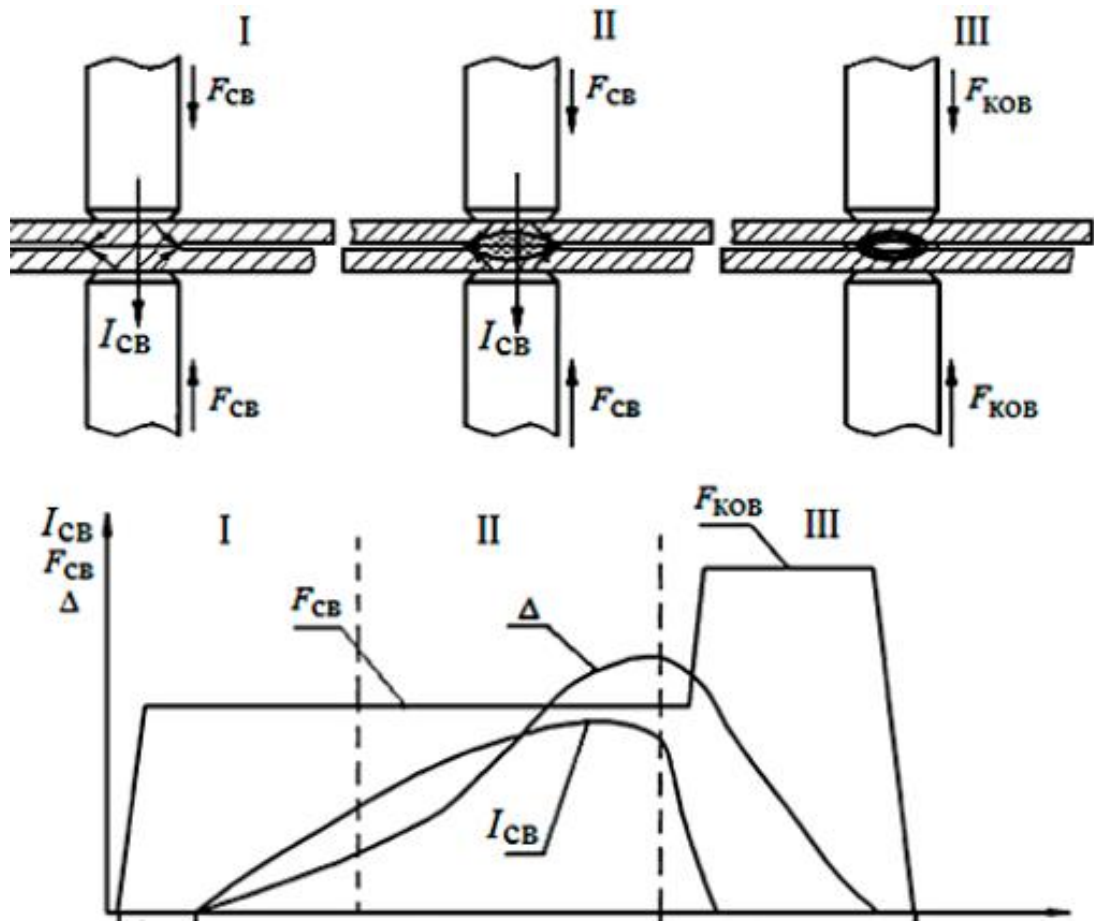


Рис 1.2. Етапи утворення з'єднання при точковому зварюванні та циклограма зварювання.

Для утворення наступного з'єднання зварювальний цикл після певної паузи повторюється.

Фізичні процеси залежно від їхньої ролі у формуванні з'єднання умовно поділяють на такі.

Основні:

- нагрівання та кристалізація металу;
- пластична деформація;
- видалення поверхневих плівок безпосередньо під час зварювання внаслідок електромагнітного перемішування розплавленого металу.

Супутні:

- теплове розширення металу;
- вплив термодформаційного циклу на властивості зварних з'єднань;
- утворення залишкових напружень;
- масоперенесення в контактї електрод–деталь.

Джерела теплоти при зварюванні

Нагрівання та плавлення металу відбувається за рахунок виділення теплоти на електричних опорах при проходженні через них електричного струму. Загальна кількість теплоти, що виділяється між електродами за час зварювання ($t_{зв}$), визначається за законом Джоуля — Ленца.

$$Q_{ee} = \int_0^{t_{зв}} i_{зв}^2(t) r_{ee}(t) dt. \quad [1.1]$$

Формула. $I_{зв}(t)$ - миттєве значення зварювального струму зварювання. $r_{ee}(t)$ — загальний опір металу між електродами в момент часу до завершення зварювання)

Під час зварювання двох деталей з одного й того ж металу та однакової товщини.

$$r_{ee} = 2r_d + 2r_{ед} + r_{дд}. \quad [1.2]$$

Формула. r_d – свій активний опір деталей. $r_{ед}$ – контактний опір між електродом та деталлю. $r_{дд}$ - контактний опір між деталями.

Контактні опори зосереджені в вузькій зоні прилягання між деталями («деталь–деталь») та між електродом і деталлю («електрод–деталь»).

Наявність контактних опорів зумовлена обмеженою площею електричного контакту, що виникає через нерівності поверхонь деталей і електродів. Крім того, додатковий опір створюють різні непровідні поверхневі утворення, серед яких: оксидні та гідрооксидні плівки, адсорбована волога, залишки мастил, продукти корозії, пил, адсорбовані гази тощо. Усе це перешкоджає вільному проходженню струму через контакт і збільшує електричний опір у зоні з'єднання.

Експериментально величину контактної опору визначають шляхом пропускання малого (сигнального) струму через металеві деталі, що стиснуті зусиллям F . При цьому вимірюють падіння напруги на ділянках однакової довжини як у зоні контакту, так і на самих деталях, щоб розрахувати значення опору.

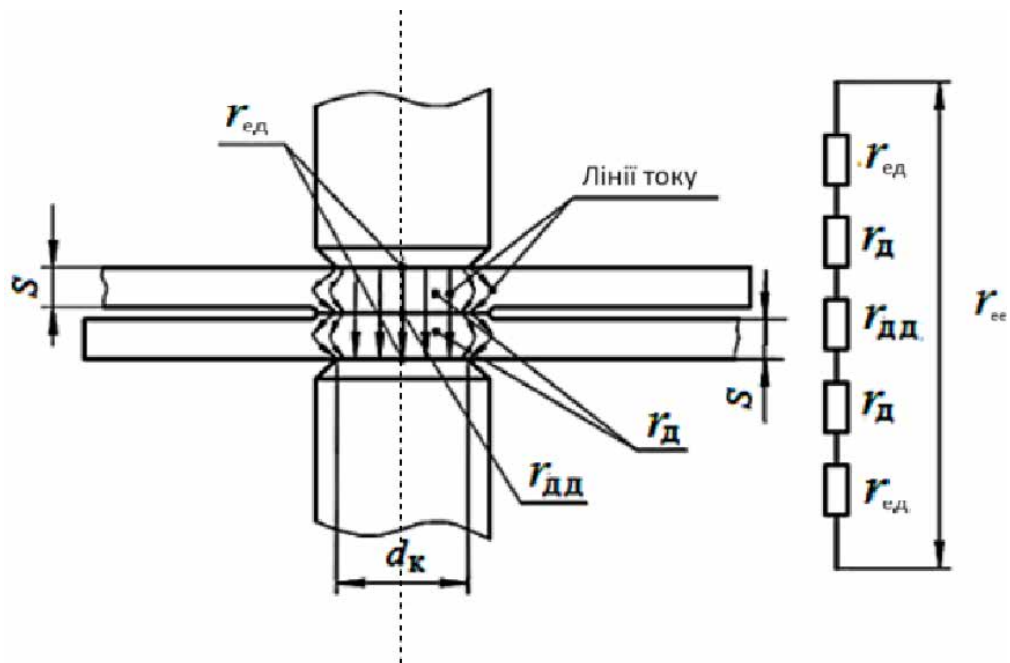


Рис 1.3. Опір участку електрод-електрод

Загальний контактний опір $r_k = 2r_{ед} + r_{дд}$.

Рівень контактних опорів і власного опору деталей, а також динаміка їх зміни в процесі зварювання визначають характер тепловиділення та формування з'єднання. Вплив контактних і власних опорів на процес тепловиділення доцільно досліджувати, представивши рівняння (1.3) у такому вигляді:

$$Q_{еє} = \int_0^{t_{зв}} i_{зв}^2(t) r_k(t) dt + \int_0^{t_{зв}} i_{зв}^2(t) 2r_{д}(t) dt \quad [1.4]$$

На опори r_k та $r_{д}$ впливають: властивості зварюваних матеріалів, форма з'єднаних деталей, зусилля стиснення, нерівномірність нагріву, стан поверхні тощо.

Розрахунок току зварювання.

Зварювальний струм розраховують за законом Джоуля — Ленца.

$$I_{зв} = \sqrt{Q_{ee} / (m_r * 2r_{дк} * t_{зв})} \quad [1.5]$$

Формула. Q_{ee} – загальна кількість теплоти для утворення з'єднання. m_r – коефіцієнт зміни γ_{ee}

Орієнтовні значення коефіцієнта $m_{_r}$ залежно від властивостей зварюваних сталей і сплавів: для низьковуглецевих сталей — 1, алюмінієвих і магнієвих сплавів — 1,15, корозійностійких сталей — 1,2, титанових сплавів — 1,4.

У свою чергу, $Q_{ээ}$ (теплова енергія, що виділяється в зоні електричного контакту) визначається за рівнянням теплового балансу (2.5). У цьому рівнянні її складові спрощено розглядаються таким чином:

Q_p — теплова енергія, необхідна для нагрівання стовпчика металу заввишки $2s$ і діаметром $d_э$ до температури плавлення $T_{пл}$;

Q_d — тепло, що витрачається на нагрівання металу деталей у вигляді кільця шириною x_2 , яке оточує ядро. Середню температуру кільця умовно приймають $0,25 T_{пл}$, яку воно досягає на внутрішній стороні контакту між деталями;

Q_e — втрати тепла в електроди, які враховуються як нагрівання умовного циліндра в електродах висотою x_3 до середньої температури $T_э$.

Вважаючи, що температура на контактній поверхні електродів $T_{эд} \approx 0,5 T_{пл}$, а $T_э \approx 0,25 T_{эд}$, можна зробити припущення: $T_э \approx T_{пл} / 8$.

$$Q_{ee} = Q_{орд} + 2Q_{пед} + Q_{пдд} = Q_p + Q_d + Q_e. \quad [1.5]$$

Формула. $Q_{орд}$ — об'ємно розподілене джерело тепла; $Q_{пэд}$ — площинне джерело тепла в зоні контакту електрод–деталь; $Q_{пдд}$ — площинне джерело тепла в зоні контакту деталь–деталь; Q_p — теплова енергія, що витрачається на нагрівання та плавлення металу в зоні зварної точки; Q_d — теплота, необхідна для нагрівання металу деталей навколо зварної точки; Q_e — теплота, що витрачається на нагрівання електродів.

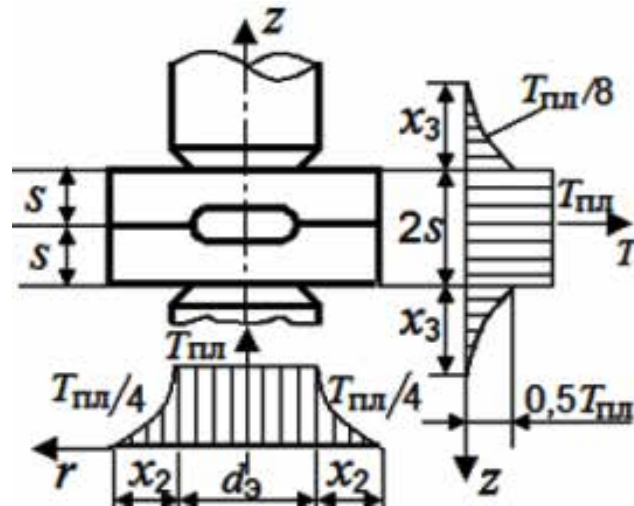


Рис 1.4. Розрахункова схема визначення сили зварювального струму

Теплове розширення металу при зварюванні

Нагрів металевих тіл супроводжується збільшенням їх лінійних розмірів та обсягу (дилатометричний ефект). Відомо, що за температури T твердого тіла його довжина l_t та обсяг V_t відповідно рівні:

$$l_t = l_0(1 + \alpha_t T), \quad V_t = V_0(1 + \beta_v T) \quad [1.6]$$

де l_0 і V_0 — довжина та об'єм тіла при $T = 0$; α_t і β_v — термічні коефіцієнти лінійного та об'ємного розширення.

Це описує залежність геометричних характеристик тіла від температури, де коефіцієнти розширення визначають, як змінюються ці характеристики при зміні температури.

Під час плавлення об'єм тіла різко збільшується на 8–10%. Збільшення об'єму металу при переході в рідкий стан має скачкоподібний характер.

У умовах точкового та шовного зварювання збільшення товщини і об'єму деталей відбувається переважно в напрямку осі z , оскільки збільшення розмірів по осі r обмежується жорсткістю сусідніх, більш холодних ділянок металу, за винятком зони контакту деталей. При точковому та шовному зварюванні дилатометричний ефект (збільшення розмірів деталей по осі z) може проявитися невеликим розсуванням електродів. У тому випадку, коли можливість переміщення електродів виключена,

виникає значне збільшення зусилля стиснення за рахунок внутрішніх сил. Таким чином, збільшення об'єму при нагріві металу супроводжується виникненням в приводі стиснення машини внутрішніх сил F_t . Ці сили прагнуть розсунути електроди на величину ΔT . Зазвичай верхній електрод є рухомих, і для його переміщення необхідно подолати лише силу тертя в приводі стиснення та силу інерції рухомих частин цього приводу, оскільки зусилля стиснення в цих умовах значною мірою урівноважується реакцією нижнього електрода F_p .

Зазвичай ці сили є незначними, і верхній електрод переміщається під час зварювання на величину Δi . Величина Δi залежить не лише від температури, але й від ступеня пластичної деформації Δd металу в зазорі між деталями (глибина вм'ятини під електродами). Помітне переміщення електрода зазвичай спостерігається з моменту плавлення ядра, коли зміна об'єму є найбільшою. Максимальне значення Δi пов'язане з розмірами ядра. Цей ефект використовують для контролю та автоматичного регулювання розмірів ядра.

Процеси масопереносу в зоні контакту електрод–деталь

Під час зварювання спостерігається взаємний перенос незначних кількостей металу між електродами та деталями через межу їхнього контакту. Цей перенос може відбуватись механічним шляхом або як результат дифузійних процесів.

На етапі від моменту прикладення зварювального зусилля до подачі струму (рис. 2.20, а), у контакті електрод–деталь виникають наступні явища: Упругопластична деформація мікровиступів; Втискання виступів у западини, їх зсув, зрізання і навіть заклинювання; Часткове руйнування оксидних плівок на поверхні; Формування невеликої кількості локальних фізичних зв'язків між поверхнями. Ці процеси посилюються зсувними деформаціями, що виникають через відносне переміщення електродів відносно поверхні деталей. Причина цього — різна жорсткість верхньої та нижньої консолей зварювального устаткування. На рисунку показано, як виступи зі світлою оксидною плівкою руйнують темніші оксидні шари на деталях. Проте в деяких випадках можливий і зворотний процес, коли руйнування йде в протилежному напрямку.

До моменту подачі зварювального струму описані процеси перебувають лише на початковій стадії, і масоперенос майже не відбувається.

Після включення струму та поступового нагрівання зони біля електродів опір пластичній деформації мікрорельєфів зменшується, що сприяє їх деформації та збільшенню площ фактичного контакту. Це створює умови не лише для фізичного, а й хімічного з'єднання матеріалів. Виникає взаємна дифузія металів (на схемі показано світлими та темними точками). У деяких випадках, таких як зварювання оцинкованої сталі, магнієвих сплавів тощо, можливе локальне плавлення поверхні через утворення легкоплавких евтектик (наприклад, магній або цинк з міддю електродної бронзи) (рис. 2.20, в). Під час плавлення інтенсивність дифузії різко зростає. Якщо поверхні деталей або електродів були недостатньо очищені, в порожнинах між мікронерівностями можуть залишатися оксидні, гідроксидні плівки чи адсорбовані речовини (рис. 2.20, г). При нагріванні гідроксиди розкладаються з виділенням газу, зокрема кисню. Утворене надлишкове тиснення — так званий "розпирний ефект" $F_{рас}$ — зменшує контактний тиск, а вивільнений кисень повторно окиснює поверхні, заважаючи збільшенню площі контакту. Це призводить до зростання контактної опору і, відповідно, підвищення температури в зоні контактів. Після вимкнення струму, зняття зусилля та підйому електрода), утворені локальні зв'язки руйнуються під дією пружних сил, що виникли через деформацію мікровиступів, а також через розпирний ефект і механічні зсуви. На електродах залишаються частинки металу, що переносилися під час зварювання внаслідок дифузії або механічного впливу. Активність цих процесів значною мірою залежить від співвідношення твердості металу електрода і зварюваного матеріалу. Наприклад, м'який метал (як-от алюміній) легко прилипає до твердих електродів, чого практично не спостерігається під час зварювання сталі.

Обладнання

Для зварювання стабілізаторів використовується зварювальний автомат на базі машини точкового зварювання K242 розробки і виробництва ІЕЗ ім.Патона НАН України. Основні технічні характеристики зварювальної машини:

- Потужність к.з - 450 кВА

- Потужність при ПВ 20% - 310 кВА
- Максимальний зварювальний струм 55 кА.
- Напруга вторинного контуру 4 - 10 В.
- Зусилля зварювальне 10000 Н.
- Зусилля ковочне 18000 Н.
- Продуктивність 5 зварювань/хвилина
- Витрати повітря при 6 атм. - 200 літрів/хвилину.
- Витрати води на охолодження - 30 літрів/хвилину

При приварці крил до штоку стабілізатора використовується спосіб контактного точкового зварювання з використанням штампованих рельєфів на поверхні крила. Це дозволяє за одну операцію зварювання отримати три крапки розміром 10×6 мм з глибиною проплавлення 5 мм, що забезпечує нормативну механічну міцність на зріз зварного з'єднання на рівні 20000 Н.

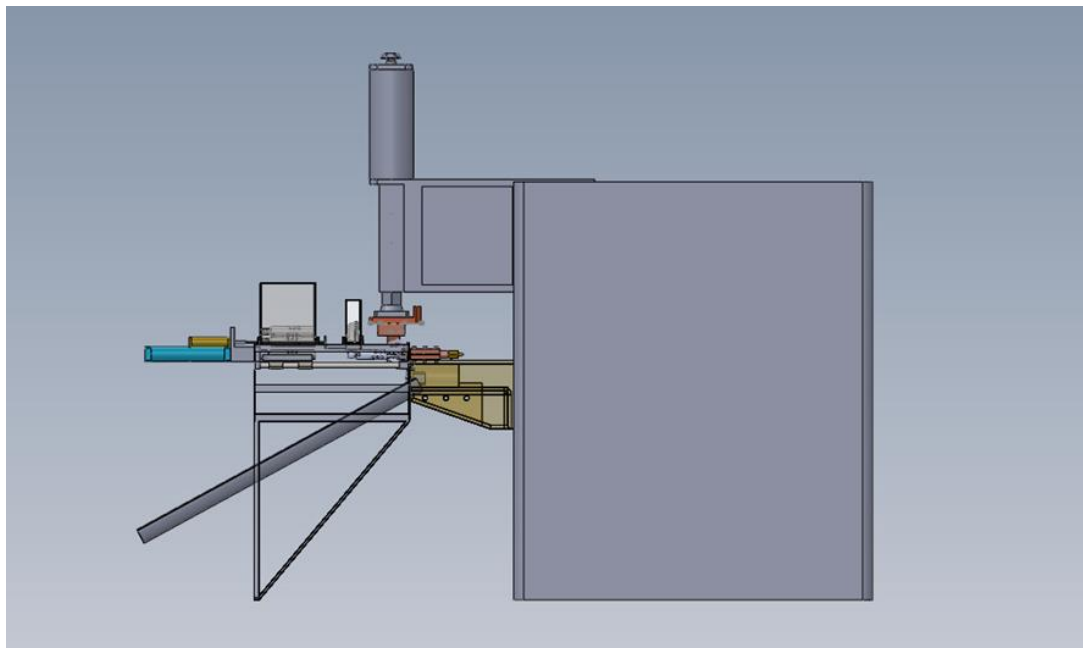


Рис 1.6. Модель установки автоматичного зварювання.

Зварювальний автомат забезпечує подачу в операційну зону штоків і крил з накопичувачів, проведення по заданій програмі циклу зварювання з реєстрацією і автоматичною стабілізацією основних параметрів зварювання і контролем якості зварного з'єднання.

Трубки хвостовиків знаходяться в накопичувачі 1. На першому етапі за сигналом від ПЛК спрацьовує пневматичний клапан живлячий пневмоциліндр і хвостовик подається в зону зварювання одягаючись на нижній електрод зварювальної машини.

Крила знаходяться в накопичувачі 2, після подачі хвостовика за сигналом ПЛК спрацьовує пневмоциліндр подачі крила і перше крило штовхачем подається в зону зварювання і фіксується на верхньому електроді.

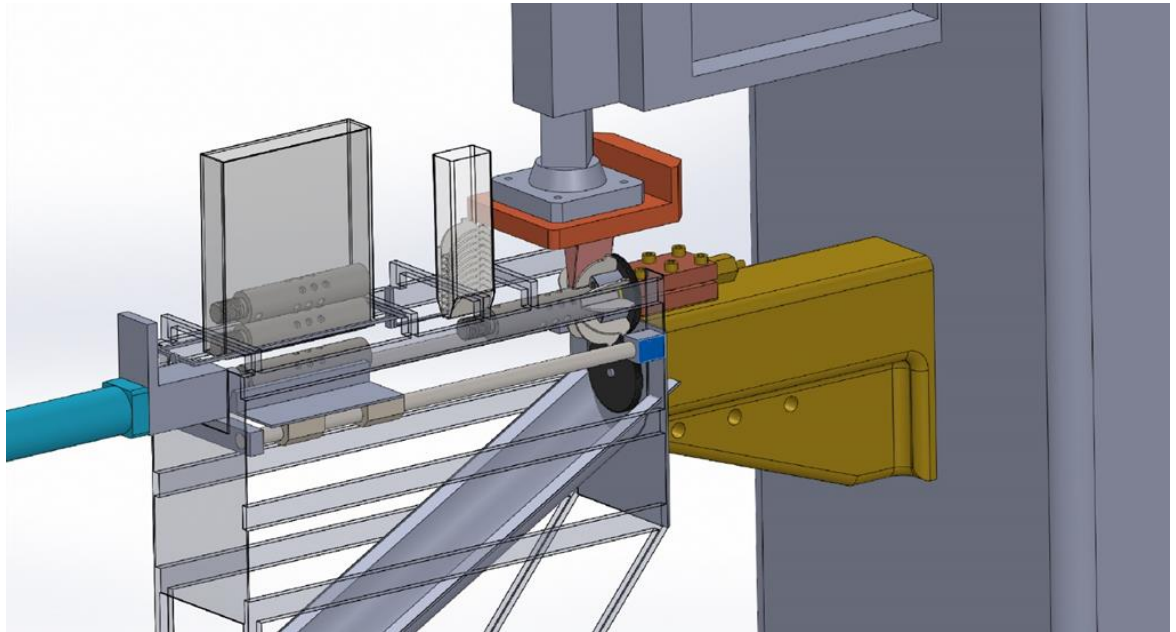


Рис 1.7.Ілюстрація процесу.

За сигналом з ПЛК контролер КСУ керуючий зварювальною машиною виконує алгоритм зварювання. Спрацьовують зварювальний і ковочний пневмоклапани зварювальної машини, верхній електрод з крилом опускаються на хвостовик.

За методикою з джерела [16] для виробу технологами була розроблена наступна циклограмма процесу зварювання.

Прикладанням ковочного зусилля проходить етап попереднього стиснення величиною 15000 Н, з метою стабілізації перехідного опору між деталями. На другому етапі відключається ковочне зусилля і включається зварювальне величиною 9000 Н. КСУ відкриває тиристори в первинні обмотці зварювального трансформатора.

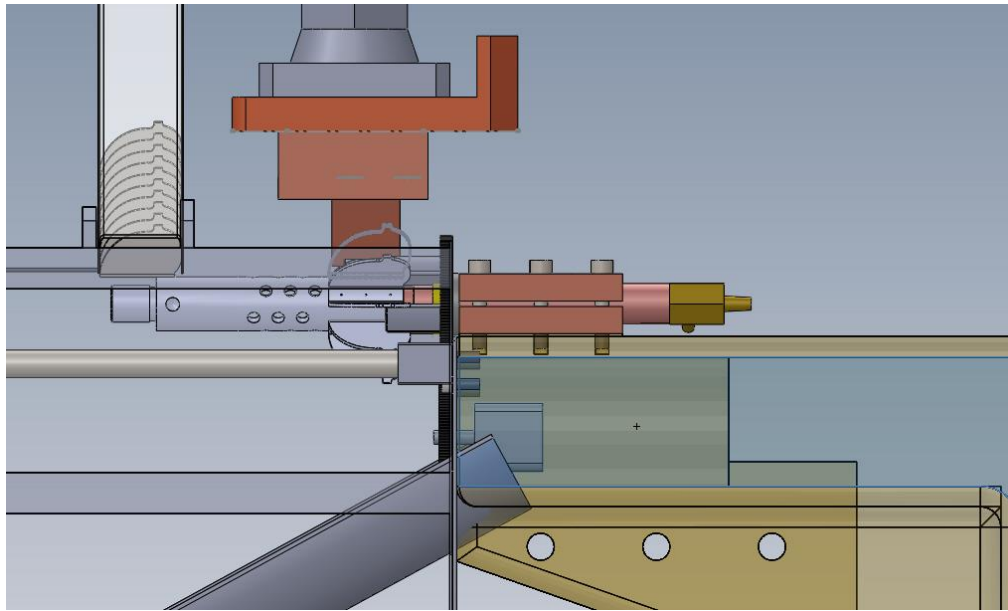


Рис 1.8 .Ілюстрація процесу 2

Проходить перший імпульс зварювання величиною 50 кА. З метою запобігання виплесків розплавленого металу перші 0,08 с зварювальний струм повільно наростає від 0 до заданого значення. Тривалість імпульсу зварювального струму становить 0,32 с. За цей час формують три розплавлених ядра 10×6 мм з глибиною проплавлення 5 мм. Після закінчення струму зварювання знову включається підвищене ковочне зусилля з метою запобігання утворення кристалізаційних тріщин в остигаючому металі. Внаслідок того, що хвостовик виготовляють з сталі 40Х або сталі 45, а крила з сталі 20 після зварювання внаслідок великої швидкості охолодження на межі сплавлення двох сталей утворюється мартенситні структури загартування. Через це необхідно проводити додаткові імпульси відпалу

Після зварювання першого крила стабілізатор обертається на 72° кроковим двигуном. Положення стабілізатора контролюється датчиками положення, що дають дозвіл на зварювання. Механізму подачі подає друге крило і операція зварювання повторюється. Після приварювання п'ятого крила готову деталь знімається з нижнього електроду і транспортується в бункер-накопичувач.

1.3. Постановка задачі автоматизації.

Результатом процесу контактного зварювання є отримання на виході зварювального з'єднання, заданої міцності та допустими ступенем деформації оперення, ці параметри значно впливають на процесу подальшої експлуатації такого виробу.

Кінцевим результатом процесу зварювання контакту є виробництво зварених швів з високою механічною міцністю, що впливає відповідно до якості кінцевого продукту. Найважливіші технічні параметри в процесі - це зварювальний струм, точність та стабільність, теплова ефективність, глибина проплавлення, форма зони зварювання та якість зварювання.

У не автоматизованій системі управління струм зварювання визначається шляхом грубого регулювання напруги живлення або за допомогою недостатньо точних контактних регуляторі. Це не так точно, струм обробки нестабільний. Це, в свою чергу, може призводити як до недостатнього прогріву металу (що формує слабке з'єднання), так і до його перегріву, коли з'єднання втрачає механічну цілісність. У результаті виникають дефекти, що потребують повторної обробки або ведуть до браку.

Вдосконалити систему автоматизації установки контактного зварювання можна шляхом стабілізації зварювального струму за допомогою тиристорного регулятора. Такий підхід дозволяє плавно регулювати подачу енергії у процесі зварювання, реагуючи на зміни опору в зоні контакту. Застосування зворотного зв'язку за струмом у поєднанні з фазоімпульсним керуванням тиристорами забезпечує стабільну подачу енергії протягом всього зварювального циклу.

Результатом вдосконалення є підвищення точності керування тепловим режимом, зменшення кількості браку та покращення повторюваності процесу .

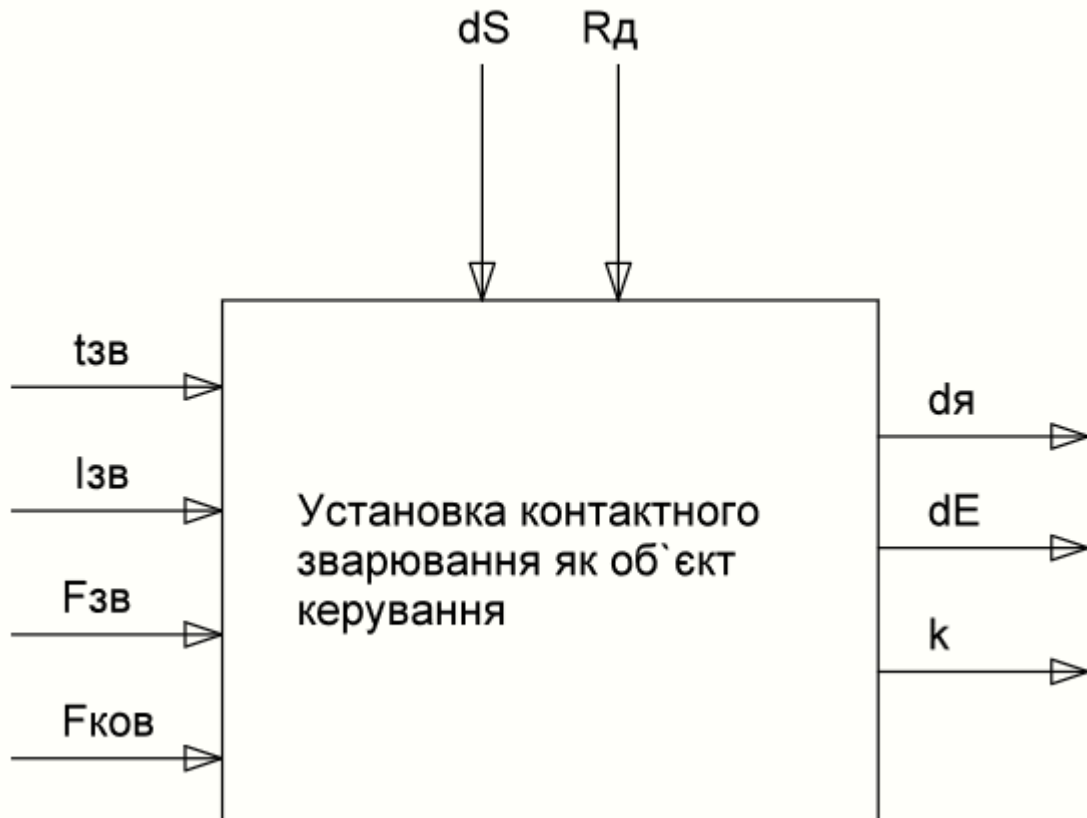


Рис 1.9. Параметрична зварювальної установки як об'єкта керування

Отже, *регульованими* (вихідними) величинами для даного процесу є діаметр литого ядра зварювального з'єднання $dя$, деформація виробу dE і рід кристалізації металу k ; *збурюючими* – опір деталі та його зміни під час нагріву $Rд$, теплове розширення металу dS , *регулюючими* (вхідними) величинами є періоди зварювання, ковки $tзв$, тиск електродів під час проходження струму $Fзв$, тиск після $Fков$, зварювальний струм $Iзв$

Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування зварювальним струмом.

Система складається з **поясу Роговського, мікроконтролера та тиристорного контактора КТ-12**. Пояс Роговського генерує імпульс напруги, пропорційний зміні зварювального струму. Цей сигнал проходить через аналоговий інтегратор, формуючи напругу, пропорційну миттєвому значенню струму. Мікроконтролер, отримуючи

порівняльний сигнал (через компаратор або логіку порогового спрацювання), визначає момент відкриття тиристора. Керуючи фазою включення тиристора КТ-12 в мережевому циклі, система підтримує заданий рівень зварювального струму, забезпечуючи стабільність і повторюваність процесу.

Функціональна схема складається з наступних елементів:

ЕЕ – датник струму, - Вимірювальний трансформатор струму, виконаний у вигляді довгого замкнутого соленоїда з довільною і практично замкненою формою і рівномірною намотуванням, один з висновків якої приведений до іншого через вісь соленоїда.

ЕС- керуючий елемент. АТ89S8252 — це 8-бітний мікроконтролер сімейства 8051 з 8 КБ Flash-пам'яті, 256 байтами RAM, 2 КБ EEPROM та тактовою частотою до 24 МГц. Він має 32 лінії вводу/виводу, UART, SPI, три таймери й підтримує внутрішнє програмування, що робить його придатним для простих керуючих систем.

Е- виконавчий механізм. Контактори тиристорні типа КТ-12-1, призначені для комплектації точкових, шовних та рельєфних контактних зварювальних машин та служать для комутації та керування однофазним струмом промислової частоти за наявності блоку керування із синхронним включенням зварювального струму.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ.

2.1. Математичні моделі для прогнозування якості зварних з'єднань

Розробку математичної моделі процесу контактного зварювання проводимо за методикою, що розроблена авторами досліджень [14].

Під час контактного точкового зварювання багато зовнішніх і внутрішніх чинників впливають на результат — як відхилення параметрів режиму зварювання та

технологічні особливості. Спроби виділити один ключовий параметр для оцінки якості з'єднання не принесли результату: такий погляд не дозволив створити ефективні методи контролю та регулювання процесу точкового зварювання.

Причина полягає у тому, що на зварювальний процес впливають одночасно багато факторів без явного лідерства серед них и один з них не є вирішальним. Атже для точного опису цього процесу потрібно створити математичну модель, яка враховуватиме всі основні параметри разом груповий вплив кожного з них на інші параметри. Проте спроби побудувати такі моделі на основі лише теоретичних знань часто призводять до складних та не дуже точних математичних залежностей. Одна з головних складностей полягають у тому, що досить складно точно описати взаємодію між електричними, тепловими та механічними процесами у зварення для досягнення необхідної точності.

З практичної точки зору отримання значень за допомогою експериментально-статистичних методів часто є більш практичним. Ці методи дозволяють визначити, на основі результатів вимірювань, параметри, які визначають перебіг процесу, зокрема якість зварного з'єднання, у найоптимальніш.

Регресивна модель, яка є рівнянням, що представляє звязок між якістю з'єднання та ключовими параметрами процесу, створюється з використанням цих даних. Математична формула, отримана таким чином, є виключно формальною і не може бути безпосередньо пов'язана и теорією поза межами експериментальних даних. У таких моделях ефекти всіх інших невимірюваних факторів розглядаються як випадкові похибки. Мета полягає в тому, щоб розробити таку модель, для якої ці похибки через потенційні зміни режимів і технологічних параметрів не перевищують допусків на точність контролю якості зварених з'єднань, встановлених підприємством. Перші багатофакторні математичні моделі процесу контактного точкового зварювання мали вигляд:

$$y=f(x_1,x_2,\dots,x_n) \quad [2.1]$$

де:

y — показник якості зварної точки (наприклад, діаметр литого ядра дя або глибина проплавлення),

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — поліном другого порядку від змінних x_1, x_2, \dots, x_n ,
 x_1, x_2, \dots, x_n , — параметри процесу (зазвичай середнє зусилля стискання електродів F протягом імпульсу та енергія Q , що виділяється у зварному контакті).

Такі моделі були розроблені для автоматизованого контролю процесу за допомогою локальних пристроїв. Промислові випробування підтвердили доцільність використання цих моделей у виробництві.

Структури моделей інших сплавів були різними.

У зварювальному цеху під управлінням АСУ ТП можна зварювати вироби з різною структурою сплаву в той самий день. У зв'язку з цим були розроблені моделі постійної структури для зварних точок литого ядра в АСУ ТП у випадку зварювання виробів із

сплавів АМГ-6, МА2-І, Д-16Т та 01420

$$d_{\text{я}} = a_0 + a_1 * F + a_2 * Q + a_3 * Q^2 \quad [2.2]$$

де:

a_0, a_1, a_2, a_3 — коефіцієнти, які залежать від марки сплаву та товщини зварюваних деталей і визначаються на основі експериментальних даних; F — зусилля стискання електродів; Q — енергія, що виділяється в зварювальному контакті.

Таку структуру моделей було обрано тому, що, згідно з експериментальними даними, нестабільність зусилля стискання F у межах допустимих відхилень менше впливає на діаметр литого ядра, ніж коливання значення енергії Q .

Точність прогнозування діаметра ядра за моделлю (1.2) досліджувалася під час зварювання на низькочастотних точкових машинах деталей зі сплавів АМГ-6 та МА2-І товщиною: 1+1, 1,5+1,5, 2+2, 2,5+2,5, 3+3мм,

а також на конденсаторних машинах для деталей зі сплавів ДІ6Т та 01420 товщиною: 1+1,2, 1,2+1,2, 1,2+1,5, 1,5+1,5мм.

Середня відносна похибка прогнозу за цими зусилля стискання на $\pm 20\%$,

зміни радіусу заточення електродів на $-25\%...+50\%$, відхилення кроку постановки точок на $\pm 25\%$ від оптимальних значень зміни контактного опору в межах допусків.

моделями не перевищувала 7% навіть за умов: відхилення зварювального струму на $+5\%...-15\%$,

Зрештою, та ж сама математична модель точкового зварювання зазначених навчальних сплавів на низькочастотних та ємнісних машинах (навчальний режим) дозволить цим машинам працювати в автоматичній системі керування (як один для всіх) і єдиний алгоритм контролю якості зварювань машин МТПП, МТВ, МТК також.

Для того, щоб отримати коефіцієнти в моделі (2.1) методом регресійного аналізу, необхідна досить багата база експериментальних даних (близько 40 точок). Це, очевидно, не готове до виробництва. Крім того, метод ізоморфного перетворення забезпечує альтернативу для зменшення кількості експериментів та дозволяє становити математичну модель процесу СЗ на основі неповного (мінімального) масиву експериментальних даних.

$$Q_{бп}, a_{бб}, d_{бп} - d_{бб}; a_{іп}, a_{іб}, f_{б}, f_{і}; a_{іп}^*, a_{іб}^* \cdot \frac{Q_{б}}{Q_{і}}; a_{іп}^{**}, a_{іб}^{**} \cdot \frac{Q_{б}^*}{Q_{і}^*} \quad [2.3]$$

де: індекс «б» (базовий) означає коефіцієнти та оптимальні значення діаметра литого ядра і параметрів режиму для вже відомої (базової) моделі;

індекс «і» (ізоморфний) стосується відповідних величин, отриманих в результаті ізоморфного перетворення.

Однак ізоморфне перетворення може працювати лише для ситуації, в якій змінюються параметри режимів або еквівалентна товщина з'єднаних частин.

Коли нові матеріали зварюються у нові вироби, наприклад, базові моделі для нового матеріалу повинні спочатку бути виведені за допомогою звичайних статистичних методів.

Рекомендації. Враховуючи експериментальні дані про динаміку елементів саморегульованої системи, при формуванні моделі ми рекомендуємо використовувати

мінімальний набір натурних експериментів з авторегулятором, щоб використовувати оптимальний алгоритм одноланкової ідентифікації.

Спільне використання цього алгоритму та методу ізоморфного перетворення дозволяє побудувати промислові математичні моделі типу (2.1) для процесу зварювання безпосередньо — як в переході між режимами зварювання і товщиною частин, так і в переході між марками сплавів.

$$d_{\text{оп}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K d_{\text{ri}}; \quad F_{\text{оп}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K F_i; \quad Q_{\text{оп}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Q_i \quad [2.4]$$

де: d_{ri}, F_i, Q_i — значення відповідних параметрів у кожному досліді; K — кількість проведених дослідів.

Відповідно до формул 1.3, за значеннями d_n, F_n, Q_n

Розраховується ізоморфна модель. Для уточнення цієї моделі проводиться експеримент за планом 2^2 , що охоплює необхідну область визначення моделі. Зокрема, змінюється діаметр литого ядра від мінімально допустимого до критичного значення, на якому виникає виплеск, при варіюванні зусилля стиснення в межах від

$$0,8F_n \text{ до } 1,2F_n/$$

З урахуванням збільшення швидкості охолодження, ізоморфна модель /1.2/ алгебраїчно перетворюється до наступного вигляду:

$$d_Q = d_n + b_1(F - F_n) + b_2(Q - Q_n) + b_3(Q - Q_n)^2 \quad [2.5]$$

Коефіцієнти

b_1, b_2, b_3 в моделі (2.3) уточнюються після кожного

N -го досліді за формулою:

$$b_i(N) = b_i(N - 1) + \frac{\Delta d_Q(N)}{d(N) \sum_{i=1}^3 \omega_i x_i(N) \omega_i x_i(N)} \quad [2.6]$$

де: $\Delta d_Q(N)$ — похибка прогнозування N -му досліді, Ω_i — масштабні коефіцієнти нормалізованих змінних, обрані пропорційно b_1, b_2, b_3 із моделі (2.4).

З урахуванням похибок вимірювання вхідних і вихідних параметрів, для кожного кроку може бути розраховане значення $\lambda(N)$:

$$\lambda(N) = \frac{\sum_{i=1}^3 \omega_i x_i(N) [d_i^2 x_i^2]}{[\Delta d_e(N)]^2} \quad [2.7]$$

де: Δd — похибка вимірювання діаметра литого ядра (зазвичай близько 0,05 мм),

$\Delta \Sigma x$ — сумарна приведена до виходу похибка вимірювання параметрів режиму (не перевищує 2,5%, у дослідженому діапазоні товщин — від 0,1 мм до 0,2 мм).

2.2. Визначення передатної функції процесу контактного зварювання для каналу керування зварювальним струмом.

Визначимо такі параметри передатної функції зварювального процесу для каналу керування зварювальним струмом, як час, коефіцієнт передачі кут та постійна часу об'єкта T_{ou} .

У процесах контактного точкового зварювання управління струмом здійснюється із застосуванням тиристорного регулятора, що дозволяє швидко та точно змінювати значення струму з кроком в один період мережі (20 мс при частоті 50 Гц).

Керований параметр — це діюче значення струму, що визначається кутом відкриття тиристора на первинній обмотці трансформатора. Математична залежність для розрахунку I_{rms} має вигляд:

$$I_{rms}(a) = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot R} * \sqrt{\frac{1}{\pi} * (\pi - a + \frac{\sin(2a)}{2})} \quad [2.8]$$

Де $U_m = 9.5$; $R = 122$ мкОм; a — кут відкриття тиристора (радіани).

Для побудови табличної залежності я розбив діапазон кута $a \in [10^\circ, 160^\circ]$ на 200 рівних кроків (кожен крок відповідатиме одному рівню керуючого сигналу), значення

можна подивитися в додатку 5. Для кожного значення рівня керування розраховали відповідний струм за допомогою формули [2.8]

Знаючи струм для кожного рівня керування, можна побудувати лінійне співвідношення між керуючим сигналом, напругою та струмом на Тобто коефіцієнт передачі виконавчого механізму можна визначити як зміну снапруги ΔU_{rms} , що відповідає кожному кроку керуючого сигналу (від 1 до 200). Керуючий сигнал с мікроконтроллеру буде визначатися періодом скважності широтно-імпульсної модуляції, в період низького потенціалу ШІ-Модуляції тиристор буде в закритому стані.

Через властивості та сінусоїдальну форму змінного струму для регулювання зварювальним струмом не можливо напряму використовувати як мінімальну одиницю сигналу час, тому й була побудована таблиця умовних кроків,

Для визначення передатної функції процесу зварювання для каналу керування зварювальним током був використаний графічний метод.

Тривалість зварювального імпульсу становить приблизно 0.2 с, що відповідає 10 періодам мережі. У системі автоматичного регулювання струму тиристорним перетворювачем одним з визначальних факторів є швидкодія та коректна побудова зворотного зв'язку

Було проведено експериментальне визначення сталої часу тиристорного перетворювача. Для цього здійснено реєстрацію перехідного процесу зміни струму навантаження при одиничному впливі на керуючий сигнал. Аналізуючи часову діаграму зміни струму, за формою експоненційного зростання було визначено часовий інтервал, за який струм досяг приблизно 63% від свого усталеного значення. Цей інтервал умовно прийнято за сталу часу

Оцінка проводилася в робочих умовах з використанням осцилографа марки Hantek 6254BD, що забезпечило прийнятну точність для подальшого інженерного

аналізу. Отримане значення сталої часу враховувалося при розрахунку передатної функції тиристорного регулятора струму

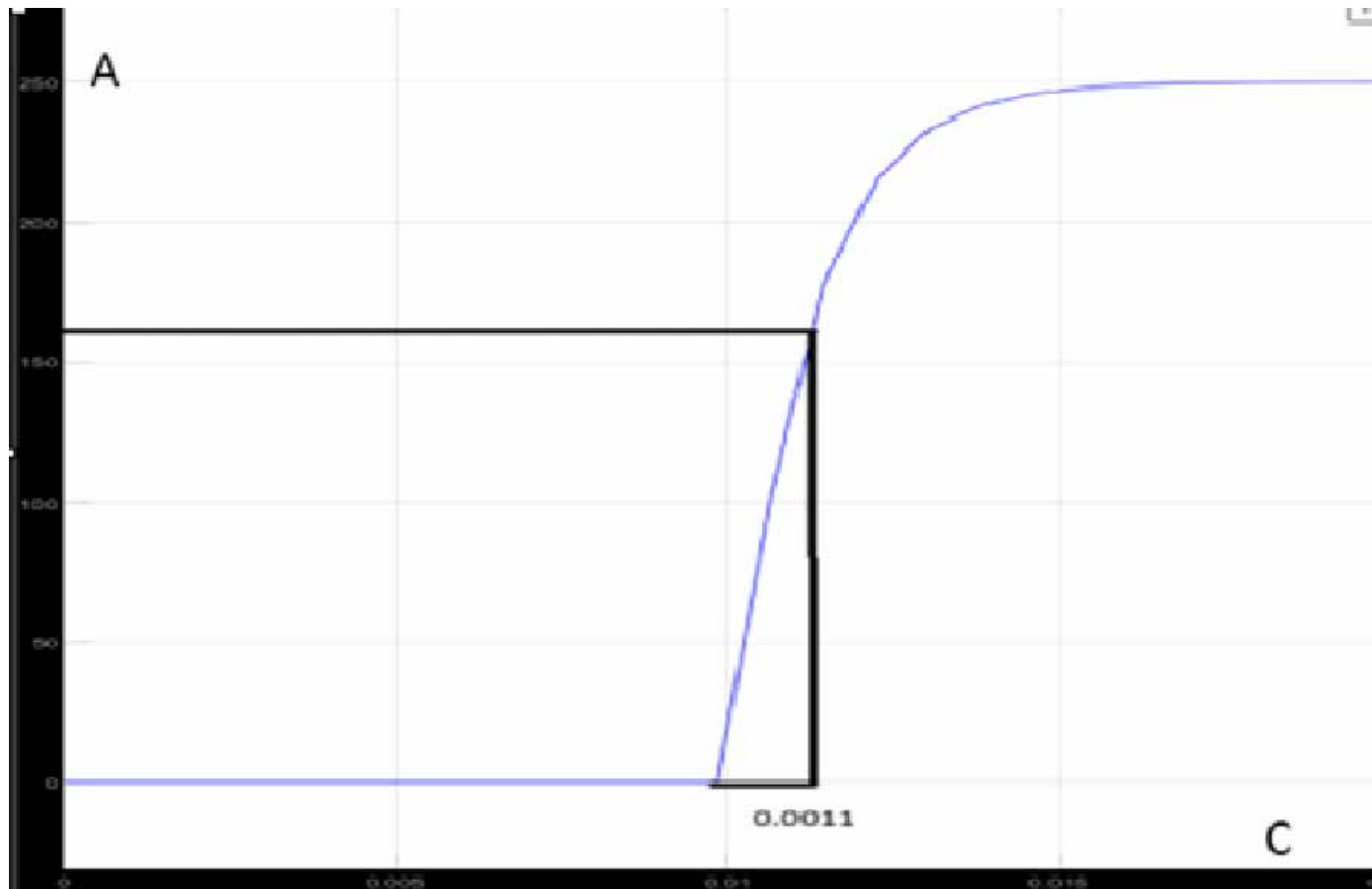


Рис 2.2. Крива розгону зварювального струму. Вертикальна шкала [А], горизонтальна [секунди].

$$T=0.0011 \text{ c}$$

$T=0.0011 \text{ c}$, що дозволяє вихідній величині (струму) досягати встановленого значення приблизно за один перехідний процес (в межах одного періоду мережі). T .

Таким чином, обрана постійна часу відповідає часу формування дійсного значення струму, забезпечує стійку та ефективну роботу системи в умовах впливу затримки.

Передатна функція буде мати вигляд:

$$W_{OK}(s) = \frac{dI/dU}{0.0011s+1} = \frac{250/0.03}{0.0011s+1} = \frac{8333}{0.0011s+1}, \left[\frac{A}{V}\right] \quad [3.1]$$

РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

3.1. Вибір алгоритму керування

При розробці автоматичних систем регулювання, розуміння динаміки об'єкта керування є критично важливим. Аналіз часових характеристик, таких як стала часу та час запізнення, дозволяє ще на етапі проектування підібрати оптимальний алгоритм керування. Правильний вибір структури регулятора забезпечує стабільну роботу системи та швидке досягнення бажаного результату.

Якщо $\tau/T > 1$, ($0.02/0.0022=9.04$), то надають перевагу імпульсному алгоритму керування,

Імпульсний алгоритм керування це алгоритм в якому керування здійснюється короткочастними сигналами(імпульсами) в певний момент часу. Імпульсний метод керування частіше за все обумовлений характером дії системи. В данній роботі роботі як сигнал керування використовується широтно-імпульсна модуляція.

На тиристорний контактор подається синхронізований з частотою мережі сигнал спостійної частоти 100Гц і амплітудою 24 В, в якому періодом низького потенціалу ініціюється та задається кут затримки вмикання тиристорів.

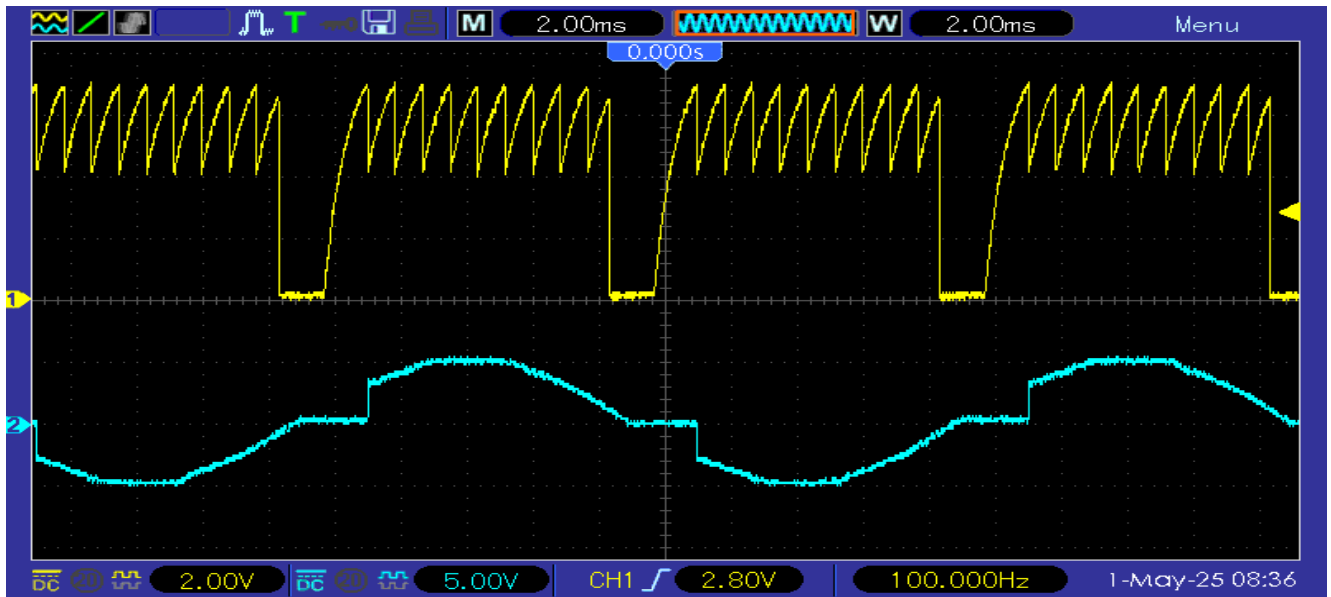


Рис 3.1. Осцилограма Керуючий сигнал-Струм

В данній роботі було прийнято рішення реалізувати імпульсну систему на основі Пропорційно-інтегрального-дифференційного алгоритму керування.

ПІД-регулятор підходить для тиристорного управління зварювальним струмом, оскільки забезпечує точне підтримання заданого значення струму в умовах змінного навантаження. Пропорційна, інтегральна та диференціальна складові дозволяють швидко реагувати на відхилення, усуваючи перерегулювання і коливання. Це забезпечує стабільність процесу зварювання та високу якість з'єднання.

Методика вибору найкращого алгоритму керування, з джерела [12] для певного об'єкта полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання

Для статичних об'єктів:

$$R_D = \frac{y_1}{K_{OY} \cdot y_{\text{МАКС}}}, \quad [3.2]$$

де K_{OY} – коефіцієнт передачі об'єкта керування;

$y_{\text{МАКС}}$ – максимальне допустиме збурення по навантаженню

y_1 – максимальне динамічне відхилення, %.

Проведемо розрахунки за умов наступних значень показників якості:

- максимальне динамічне відхилення $y_1 = 1\%$;
- допустимий час регулювання $t_p = 0.02$ с;
- перерегулювання за збуренням $\sigma = 0,5$;
- допустиме можливе значення збурення за навантаженням (у % переміщення регулювального органу) -20%

Величина динамічного коефіцієнту:

$$R_d = \frac{1}{0.0275 * 20} = 1.8 \quad [3.3]$$

Вибираємо для цього об'єкта перехідний процес із 20% перерегулюванням.

Щоб переконатись у правильності вибору алгоритму керування, треба обчислити час

регулювання, який порівнюють з вимогами технологів

$$t = \psi * \tau \quad [3.4]$$

де ψ – відносний час регулювання, що вибирається з таблиці, для статичного об'єкту із ПІД-алгоритмом керування ψ (додаток 1)

Отже $t_p = 7 * 0.01 = 0.07$ с, тобто час регулювання забезпечується

Перевіримо на виникнення при цьому статичної похибки

$$\frac{\Delta y}{k_{OY} \cdot U_{\text{МАКС}}} = 0,14, \quad \Delta y = K_{OK} * Y_{\text{МАКС}} = 0.0275 * 20 * 0.14 = 0.077$$

Умова $0.077 < 0.1$ виконується, тобто Пропорційний-Інтегрально- алгоритм керування задовольняє технологічні вимоги до процесу регулювання струмом в процесі контактного зварювання.

Процес зварювання є короткочасним та інерційним, що зменшує потребу в точній динамічній компенсації;

Експериментально було доведено, що допустима статична похибка на рівні половини кроку (± 125 А) є прийнятною для забезпечення якості зварного з'єднання;

ПД-регулятор має просту програмну реалізацію, достатню швидкодію та забезпечує необхідну статичну точність у асимптотичному наближенні

Отже, вибір ПД-регулятора є обґрунтованим і забезпечує задовільну якість регулювання при мінімальній складності реалізації.

3.2. Реалізація алгоритму керування

Згідно з описом функціональної схеми автоматизації (лист N1 графічної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи), система керування зварювальним стумом під час контактного зварювання складається з

- Мікроконтроллер, який обробляє сигнал з датника струму та генерує керуючий сигнал;
- чутливий елемент – вимірювальний трансформатор струму “пояс Роговського”;
- виконавчий механізм – спеціалізований тиристорний контактор;
- трансформатор контактної зварювання.

Вибір пуско-захистного обладнання, керування, комутації, сигналізації розглядається у розділі 5, вибір керуючого, чутливого елементів та виконавчого механізму викладений в наступному матеріалі 3-го розділу.

3.2.1. Вибір мікроконтролера.

Згідно із завданням на бакалаврську кваліфікаційну роботу, для реалізації системи автоматичного керування струмом тиристорного регулятора обрано мікроконтролер AT89S8252.

Atmel AT89S8252 — це малопотужний, високопродуктивний 8-бітний мікрокомп'ютер CMOS з 8К байт завантажуваної флеш-пам'яті, програмованої та стираної, лише для читання та 2 КБ EEPROM. Пристрій виготовлено з використанням технології енергонезалежної пам'яті високої щільності Atmel і сумісний із галузевим стандартом інструкцій 80C51 і розпиновкою. Завантажувана флеш-пам'ять на мікросхемі дозволяє програмній пам'яті

перепрограмувати в системі через послідовний інтерфейс SPI або за допомогою звичайного програматора енергонезалежної пам'яті. Завдяки поєднанню універсального 8-розрядного ЦП із можливістю завантаження

Flash на монолітному чіпі Atmel AT89S8252 — це потужний мікрокомп'ютер, який

надає дуже гнучке та економічно ефективне рішення для багатьох вбудованих програм керування

Технічні характеристики мікроконтролера AT89S8252 наведені в додатку 2

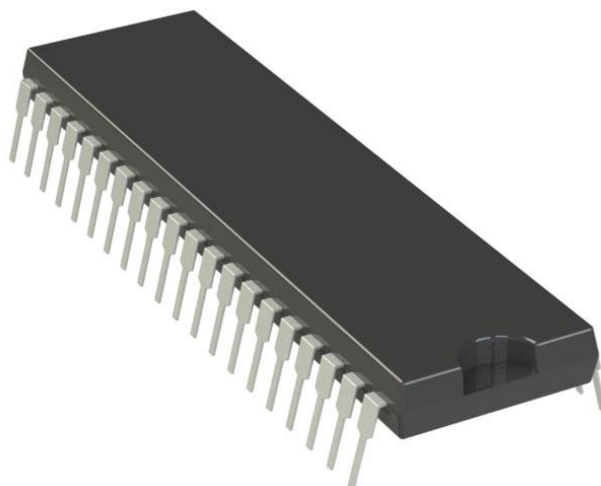


Рис 3.2. Atmel AT89S8252

Розробка програми реалізації алгоритму керування струмом зварювання.

Розрахунок мінімального кроку фазозсуву в градусах та мікросекундах для керування тиристором з урахуванням 8-бітного діапазону:

У системі керування тиристором фазозсув задається 8-бітним числом, тобто від 0 до 255. Один півперіод мережі 50 Гц триває 10 мс і відповідає 180° . Отже, один крок фазозсуву становить:

$$dA = \frac{180}{256} = 0.702^\circ; \quad dt = \frac{10000 \mu s}{256} = 39 \mu s \quad [3.5]$$

Це означає, що кожна одиниця в таблиці фазозсуву відповідає 0.703° або 39.06 мкс затримки відкривання тиристора.

Для розробки програмного забезпечення мікроконтролерної системи було використано середовище Keil μ Vision 5, яке є одним із найпоширеніших середовищ розробки для мікроконтролерів архітектури 8051 (у тому числі сумісного мікроконтролера AT89S8252). Середовище забезпечує зручний інтерфейс для написання, компіляції, налагодження та симуляції коду на асемблері або мові C

Першим кроком при створенні програми потрібно створити проект та налаштувати target файл

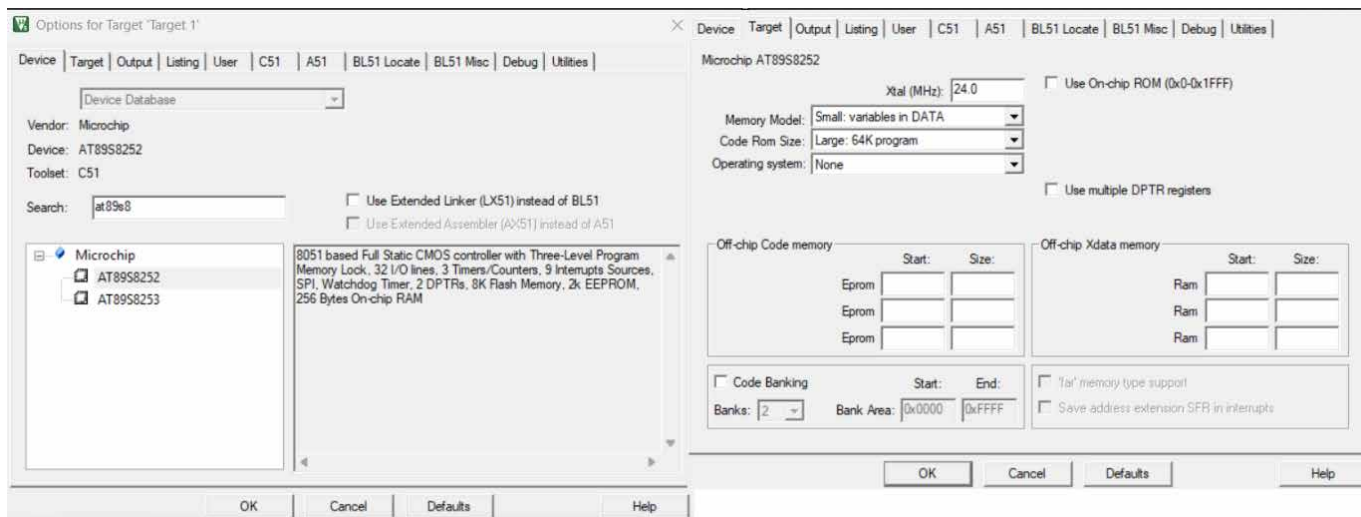


Рис3.3. Панель налаштування таргет файлу Keil uVision

Наступним кроком в дереві проекту створюєть бібліотека реєстрів(Header file.h) та сама програма на мові C,(C File.h).

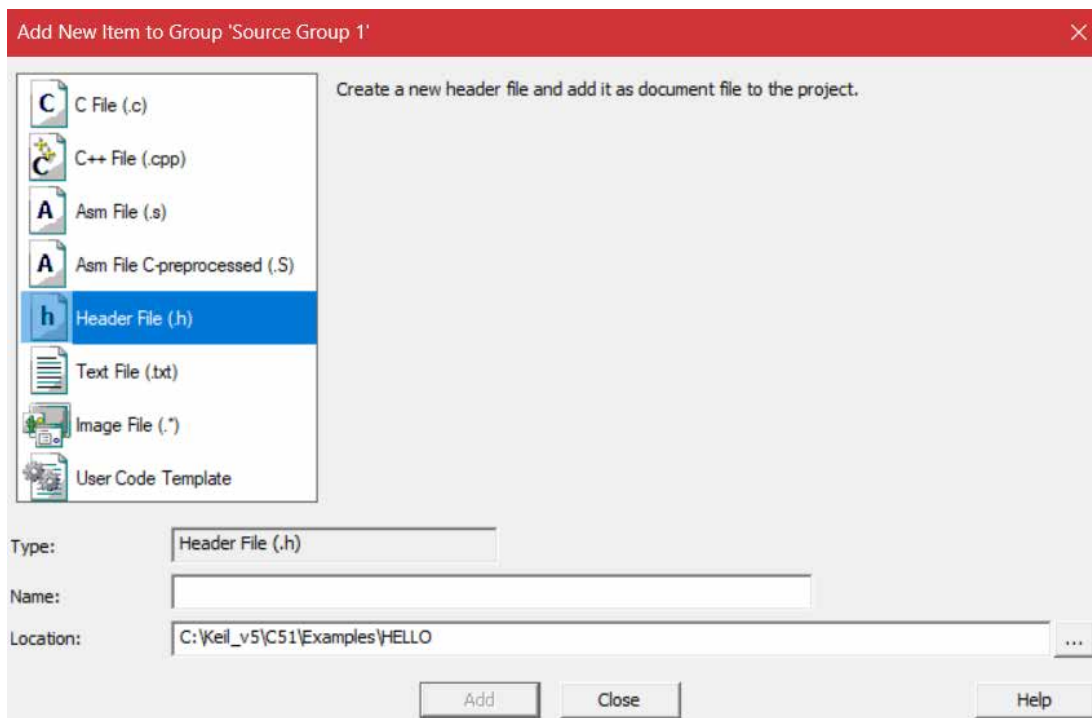


Рис3.4. Панель створення файлів Keil uVision

Далі створюємо програму на :

Опис алгоритму роботи програми

Програма мікроконтролера реалізує керування тиристором для стабілізації зварювального струму в процесі контактного зварювання. Алгоритм роботи складається з кількох логічних етапів:

Ініціалізація системи

- На початку роботи мікроконтролер виконує ініціалізацію всіх необхідних периферійних пристроїв:
- Налаштовується таймер для формування затримки керуючого імпульсу з роздільною здатністю ~ 1 мкс (при частоті 20 МГц).
- Встановлюються порти вводу/виводу для кнопок регулювання, керування тиристором і виводу на LED-дисплей.
- Ініціалізується модуль АЦП для зчитування сигналу з датчика струму.
- Встановлюється переривання по нульовому переходу напруги (zero-crossing), яке синхронізує процес формування імпульсу керування тиристором

Зчитування еталонного значення струму

- Еталонне значення струму задається користувачем за допомогою двох кнопок: «+» (збільшити) і «-» (зменшити). Змінюючи значення, користувач впливає на фазовий зсув запуску тиристора, тобто на момент включення у кожному напівперіоді мережі.
- Після кожного натискання кнопки:
- Значення змінної SetCurrent збільшується або зменшується в межах допустимого діапазону.
- Нове значення виводиться на LED-дисплей.

Синхронізація з мережею 50 Гц

- Система синхронізується з мережею змінного струму через переривання на фронті синусоїди (нульовий перехід). У момент переривання виконується:
- Обнулення таймера;

- Затримка, що розраховується відповідно до різниці між вимірним і еталонним струмом;
- Після закінчення затримки формується імпульс керування тиристором тривалістю ~ 100 мкс.

Вимірювання струму

- У певний момент після вмикання тиристора мікроконтролер зчитує значення з АЦП, підключеного до датчика струму поясу Роговського. Це значення обробляється:
 - Переводиться у внутрішню одиницю вимірювання
 - Порівнюється з SetCurrent — заданим значенням;
 - На основі цієї різниці обчислюється фазовий зсув у мікросекундах:

Формування імпульсу на тиристор

- Після завершення затримки за фазовим зсувом:
- Встановлюється високий рівень на вихідний пін керування тиристором P1.0;
- Встановлюється таймер для затримки (тривалість імпульсу);
- Після цього рівень на керуючому виводі скидається.

Індикація та обслуговування користувача

- Паралельно з роботою основного циклу:
- Відбувається постійне оновлення значення на 7-сегментному LCD-дисплеї.
- Користувач може змінити значення струму під час роботи без перезапуску системи. Мікроконтролер постійно перевіряє натискання кнопок і оновлює відповідні параметри.

Лістинг програми: на мові C

```
#include <reg8252.h>

// ===== НАЛАШТУВАННЯ =====
#define BUTTON_INC_PIN 2 // Кнопка "більше" (P3.2)
#define BUTTON_DEC_PIN 3 // Кнопка "менше" (P3.3)
#define DISP_SEGMENTS P2 // Порт для сегментів індикатора
#define DISP_DIGITS P0 // Порт для вибору цифри (4 цифри, активні LOW)
```

```

#define THYRISTOR_PIN P1_0 // Вихід для керування тиристором
#define F_CPU 2000000UL // Частота процесора 20 МГц

// ===== ТАБЛИЦІ =====
const unsigned char alpha_table[] = {
30,37,42,46,50,53,56,59,61,63,65,67,69,71,73,75,77,79,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112,113,114,115,1
16,117,118,119,120,121,122,123,124,125,126,127,128,129,130,131,132,133,134,135,136,137,138,139,140,141,142,143,144,145,146,147,148,149,150,151,152,153,154,155,156,157,158,
159,160,161,162,163,164,165,166,167,168,169,170,171,172,173,174,175,176,177,178,179,180,181,182,183,184,185,186,187,188,189,190,191,192,193,194,195,196,197,198,199,200,20
1,202,203,204,205,206,207,208,209,210,211,212,213,214,215,216,217,218,219,220,221,222,223,224,225,226,227
};
const unsigned int Irms_table[] = {
254,252,251,250,249,248,247,245,244,243,242,241,240,239,238,236,235,233,232,231,230,230,229,228,227,226,225,224,224,223,222,221,220,219,218,217,216,215,214,213,212,210,20
9,208,207,206,205,204,202,201,200,199,197,196,195,194,192,191,190,188,187,186,184,183,182,180,179,177,176,174,173,172,170,169,167,166,164,163,161,159,158,156,155,153,152,1
50,149,147,145,144,142,140,139,137,136,134,132,131,129,127,126,124,122,121,119,117,116,114,112,110,109,107,105,104,102,100,99,97,95,94,92,90,89,87,85,84,82,80,79,77,75,74,72
,70,69,67,66,64,62,61,59,58,56,54,53,51,50,48,47,45,44,42,41,40,38,37,35,34,33,31,30,29,27,26,25
};
const unsigned char digit_to_7seg[10] = {
0x3F, 0x06, 0x5B, 0x4F, 0x66,
0x6D, 0x7D, 0x07, 0x7F, 0x6F
};

// ===== ГЛОБАЛЬНІ ЗМІННІ =====
unsigned int SetPoint = 500; // Заданий струм (0..1000)
unsigned char alpha_index = 30; // Початковий фазовий кут

// PID-регулятор
int error_integral = 0;
int prev_error = 0;
float Kp = 0.5;
float Ki = 0.05;
float Kd = 0.02;

// ===== ФУНКЦІЇ =====
unsigned int alpha_to_us(unsigned char alpha_deg) {
float deg_corr = alpha_deg * 0.702f;
return (unsigned int)(deg_corr * (20000.0f / 360.0f));
}

void Delay_ms(unsigned int ms) {
unsigned int i,j;
for(i=0; i<ms; i++)
for(j=0; j<120; j++)
}

unsigned int ADC_Read(void) {
ADC_CONTR = 0x81;
while ((ADC_CONTR & 0x10) == 0);
return (ADC_RES << 2) | (ADC_RESL >> 6);
}

void DisplayNumber(unsigned int num) {
unsigned char digits[4];
int i;
digits[0] = (num / 1000) % 10;
digits[1] = (num / 100) % 10;
digits[2] = (num / 10) % 10;
digits[3] = num % 10;
for(i=0; i<4; i++) {
DISP_DIGITS = ~(1 << i);
}
}

```

```

    DISP_SEGMENTS = digit_to_7seg[digits[i]];
    Delay_ms(2);
    DISP_SEGMENTS = 0x00;
}
DISP_DIGITS = 0xFF;
}

void CheckButtons(void) {
    static unsigned char last_inc = 1, last_dec = 1;
    unsigned char inc = (P3 >> BUTTON_INC_PIN) & 1;
    unsigned char dec = (P3 >> BUTTON_DEC_PIN) & 1;
    if (last_inc == 1 && inc == 0) {
        if (SetPoint < 1000) SetPoint += 10;
    }
    last_inc = inc;
    if (last_dec == 1 && dec == 0) {
        if (SetPoint > 0) SetPoint -= 10;
    }
    last_dec = dec;
}

// ===== PID-РЕГУЛЯТОР =====

void ControlLoop(void) {
    unsigned int adc_val;
    unsigned int Irms_actual;
    int delta, derivative;

    adc_val = ADC_Read();
    int i;
    for(i=0; i < sizeof(Irms_table)/sizeof(Irms_table[0]); i++) {
        if(Irms_table[i] <= adc_val) break;
    }
    Irms_actual = Irms_table[i];
    delta = (int)SetPoint - (int)Irms_actual;

    // Интегральна частина
    error_integral += delta;
    if (error_integral > 1000) error_integral = 1000;
    if (error_integral < -1000) error_integral = -1000;

    // Диференціальна частина
    derivative = delta - prev_error;
    prev_error = delta;

    // Обчислення PID-регулятора
    float control = Kp * delta + Ki * error_integral + Kd * derivative;
    alpha_index -= (int)control;

    // Обмеження фазового кута
    if (alpha_index < 30) alpha_index = 30;
    if (alpha_index > 165) alpha_index = 165;
}

void FireThyristor(void) {
    unsigned int delay_us = alpha_to_us(alpha_index);
    unsigned int i;
    for(i=0; i<delay_us*20; i++) __asm nop __endasm;
    THYRISTOR_PIN = 1;
    Delay_ms(1);
    THYRISTOR_PIN = 0;
}

```

```

}

// ===== ГОЛОВНА ФУНКЦІЯ =====
void main(void) {
    P0 = 0xFF;
    P2 = 0x00;
    P3 |= (1 << BUTTON_INC_PIN) | (1 << BUTTON_DEC_PIN);
    while(1) {
        CheckButtons();
        ControlLoop();
        FireThyristor();
        DisplayNumber(SetPoint);
    }
} }
}

Build started: Project: external0
Build target 'Target 1'
linking...
Program Size: data=10.0 xdata=0 code=161
"external0" - 0 Error(s), 0 Warning(s).
Build Time Elapsed: 00:00:00

```

Рис 3.5 Вихід програми

3.2.2. Вибір трансформатора.

1. Модифікований Трансформатор ТК-40.08-ЕП

Технічні характеристики трансформатора ТК-40.08-ЕП

Тип трансформатора	Ступені		Струм				Напруга	
	Число	Номінал	I _{2ном}	I ₂	I _{1ном}	I ₁	(U ₂₀) _{min} - (U ₂₀) _{max}	(U ₂₀) _n
ТК-40.08-ЭП	8	8	50 кА	20 кА	1300А	530А	4.3...8.6	8.6
Напруга	Потужність кВА		Опір обмоток мкОм			М-провід		

U1	S _{НОМ}	S	rГ	xГ	zГ	H, мм ²		
335V	360	160	11.2	27	29.3	250		

Шляхом зміни внутрішнього опору з 50 мкОм до 40, було збільшено номінальний струм вторинної обмотки до 50 кА.

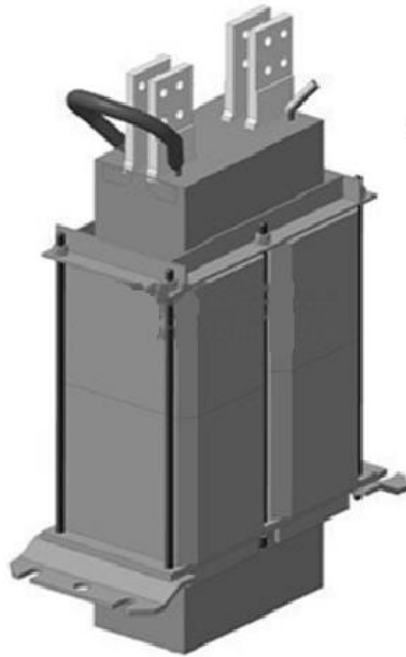


Рис 3.6. Трансформатор ТК-40.08-ЭП

При підключенні контуру зварювання до системи постачання зварювання використовується зварювальний трансформатор ТК.08-EP.

В цьому відношенні його тип обраний таким чином, щоб мати можливість забезпечити високу пікову силу струму (до 55 кА) на вторинній обмотці, в той час як струм на первинній обмотці становить 1300 А, що необхідно для забезпечення енергії для виконання контактного зварювання.

Трансформатор призначений для імпульсних процесів (наприклад, точкове й прихватне зварювання), де тривалість імпульсу (приблизно 0,2 с) значно коротша,

водночас локалізована потужність помітно вища. ТК.08-EP також зменшує втрати в міді та сердечнику для високої ефективності перетворення.

Опір первинної обмотки становить 1,5 Ом, що дозволяє обмежити активні втрати при струмах до 1300 А. Опір вторинної обмотки дуже малий - 80 мікроом (!), що критично для роботи з імпульсними струмами до 55 кА, щоб мінімізувати падіння напруги в вторинному контурі. Набір параметрів забезпечує ефективне використання енергії та добру стабільність, а також малі втрати.

Таким чином, використання ТК.08-EP для зварювального інструменту забезпечує необхідну надійність, електричну та термічну стабільність, а також дозволяє регульоване формування коротких теплових імпульсів з урахуванням динаміки процесу роликowego зварювання, що є особливо важливим для обробки високолегованих або тонколистової матеріалів. Технічні параметри трансформатора відповідають вимогам процесу.

3.2.3. Обґрунтування вибору чутливого елемента.

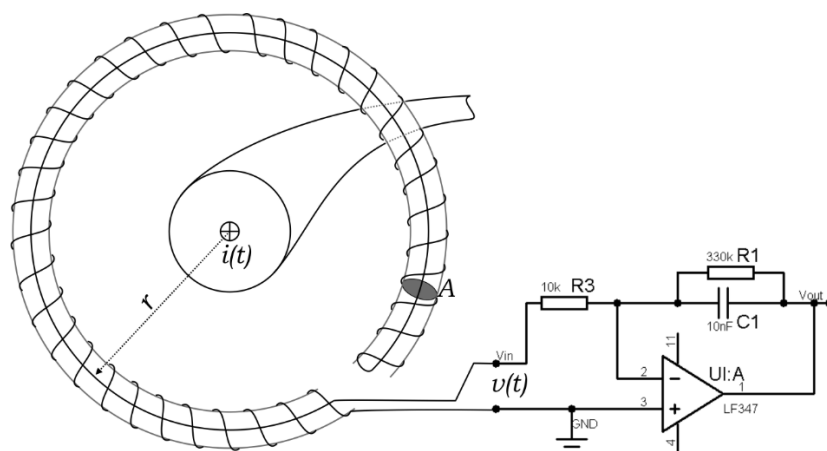


Рис 3.7. Пояс Роговського

Для вимірювання зварювального струму, який досягає амплітудного значення **55 кА** у вторинному колі трансформатора, у складі системи регулювання тиристорного зварювального контактора застосовано **пояс Роговського** — індуктивний безконтактний перетворювач струму, який генерує напругу, пропорційну швидкості зміни струму в провіднику. Цей тип датчика забезпечує точне, динамічне вимірювання без навантаження на силовий ланцюг, не потребує розриву провідника, не має насичення і не створює додаткових електромагнітних перешкод.

Амплітуда вихідної напруги пояса визначається залежністю:

$$U_{\text{вих}} = M * \omega * I_0 \quad [3.6]$$

де M – коефіцієнт взаємоіндукції, ω – кутова частота струму, I_0 = амплітуда зварювального струму А.

За умови амплітудної напруги 6 В на виході перетворювача, при максимальному струмі 55 кА та частоті 50 Гц (що відповідає мережевому живленню з синхронізованим тиристорним керуванням), кутова частота становить:

$$\omega = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ рад/с} \quad [3.7]$$

Тоді необхідне значення коефіцієнта взаємоіндукції:

$$M = \frac{U_{\text{вих}}}{\omega * I_0} = \frac{6}{314 * 55000} = 3.52 * 10^{-10} \text{ Гн} \quad [3.8]$$

Для отримання такого значення індуктивності використано конструкцію пояса Роговського з ефективною довжиною кола $l=25\text{см}$ (що відповідає охопленню провідника діаметром приблизно 70мм) і поперечним перерізом обмотки $A = 2.5 \text{ мкм}^2$. Кількість витків обчислюється рівнянням:

$$M = \mu_0 * \frac{N * A}{l}, \text{ отже } N = \frac{M * l}{\mu_0 * A} \quad [2.9]$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{(-7)} \text{ Гн/м.}, \text{ отже, } \frac{8.8 * 10^{(-11)}}{3.14 * 10^{(-12)}} = 28$$

Таким чином, конструкція передбачає **28 витків** обмотки на діелектричному кільці, що повністю охоплює струмопровідний провідник. Така реалізація забезпечує:

- достатній рівень вихідного сигналу (6 В),
- високий динамічний діапазон,
- мінімальну фазову похибку,
- повну гальванічну розв'язку з основною мережею.

Використання саме пояса Роговського дозволяє реалізувати високотемпературостійкий, електрично надійний та простий у виробництві струмовий датчик, придатний для довготривалої роботи в умовах потужного зварювального процесу.

Вихідна напруга такого датчика пропорційна похідній струму, тобто:

$$u(t) = M * \frac{di(t)}{dt} \quad [3.9]$$

де M — взаємодуктивність. У частотній області передатна функція пояса Роговського має вигляд:

$$W_{\text{рог}}(s) = M * s \quad [3.10]$$

Оскільки така характеристика є диференційною, для отримання сигналу, пропорційного самому струму, застосовується інтегруючий фільтр з передатною функцією:

$$W_{\Phi}(s) = \frac{1}{s} \quad [3.11]$$

Множення передатної функції пояса Роговського та інтегруючого фільтра дає:

$$W(s) = W_{\text{рог}}(s) * W_{\text{ф}}(s) = M \quad [3.12]$$

Підставив значення, отримаємо:

$$W_{\text{че}}(s) = 0.00011 M \quad [3.13]$$

Мінімальний час вимірювання(пів періода) дійсного значення змінного струму виразимо як ланку чистого запізднювання.

Підставив значення, отримаємо:

$$W_{\text{че}}(s) = 0.00011 * e^{-0.01s} \quad [3.14]$$

3.2.4. Обґрунтування вибору виконавчого механізму.

У даному проєкті для регулювання зварювального струму використовується тиристорний контактор КТ-12, що забезпечує безконтактне комутаційне регулювання зварювального струму, що дозволяє отримати високу швидкодію, надійність та довговічність роботи. Контактор працює на основі фазового керування тиристорами, що дозволяє плавно змінювати середнє значення струму шляхом зміни кута відкриття.

Завдяки цьому досягається точне дозування енергії, що подається на зварювальну зону, відповідно до технологічних вимог.

Контактори тиристорні типів КТ-12-1 призначені для комплектації точкових, шовних та рельєфних контактних зварювальних машин і служать для комутації та керування однофазним струмом промислової частоти за наявності блоку управління із синхронним включенням зварювального струму. Керування контактором здійснюється від синхронних регуляторів зварювання, що видають на виході однополярні симетричні імпульси з частотою, що в два рази перевищує частоту мережі, з параметрами:

- Струм $1,5 \pm 0,1$ А;
- напруга 20 ± 5 (на опорі $6,2 \pm 5\%$ Ом);
- Тривалість 200 ± 100 мкс (на рівні не нижче 15 В).

При цьому забезпечується регулювання струму на первинній обмотці зварювального трансформатора машини в межах від 2-4 А до найбільшого значення

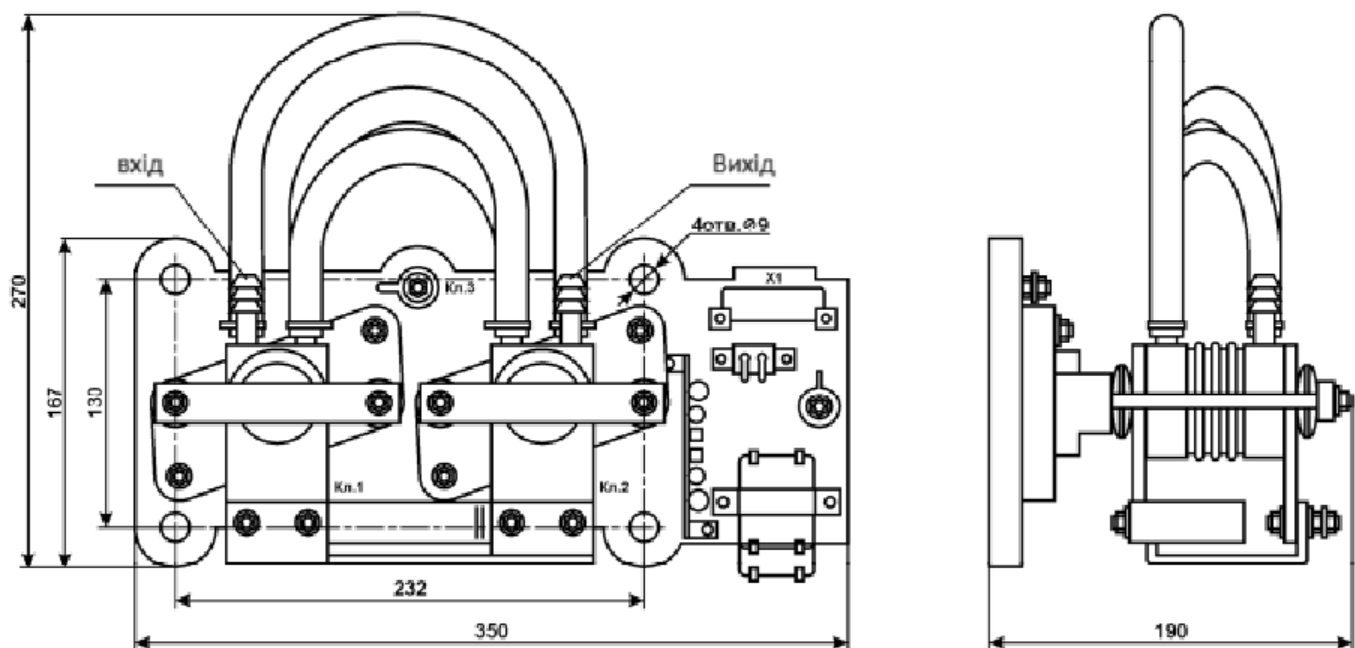


Рис 3.8. Тиристорний контактор КТ-12

Тиристорні контактори типу КТ-12-1 призначені для комплектації точкових, шовних і рельєфних контактних зварювальних машин та слугують для комутації й керування однофазним струмом промислової частоти за наявності блоку керування із синхронним вмиканням зварювального струму.

Керування контактором здійснюється від синхронних регуляторів зварювання, які видають на виході однополярні симетричні імпульси з частотою, що вдвічі перевищує частоту мережі, з такими параметрами: струм: $1,5 \pm 0,1$ А, напруга: 20 ± 5 В (на опорі $6,2 \pm 5\%$ Ом), тривалість: 200 ± 100 мкс (на рівні не нижче 15 В). Технічні характеристики тиристорного перетворювача КТ-12.

Найменування	Напруга живлення, та її частота	Номінальний зварювальний струм при ПВ=5%б і часу імпульсу 2с
КТ-12-1	220-380V, 50-60Гц	2200А

Номінальний струм первинної обмотки трансформатора становить 1300 А. Обраний тиристорний контактор КТ-12 має номінальний струм 2200 А, що забезпечує необхідний запас (не менше 1.5)

$$K = \frac{I_{\text{ном контактора}}}{I_{\text{ном трансформаторп}}} = \frac{2200}{1300} = 1.69 \quad [3.15]$$

, який гарантує: роботу без перегріву, компенсацію можливих короткочасних перевантажень при пуску, підвищену надійність і довговічність

Знаючи струм для кожного рівня керування, можна побудувати лінійне співвідношення між керуючим сигналом, напругою та струмом на Тобто коефіцієнт передачі виконавчого механізму можна визначити як зміну снапруги ΔU_{rms} , що відповідає кожному кроку керуючого сигналу (від 1 до 200).

Після розрахунків отримаємо передатну функцію :

$$W_{\text{ВМ}}(s) = \frac{dU}{y_0} = \frac{0.03}{1} = 0.03, \left[\frac{U}{y_0} \right] \quad [3.16]$$

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.

Цифрові системи керування — це системи, в яких безперервні сигнали спочатку оцифровуються, після чого керування здійснюється за допомогою алгоритмів цифрової обробки даних. Для цього в системі використовуються аналогово-цифрові (АЦП) та цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі, які забезпечують перехід між аналоговими та цифровими формами сигналів. У процесі таких перетворень відбувається квантування сигналу як у часовій області, так і за рівнем.

4.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями.

Види дискретизації:

- за часом
- за рівнем
- одночасна дискретизація за рівнем і за часом

Задача вибору раціонального періоду квантування T_k є однією з основних проблем реалізації ЦСК. При зменшенні часу керування точність керування цифровою системою збільшується, але при цьому зростає завантаження мікроЕОМ масивами інформації. При збільшенні часу квантування втрачається важлива інформація про сигнал, що може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування T_k , який задовольнив би такі вимоги.

У цифровій обробці сигналів найменша кількість зразків за секунду, яка може бути використана для перетворення аналогового сигналу в цифровий, тобто набір багатьох

сигналів, що представляють повне обговорення завершеного аналогового сигналу без втрати інформації. Відповідно до цієї теорії, ви маєте взяти частоту дискретизації щонайменше вдвічі більше, ніж максимальна частота в спектрі сигналу.

У моєму випадку я маю зразок, взятий один раз за період мережі (20 мс, 50 Гц). Це еквівалентно частоті дискретизації 50 Гц, що, ймовірно, не може будь-яким чином реконструювати синусоїдальну форму струму і тим більше його спотворення, викликане перемиканням тиристора, явищем дуги, нелінійною поведінкою навантаження.

Переважаючий сигнал на момент зварювання контакту має значно більш складну композицію, яка включає круті фронти, імпульсні переходи і високочастотні складові, що виникають, коли тиристор відкривається і контакт зачинається. Однак теорема Котельникова вказує на те, що для реконструкції такого сигналу вам потрібна значно вища частота дискретизації, в десятки або сотні разів більше 50 Гц.

Таким чином, при частоті дискретизації 50 Гц відновлення форми і аналіз частотного спектру струму неможливі, а пікова величина імпульсу не може бути виявлена; система відстає, і її точність налаштування низька.

Тим не менш, найбільш раціональною частотою дискретизації для цієї системи є та, що дорівнює частоті мережі (період 20 мс), оскільки тиристор змінює струм один раз за період. Отже, це вимірювання переважно дозволяє зберігати ефективну величину струму після кожного контрольного імпульсу і формувати дискретний час Р-регулятор для вимірювальної частоти. Це дозволяє досягти високої точності регулювання, попереджаючи при цьому перевантаження мікропроцесора і швидкість системи.

Передатна функція системи

У процесі зварювання, для регулювання сили струму використовуються електронні системи автоматичного управління. Одним з основних елементів таких систем є замкнена система з негативним зворотним зв'язком, що дозволяє досягти стабільності і точності при заданих умовах процесу.

$$W_{\text{роз}}(S) = W_{\text{вм}}(s) * W_{\text{че}}(S) * W_{\text{ок}}(s) \quad [4.1]$$

$$W_{\text{роз}}(s) = \frac{8333}{0.0011s + 1} * 0.03 * 0.00011 * e^{-0.01s} = \frac{0.0275 * e^{-0.01s}}{0.0011s + 1}$$

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{\frac{0.0275 * e^{-0.01s}}{0.0011s + 1}}{1 - \frac{0.0275 * e^{-0.01s}}{0.0011s + 1}} = \frac{0.0275 * e^{-0.01s}}{0.0011s + 1 - 0.0275 * e^{-0.01s}}$$

Аналіз стійкості системи автоматичного регулювання

Найважливішою вимогою до систем автоматичного регулювання є їх стійка робота — здатність повертатися у вихідний або новий стійкий стан після дії зовнішнього збурення. Для оцінки стійкості існує низка критеріїв: Рауса, Гурвиця, Вишнеградського, Михайлова, Найквіста. Серед них критерій Найквіста є універсальним і широко застосовується для аналізу частотних характеристик систем. Частотні характеристики дозволяють не лише оцінити стійкість, а й визначити запаси стійкості за амплітудою та фазою, а також оптимізувати параметри регуляторів. Критерій Найквіста: якщо розімкнена система є стійкою, і її амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) не охоплює точку $(-1; j0)$ при зміні частоти від 0 до ∞ , то замкнена система буде стійкою. Якщо точка охоплюється — система нестійка, а її проходження через точку відповідає межі стійкості. Для аналізу будується АФЧХ (годограф Найквіста) розімкненої системи в MATHCAD

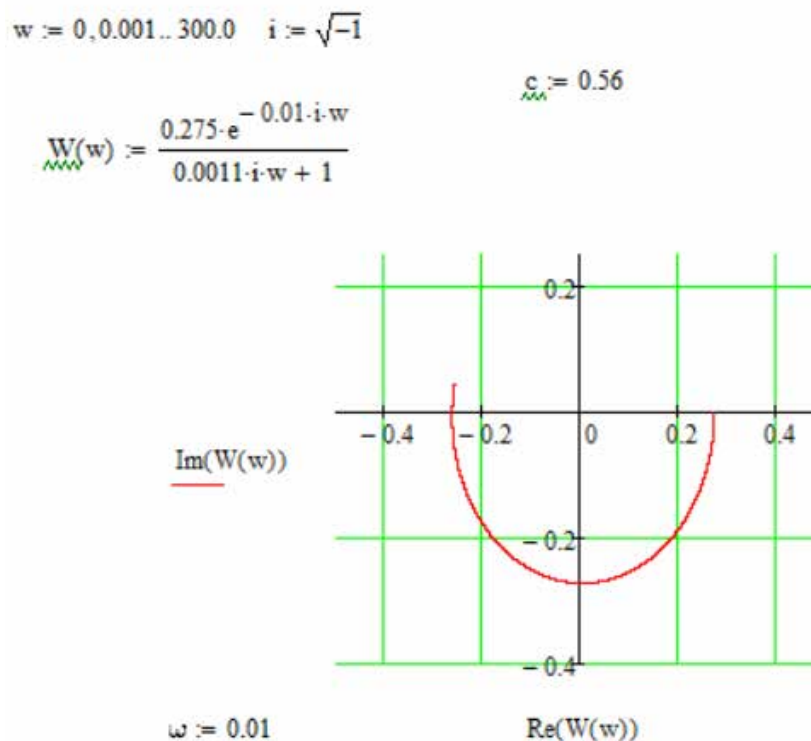


Рис 4.1 Годограф розімкнутої системи

Запас стійкості за фазою $\Delta\varphi = \infty$

Запас стійкості за амплітудою $\Delta L = 20 \lg(1/0.25) = 12$ дБ, $C = 1/0.121 = 4$

4.2. Визначення показників якості роботи цифрової системи керування

Аналогічно з неперервними системами, в цифрових системах можна реалізувати ПД-алгоритм керування (рис 4.2).

Синтез ПД-регулятора полягає у знаходженні параметрів K_p, K_i, K_d

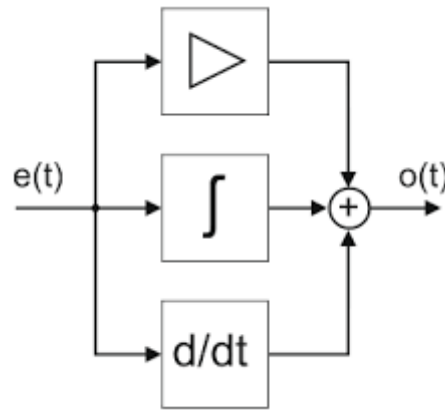


Рис. 4.2. Структурно-алгоритмічна схема ПД-регулятора:

K_p, K_i, K_d – параметри відповідно пропорційної та інтегральної складових ПД-регулятора,

Я можу налаштувати коефіцієнти регулятора лише методом графічного аналізу перехідної характеристики, оскільки час дискретизації $0,02\text{ с}$ є єдиним можливим через те, що тиристорний контактор регулює струм лише один раз за період. Цей час дискретизації становить 10% від загальної тривалості процесу, тому інші методи налаштування недоцільні, і графічний аналіз перехідної характеристики є оптимальним.

Методику графічного аналізу я взяв з джерела [17].

Етап 1. Налаштування пропорційної складової ПД-регулятора

Перед налаштуванням пропорційної зони інтегральна та диференціальна складові вимикаються (постійна інтегрування встановлюється максимальною, а постійна диференціювання — мінімальною). Встановлюється необхідне задане значення (уставка). Зона пропорційності встановлюється на мінімально можливий рівень. У такому режимі регулятор працює як двопозиційний. Фіксується перехідна характеристика.

Оскільки мінімальним періодом для вимірювання змінного струму є $0,01\text{ с}$ (півперіод змінного струму), щоб змоделювати таку систему потрібно дискретизувати зворотний зв'язок на період $0,01\text{ с}$

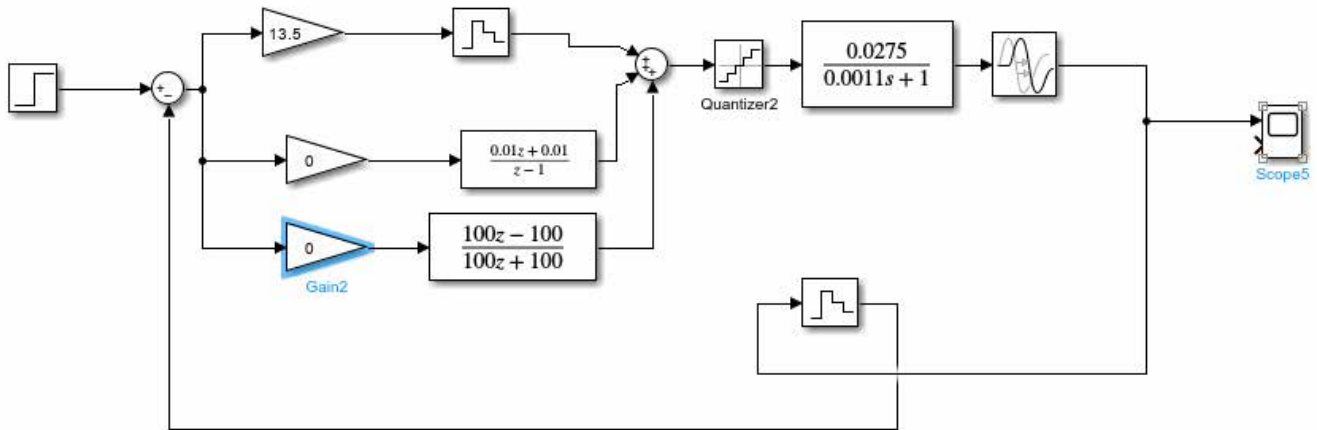


Рис 4.3. Налаштування пропорційної складової.

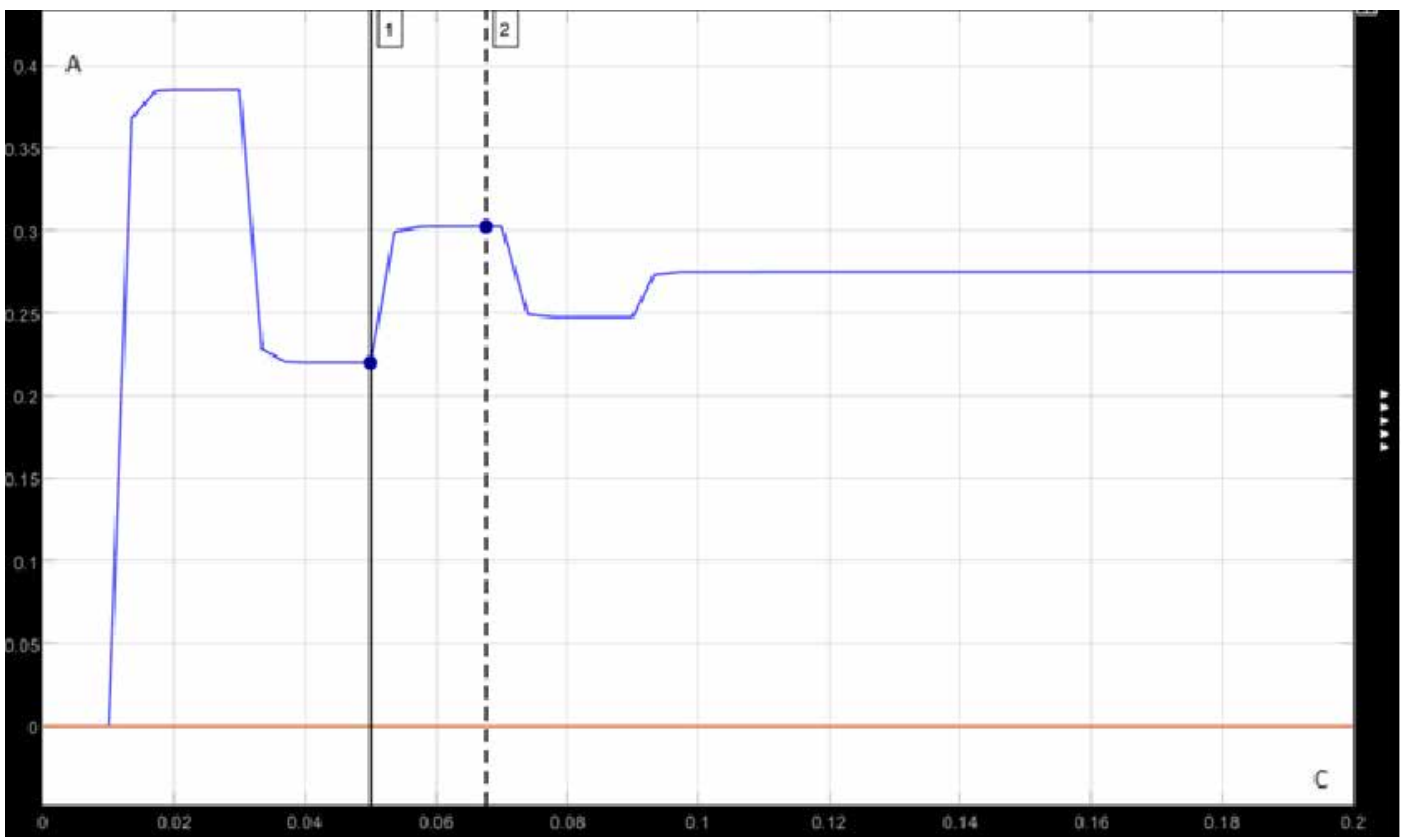


Рис 4.4 . Перехідний процес пропорційної ланки

У перехідній характеристиці спостерігається невеликий викид і швидко затухаючі коливання (1-2 періоди). Такий тип перехідної характеристики забезпечує хорошу швидкодію та швидкий вихід на задану температуру. У більшості випадків її можна вважати оптимальною, якщо в системі допускаються викиди (перегриви) під час переходу від однієї температури до іншої. Викиди усуваються додатковим збільшенням зони пропорційності так, щоб отримати перехідну характеристику без таких викидів.

Етап 2. Налаштування диференційної складової ПД регулятора.

Для подальшого моделювання системи необхідно апроксимувати диференційну ланку методом Тустіна.

$$G(z) = \frac{E(z)}{Y(z)} = K_d \cdot 100 \cdot \frac{z - 1}{z + 1}$$

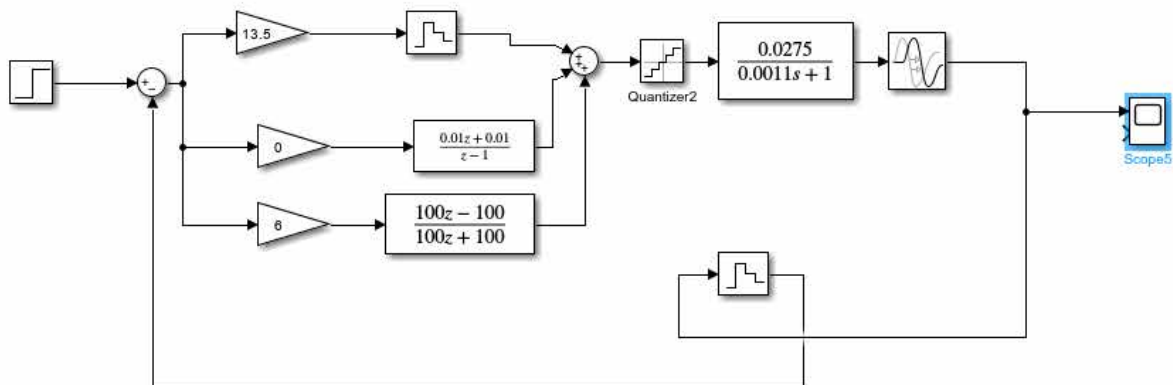


Рис 4.5. Налаштування диференційної складової.

Під час налаштування зони пропорційності задається така її величина, за якої перехідна характеристика має форму типу з коливальним (затухаючим) процесом. Далі необхідно підібрати постійну часу диференціювання так, щоб отримати перехідну характеристику, подібну до кривої мінімальним інтегральним показником якості.

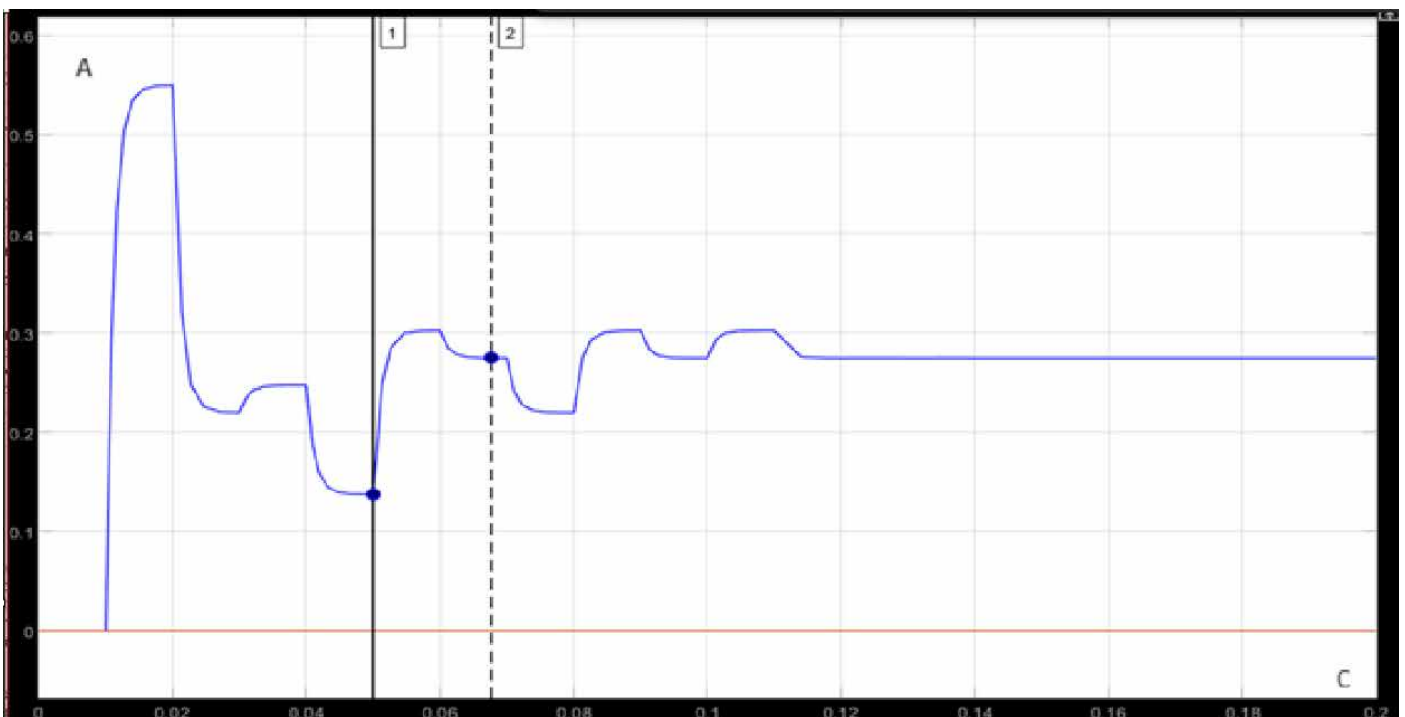


Рис 4.6 Перехідний процес диференційної ланки

Етап 2. Налаштування інтегральної складової ПІ-регулятора

Апроксимація інтегральної складової методом тустіна:

$$\frac{1}{s} \approx \frac{T_s}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} \approx \frac{0.02}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} = 0.01 \cdot \frac{z+1}{z-1} = \boxed{\frac{1}{s} \approx 0.01 \cdot \frac{z+1}{z-1}}$$

Після налаштування пропорційної (а за потреби — й диференціальної) складової отримують перехідну характеристику, зображену на рис. 4, крива 1. Інтегральна складова призначена для усунення залишкового відхилення між усталеним значенням температури в системі та заданим значенням. Налаштування постійної часу інтегрування слід починати з величини, що дорівнює dt .

$$\frac{1}{s} \approx \frac{T_s}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} \approx \frac{0.02}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} = 0.01 \cdot \frac{z+1}{z-1} = \boxed{\frac{1}{s} \approx 0.01 \cdot \frac{z+1}{z-1}}$$

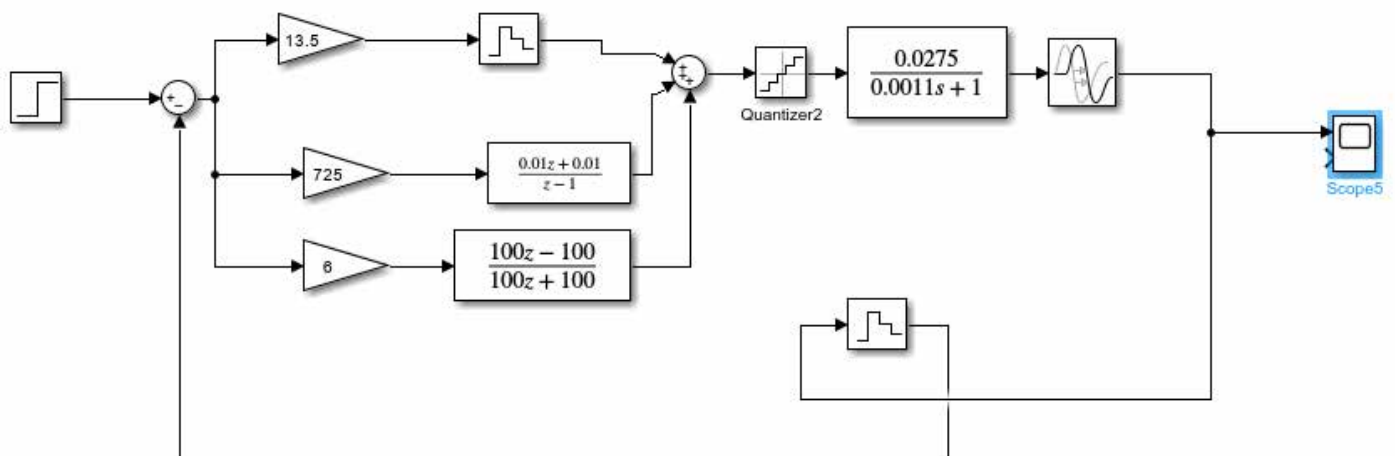


Рис. 4.5 Імітаційна модель ПІ регулятора MATLAB SIMULINK

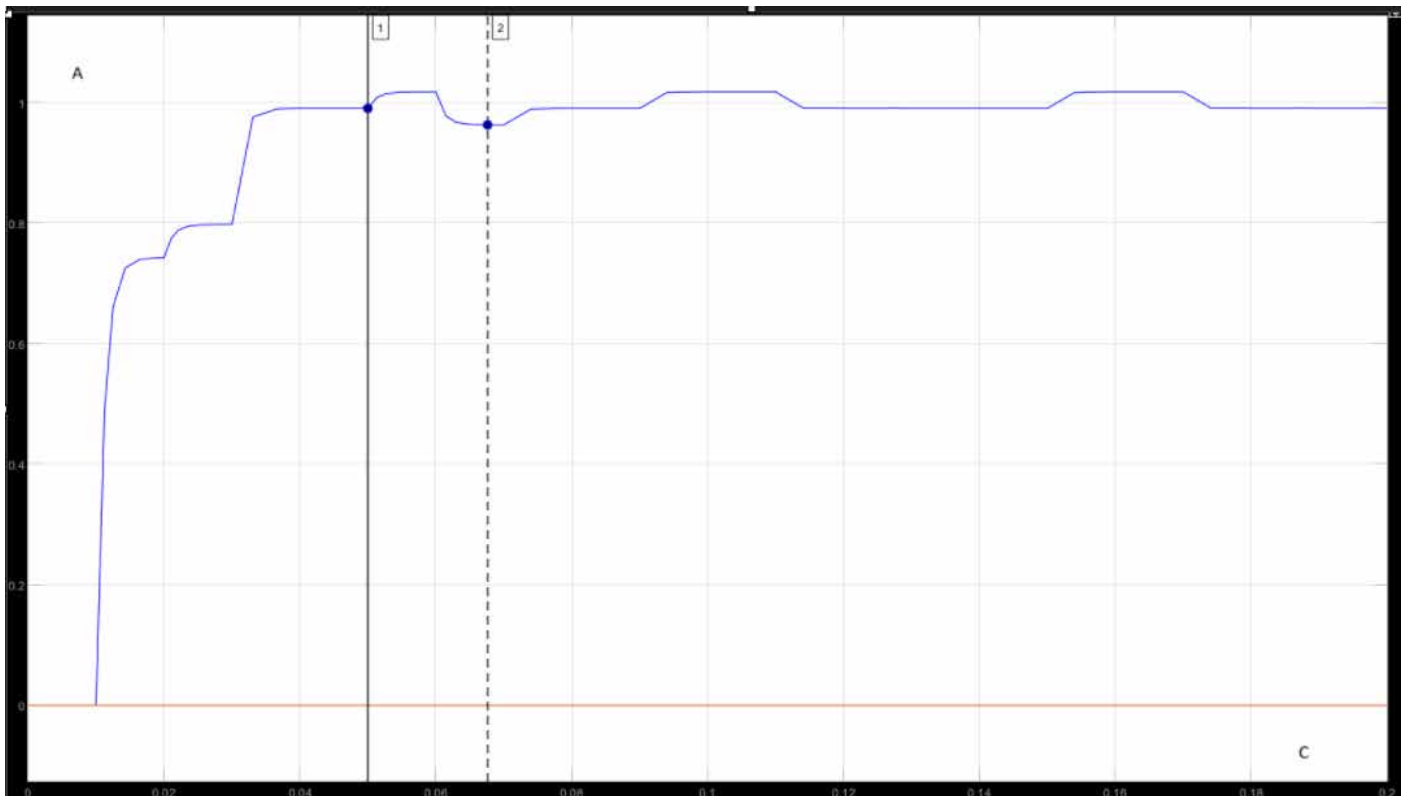


Рис 4.6 .Налаштування інтегральної складової апроксимованої методом тустіна

За характером перехідного процесу видно, що система є стійкою із наступними показниками якості роботи:

- час регулювання $t_p = 0.04$ с;
- перерегулювання $\sigma = 4\%$
- коливальність $n=1$;
- відсутня статична похибка.

Отримані показники задовольняють технологічні вимоги до процесу керування зварювальним струмом.

РОЗДІЛ 5

СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1. Розробка схем електричних принципової, з'єднань та підключень системи керування роликовою сушаркою для шпону

Схеми електричні принципова, з'єднань та підключень виконані згідно з ДСТУ ГОСТ 2.702:2013 «Єдина система конструкторської документації. Правила виконання електричних схем (ГОСТ 2.702-2011, IDT)».

Схема електрична принципова системи керування зварювальним струмом зображена на листі 2 графічної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи.

Шафи керування – на листі №4 графічної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи. Інформація про хід технологічного процесу надходить до мікроконтролеру **A1** від датчика струму **RI**.

Мікроконтролер порівнює реальне значення струму s заданим, у випадку не відповідності, формує сигнал керування на виконавчий механізм тиристорний контактор **Q1**, тим самим змінюючи кут затримки відкриття тиристорів, таким чином регулюючи дійсне значення струму зварюва

Задане значення струму задається тактовими кнопками **KF1-KF2**, та відображається на дисплеї **LCD**.

5.2. Вибір автоматичних вимикачів для живлення трансформатора та системи керування

Для активації автоматичних вимикачів **QF1** і **QF** будуть використані значення параметрів зварювального трансформатора **TK-40.08-EP** та система керування, представлені в таблиці 5.1.

Високопотужний автоматичний вимикач з високою відключною здатністю призначений для захисту первинної обмотки трансформатора, як показано на

електричній схемі, а автоматичний вимикач типу С призначений для захисту блоку керування.

Відповідно до умов, вибрані такі автоматичні вимикачі:

QF1 – К 242 ЕВ 2500/3Е (ЕТІ) – трифазний автоматичний вимикач з номінальним струмом 2500 А, типу РС з селективною затримкою, призначений для захисту трансформаторів. Забезпечує розрив короткого замикання струмом 85 кА, захист від перевантажень, коротких замикань та пускових струмів.

QF2 – МС101А (Hager) – автоматичний вимикач, номінальний струм 1 А, типу С, однополюсний, призначений для захисту ланцюгів керування. Чутливий до коротких замикань, не чутливий до перевантажень реле і котушок.

Таблиця 5.1. Технічні характеристики елементів навантаження

Характеристика	ТК-40.08-ЭП	Система керування
Напруга живлення, В	3ф, 380, 50 Гц	1ф, 220, 50 Гц
Номінальний струм, А	до 2300	0,5...0,8 А
Тип навантаження	трансформатор імпульсного режиму	мікроконтролер, реле
Пусковий струм	високий (до 7 Ін)	низький
Ступінь захисту	IP00 (у шафі)	IP20
Режим роботи	короткочасний, S3	тривалий, S1

Таблиця 5.2. Відповідність технічних характеристик умовам вибору (додаток 3) QF1 та QF2

№ умови	QF1 (К 242 ЕВ 2500/3Е)	QF2 (МС101А)
1. $U_H \text{ АВТ} \geq U_{МЕР}$	690 В > 380 В	230 В = 220 В
2. $I_H \text{ АВТ} \geq I_{ТР}$	2500 А > 2300 А	1 А > 0,8 А
3. Кількість полюсів	3	1
4. $I_T \text{ РОЗЧ} \geq I_{ТРKN} \cdot K_T$	$2500 \text{ А} \geq 2300 \cdot 1,1 = 2530 \text{ А}$	$1 \text{ А} \geq 0,8 \cdot 1,1 = 0,88 \text{ А}$
5. Клас РС (повільний) для трансформатора	відповідає	Клас С — для індуктивного навантаження
6. $I_{EM} \text{ РОЗЧ} \geq (1,5-1,6) \cdot I_{ПУСК}$	$85 \text{ кА} > 1,6 \cdot 2300 \cdot 7 = 25,76 \text{ кА}$	$6 \text{ кА} > 1,6 \cdot 0,8 \cdot 5 = 6,4 \text{ А}$
7. Ступінь захисту	IP20	IP20



Рис 5.1. К 242 EB 2500/3E



Рис 5.2. MC101A (Hager)

5.2.1. Вибір електротехнічного обладнання кола керування

Для захисту кола керування використовується однополюсний автоматичний вимикач QF2

Відповідно до умов (додаток 4), вибране наступне обладнання для кола керування.

Для задавання значення струму були обрані тактові кнопки OMRON ELECTRONIC V3F-3150.

Для візуалізації заданого значення струму було обрано дисплей LCD 1602/2004 (HD44780)

Для перемикання живлення кола керування було обрано кнопковий тумблер C&K M2011 обраний завдяки своїй високій надійності, здатності витримувати струми до 3 А при 5 В, а також довговічному механічному ресурсу понад 30 000 циклів увімкнення/вимкнення.

Всі прилади відповідають стандартам МЕК 60947-2-98 та ІЕС 60947-4-1-2000.

Таблиця 5.2 Технічні характеристики об'єктів кола керування.

Параметр	OMRON V3F-3150	C&K M2011	LCD 1602/2004 (HD44780)
Тип	Тактова кнопка (Push-button)	Тумблер (Toggle switch)	Рідкокристалічний дисплей
Кількість контактів	4 контакти (SPST)	2 положення (ON/OFF), 2 контакти	Паралельний інтерфейс (4 або 8 біт)
Напруга	До 12 В	До 250 В АС / 30 В DC	5 В (логіка LCD)
Струм	До 50 мА (макс.)	До 3 А (при 5 В)	Мінімальне споживання (~1-2 мА)
Механічний ресурс	> 1 000 000 натискань	> 30 000 циклів вкл/викл	Більше 50 000 годин роботи
Тип монтажу	SMD / THT	THT (через отвір)	Тримач для пайки / плата (THT)
Розміри	~12 × 12 × 7 мм	~20 × 10 × 12 мм	80 × 36 мм (1602), 98 × 60 мм (2004)
Особливості	М'який хід, тактильний відгук	Надійний тумблер із фіксацією	Підсвітка, підтримка символів, інтерфейс HD44780
Застосування	Клавіатури, панелі управління	Керування живленням, вибір режимів	Відображення текстової інформації



Рис 5.3 Тактова кнопка V3F-3150



Рис 5.4 Тумблер C&K M2011

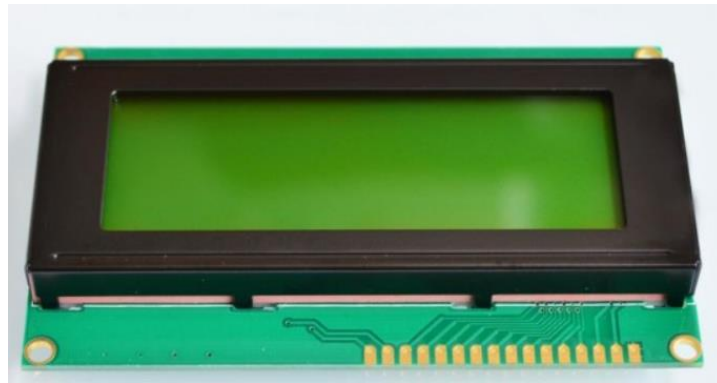


Рис 5.5 дисплей LCD 1602/2004 (HD44780)

5.3. Вибір проводів та кабелів

При проектуванні автоматизованого зварювання необхідно правильно вибрати проходження для певних типів проводів та кабелів і їх параметри, щоб забезпечити надійне електропостачання пристрою та забезпечити необхідну безпечну експлуатацію. Умови вибору – номінальний струм і установка кабелю.

Для трансформатора ТК-40 з первинним струмом обмотки, здатним пропустити 1300 А, форма кабелю має велике значення. Переріз проводу забезпечується максимальним нагріванням жил у струмопровідній частині та довжині кабельної лінії, а також падінням напруги в лінії. Конфігурації установки – відкритий монтаж, у кабельному каналі або на лотку – навколишня температура та механічні можливості враховуються. Для цього типу навантаження струму вторинні резистори мають виготовлятися з багатожильного мідного кабелю з перетином проводів не менше 240 мм². Мідь надає перевагу через її гарну електропровідність та стійкість до термічної напруги.

Ізоляція кабелю розроблена так, щоб забезпечити стійкість до високої температури та впливу механічного навантаження, наприклад, ПВХ-пластик або гума, стійка до старіння в агресивному навколишньому середовищі.

Щоб уникнути надмірного нагріву та руйнування ізоляції, що може призвести до її пробою, короткого замикання та пошкодження обладнання, конструкція кабелю повинна бути відпущена для розсіювання тепла. Для кабелів у багатожильних, але великих лотках, потрібно враховувати зменшення провідності через вплив температури, викликане сусідніми (суміжними) струмопровідними провідниками.

Для з'єднання контрольної схеми автоматичного вимикача MC101A Nager (1A, 1F) використовуються проводи меншого перетину (двожильний дріт з мідним проводом 0,75 мм², краще ПВХ-ізольований), щоб гарантувати захист і довговічність його роботи. Провід у довгостроковій перспективі є досить низькострумовим кабелем і не «нагрівається» при використанні, його також легко встановити!

В системах автоматичного керування важливим елементом є датчики, які передають аналогові або цифрові сигнали на контролери. Для підключення датчиків рекомендується використовувати екрановані кабелі типу LiYCY з мідними

багатодротовими жилами малого перерізу (0,25 мм²), що мають підвищену гнучкість і стійкість до електромагнітних завад. Екранування захищає сигнали від впливу шумів, що може бути критично при точному контролі параметрів зварювання.

Обираючи кабельну продукцію, варто враховувати стандарти та вимоги, зокрема, ДСТУ та ІЕС, які включають стандарти для електричних властивостей матеріалів, ізоляції та маркування, а також допустиму кількість струму.

Крім того, потрібно враховувати рекомендації виробників трансформаторного обладнання та автоматичних вимикачів, щоб гарантувати сумісність та надійність системи.

Отже, правильний вибір дротів та кабелів для системи контактного зварювання важливий не лише для ефективності енергопостачання, але й для безпеки персоналу та терміну служби обладнання. Якість зварювальних виробів значною мірою визначається високоякісним монтажем дротів і дотриманням правил експлуатації електричних виробів.

5.4. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу

Візуалізація – це процес побудови графічного образу даних, що допомагає у процесі загального аналізу даних вбачати аномалії, структури

Візуалізація – це метод представлення інформації у вигляді зображення, наприклад, у вигляді графіків, діаграм, структурних схем, таблиць тощо. В автоматизованих системах управління візуалізація забезпечує розуміння стану об'єкта і перебігу технологічного процесу, також забезпечує контроль і втручання в разі необхідності. В контексті даного проекту, можна реалізувати віртуальну СКАДА систему. На відміну від великомасштабних систем, які передбачають централізовану диспетчеризацію, було створено імітаційне середовище за допомогою функціональних блоків в програмі Quick2 та мнемосхему в SCADA 0TRACE MODE. Ці програми використовувалися для моделювання логіки роботи контролера, який забезпечує генерацію і регулювання зварювального струму. Для візуального представлення зміни струму в часі була розроблена програма на Java, яка створює графік на основі даних, переданих від контролера або згенерованих під час моделювання. Такий підхід дозволяє наочно спостерігати, як змінюється зварювальний струм на різних етапах процесу.

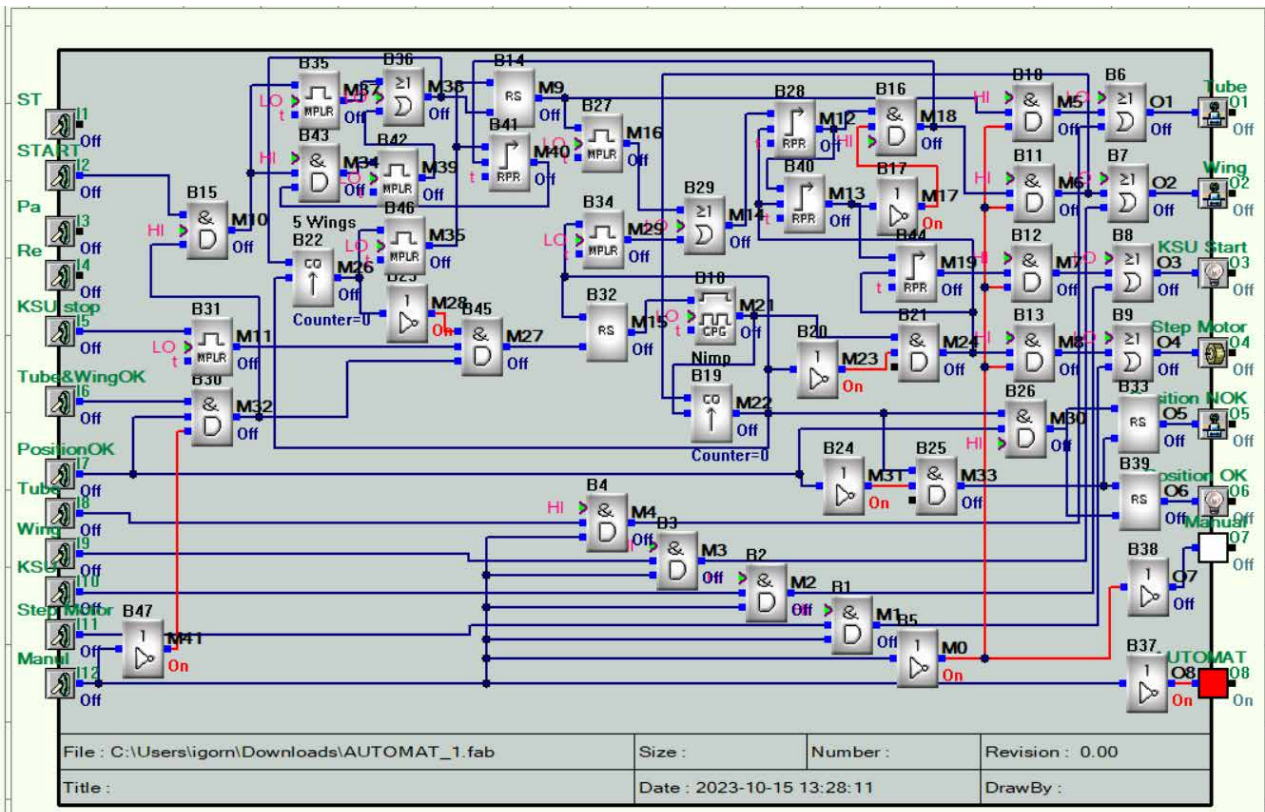
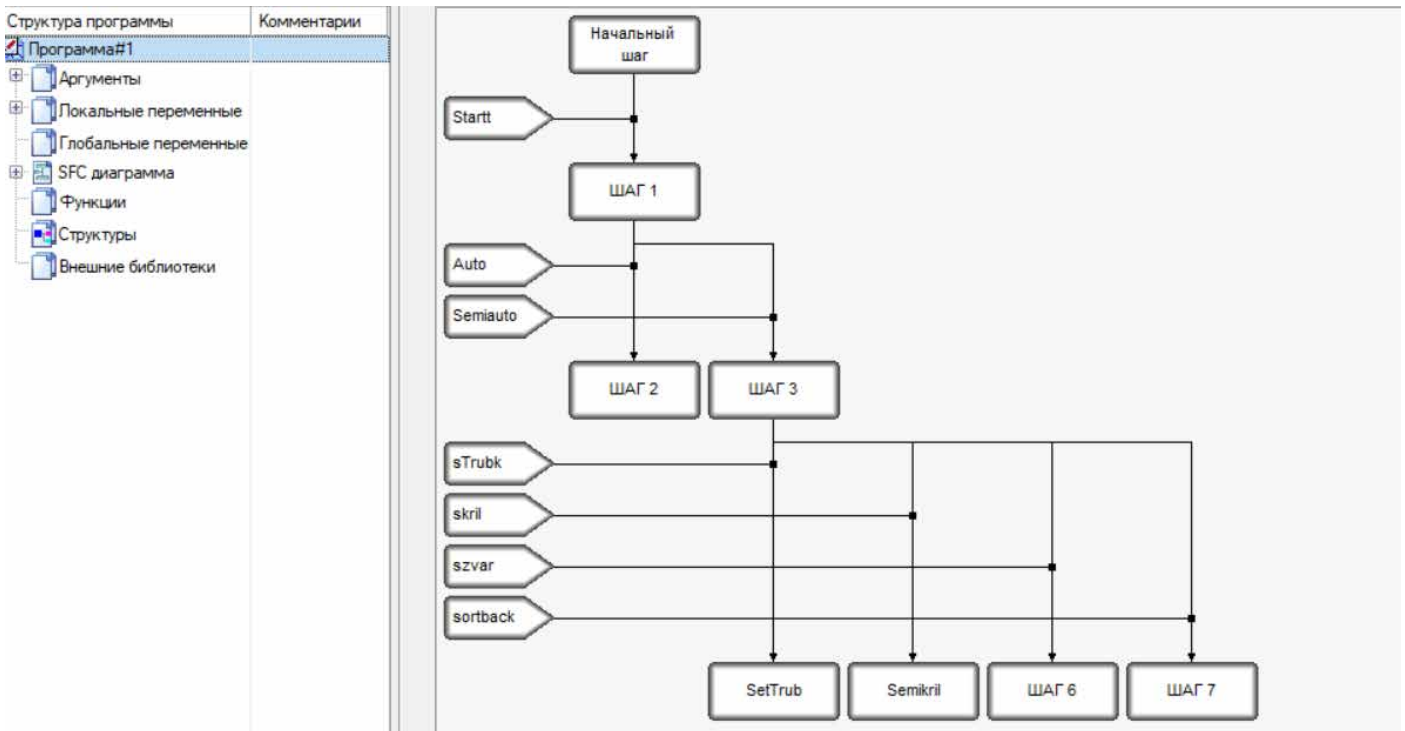


Рис 5.6. Візуалізація роботи допоміжних систем контрольваних ПЛК в середовищі QUICKII.



Рис 5.7. Мнемосхема реалізована в середовищі SCADA TRACE MODE



. Рис 5.8. Логіка роботи мнемосхеми

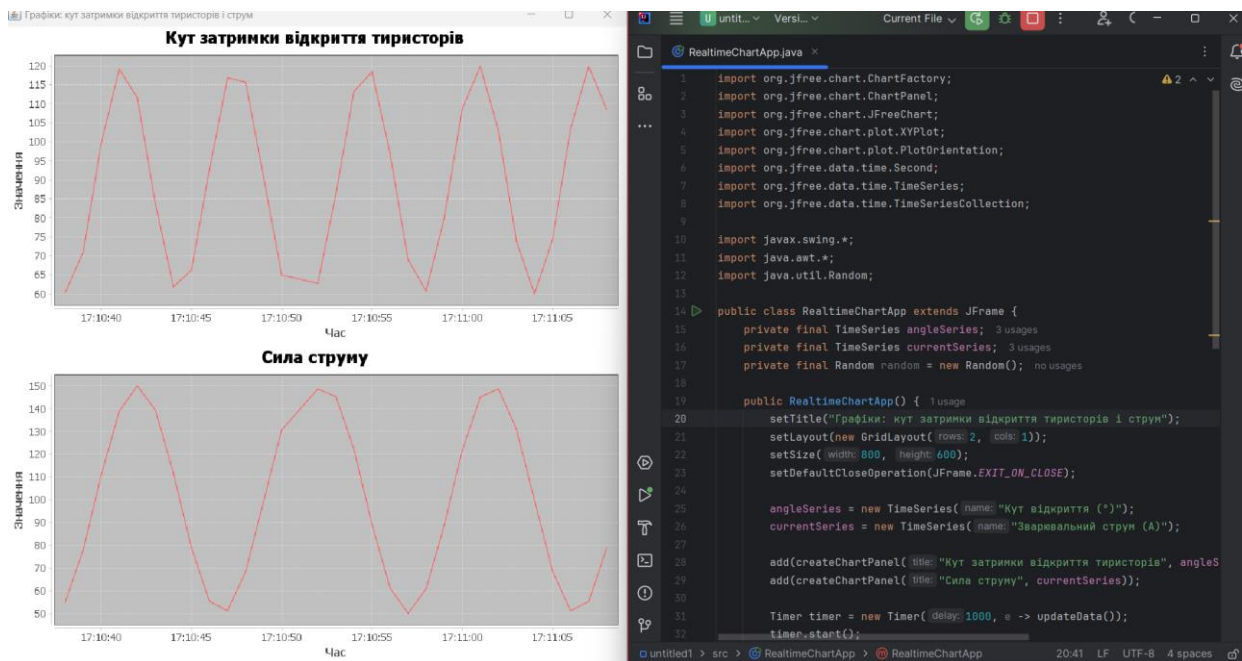


Рис 5.9. Візуалізація керування зварювальним струмом.

6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

У сучасних умовах о виробництва підвищення продуктивності, якості та надійності зварних з'єднань є критично важливим. Автоматизація установки контактного зварювання для виготовлення виробів з високоміцних та теплостійких марок сталі дозволяє не тільки зменшити вплив людського фактору, а й забезпечити стабільну якість продукції з підвищенням економічної ефективності.

Основними цілями автоматизації є:

- підвищення точності контролю зварювального струму та часу імпульсу;
- зниження кількості браку;
- зменшення витрат на зарплату обслуговчого персоналу;
- скорочення простоїв обладнання;
- скорочення терміну окупності капітальних вкладень.

6.1 Розрахунок капітальних вкладень

Загальні капітальні вкладення визначаються за формулою:

$$K = K_z + K_{тт} + K_m + K_{пр} + K_i,$$

де:

- K_z — вартість технічних засобів автоматизації, грн;
- $K_{тт}$ — торгово-транспортні витрати (10% від K_z), грн;
- K_m — монтаж, 15% від K_z , грн;
- $K_{пр}$ — прокладання проводки, грн;
- K_i — інші витрати (2% від K_z), грн.

Вартість технічних засобів автоматизації:

- контролер мікропроцесорний з ПЗ — 7000 грн;
- тиристорний регулятор струму — 8600 грн;
- датчик струму (пояс Роговського) — 1200 грн;
- оптопара з ізоляцією — 300 грн;
- модуль аналогового вводу — 1500 грн;
- індикаторна панель — 2500 грн;
- кабель і дроти — 10 грн/м × 50 м = 500 грн;

$$K_z = 7000 + 8600 + 1200 + 300 + 1500 + 2500 + 500 = 19600 \text{ грн}$$

$$K_{тт} = 19600 \times 0.10 = 1960 \text{ грн}$$

$$K_m = 19600 \times 0.15 = 2940 \text{ грн}$$

$$K_{пр} = 20 \text{ грн/м} \times 50 \text{ м} = 1000 \text{ грн}$$

$$K_i = 19600 \times 0.02 = 392 \text{ грн}$$

Загальні капітальні вкладення:

$$K = 19600 + 1960 + 2940 + 1000 + 392 = 25892 \text{ грн}$$

6.2 Розрахунок річної економії експлуатаційних витрат

Річна економія розраховується як:

$$\Delta E = E_{р.до} - E_{р.після},$$

де:

Ер.до — річні експлуатаційні витрати до автоматизації;

Ер.після — витрати після автоматизації.

Ер.до:

$Z_{п} = 2 \text{ оператори} \times 22 \text{ грн/год} \times 8 \text{ год} \times 250 \text{ днів} = 88000 \text{ грн}$

$Z_{ел} = 20 \text{ кВт} \times 8 \text{ год} \times 250 \text{ днів} \times 6 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год} = 240000 \text{ грн}$

$Z_{ін} = 5000 \text{ грн}$

$Ер.до = 88000 + 240000 + 5000 = 333000 \text{ грн}$

Ер.після:

$Z_{п} = 1 \text{ оператор} \times 22 \text{ грн/год} \times 8 \text{ год} \times 250 \text{ днів} = 44000 \text{ грн}$

$Z_{ел} = 18 \text{ кВт} \times 8 \text{ год} \times 250 \text{ днів} \times 6 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год} = 216000 \text{ грн}$

$Z_{ін} = 4000 \text{ грн}$

$Ер.після = 44000 + 216000 + 4000 = 264000 \text{ грн}$

$\Delta E = 333000 - 264000 = 69000 \text{ грн/рік}$

6.3 Строк окупності капітальних вкладень

Строк окупності визначається за формулою:

$T = K / \Delta E = 25892 / 69000 \approx 0.375 \text{ років} \approx 4.5 \text{ місяці}$

Висновок:

Автоматизація процесу контактного зварювання мзабезпечує значну економію експлуатаційних витрат і окупається менш ніж за пів року. Крім економічної доцільності, вона підвищує якість продукції, зменшує кількість браку та підвищує темп виготовлення критично важливої оборонної продукції.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів контактного зварювання металевих конструкцій.

На основі дослідження літературних та проведеного аналізу процесу контактного зварювання як об'єкта керування було здійснено пошук шляхів удосконалення системи управління током зварювання.

Запропоновано використовувати тиристорний регулятор струму для забезпечення точнішої стабілізації зварювального струму в часі.

Такий метод дозволяє ефективно контролювати параметрами зварювання відповідно до вимог технологічного процесу та зменшити вплив зовнішніх збурень.

Отримано динамічні характеристики процесу та визначено передатну функцію для каналу керування зварювальним струмом.

Перевірка якості функціонування системи автоматичного керування (САК) виявила, що система є стійкою, час регулювання становить 0,04 с, перерегулювання не перевищує 4%, статична похибка — менше 1%.

Для реалізації системи керування процесом контактного зварювання обґрунтовано вибір технічних засобів автоматики на основі мікроконтролера AT89S8252. Розроблені електричні схеми: схема принципова, схема з'єднань, мхема підключень, а програма для керування тиристорним регулятором струму з урахуванням зворотного зв'язку від датнику струму поясу роговського.

Економічними розрахунками обґрунтована доцільність запропонованих технічних рішень, строк окупності впровадженої системи автоматичного керування становить 4.5 місяці.

ЛІТЕРАТУРА.

1. Білобородченко В. І. Оптимізація технології точкового конденсаторного зварювання площинних виробів із сплаву АМГ-6 // Автоматизація вироб. Процесів у машинобуд. Та приладобудуванні : Укр. Міжвід. Наук.-техн. Зб. — 2018. — Вип. 52.
2. Єфімов О.Ю.
Назва: Автоматичне керування процесом точкового зварювання тонкостінних конструкцій, Матеріали конференції «Актуальні проблеми машинобудування та транспорту», 2020. — С. 83–84.
3. Кузьмук Д.Є. Автоматичне керування процесом точкового зварювання тонкостінних конструкцій, Матеріали конференції «Актуальні проблеми машинобудування та транспорту», 2020. — С. 83–84.

4. Пилипець М.І. Контактне точкове зварювання в машинобудуванні, Автореферат дисертації, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2016.
5. Howard B. Cary, Arc Welding Automation, CRC Press, 1995. – 544 с.
6. James Berge, Automating the Welding Process, Industrial Press, 1994. – 320 с.
7. Tzyh-Jong Tarn, Shan-Ben Chen, Changjiu Zhou, Robotic Welding, Intelligence and Automation, Springer, 2004. – 390 с.
8. Robert M. Evans
Назва: Automation in Welding, Wiley, 1980. – 250 с
9. Харченко Г.К, Металургія і технологія зварювання титану і його сплавів, Наукова думка, 1986. – 240 с.
10. Журнал Автоматичне зварювання, Контактне зварювання: сучасні тенденції та автоматизація, ПАТОН, 2022
11. Основи автоматики: теорія і практика (ч.1) / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: Освіта України, 2012. – 540 с.
12. Основні методи і методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра / В.П. Лисенко, А.О. Дудник, В.О. Мірошник, А.А. Руденський, Н.А. Заєць. – Київ: «Компринт». 2023. – 303 с. Для студентів зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології Навчальний посібник.
13. В.К Лебедев, В.П.Черниш: Автоматичне керування електро-зварювальними процесами і установками, Київ, Вища школа, 1994.
14. Н.В.Подола, П.М.Руденко: Математичні моделі і алгоритми для асу тп контактного точкового зварювання, Київ, Товариство «ЗНАННЯ» УРСР, 1980.
15. РУДЕНКО П.М: Розробка та дослідження математичних моделей і алгоритмів контролю й керування процесом контактного точкового зварювання, Київ, ІЕЗ ім Є.Патона, 1979.
16. Орлов Б.Д., Технологія та обладнання контактного зварювання. Орлов Б.Д. - М.: Машинобудування, 1975. - 536 с.
17. Методичні рекомендації по налаштуванню ПІД регулятора
https://voron.ua/files/pdf/termostat/PID_Seting.doc

ДОДАТКИ