

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Комп'ютерних наук і технологій
(повне найменування факультету)

Комп'ютерні системи та мережі
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалаврський
(ступінь вищої освіти)

на тему: РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПІДСИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ЗВАРЮВАЛЬНОГО АПАРАТУ

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу,
групи КНТ-511

Спеціальності

123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Комп'ютерна інженерія
(назва освітньої програми (спеціалізації))

МІЩУК М.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГОЛУБ Т.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ЄФИМЕНКО М.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Комп'ютерних наук і технологій
Кафедра комп'ютерних систем та мереж
Ступінь вищої освіти бакалаврський
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Комп'ютерна інженерія
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КУДЕРМЕТОВ Р.К.

«14» квітня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

МІЩУКА Микити Сергійовича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка автоматизованої підсистеми керування зварювального апарату

керівник проєкту (роботи) к.т.н., ГОЛУБ Т.В.

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «08» квітня 2025 року № 151

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) опис предметної області, технології розробки апаратної та програмної частини, програмні пакети для проєктування на мікросхемах Intel (Altera)

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

1) Опис предметної області;

2) Апаратна реалізація системи;

3) Програмна реалізація системи;

4) Реалізація схем на VHDL;

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Слайди презентації

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	ГОЛУБ Т.В.		
Нормоконтроль	ПОЛЬСЬКА О.В.		

7. Дата видачі завдання «14» квітня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз предметної області	до 18.04.2025	
2	Визначення та аналіз вимог до програмного забезпечення	до 22.04.2025	
3	Розробка структури системи	до 24.04.2025	
4	Розробка алгоритмів роботи	до 28.04.2025	
5	Розробка блоків керування	до 01.05.2025	
6	Розробка VHDL коду	до 05.05.2025	
7	Проектування та аналіз мікросхем	до 22.05.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки	до 25.05.2025	
9	Проходження нормоконтролю	до 01.06.2025	
10	Перевірка на наявність академічного плагіату	до 03.06.2025	
11	Проходження рецензування	до 10.06.2025	

Студент(ка)

(підпис)

Микита МІЩУК

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Тетяна ГОЛУБ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра: 69 с., 6 табл., 22 рис., 1 дод., 13 джерел.

АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ, АВТОМАТИЗОВАНА ПІДСИСТЕМА, VHDL, ЗВАРЮВАЛЬНИЙ РОБОТ, КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ, ПЛІС, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ЦИФРОВА ЛОГІКА, VHDL.

Об'єкт розробки – автоматизована підсистема керування зварювального апарату.

Предмет розробки – блоки керування зварювального апарату.

Мета роботи – розробка підсистеми керування зварювального апарату для автоматизації зварювальних робіт.

В ході розробки було проаналізовано технічне завдання. Проведено опис автоматизованої підсистеми зварювання, в результаті якого було визначено її функціональні блоки, сформовано загальну структуру системи, розроблено алгоритми роботи, та побудовано функціональну схему керування. Для реалізації логіки управління було обрано платформу FPGA. Програмна частина реалізована з використанням мови VHDL у середовищі розробки Quartus II.

У результаті створена система забезпечує автоматичне виконання зварювання відповідно до заданих параметрів, контроль технологічних умов та безпечне завершення процесу.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	6
Вступ.....	7
1 Опис предметної області	9
1.1 Аналіз предметної області	9
1.2 Сучасні системи зварювання	10
1.3 Апаратні засоби системи керування	18
1.4 Вибір апаратної платформи	21
1.5 Програмні засоби розробки систем	23
1.6 Вибір мови опису апаратури	26
1.7 Постановка завдання	27
2 Апаратна реалізація системи	28
2.1 Структура системи	28
2.2 Опис структурних елементів системи.....	30
2.3 Алгоритми роботи блоків керування	36
3 Програмна реалізація системи.....	39
3.1 Основні теоретичні положення	39
3.2 Блок загального керування роботом	41
3.3 Блок керування зварювальною головкою	45
4 Реалізація схем на VHDL.....	49
4.1 Огляд сімейств ПЛІС	49
4.2 Розробка і моделювання схем.....	52
4.3 Імплементация на різні ПЛІС	54
4.4 Перспективи розробки	61
Висновки.....	62
Перелік джерел посилання	63
Додаток А	65

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

FPGA	–	Field-programmable gate array, Програмована логічна інтегральна схема
САПР	–	Система автоматизованого проектування
КА	–	Керуючий автомат
VHDL	–	Very high speed integrated circuits Hardware Description Language

ВСТУП

Сучасне виробництво дедалі активніше використовує автоматизацію технологічних процесів, що дає змогу збільшити ефективність, точність та безпеку виконання операцій. Однією з ключових сфер, де автоматизація відіграє важливу роль, є зварювальне виробництво. Традиційні методи зварювання, що ґрунтуються на ручному управлінні, мають низку недоліків, як-от висока залежність від кваліфікації оператора, можливість людських помилок та обмежена продуктивність.

З огляду на це, розробка автоматизованої підсистеми управління зварювальним апаратом є актуальним завданням, спрямованим на оптимізацію процесу зварювання, підвищення його якості та стабільності. Сучасні технології, зокрема інтеграція мікропроцесорних систем, датчиків зворотного зв'язку та алгоритмів адаптивного управління, дають змогу створювати інтелектуальні системи, здатні динамічно адаптуватися до змінних умов зварювання.

Метою цієї роботи є розробка автоматизованої підсистеми, що забезпечує точне регулювання параметрів зварювального процесу (подача газу, швидкості подачі дроту тощо) на основі реальних даних з датчиків. У процесі дослідження було проаналізовано сучасні підходи до автоматизації зварювання, обґрунтовано вибір апаратної та програмної платформи, розроблено алгоритми управління та проведено експериментальні випробування системи. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого рішення, що проявляється у підвищенні стабільності зварювальних швів, зниженні витрат матеріалів та зменшенні залежності від людського фактора.

Розробка та впровадження подібних систем мають значний практичний потенціал для машинобудування, суднобудування, авіаційної промисловості та інших галузей, де застосовується зварювання. У майбутньому це дасть змогу перейти до повністю автономних виробничих ліній, що відповідають концепції Industry 4.0.

У цій роботі було проведено аналіз та запропоновано підхід до проєктування автоматизованої підсистеми керування зварювальним апаратом. Дослідження охоплює ключові аспекти розробки — від огляду існуючих технологій до представлення концепції програмно-апаратного комплексу.

Розглянуто аналогічні підсистеми керування, проаналізовано мови програмування та апаратні засоби для реалізації керуючої логіки. За результатами аналізу запропоновано варіант реалізації автоматизованої системи керування зварювальним процесом на базі FPGA з використанням VHDL.

1 ОПИС ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз предметної області

Процес зварювання й надалі лишається одним із найважливіших технологічних процесів у промисловості навіть у нинішніх умовах стрімкого поступу технологій. Зварювання використовується в найрізноманітніших сферах — від машинобудування, авіабудування та суднобудування до електроніки, енергетики та навіть медицини. Сучасне виробництво складно собі уявити без високоякісних зварних з'єднань, що забезпечують механічну міцність, герметичність та довговічність конструкцій.

Особливої актуальності набирає застосування роботизованого зварювання, що дозволяє автоматизувати складні, трудомісткі та небезпечні процеси. Впровадження роботів-зварювальників дозволяє значно збільшити продуктивність праці, мінімізувати вплив людського чинника, забезпечити стабільно високу якість виробів та зменшити ризики для здоров'я працівників.

Окрім цього, сучасні вимоги до продукції з погляду енергоефективності, екологічності та зменшення ваги конструкцій стимулюють розвиток нових технологій зварювання, таких як лазерне, ультразвукове, термічне зварювання з високою точністю. Водночас глобальні тренди цифровізації виробництва та концепція Industry 4.0 передбачають інтеграцію процесів зварювання в єдині виробничі системи, що вимагає розробки інтелектуальних систем управління роботами.

Отже, зварювання не тільки залишається ключовим процесом сучасної промисловості, але й безперервно вдосконалюється, стаючи більш ефективним, автоматизованим та високотехнологічним, що забезпечує його надзвичайну актуальність у сучасних економічних умовах.

В якості маніпулятора зварювального інструменту (пальники – для дугового, кліщі – для контактного точкового зварювання) зазвичай використовується

зварювальний робот, який представляє собою багатоланковий маніпулятор з системою програмного керування переміщеннями ланок.

Маніпулятор зварювального інструменту сприймає навантаження, пов'язане з переміщенням зварювального пальника або зварювальних кліщів з комунікаціями, вимірювальних пристроїв підсистеми адаптації, а також сили опору вигину і скручування зварювальних кабелів та інших комунікацій, які підводяться до зварювального інструменту. Тому вантажопідйомність роботів для дугового зварювання зазвичай становить 5–10кг, а роботів для контактного точкового зварювання – 50 кг ... 90кг [1].

Зварювальний робот - це промисловий робот, призначений для виконання зварювальних операцій, включаючи різання та напилення.

Відповідно до визначення Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), промислові роботи, зокрема зварювальні, є багатофункціональними, програмованими пристроями автоматичного керування (маніпуляторами) з трьома або більше осями руху, призначеними для автоматизації промислових процесів.

Для адаптації до різних завдань, на останній осі робота зазвичай розташовується механічний інтерфейс (фланець), до якого можна прикріпити різноманітні інструменти або кінцеві виконавчі пристрої.

Для інтелектуальних роботів також повинні бути системи чутливості, такі як лазерні датчики або датчики камери та їхні пристрої керування.

1.2 Сучасні системи зварювання

1.2.1 Сучасні системи зварювання

Було проведено аналіз брендів зварювальних роботів, які широко застосовуються на виробництві, далі детальніше про основні з них.

Зварювальний робот EVS - EVS є одним із провідних виробників зварювальних роботів, який демонструє стабільне зростання завдяки розширенню

клієнтської бази. Компанія пропонує одну з найсучасніших робототехнічних систем, які активно застосовуються у виробництві важкої техніки на складальних підприємствах у різних країнах світу. Зварювальні роботи EVS здатні ефективно працювати з великими навантаженнями. Деякі моделі забезпечують обробку корисного навантаження понад 800 кг без зниження продуктивності. Асортимент включає широкий спектр зварювальних рішень, які можуть бути адаптовані відповідно до індивідуальних вимог замовника (рис. 1.1);



Рисунок 1.1 – Зварювальний робот EVS

Зварювальний робот Panasonic - Panasonic є одним із провідних світових виробників у галузі робототехніки, з багаторічним досвідом у створенні автоматизованих зварювальних систем. Завдяки накопиченим технологіям компанія розробила низку інноваційних роботизованих зварювальних рішень, здатних ефективно виконувати завдання підвищеної складності. Зварювальні апарати Panasonic представлені у широкому спектрі моделей — від компактних портативних до великих промислових систем, що використовуються у взаємодії з

важкою технікою, транспортними засобами та авіаційною галуззю. Роботи оснащені сучасними засобами керування й інтегрованими технологіями, значна частина яких була розроблена безпосередньо компанією (рис. 1.2);



Рисунок 1.2 – Зварювальний робот Panasonic

Зварювальний робот KUKA - KUKA — німецька компанія, що є одним із світових лідерів у сфері промислової робототехніки. Продукція KUKA відзначається високою якістю виготовлення, що дозволяє ефективно застосовувати її у складальних процесах різного рівня складності. Компанія також пропонує індивідуалізовані рішення, розробляючи роботизовані системи відповідно до специфічних вимог замовника. Завдяки високому рівню технологічного розвитку та інноваційності, KUKA досягла значного комерційного успіху, в результаті чого була придбана корпорацією Midea Group за 3,9 мільярда доларів. Це дозволило розширити її глобальну присутність та посилити конкурентні позиції на міжнародному ринку (рис. 1.3);



Рисунок 1.3 – Зварювальний робот KUKA

1.2.2 Системи керування зварювальними роботами

Системи керування зварювальними роботами - це складні комплекси, що забезпечують точне та ефективне виконання зварювальних операцій. Вони включають в себе апаратні та програмні компоненти, які спільно працюють для досягнення високої якості зварних з'єднань [2].

Керування рухом робота включає в себе програмування траєкторії руху зварювального пальника, контроль швидкості та позиціонування. Сучасні системи використовують складні алгоритми для забезпечення точності та повторюваності зварювальних операцій. Системи керування мають такі основні властивості:

Регулюють такі параметри зварювання, як струм, напруга, швидкість подачі дроту та витрата захисного газу. Це дозволяє забезпечити оптимальні умови для кожного конкретного зварювального процесу.

Можуть включати в себе датчики та системи моніторингу для відстеження параметрів зварювання в реальному часі. Це дозволяє виявляти та усувати потенційні проблеми на ранніх стадіях.

Можуть інтегруватися з іншими виробничими системами, такими як системи автоматизованого проектування (CAD) та системи управління виробництвом (MES). Це дозволяє оптимізувати виробничий процес та забезпечити високу ефективність.

Можуть включати в себе системи чутливості, такі як лазерні датчики або датчики камери та їхні пристрої керування, дозволяють роботу адаптуватися до змін умов зварювання в реальному часі.

Важливо зазначити, що системи керування зварювальними роботами постійно вдосконалюються, що дозволяє досягти більш високої якості зварних з'єднань, підвищити продуктивність та безпеку.

У роботизованому зварюванні саме система керування відіграє ключову роль, визначаючи точність, адаптивність та стабільність усього процесу. З розвитком промислової автоматизації, системи керування пройшли еволюцію від простих контролерів до складних інтегрованих платформ, що здатні самостійно аналізувати виробничі умови та змінювати параметри роботи в реальному часі. Це стало можливим завдяки поєднанню сучасного апаратного забезпечення з потужним програмним забезпеченням, сенсорикою та інтелектуальними алгоритмами.

У типовій конфігурації система управління зварювального робота містить: контролер руху, систему зворотного зв'язку, інтерфейс користувача, модулі управління параметрами зварювання, а також засоби зв'язку з іншими промисловими системами. Завдяки цьому оператор має змогу не лише програмувати траєкторії руху робота, але й контролювати всі критичні параметри: зварювальний струм, напругу, швидкість подачі дроту, температурний режим, положення шва та інше.

Особливу цінність становлять функції автоматичного коригування процесу, наприклад, при зміні зазорів чи деформації деталей. Завдяки використанню лазерних, оптичних чи струмових сенсорів, система може виявити відхилення та миттєво відреагувати, забезпечуючи стабільність якості зварного з'єднання. У

складних виробничих умовах це дає змогу зменшити кількість дефектів та знизити потребу в додатковому контролі якості.

Крім того, сучасні підсистеми підтримують інтеграцію з CAD/CAM-системами, системами управління виробництвом (MES) та базами даних, що дозволяє впроваджувати концепції Industry 4.0 — повністю цифрового, взаємопов'язаного виробництва. Такий підхід не лише підвищує ефективність, а й спрощує контроль за всіма етапами виготовлення продукції.

У цьому контексті доцільним є розгляд практичних реалізацій підсистем керування у зварювальних роботах від провідних виробників.

Відповідно до предметної області можна виділити декілька аналогів.

EVS: Інтелектуальні зварювальні системи. Компанія EVS Robotics, відома на азійському та міжнародному ринках, розробляє інтелектуальні системи керування зварювальними процесами, які орієнтовані на гнучкість і масштабованість. Системи EVS побудовані на базі інтегрованих контролерів, які поєднують у собі керування рухом робота, регулювання параметрів зварювання та сенсорний моніторинг.

Використання розширених сенсорних систем дозволяє EVS автоматично контролювати параметри процесу в реальному часі та оперативно адаптувати режим роботи до змін умов зварювання. Технологія Full-V Sensor забезпечує високу точність виявлення шва і корекцію траєкторії руху пальника навіть при складній геометрії деталей. Крім того, EVS активно застосовує методи цифрового моделювання та аналізу даних для оптимізації процесів і зменшення виробничих дефектів. Їхні системи також легко інтегруються у виробничі середовища, побудовані за концепцією Industry 4.0, забезпечуючи централізоване керування та моніторинг [3].

Panasonic: Інтегрована система TAWERS. Японська компанія Panasonic представила інноваційну інтегровану систему TAWERS (The Arc Welding Robot System), яка поєднує функції зварювального джерела живлення, контролера і маніпулятора в єдину платформу. У системі використовується концепція Embedded

Arc Control (EAC), яка дозволяє здійснювати пряме управління параметрами зварювання без проміжних інтерфейсів.

Особливістю системи є мінімізація втрат часу між обробкою команд та виконанням операцій, що забезпечує стабільність дуги і знижує розбрикування металу до мінімуму. Інтеграція програмного забезпечення та апаратної частини дозволяє автоматизувати оптимальний вибір параметрів зварювання на основі аналізу типу шва та товщини матеріалу. Використання сенсорних панелей і навчального пульта забезпечує зручність налаштувань і контроль процесу навіть у складних виробничих умовах. Таким чином, система TAWERS дозволяє істотно підвищити якість зварних з'єднань та скоротити час виробничого циклу [4].

KUKA: Платформа ArcTech Advanced. Німецька компанія KUKA, один із світових лідерів у галузі промислової робототехніки, приділяє особливу увагу розвитку підсистем керування зварювальними роботами. Одним із прикладів є рішення KUKA.ArcTech Advanced, яке забезпечує повноцінне керування процесом дугового зварювання. Система дозволяє інтегрувати в один процес керування рухами робота, параметрами зварювання та системами контролю.

KUKA ArcTech підтримує можливість синхронізованого зварювання кількома роботами одночасно, використовуючи технологію KUKA.RoboTeam. Підсистема забезпечує гнучке програмування зварювальних швів, контроль за довжиною зварювального шва та автоматичне відновлення після виникнення помилок у процесі. Інтерфейс користувача на базі smartPAD робить налаштування системи інтуїтивно зрозумілим і доступним навіть для операторів без глибоких знань програмування. Таким чином, платформа ArcTech Advanced дозволяє досягти високої точності, надійності та повторюваності зварювальних операцій, що є критично важливим для таких галузей, як автомобілебудування та важке машинобудування [5].

Triada Welding: Підсистеми керування зварювальними роботами. Компанія Triada Welding, заснована у 1992 році, є провідним українським розробником роботизованих систем для зварювального виробництва. Одним із ключових

напрямів її діяльності є створення комплексних підсистем керування для зварювальних роботів, орієнтованих на сучасні виробничі вимоги.

Підсистеми керування Triada Welding розроблені на основі трирівневої ієрархічної моделі. Вони передбачають окреме управління трьома основними аспектами виробничого процесу: формуванням зварювального валика, побудовою шару та контролем стінкової структури виробу. Такий розподіл дозволяє забезпечити високу точність контролю траєкторії пальника та стабільність термічного режиму на кожному етапі друку або зварювання.

Центральною частиною підсистеми є модуль зворотного зв'язку, який у реальному часі аналізує параметри процесу за допомогою сенсорів температури, геометрії зварювальної ванни та положення виробу. Зібрані дані дозволяють системі автоматично коригувати режим зварювання, зменшуючи ризик утворення дефектів, таких як непровари чи тріщини. Завдяки цьому підсистема здатна адаптуватися до змін у геометрії виробу або умовах процесу без втручання оператора.

Іншою важливою складовою є інтеграція підсистеми керування з CAD/CAM-та CAE-системами, що дозволяє автоматично генерувати оптимальні траєкторії руху пальника та моделювати поведінку матеріалу під час термічного навантаження. Це сприяє прогнозуванню залишкових напружень та мінімізує деформації готової продукції.

Особливістю рішень Triada Welding є орієнтація на стандарти Industry 4.0: підсистеми підтримують обмін даними з MES-системами, системами планування виробництва та базами даних, що дозволяє реалізовувати повноцінне цифрове управління виробничим циклом.

Таким чином, підсистеми керування зварювальними роботами від Triada Welding поєднують сучасну сенсорну технологію, високий рівень автоматизації процесу та можливість інтеграції в цифрові виробничі середовища, що робить їх конкурентоспроможними рішеннями на міжнародному ринку роботизованого зварювання [6].

Загалом, аналіз підсистем керування від KUKA, Panasonic, EVS і Triada Welding показує, що провідні компанії активно впроваджують інтелектуальні технології, сенсорні системи зворотного зв'язку та гнучке програмування для досягнення високої якості зварювання, підвищення стабільності та ефективності виробничих процесів.

1.3 Апаратні засоби системи керування

Проектування апаратної частини системи керування є важливим етапом. Саме апаратні засоби визначають продуктивність, швидкодію, енергоефективність і надійність реалізації закладеної логіки керування. Правильний вибір апаратної платформи дозволяє забезпечити відповідність системи технічним вимогам і досягти необхідної функціональності в умовах конкретного виробничого середовища.

У сучасних системах автоматизованого керування найбільш поширеними варіантами апаратної реалізації є мікроконтролери та програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС). Кожен із цих підходів має свої переваги та обмеження, тому обґрунтований вибір архітектури є критичним для ефективної реалізації функцій системи керування.

Програмована логічна інтегральна схема, ПЛІС (programmable logic device, PLD) - електронний компонент, що використовується для створення цифрових інтегральних схем. На відміну від звичайних цифрових мікросхем, логіка роботи ПЛІС не визначається при виготовленні, а задається за допомогою програмування. Для програмування можуть бути використані спеціальні пристрої - програматори, або налагоджувальні середовища, наприклад, системи автоматизованого проектування MAX+PLUS II, Quartus II, Xilinx Foundation Series та ін.

САПР дозволяють задати бажану структуру цифрового пристрою у вигляді принципової електричної схеми або програми на спеціальних мовах опису апаратури Verilog, VHDL, AHDL та ін [7].

Серед основних виробників ПЛІС вирізняються компанії Xilinx (тепер є частиною AMD), Intel (яка у 2015 році придбала компанію Altera) та Microsemi (входить до складу Microchip Technology). Кожен з цих виробників пропонує власні родини ПЛІС, орієнтовані на різні сфери застосування та рівень складності проєктів.

Xilinx пропонує кілька серій ПЛІС для різних потреб. Родина Spartan орієнтована на недорогі рішення з базовими вимогами до ресурсів. Artix призначена для енергоефективних систем із обмеженим простором і споживанням енергії. Kintex забезпечує високу продуктивність і добре підходить для обчислювальних задач середньої складності. Virtex є флагманською серією з максимальною щільністю логіки та високою швидкістю, що робить її придатною для телекомунікацій, обробки відео й сигналів. Найновіша серія Versal — це гетерогенні платформи, які поєднують ПЛІС, процесорні ядра та прискорювачі штучного інтелекту в одному чипі.

Intel (Altera) також має декілька основних родин ПЛІС. MAX — це серія CPLD (комплексних ПЛІС) для реалізації простих логічних функцій. Серія Cyclone орієнтована на бюджетні проєкти з невеликим енергоспоживанням. Arria пропонує вищу продуктивність та краще співвідношення "ціна/можливості", а Stratix — це високопродуктивні ПЛІС, які використовуються в задачах, що потребують високої пропускної здатності, обробки даних у реальному часі та складної логіки.

Microsemi, яка спеціалізується на рішеннях з підвищеною безпекою та енергоефективністю, пропонує серію IGLOO, яка відзначається наднизьким енергоспоживанням і підходить для мобільних або автономних систем. ProASIC має підвищену стійкість до несанкціонованого доступу та підробки, що робить її корисною для критично важливих застосувань. SmartFusion об'єднує ПЛІС з ARM-процесором у межах одного чипа, дозволяючи реалізовувати комбіновані обчислювальні архітектури. Серія PolarFire поєднує середню продуктивність із

високою енергоефективністю та використовується у сфері телекомунікацій, промислової автоматизації та військових систем.

Більшість сучасних цифрових систем управління реалізуються на базі мікроконтролерів (МК) – спеціалізованих мікропроцесорних пристроїв, орієнтованих на виконання керуючих функцій. Інтегруючи на одному кристалі високопродуктивний процесор, пам'ять і набір периферійних пристроїв, мікроконтролери дозволяють з мінімальними витратами реалізувати високоефективні системи і пристрої управління.

В даний час однокристальні мікроконтролери є найбільш масовими представниками мікропроцесорної техніки, обсяг випуску яких становить близько 2,5 млрд. штук на рік. Їх виробництвом займається ряд фірм (Intel, Motorola, Philips, Siemens, Atmel, Dallas, Temic, Oki, AMD і ін.), які надають споживачам більшу номенклатуру виробів, починаючи з простих 8-розрядних моделей і закінчуючи 32-розрядними пристроями, ядром яких служать CISC-iRISC-процесори.

У виробках масового застосування найбільшого поширення набули 8-розрядні однокристальні мікроконтролери, які мають практично однакове обчислювальне ядро, але відрізняються обсягом і типом внутрішньої пам'яті, номенклатурою розміщених на кристалі периферійних пристроїв і низкою технічних характеристик. Біля витоків виробництва мікроконтролерів стоїть фірма Intel з родинними восьмирозрядних мікроконтролерів MCS-48 і MCS-51 [8].

Сучасні мікроконтролери випускаються багатьма виробниками, серед яких найбільш відомі Microchip Technology, STMicroelectronics, Texas Instruments та NXP Semiconductors. Вони пропонують широкі лінійки мікроконтролерів, які охоплюють як прості бюджетні рішення, так і високопродуктивні пристрої з розвиненими функціями.

Microchip виробляє серії PIC (8-, 16-, 32-бітні) — універсальні мікроконтролери для побутових, промислових і вбудованих систем. Серія AVR (раніше Atmel) популярна серед хобістів та використовується, зокрема, у платах Arduino. Для складніших задач компанія пропонує ARM-базовану серію SAM, що забезпечує високу продуктивність та низьке енергоспоживання.

STMicroelectronics пропонує потужну і гнучку серію STM32, побудовану на ядрах ARM Cortex-M. Вона охоплює широкий спектр — від енергоефективних мікроконтролерів (STM32L) до високошвидкісних з розширеними можливостями обробки даних (STM32F, STM32H). STM32 відзначається великою підтримкою з боку спільноти, наявністю безкоштовних бібліотек, інструментів (STM32CubeIDE) та підтримкою багатьох протоколів зв'язку.

Texas Instruments відома серією MSP430 — це 16-бітні мікроконтролери з наднизьким енергоспоживанням, які ідеально підходять для сенсорних систем, портативних пристроїв і автономних рішень. Для задач з високими вимогами до обчислювальної потужності TI пропонує серію Tiva C на базі ARM Cortex-M4.

1.4 Вибір апаратної платформи

ПЛІС були обрані через їх унікальну здатність до паралельної обробки даних, що дозволяє одночасно виконувати кілька завдань без втрати швидкодії. Ця особливість є ключовою для реалізації складних алгоритмів керування, таких як миттєва корекція параметрів зварювання, аналіз якості зварного шва та адаптація до змінних умов процесу. На відміну від традиційних мікроконтролерів, які виконують команди послідовно, ПЛІС забезпечують апаратний рівень обробки сигналів з мінімальними затримками.

Важливою перевагою ПЛІС є їхня гнучкість - програмована архітектура дозволяє створювати спеціалізовані обчислювальні блоки, точно налаштовані під конкретні задачі зварювального процесу. Це включає реалізацію цифрових фільтрів, блоків спектрального аналізу та інших спеціалізованих модулів, необхідних для високоточного керування. Крім того, ПЛІС забезпечують високу стабільність роботи в умовах електромагнітних перешкод, що характерні для промислових зварювальних установок.

Можливість апаратної реалізації складних алгоритмів керування робить ПЛІС ідеальним вибором для завдань, де критичними є точність та швидкодія. У контексті автоматизації зварювальних процесів це дозволяє досягти нового рівня контролю якості, зменшити ймовірність дефектів та підвищити ефективність роботи всього обладнання.

Запропонована система на базі ПЛІС має значний потенціал для подальшого розвитку та вдосконалення. Програмована природа ПЛІС дозволяє легко додавати нові функції без необхідності зміни апаратної частини, що робить систему майбутньо-орієнтованою.

Основні можливості розширення включають реалізацію додаткових модулів безпосередньо на кристалі. Це дозволить в майбутньому інтегрувати функції аналізу якості зварювання в реальному часі, системи візуального контролю за процесом, а також алгоритми адаптивного керування. Модульна архітектура системи дозволяє масштабувати її функціонал шляхом додавання нових блоків обробки сигналів або вдосконалення існуючих.

Важливою перевагою є можливість оновлення програмного забезпечення без фізичної заміни обладнання. Це дозволить у майбутньому впроваджувати новітні алгоритми керування, включаючи методи машинного навчання для прогнозування оптимальних параметрів зварювання. Система може бути доповнена функціями предиктивного аналізу, що дозволить запобігати потенційним несправностям обладнання.

Гнучкість архітектури також забезпечує можливість інтеграції з іншими промисловими системами відповідно до концепції Industry 4.0. В подальшому це дозволить створити повноцінний цифровий двійник зварювального процесу для глибшого аналізу та оптимізації виробництва.

Ще одним вагомим чинником, що вплинув на вибір ПЛІС, є їхня сумісність із сучасними середовищами розробки та підтримка стандартних мов опису апаратури, зокрема VHDL. Це дозволяє розробляти та моделювати системи на високому рівні формалізації, а також забезпечує простоту у верифікації та тестуванні. Завдяки цьому розробник отримує повний контроль над внутрішньою

архітектурою системи та може оптимізувати її відповідно до конкретних технічних вимог.

Також варто відзначити, що сучасні ПЛІС мають широкі можливості для інтеграції зовнішніх інтерфейсів, що робить їх зручними для побудови комплексних систем керування з підтримкою сенсорів, виконавчих механізмів та засобів зворотного зв'язку. Завдяки цьому забезпечується гнучка взаємодія з елементами автоматизованої виробничої лінії, що є необхідним у межах реалізації сучасних кіберфізичних систем.

1.5 Програмні засоби розробки систем

Розробка сучасних систем керування, зокрема у сферах промислової автоматизації та роботизації зварювальних процесів, є немислимою без використання спеціалізованого програмного забезпечення. Програмні інструменти на кожному етапі життєвого циклу проєктування відіграють надзвичайно важливу роль, забезпечуючи моделювання функціонування систем, опис апаратної логіки, синтез апаратури, тестування та подальшу верифікацію отриманих результатів.

Коректний вибір програмного забезпечення дозволяє значно зменшити тривалість розробки, підвищити якість кінцевого продукту, а також мінімізувати кількість помилок і недоліків, котрі могли б бути виявлені на стадії фізичного втілення. Крім того, застосування ефективних інструментів проєктування відкриває можливості для гнучкого масштабування систем, їх адаптації до нових вимог та умов експлуатації, а також інтеграції у складні виробничі комплекси згідно з концепціями Industry 4.0.

Отже, аналіз наявних класів програмного забезпечення та обґрунтований вибір найбільш відповідних інструментів є обов'язковою складовою етапу проєктування системи керування роботизованого зварювального комплексу.

На початкових етапах розробки систем керування особливе значення мають інструменти для моделювання. Вони дають змогу створювати абстрактні моделі систем, досліджувати їхню поведінку в різних умовах експлуатації та оптимізувати робочі алгоритми ще до розробки апаратної частини.

Одним із найпопулярніших середовищ для моделювання є Simulink — графічне середовище моделювання, що входить до складу пакета MATLAB. Simulink забезпечує зручний інтерфейс для побудови моделей систем у вигляді блок-схем, які описують динаміку об'єктів та алгоритми їх керування. Його перевагами є інтеграція з великою кількістю бібліотек, можливість автоматичного перетворення моделей у C або HDL-код, підтримка моделювання фізичних процесів за допомогою додаткових модулів (Simscape) та гнучке налаштування параметрів моделювання.

Іншим поширеним інструментом є LabVIEW — середовище візуального програмування від компанії National Instruments. LabVIEW особливо часто використовується у сферах, де потрібно розробляти системи збирання даних та керування фізичними процесами. Його перевагою є модульність, простота інтеграції з апаратними засобами через драйвери DAQ та можливість розробки вбудованих систем реального часу.

Незважаючи на те, що Simulink і LabVIEW мають потужні інструменти для моделювання, вони не забезпечують безпосереднього доступу до низькорівневого опису цифрової апаратури, що обмежує їхнє застосування на етапах апаратної реалізації.

Для прямого опису апаратної логіки цифрових систем використовуються мови опису апаратури (Hardware Description Languages, HDL). Найбільш поширеними з них є VHDL, Verilog та SystemC.

VHDL — формальна мова опису цифрових систем, розроблена у 1980-х роках на замовлення Міністерства оборони США. Мова вирізняється суворим синтаксисом, сильною типізацією та підтримкою модульності, що робить її придатною для проєктування великих і складних систем. VHDL широко

застосовується у галузях, де потрібна висока надійність — у промисловій автоматизації, авіабудуванні, військовій техніці.

Verilog — мова, що з'явилася дещо раніше та орієнтована більше на компактність запису й спрощення розробки проєктів. Її синтаксис ближчий до мов програмування типу C, що робить Verilog зручним для швидкого створення невеликих або середніх за складністю проєктів.

SystemC — розширення C++ для опису як апаратної, так і програмної частини систем на високому рівні абстракції. SystemC широко використовується для проєктування систем-на-кристалі (SoC), але через свою складність та віддаленість від фізичного рівня опису менш придатний для розробки класичних систем керування.

Отже, для завдань, де потрібна формальність та чіткість опису логіки (як у випадку підсистем керування роботизованим зварюванням), оптимальним вибором є VHDL.

У деяких системах керування можуть застосовуватись мікроконтролери для виконання допоміжних функцій: збору даних, комунікації з периферійними пристроями, реалізації алгоритмів реального часу.

Для програмування мікроконтролерів традиційно використовуються мови C та C++ у спеціалізованих середовищах розробки (IDE), таких як Keil, IAR Embedded Workbench, STM32CubeIDE тощо. Ці інструменти забезпечують компіляцію коду, налагодження та інтеграцію з апаратними дебагерами.

Однак у рамках підсистеми керування роботизованого зварювального комплексу основний акцент робиться на проєктуванні апаратної частини засобами ПЛС, тому розгляд програмування мікроконтролерів має лише допоміжний характер.

Завершальним етапом розробки є верифікація функціональності розробленої апаратної логіки. Для цього застосовуються інструменти симуляції, серед яких найбільш популярними є ModelSim (від Siemens) та Vivado Simulator (від Xilinx).

ModelSim забезпечує можливість проведення як функціональної симуляції (перевірка логіки роботи схеми), так і часової симуляції (перевірка затримок

сигналів). Його гнучкий інтерфейс і розвинені можливості трасування сигналів роблять його одним із найзручніших інструментів для перевірки проектів на VHDL та Verilog.

Vivado Simulator інтегрований у середовище Vivado і оптимізований для симуляції проектів, що синтезуються для ПЛІС Xilinx. Він дозволяє виконувати як просту симуляцію, так і розширений аналіз продуктивності.

Тестування за допомогою таких інструментів є обов'язковою процедурою, що дозволяє уникнути багатьох помилок ще до фізичного програмування пристроїв.

Порівняння можливостей програмних засобів є важливим етапом при виборі оптимального інструментарію для проектування системи керування. Різні класи ПЗ мають специфічні переваги, що визначають їхню доцільність застосування залежно від цілей розробки.

1.6 Вибір мови опису апаратури

У процесі розробки цифрових систем керування важливим аспектом є вибір мови опису апаратури, що напряду впливає на ефективність проектування, можливості тестування, гнучкість у моделюванні та загальну надійність системи. На сьогодні найпоширенішими мовами цього класу є VHDL, Verilog та SystemC — кожна з яких має власні особливості, переваги та сфери застосування.

Verilog є однією з перших комерційно успішних мов опису апаратури, що вирізняється лаконічним синтаксисом та простотою освоєння. Вона часто використовується у проектах середнього рівня складності, а її схожість із мовою програмування C робить її зручною для швидкої реалізації типових цифрових структур. Проте така компактність може стати недоліком при роботі з масштабними системами, де потрібен чіткий контроль типів і структур.

SystemC, на відміну від традиційних HDL-мов, є бібліотекою мови C++ і дозволяє описувати як програмні, так і апаратні компоненти на високому рівні

абстракції. Вона широко використовується для створення систем-на-кристалі (SoC), де важливо моделювати взаємодію між програмною та апаратною частинами. Проте для задач, орієнтованих на реалізацію керуючої логіки в ПЛІС або подібних пристроях, SystemC є менш придатним через ускладнений синтаксис і недостатню деталізацію низькорівневої логіки.

У свою чергу, мова VHDL була розроблена з урахуванням суворих вимог до формалізації та типізації цифрових систем. Її синтаксис є строгим, що дозволяє зменшити кількість помилок під час проєктування, а підтримка модульного підходу полегшує побудову ієрархічних структур. VHDL активно застосовується в галузях, де необхідна висока надійність і відмовостійкість — таких як авіація, космічна техніка та промислові автоматизовані системи.

З урахуванням потреб проєкту, що передбачає реалізацію підсистеми керування роботизованого зварювального комплексу, головними критеріями вибору стали: висока формалізація опису, підтримка модульної структури, сумісність із професійним інструментарієм (Vivado, ModelSim) та надійність. Усі ці вимоги найбільш повно задовольняє саме мова VHDL. Саме тому вона була обрана як основна мова опису апаратури в межах даної дипломної роботи.

1.7 Постановка завдання

На основі проведеного аналізу предметної області та вимог до сучасних систем автоматизованого зварювання було сформовано комплекс технічних завдань для дипломної роботи. Центральною задачею є розробка високопродуктивної системи керування на базі програмованих логічних інтегральних схем, здатної забезпечувати точне регулювання всіх критичних параметрів зварювального процесу.

Основним об'єктом дослідження виступає апаратна реалізація алгоритмів керування за допомогою ПЛІС, що дозволить досягти значно вищої швидкодії

порівняно з традиційними мікроконтролерними рішеннями. Особливу увагу приділено розробці модулів керування основним параметрами зварювання, включаючи стабілізацію струму та напруги, контроль швидкості подачі дроту і регулювання інтенсивності подачі інертного газу.

Важливим аспектом роботи є створення точної системи позиціонування зварювальної голки з використанням координатних методів керування. Паралельно передбачається розробка механізмів безпеки, які забезпечать оперативне виявлення аварійних ситуацій та запобігання технологічним помилкам.

Технічна реалізація передбачає використання сучасних ПЛІС сімейства Xilinx або Intel (Altera) з програмуванням на мові VHDL, що забезпечить необхідну гнучкість і продуктивність системи. Очікується, що розроблене рішення знайде широке застосування у промислових умовах, підвищуючи якість і ефективність зварювальних процесів.

2 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

2.1 Структура системи

Автоматизована система керування зварювальним процесом є комплексним технічним рішенням, що інтегрує механічні, електронні та програмні компоненти для забезпечення високої точності, ефективності та безпеки зварювання. Розробка апаратної частини системи базується на чіткому розумінні функціональних вимог і технічних завдань, визначених у попередньому розділі, що дозволяє забезпечити надійну та стабільну роботу у реальному часі.

Впровадження модульної архітектури забезпечує гнучкість системи, можливість масштабування та адаптації до різних умов експлуатації. Центральний контролер координує роботу виконавчих пристроїв і здійснює моніторинг стану системи на основі даних, що надходять із датчиків, забезпечуючи точне виконання програмованих алгоритмів зварювання.

Розроблена автоматизована система зварювання складається з комплексу взаємопов'язаних апаратних модулів, кожен із яких виконує свою специфічну функцію в забезпеченні точності, безпеки та ефективності зварювального процесу. Для досягнення високої надійності та гнучкості система побудована за модульним принципом, що дозволяє розділити загальну задачу на окремі функціональні блоки.

Нижче наведено компоненти системи, які є базовими складовими її апаратної частини:

- блок живлення та керування;
- зварювальний робот-маніпулятор;
- стіл позиціонування;
- система сервоприводів і редукторів;
- датчики контролю;
- зварювальна головка;
- система подачі газу;
- система безпеки;
- інтерфейс оператора.

Розглянуті основні компоненти системи формують цілісний комплекс, у якому кожен блок виконує свою спеціалізовану функцію, а їхнє взаємне поєднання забезпечує стабільну і ефективну роботу зварювального процесу. Такий підхід дозволяє досягати високої точності позиціонування, надійного контролю параметрів та забезпечення безпеки операцій. Для більш повного уявлення про організацію роботи системи та взаємодію її елементів наведено структурну схему, що відображає основні зв'язки між функціональними модулями (рис. 2.1).

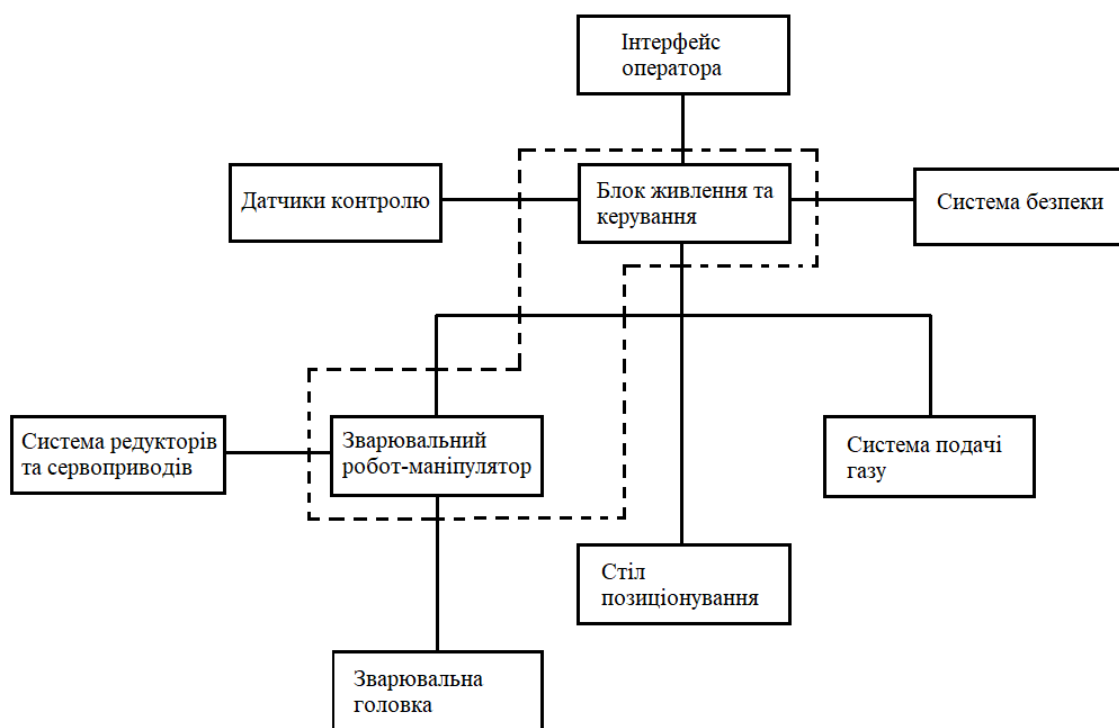


Рисунок 2.1 – Структурна схема апаратної частини

Пунктирною лінією позначено блоки, керуючи автомати яких реалізовані у даній роботі.

2.2 Опис структурних елементів системи

Для повного розкриття структури розробленої системи доцільно детально розглянути кожен із її ключових компонентів. Далі буде наведено опис конструктивних особливостей, принципів роботи та функціонального призначення кожного блоку. Це дозволить більш глибоко зрозуміти архітектуру системи та забезпечити основу для подальшої інтеграції апаратної і програмної частин.

2.2.1 Блок живлення і керування

Блок живлення та керування є ключовим елементом автоматизованої системи зварювання, що відповідає за стабільне забезпечення живленням усіх компонентів системи та координацію їх роботи. Цей блок включає в себе кілька функціональних

підсистем, кожна з яких виконує важливу роль для забезпечення безперебійної та надійної роботи обладнання.

Основною складовою є підсистема керування, яка реалізує логіку роботи системи, обробляє сигнали від датчиків і формує команди для виконавчих механізмів. Вона розробляється з урахуванням специфіки зварювального процесу та забезпечує інтеграцію між апаратними модулями.

Для управління приводами роботизованого маніпулятора та іншими електромеханічними компонентами використовуються силові модулі, що дозволяють регулювати подачу електроживлення до двигунів з високою точністю і швидкодією. Ці модулі забезпечують необхідний рівень крутного моменту, а також захист від перевантажень і коротких замикань.

Джерелом живлення служать стабілізовані блоки живлення на 24В та 48В, які гарантують безперервну і стабільну подачу напруги навіть при коливаннях у зовнішній мережі. Надійність живлення критично важлива для підтримання стабільної роботи як системи керування, так і силових приводів.

Для забезпечення безпеки та запобігання пошкодженням обладнання блок включає аварійні реле та запобіжники, які автоматично відключають живлення у випадку перевантаження, короткого замикання чи інших аварійних ситуацій. Це дозволяє не лише захистити компоненти системи, а й запобігти небезпечним ситуаціям під час експлуатації.

Загалом, блок живлення та керування виступає як центральний елемент, що координує роботу всієї системи, забезпечуючи належний рівень енергопостачання та управління виконавчими пристроями.

2.2.2 Зварювальний робот-маніпулятор

Зварювальний робот-маніпулятор є основною рухомою частиною автоматизованої системи, що забезпечує точне та гнучке позиціонування зварювальної головки у робочому просторі. Конструктивно робот складається з чотирьох осей обертання, які забезпечують широкий діапазон рухів і дозволяють виконувати зварювання в різних положеннях і під різними кутами.

Механічна структура робота складається з послідовно з'єднаних ланок, об'єднаних шарнірними з'єднаннями, що надає системі необхідну ступінь свободи. Кожна ланка приводиться в дію окремим сервоприводом — електричним приводом з високою точністю регулювання положення та швидкості. Використання сервоприводів дозволяє забезпечити плавність рухів, мінімальні похибки позиціонування і швидко реакцію на команди блоку керування.

Завдяки такій конструкції зварювальний робот-маніпулятор здатний працювати у складних геометричних умовах, адаптуючись до різних конфігурацій деталей, що зварюються. Висока точність рухів сприяє підвищенню якості зварних швів і зниженню кількості дефектів.

2.2.3 Стіл позиціонування

Стіл позиціонування є важливою складовою частиною автоматизованої системи зварювання, що забезпечує надійну та стабільну фіксацію деталей під час виконання технологічного процесу. Конструктивно це міцна металева платформа, обладнана численними отворами по всій площині, які служать для встановлення та кріплення різноманітних затискачів і фіксуючих елементів.

Для зручності роботи та доступу до зони зварювання стіл може бути оснащений поворотним механізмом, що дозволяє обертати платформу у різні боки. Це дає змогу оператору або системі керування легко змінювати положення деталей, забезпечуючи оптимальні умови для проведення зварювання з різних кутів і сторін.

На столі розміщуються регульовані затискачі, які гарантують надійну фіксацію деталей незалежно від їхньої форми та розмірів. Завдяки цьому виключається можливість зміщення або вібрації зварювальних елементів під час роботи, що суттєво підвищує якість зварних швів.

2.2.4 Система приводів і редукторів

Система приводів і редукторів є важливим елементом механічної частини зварювального робота-маніпулятора, яка забезпечує точне і стабільне управління рухом його ланок. Кожна вісь обертання оснащена власним серводвигуном — високоточним електродвигуном із зворотним зв'язком, який дозволяє точно регулювати положення і швидкість руху в реальному часі.

Для підвищення крутного моменту та зниження навантаження на серводвигуни використовуються гармонічні редуктори. Ці пристрої відомі своєю компактністю, високою точністю та великим коефіцієнтом передачі, що робить їх ідеальними для застосування в робототехніці. Вони дозволяють збільшити силу обертання без значного збільшення розмірів і ваги приводної системи.

Для перетворення обертального руху в лінійний рух, необхідний для точного позиціонування деяких елементів робота або столу, застосовуються кулькові гвинти. Вони забезпечують високу ефективність передачі руху, низький коефіцієнт тертя і точність лінійних переміщень, що є критично важливим для стабільної роботи зварювального процесу.

2.2.5 Датчики контролю

Система датчиків контролю є невід'ємною частиною автоматизованої зварювальної системи, забезпечуючи точний моніторинг параметрів процесу та зворотний зв'язок для блоку керування. Основою цієї системи є енкодери, які відповідають за визначення точного положення кожної осі робота. Завдяки високій роздільній здатності вони дозволяють здійснювати контроль рухів у реальному часі, що є критично важливим для забезпечення точності позиціонування.

Для контролю навантаження на двигуни приводів використовуються датчики моменту. Вони допомагають запобігти перевантаженням та пошкодженням механізмів, забезпечуючи надійну і безпечну роботу приводної системи.

Лазерні датчики відстані призначені для вимірювання дистанції між зварювальною головкою і деталлю, що дозволяє підтримувати оптимальний зазор, необхідний для високої якості зварювальних швів.

Також у конструкції передбачені термодатчики, які монтуються безпосередньо біля зварювальної головки для контролю температури нагріву. Постійний моніторинг температури дає змогу уникнути перегріву, підтримати технологічні параметри та гарантувати стабільність процесу.

Окрім цього, система оснащена потоковими датчиками, які вимірюють витрату газу у системі подачі. Ці датчики забезпечують точний контроль над

подачею технічних газів, що є критично важливим для підтримання стабільних параметрів зварювання та безпеки роботи.

2.2.6 Зварювальна головка

Зварювальна головка є ключовим елементом системи, що безпосередньо виконує процес зварювання, забезпечуючи подачу енергії та матеріалів у зону з'єднання деталей. Вона оснащена газовим пальником або електродним механізмом, залежно від обраного виду зварювання. Газовий пальник використовується для газового зварювання, де точне регулювання суміші газів забезпечує стабільність полум'я і якість шва.

Для забезпечення додаткового матеріалу у зварювальну ванну використовується система подачі присадочного дроту. Вона автоматично регулює швидкість подачі дроту, що дозволяє підтримувати стабільний процес зварювання та покращувати якість швів.

Охолодження зварювальної головки здійснюється за допомогою повітряної системи, яка запобігає перегріву конструктивних елементів, тим самим підвищуючи надійність і довговічність обладнання. Використання повітряного охолодження забезпечує ефективне відведення тепла і є зручним рішенням для підтримки стабільності процесу в різних умовах експлуатації.

2.2.7 Система подачі газу

Система подачі газу є важливою складовою автоматизованої зварювальної установки, яка відповідає за забезпечення безперервного і точного постачання технічних газів до зварювальної головки. Вона складається з комплексу обладнання, що включає балони з різними технічними газами, такими як ацетилен, кисень, аргон та інші, які використовуються залежно від технології зварювання.

Для регулювання тиску газів і забезпечення безпечної роботи системи застосовуються редуктори з манометрами. Редуктори дозволяють знизити тиск із балонів до необхідного робочого рівня, а манометри забезпечують точний контроль і моніторинг параметрів газу в режимі реального часу.

Ключовим елементом системи є електромагнітні клапани, які забезпечують автоматичне і точне регулювання подачі газу. Вони дозволяють оперативно

відкривати та закривати потік газу відповідно до команд блоку керування, що гарантує стабільність процесу зварювання та підвищує безпеку роботи.

2.2.8 Система безпеки

Система безпеки є невід'ємною частиною автоматизованої зварювальної установки, спрямованою на забезпечення захисту оператора, обладнання та навколишнього середовища від можливих аварійних ситуацій. Вона включає комплекс технічних засобів, що дозволяють оперативно реагувати на небезпечні події та запобігати пошкодженням.

До складу системи входять аварійні вимикачі, розташовані на корпусі робота, які дозволяють у будь-який момент миттєво припинити роботу обладнання в разі виникнення загрози. Це забезпечує швидке реагування оператора або автоматичних систем на небажані ситуації.

Для візуального та звукового інформування про стан системи використовуються світлова та звукова сигналізація. Вона повідомляє про початок роботи, аварійні режими, помилки та інші важливі події, що допомагає підтримувати високий рівень безпеки під час експлуатації.

Також система містить захисні огорожі та блокувальні дверцята, які фізично обмежують доступ до рухомих частин і зони зварювання. Вони запобігають випадковому контакту операторів з небезпечними елементами та автоматично блокують роботу системи при спробі відкриття захисних елементів.

2.2.9 Операційний інтерфейс

Інтерфейс оператора є ключовим засобом взаємодії людини з автоматизованою системою зварювання, що забезпечує зручне управління, моніторинг та оперативне реагування на стан обладнання. Він створений для полегшення контролю над процесом та забезпечення безпеки під час роботи.

Основним елементом інтерфейсу є панель керування, оснащена набором кнопок, які дозволяють оператору запускати, зупиняти та налаштовувати параметри зварювального процесу.

Для припинення роботи системи в екстремальних ситуаціях передбачені кнопки аварійного зупинення, які миттєво відключають живлення або зупиняють роботу механізмів, що забезпечує безпеку оператора і збереження обладнання.

Інформаційне забезпечення здійснюється через індикаційні світлодіоди, які відображають поточний стан системи, режим роботи, наявність помилок або аварійних сигналів. Це дозволяє оператору швидко орієнтуватися у стані обладнання без необхідності заглиблюватися у технічну документацію.

2.3 Алгоритми роботи блоків керування

Базуючись на попередньому описі компонентів зварювальної системи було розроблено алгоритми роботи для загального блоку керування, та блоку керування зварювальною головкою.

2.3.1 Алгоритм загального блоку керування

Цей алгоритм визначає послідовність дій для координації всіх підсистем, забезпечуючи ефективне управління процесом зварювання. Нижче наведено графічне представлення алгоритму, яке наочно ілюструє його основні етапи та логіку взаємодії між компонентами (рис 2.2).

Алгоритм описує послідовність дій для автоматизованого процесу зварювання. Спочатку система ініціалізується, перевіряючи наявність помилок та блокування зв'язку. Потім вона фіксує координати зварювальної точки та починає подачу газу. Далі система очікує досягнення заданої температури (3500°).

Якщо відстань до деталі становить менше 4 мм система автоматично коригує положення. Після цього активується подача зварювального прутка, і починається рух за запрограмованими координатами. Після досягнення фінальної точки зварювання система завершує процес, зупиняє подачу газу та прутка та повертається у вихідне положення, сигналізуючи про завершення циклу.

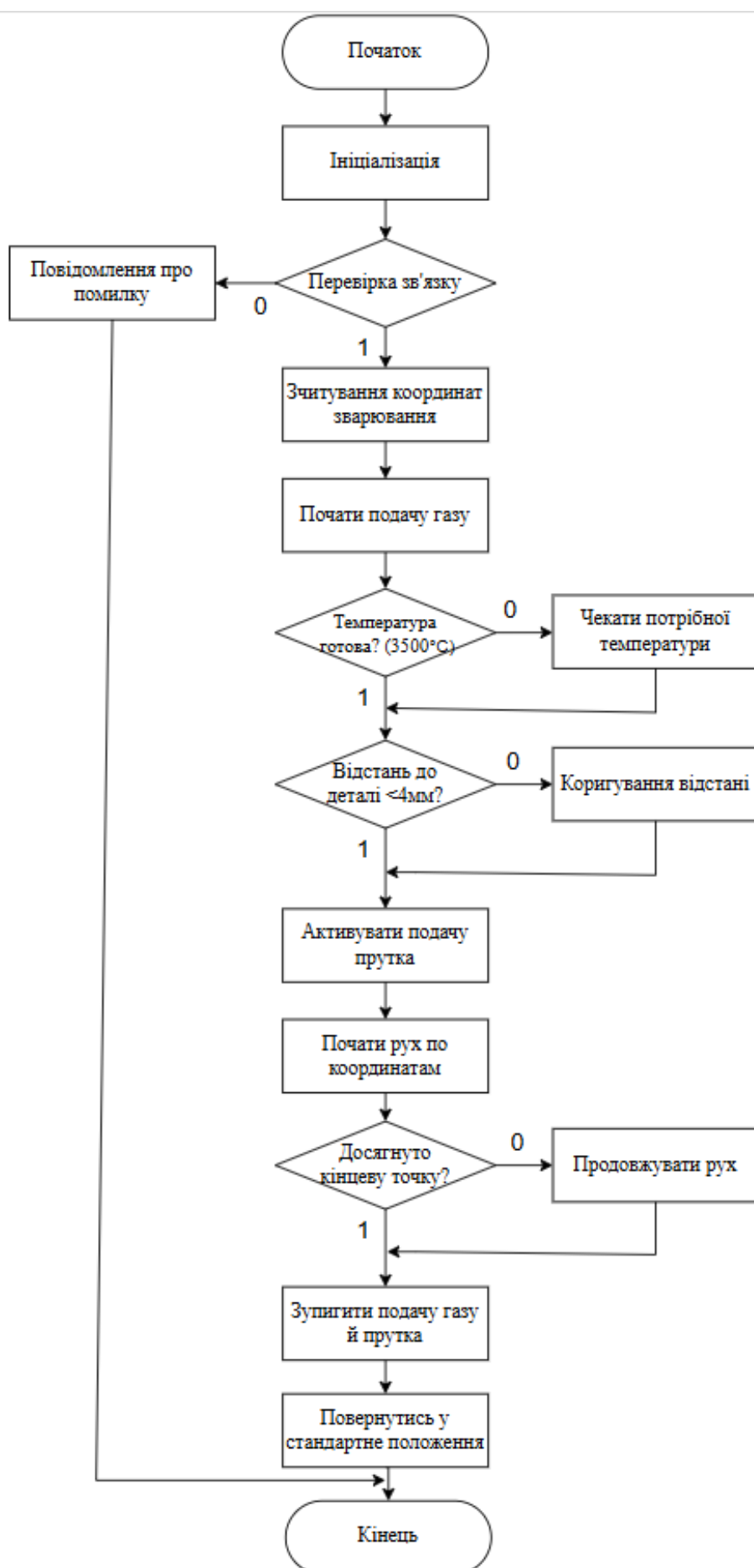


Рисунок 2.2 – Алгоритм роботи блоку загального керування

2.3.2 Алгоритм блоку керування зварювальною голівкою

Алгоритм блоку керування зварювальною голівкою визначає послідовність дій для управління приводами системи — від діагностики до завершення робочого циклу. Спочатку перевіряється стан приводів: у разі несправностей формується повідомлення про помилку. Далі виконується калібрування. Якщо воно неуспішне, система повторно перевіряє приводи й за потреби генерує повідомлення про критичну помилку, що потребує втручання оператора.

Після успішного калібрування завантажується робоча траєкторія. Якщо дані з інтерфейсу відсутні, оператор може вручну скоригувати маршрут. Після підтвердження даних формується профіль руху з параметрами швидкості та прискорення. На основному етапі приводи синхронно переміщують зварювальну голівку за заданими координатами. Після виконання всіх дій система автоматично завершує цикл (рис. 2.3).

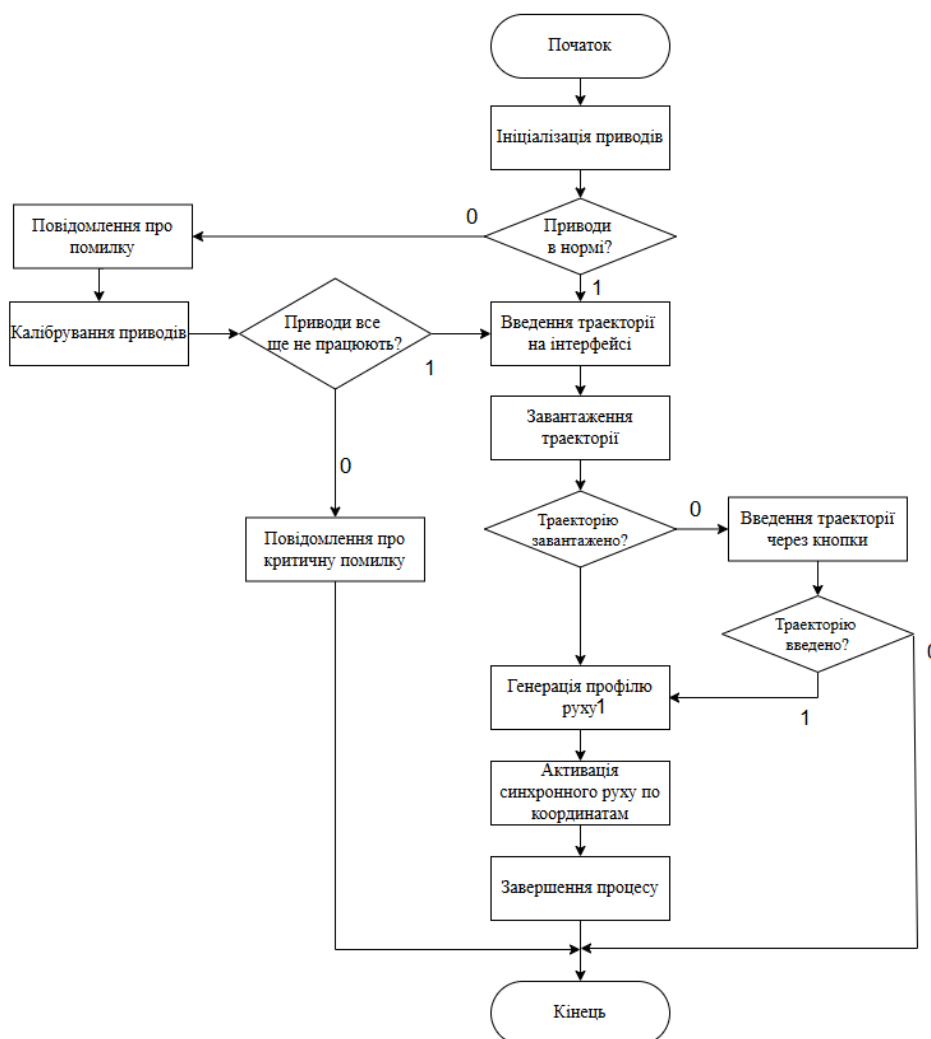


Рисунок 2.3— Алгоритм роботи блоку загального керування

Провівши аналіз архітектури та принципу функціонування зварювального комплексу, було сформовано загальну структурну схему системи, детально описано кожен із її функціональних компонентів і створено алгоритми роботи.

Такий підхід дозволяє забезпечити чітке керування зварювальним процесом відповідно до заданої логіки.

На основі отриманої функціональної структури та описаних алгоритмів можливо здійснити програмну реалізацію системи.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

3.1 Основні теоретичні положення

На основі аналізу апаратної структури розроблюваної системи керування було обґрунтовано доцільність застосування автомата Мура для реалізації алгоритму функціонування. Вибір саме цього типу скінченного автомата зумовлений архітектурними особливостями системи, в якій кожен функціональний блок (подача газу, нагрів, позиціонування, зварювання, завершення тощо) виконується послідовно в межах окремого технологічного стану.

Автомат Мура є одним із фундаментальних типів скінченних автоматів, який характеризується тим, що його вихідний сигнал визначається виключно поточним станом, в якому він перебуває. Це ключова відмінність від автомата Мілі, де вихід залежить як від поточного стану, так і від вхідного сигналу. У моделі Мура, вхідний сигнал впливає лише на перехід до наступного стану, але не на формування вихідного значення в момент переходу. Кожен стан автомата Мура має асоційований з ним вихідний символ, і цей вихід генерується відразу, як тільки автомат входить у даний стан. Завдяки цій властивості, вихідна послідовність автомата Мура завжди буде на один символ довшою за вхідну послідовність, оскільки вихід генерується початковим станом ще до обробки першого вхідного символу.

Формально, автомат Мура описується як кортеж із шести елементів: скінченна множина станів (Q), початковий стан (q_0), скінченний вхідний алфавіт (Σ), скінченний вихідний алфавіт (O), функція переходів (δ), що визначає наступний стан на основі поточного стану та вхідного символу, та функція виходів (λ), яка призначає вихідний символ кожному стану. Через свою природу, де вихід безпосередньо пов'язаний зі станами, автомати Мура часто використовуються в апаратних реалізаціях, де потрібна висока стабільність вихідного сигналу та відсутність тимчасових "глюків", оскільки вихід змінюється лише після стабілізації нового стану. Це робить їх ідеальними для проектування лічильників, систем керування та інших послідовних логічних схем, де важлива надійна та передбачувана поведінка виходів [9].

Для роботи схеми нам потрібен елемент пам'яті. Наприклад D- тригер.

Тригер - це пристрій послідовного типу з двома стійкими станами рівноваги, призначений для запису і зберігання інформації. Під дією вхідних сигналів тригер може перемикається з одного стійкого стану в інший. При цьому напруга на його виході стрибкоподібно змінюється.

Тригерні схеми класифікують за такими ознаками:

- принципу побудови;
- функціональними можливостями;
- способу прийому логічного сигналу.

Для синтезу був обраний D-тригер.

D-тригер є вдосконаленою формою Set-Reset тригера, де вбудований інвертор ефективно запобігає одночасному активуванню входів Set і Reset, забезпечуючи їх комплементарність. Така архітектура дозволяє керувати логікою перемикавання тригера за допомогою лише одного входу даних, відомого як D (Data). Основна функція D-тригера полягає в зберіганні логічного рівня, присутнього на вході D, та виведенні його на вихід на момент активного фронту тактового сигналу. На відміну від RS-тригерів, де можливий стан невизначеності (обидва входи активні одночасно), D-тригер виключає таку ситуацію на апаратному рівні.

3.2 Блок загального керування роботом

3.2.1 Кодування та зазначена граф-схема алгоритму КА

Виконаємо розмітку станів автомата Мура за заданим алгоритмом роботи КА (рис. 3.1).

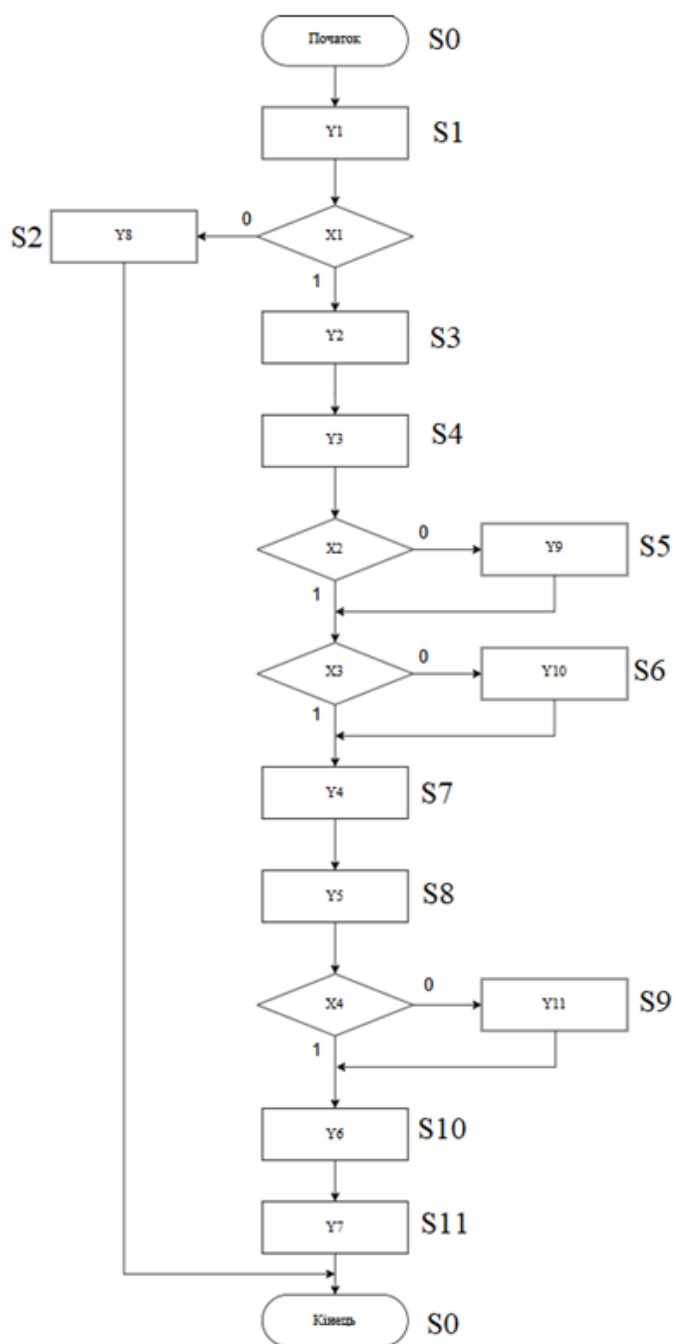


Рисунок 3.1 – Розмічена ГСА автомата Мура

Символом S_0 відмічаються початкова і кінцева вершини ГСА, а кожна операторна вершина відзначається єдиним символом S_i . Таким чином, отримаємо дванадцять (від 0 до 11) різних станів.

Символом X позначені умови переходу від одного елементу до іншого. Наприклад, X_1 відповідає за перевірку зв'язку з іншими блоками.

Символом Y позначені операторні вершини – сигнали, які дають команду для увімкнення певного блоку. Наприклад, Y_3 дає дозвіл на роботу блоку подачі газу.

3.2.2 Обчислення кількості елементів пам'яті для КА

При кодуванні станів кожному стану пристрою повинна бути поставлена у відповідність деяка кодова комбінація. Число розрядів коду вибирається і наступних міркувань: якщо число станів дорівнює S , то для забезпечення S кодових комбінацій потрібно k -розрядний код, де k - мінімальне ціле число, при якому виконується нерівність $S \leq 2^k$ [1].

При двійковому кодуванні станів автомата число тригерів у його схемі порівнює числу розрядів коду і обчислюється за формулою:

$$n = k > \lceil \log_2 S \rceil \quad (3.1)$$

Де S - число станів автомата; k – необхідна кількість тригерів; $\lceil \rceil$ - округлення в більшу сторону.

Виконаємо кодування станів автомата. Виходячи з того, що число станів автомата дорівнює шести, визначаємо необхідну кількість тригерів n :

$$n = 4 > \lceil \log_2 6 \rceil \quad (3.2)$$

Отже, необхідна кількість тригерів для реалізації функціоналу автомата, що синтезується, дорівнює чотирьом.

3.2.3 Кодування та зазначена граф-схема алгоритму КА

Згідно з визначеними станами автомата складаємо таблицю кодування станів автомата (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Кодування станів

Стан	Код	Стан	Код
S_m	$Q_3Q_2Q_1Q_0$	S_m	$Q_3Q_2Q_1Q_0$
S_0	0 0 0 0	S_6	0 1 1 0
S_1	0 0 0 1	S_7	0 1 1 1
S_2	0 0 1 0	S_8	1 0 0 0
S_3	0 0 1 1	S_9	1 0 0 1
S_4	0 1 0 0	S_{10}	1 0 1 0
S_5	0 1 0 1	S_{11}	1 0 1 1

3.2.4 Побудова таблиці переходів та вихідних функцій КА

Далі формуємо функції переходу, збудження і виходів пристрою. За позначеною ГСА, таблицею кодування станів автомата та таблицею переходів тригерів будуюмо таблиці виходів, переходу і збудження пристрою (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 -Таблиця функцій виходів, переходів і збудження автомата Мура

Q_t	Код				Q_{t+1}	Код				Умова	D_3	D_2	D_1	D_0	Функції
	Q_2	Q_2	Q_1	Q_0		Q_2	Q_2	Q_1	Q_0						
S_0	0	0	0	0	S_1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	Y1
S_1	0	0	0	1	S_2	0	0	1	0	!X1	0	0	1	0	Y8
S_1	0	0	0	1	S_3	0	0	1	1	X1	0	0	1	1	Y2
S_2	0	0	1	0	S_0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-
S_3	0	0	1	1	S_4	0	1	0	0	1	0	1	0	0	Y3
S_4	0	1	0	0	S_5	0	1	0	1	!X2	0	1	0	1	Y9
S_4	0	1	0	0	S_6	0	1	1	0	$X2 \cdot !X3$	0	1	1	0	Y10
S_4	0	1	0	0	S_7	0	1	1	1	$X2 \cdot X3$	0	1	1	1	Y4
S_5	0	1	0	1	S_6	0	1	1	0	!X3	0	1	1	0	Y10
S_5	0	1	0	1	S_7	0	1	1	1	X3	0	1	1	1	Y4
S_6	0	1	1	0	S_7	0	1	1	1	1	0	1	1	1	Y4
S_7	0	1	1	1	S_8	1	0	0	0	1	1	0	0	0	Y5
S_8	1	0	0	0	S_9	1	0	0	1	!X4	1	0	0	1	Y11
S_8	1	0	0	0	S_{10}	1	0	1	0	X4	1	0	1	0	Y6
S_9	1	0	0	1	S_{10}	1	0	1	0	1	1	0	1	0	Y6
S_{10}	1	0	1	0	S_{11}	1	0	1	1	1	1	0	1	1	Y7
S_{11}	1	0	1	1	S_0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-

Згідно таблиці 2.3 було сформовано функції збудження пам'яті:

$$D3 = !Q3*Q2*Q1*Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*!Q1*Q0 + Q3*!Q2*Q1*!Q0 = !Q3*Q2*Q1*Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*(!X4 + X4) + Q3*!Q2*!Q1*Q0 + Q3*!Q2*Q1*!Q0 = !Q3*Q2*Q1*Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0 + Q3*!Q2*!Q1*Q0 + Q3*!Q2*Q1*!Q0$$

$$D2 = !Q3*!Q2*Q1*Q0 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*X3 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*X3 + !Q3*Q2*!Q1*Q0*X3 + !Q3*Q2*!Q1*Q0*X3 + !Q3*Q2*Q1*!Q0 = !Q3*!Q2*Q1*Q0 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*(X3+X3) + !Q3*Q2*!Q1*Q0*(X3+X3) + !Q3*Q2*Q1*!Q0 = !Q3*!Q2*Q1*Q0 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*(X2 + X2) + !Q3*Q2*!Q1*Q0 + !Q3*Q2*Q1*!Q0 = !Q3*!Q2*Q1*Q0 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0 + !Q3*Q2*!Q1*Q0 + !Q3*Q2*Q1*!Q0$$

$$D1 = !Q3*!Q2*!Q1*Q0*X1 + !Q3*!Q2*!Q1*Q0*X1 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*X3 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*X3 + !Q3*Q2*!Q1*Q0*X3 + !Q3*Q2*!Q1*Q0*X3 + !Q3*Q2*Q1*!Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*!Q1*Q0 + Q3*!Q2*Q1*!Q0 = !Q3*!Q2*!Q1*Q0*(X1 + X1) + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*(X3 + X3) + !Q3*Q2*!Q1*Q0*(X3+X3) + !Q3*Q2*Q1*!Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*!Q1*Q0 + Q3*!Q2*Q1*!Q0 = !Q3*!Q2*!Q1*Q0 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2 + !Q3*Q2*!Q1*Q0 + !Q3*Q2*Q1*!Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*!Q1*Q0 + Q3*!Q2*Q1*!Q0$$

$$D0 = !Q3*!Q2*!Q1*!Q0 + !Q3*!Q2*!Q1*Q0*X1 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*X3 + !Q3*Q2*!Q1*Q0*X3 + !Q3*Q2*Q1*!Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*Q1*!Q0$$

Функції збудження пам'яті:

$$D0 = !Q3*!Q2*!Q1*!Q0 + !Q3*!Q2*!Q1*Q0*X1 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*X3 + !Q3*Q2*!Q1*Q0*X3 + !Q3*Q2*Q1*!Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*Q1*!Q0$$

$$D1 = !Q3*!Q2*!Q1*Q0 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2 + !Q3*Q2*!Q1*Q0 + !Q3*Q2*Q1*!Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*!Q1*Q0 + Q3*!Q2*Q1*!Q0$$

$$D2 = !Q3*!Q2*Q1*Q0 + !Q3*Q2*!Q1*!Q0 + !Q3*Q2*!Q1*Q0 + !Q3*Q2*Q1*!Q0$$

$$D3 = !Q3*Q2*Q1*Q0 + Q3*!Q2*!Q1*!Q0 + Q3*!Q2*!Q1*Q0 + Q3*!Q2*Q1*!Q0$$

Вихідні сигнали формуються відповідно до наступних формул:

$$Y1 = !Q3*!Q2*!Q1*!Q0$$

$$Y2 = !Q3*!Q2*!Q1*Q0*X1$$

$$Y3 = !Q3*!Q2*Q1*Q0$$

$$Y4 = !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*X3 + !Q3*Q2*!Q1*Q0*X3 + !Q3*Q2*Q1*!Q0$$

$$Y5 = !Q3*Q2*Q1*Q0$$

$$Y6 = Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4 + Q3*!Q2*!Q1*Q0$$

$$Y7 = Q3*!Q2*Q1*!Q0$$

$$Y8 = !Q3*!Q2*!Q1*Q0*X1$$

$$Y9 = !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2$$

$$Y10 = !Q3*Q2*!Q1*!Q0*X2*X3$$

$$Y11 = Q3*!Q2*!Q1*!Q0*X4$$

3.3 Блок керування зварювальною головкою

Блок керування зварювальною головкою виконує ключову роль у процесі координованого переміщення виконавчого механізму вздовж заданого маршруту. Його основним призначенням є забезпечення точного й безпечного переміщення зварювальної головки по заздалегідь визначеній траєкторії у тривимірному просторі (по координатах X, Y, Z), відповідно до технологічних параметрів зварювання.

Блок виконує перевірку наявності з'єднання з виконавчими модулями, зчитує координатну інформацію, формує профілі переміщення та ініціює синхронний рух

по всіх осях. Також передбачено контроль помилок та повернення до стандартного положення після завершення зварювального циклу.

3.3.1 Кодування та зазначена граф-схема алгоритму КА

Виконаємо розмітку станів автомата Мура за заданим алгоритмом роботи КА (рис. 3.2).

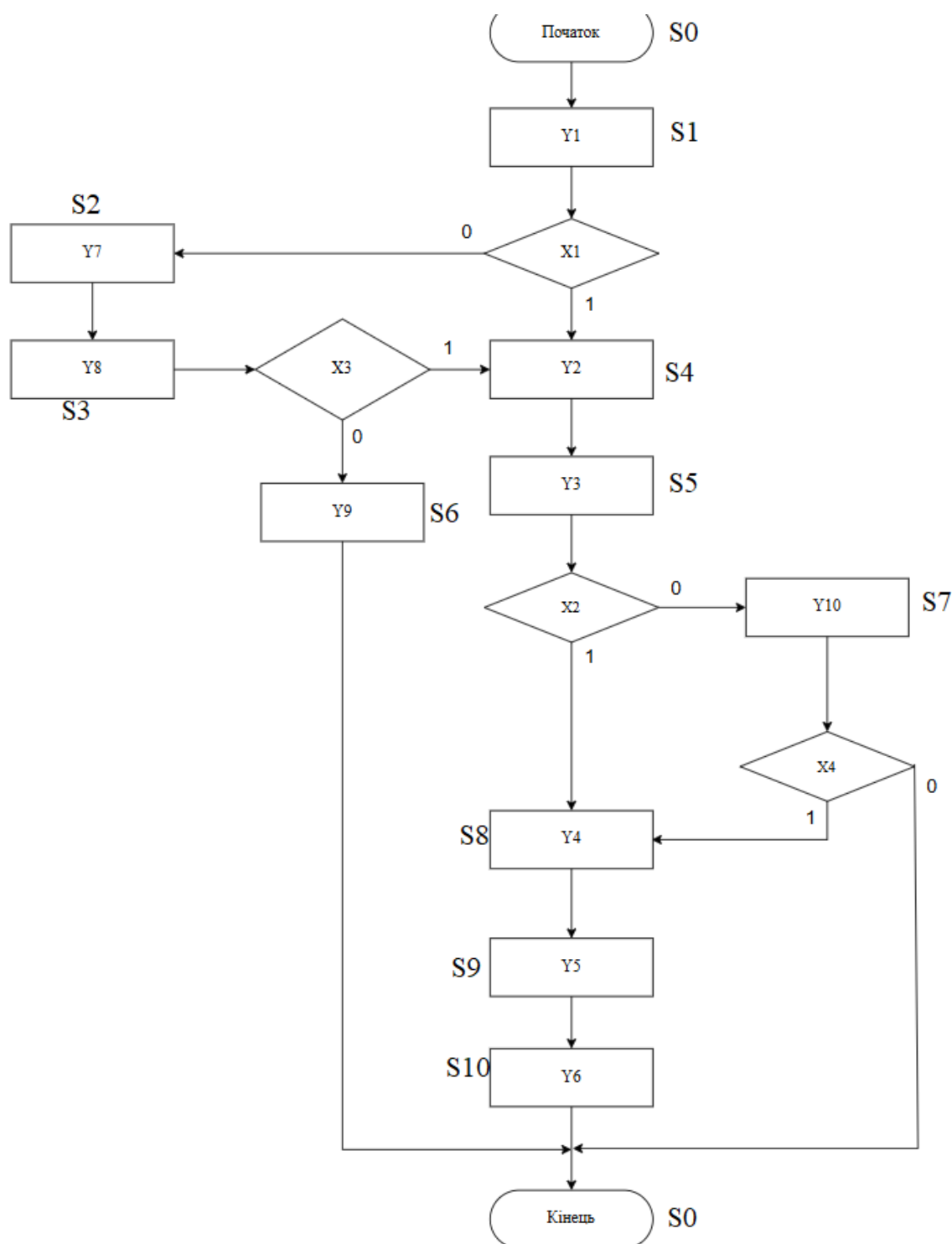


Рисунок 3.2 – Розмічена ГСА автомата Мура

Символом S_0 відмічаються початкова і кінцева вершини ГСА, а кожна операторна вершина відзначається єдиним символом S_i . Таким чином, отримаємо одинадцять (від 0 до 10) різних станів.

Символом X позначені умови переходу від одного елементу до іншого. Наприклад, X_1 відповідає за перевірку завантаження траєкторії з інтерфейсу.

Символом Y позначені операторні вершини – сигнали, які дають команду для увімкнення певного блоку. Наприклад, Y_8 дає дозвіл на роботу блоку калібрування приводів.

3.3.2 Обчислення кількості елементів пам'яті для КА

Виконаємо кодування станів автомата.

$$n = 4 > \lceil \log_2 11 \rceil \quad (3.3)$$

Отже, необхідна кількість тригерів для реалізації функціоналу автомата, що синтезується, дорівнює чотирьом.

3.3.3 Кодування та зазначена граф-схема алгоритму КА

Згідно з визначеними станами автомата складаємо таблицю кодування станів автомата (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Кодування станів

Стан	Код	Стан	Код
S_m	$Q_3Q_2Q_1Q_0$	S_m	$Q_3Q_2Q_1Q_0$
S_0	0 0 0 0	S_6	0 1 1 0
S_1	0 0 0 1	S_7	0 1 1 1
S_2	0 0 1 0	S_8	1 0 0 0
S_3	0 0 1 1	S_9	1 0 0 1
S_4	0 1 0 0	S_{10}	1 0 1 0
S_5	0 1 0 1		

3.3.4 Побудова таблиці переходів та вихідних функцій КА

Далі формуємо функції переходу, збудження і виходів пристрою. За позначеною ГСА, таблицею кодування станів автомата та таблицею переходів тригерів будемо таблиці виходів, переходу і збудження пристрою (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Кодування станів

Q _t	Код				Q _{t+1}	Код				Умова	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	Функції
	Q ₂	Q ₂	Q ₁	Q ₀		Q ₂	Q ₂	Q ₁	Q ₀						
S ₀	0	0	0	0	S ₁	0	0	0	1	1	0	0	0	1	Y ₁
S ₁	0	0	0	1	S ₂	0	0	1	0	!X ₁	0	0	1	0	Y ₇
S ₁	0	0	0	1	S ₄	0	1	0	0	X ₁	0	1	0	0	Y ₂
S ₂	0	0	1	0	S ₃	0	0	1	1	1	0	0	1	1	Y ₈
S ₃	0	0	1	1	S ₄	0	1	0	0	X ₃	0	1	0	0	Y ₂
S ₃	0	0	1	1	S ₆	0	1	1	0	!X ₃	0	1	1	0	Y ₉
S ₄	0	1	0	0	S ₅	0	1	0	1	1	0	1	0	1	Y ₃
S ₅	0	1	0	1	S ₇	0	1	1	1	!X ₂	0	1	1	1	Y ₁₀
S ₅	0	1	0	1	S ₈	1	0	0	0	X ₂	1	0	0	0	Y ₄
S ₆	0	1	1	0	S ₀	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-
S ₇	0	1	1	1	S ₈	1	0	0	0	X ₄	1	0	0	0	Y ₄
S ₇	0	1	1	1	S ₀	0	0	0	0	!X ₄	0	0	0	0	-
S ₈	1	0	0	0	S ₉	1	0	0	1	1	1	0	0	1	Y ₅
S ₉	1	0	0	1	S ₁₀	1	0	1	0	1	1	0	1	0	Y ₆
S ₁₀	1	0	1	0	S ₀	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-

Згідно таблиці 3.4 формуємо функції збудження пам'яті:

$$D_3 = !Q_3 * Q_2 * !Q_1 * Q_0 * X_2 + !Q_3 * Q_2 * Q_1 * Q_0 * X_4 + Q_3 * !Q_2 * !Q_1 * !Q_0 + Q_3 * !Q_2 * !Q_1 * Q_0$$

$$D_2 = !Q_3 * !Q_2 * !Q_1 * Q_0 * X_1 + !Q_3 * !Q_2 * Q_1 * Q_0 * X_3 + !Q_3 * !Q_2 * Q_1 * Q_0 * !X_3 + !Q_3 * Q_2 * !Q_1 * !Q_0 + !Q_3 * Q_2 * !Q_1 * Q_0 * !X_2 = !Q_3 * !Q_2 * !Q_1 * Q_0 * X_1 + !Q_3 * !Q_2 * Q_1 * Q_0 * (X_3 + !X_3) + !Q_3 * Q_2 * !Q_1 * !Q_0 + !Q_3 * Q_2 * !Q_1 * Q_0 * !X_2 = !Q_3 * (!Q_2 * !Q_1 * Q_0 * X_1 + !Q_2 * Q_1 * Q_0 + Q_2 * !Q_1 * !Q_0 + Q_2 * !Q_1 * Q_0 * !X_2)$$

$$D_1 = !Q_3 * !Q_2 * !Q_1 * Q_0 * !X_1 + !Q_3 * !Q_2 * Q_1 * !Q_0 + !Q_3 * !Q_2 * Q_1 * Q_0 * !X_3 + !Q_3 * Q_2 * !Q_1 * Q_0 * !X_2 + Q_3 * !Q_2 * !Q_1 * Q_0$$

$$D_0 = !Q_3 * !Q_2 * !Q_1 * !Q_0 + !Q_3 * !Q_2 * Q_1 * !Q_0 + !Q_3 * Q_2 * !Q_1 * !Q_0 + !Q_3 * Q_2 * !Q_1 * Q_0 * !X_2 + Q_3 * !Q_2 * !Q_1 * !Q_0$$

Вихідні сигнали формуються відповідно до наступних формул:

$$Y1 = !Q3 * !Q2 * !Q1 * !Q0$$

$$Y2 = !Q3 * !Q2 * !Q1 * Q0 * X1 + !Q3 * !Q2 * Q1 * Q0 * X3 = !Q3 * !Q2 * Q0 * (!Q1 * X1 + Q1 * X3)$$

$$Y3 = !Q3 * Q2 * !Q1 * !Q0$$

$$Y4 = !Q3 * Q2 * !Q1 * Q0 * X2 + !Q3 * Q2 * Q1 * Q0 * X4 = !Q3 * Q2 * Q0 * (!Q1 * X2 + Q1 * X4)$$

$$Y5 = Q3 * !Q2 * !Q1 * !Q0$$

$$Y6 = Q3 * !Q2 * !Q1 * Q0$$

$$Y7 = !Q3 * !Q2 * !Q1 * Q0 * !X1$$

$$Y8 = !Q3 * !Q2 * Q1 * !Q0$$

$$Y9 = !Q3 * !Q2 * Q1 * Q0 * !X3$$

$$Y10 = !Q3 * Q2 * !Q1 * Q0 * !X2$$

В результаті було отримано функції збудження пам'яті й вихідні сигнали для блоку загального керування роботом та блоку керування зварювальною головкою, які можна реалізувати на мові VHDL, використовуючи САПР Quartus II.

4 РЕАЛІЗАЦІЯ СХЕМ НА VHDL

4.1 Огляд сімейств ПЛІС

У рамках даної роботи було прийнято рішення реалізувати розроблені алгоритми керування автоматизованими зварювальними системами на мові VHDL у середовищі Quartus II. Цей вибір обумовлений потребою забезпечити високу швидкодію, детермінованість роботи та можливість апаратної оптимізації критичних функцій. Використання VHDL дозволяє ефективно описувати паралельні обчислювальні процеси, що є ключовим для систем реального часу, таких як керування зварювальними роботами.

Для реалізації алгоритмів керування було обрано три сімейства ПЛІС компанії Intel (Altera), що представляють різні рівні продуктивності: Cyclone IV E як економічне рішення, Cyclone V для завдань середньої складності, та Arria II GX для високопродуктивних застосувань. Кожне з цих сімейств має свої особливості архітектури, що впливає на процес проектування та оптимізації.

Далі детальніше про кожне з них.

Cyclone IV — це сімейство енергоефективних ПЛІС, розроблених компанією Altera (нині Intel), орієнтоване на вартісно оптимізовані системи з середнім рівнем складності. Ці пристрої виготовлені з використанням 60-нм CMOS-технології з низьким енергоспоживанням та дозволяють реалізовувати широкий спектр цифрових проектів, включаючи обробку сигналів, передачу даних, графічні контролери та мікропроцесорні підсистеми. Сімейство Cyclone IV поділяється на дві основні серії: Cyclone IV E (Enhanced) та Cyclone IV GX.

Cyclone IV E призначене для застосувань, у яких не потрібні високошвидкісні трансивери. Воно забезпечує велику щільність логіки, підтримку високошвидкісних паралельних інтерфейсів, вбудовану багаторівневу пам'ять (до 6.3 Мб), а також інтегровані апаратні блоки множення. Серед додаткових функцій — підтримка інтерфейсів DDR, DDR2, SDRAM, а також можливість реалізації різноманітних цифрових протоколів за допомогою IP-ядра Nios II.

Cyclone IV GX, своєю чергою, орієнтована на системи, де потрібна передача даних по високошвидкісних серійних інтерфейсах. Пристрої цієї серії мають до 8 вбудованих трансиверів, які працюють на швидкостях до 3.125 Гбіт/с. Вони дозволяють реалізовувати інтерфейси PCI Express Gen1, Serial Digital Interface (SDI), Gigabit Ethernet, Serial ATA та інші. Завдяки підтримці Signal Integrity Tools, можливості роботи з transceiver reconfiguration, а також точного внутрішнього тактування за допомогою fractional PLL, серія GX дає змогу створювати надійні інтерфейсні підсистеми без додаткових мікросхем.

Обидві серії Cyclone IV підтримують до 529 користувацьких I/O ліній, роботу з напругами 1.2В, 1.8В, 2.5В, 3.3В, а також забезпечують захист від перенапруги та коротких замикань. Пристрої мають від 6 до 150 тисяч логічних елементів (LE), до

360 18×18-бітних апаратних множників (DSP), а також вбудовані конфігураційні блоки для роботи з різними джерелами прошивки (Flash, EPCQ, SPI, JTAG).

Cyclone IV є хорошим вибором для задач, де потрібен баланс між продуктивністю, енергоспоживанням і вартістю. Вони часто використовуються в дисплейних системах (TFT-контролери), медицині (портативна діагностика), відеоспостереженні, побутовій електроніці, комутаційних вузлах, освітленні, а також в промислових контролерах і приводах [11].

Cyclone V — це високопродуктивне сімейство ПЛІС середнього рівня, розроблене компанією Altera (нині Intel), яке поєднує високу щільність логіки, гнучкість конфігурування та низьке енергоспоживання. Побудоване на 28-нм CMOS-технології, це сімейство орієнтоване на вбудовані системи, цифрову обробку сигналів та промислові застосування. ПЛІС Cyclone V представлені кількома серіями, серед яких: Cyclone V E (економічна версія без трансиверів), Cyclone V GX (з вбудованими високошвидкісними трансиверами) та Cyclone V SoC — гібридна архітектура, яка поєднує FPGA з двоядерним процесором ARM Cortex-A9.

Пристрої Cyclone V підтримують до 301 тисячі логічних елементів, мають до 13,3 Мб вбудованої пам'яті, до 312 апаратних цифрових сигнальних процесорів (DSP) і до 12 вбудованих трансиверів із пропускною здатністю до 6,144 Гбіт/с. Завдяки цьому вони можуть реалізовувати високошвидкісні інтерфейси, такі як PCI Express, Gigabit Ethernet, SATA, CPRI та інші. Особливістю серії SoC є наявність обчислювального ядра ARM, яке взаємодіє з програмованою логікою через високошвидкісні канали обміну даними, що дозволяє створювати потужні інтегровані системи "на одному чипі".

Cyclone V відзначається оптимальним співвідношенням між енергоефективністю, функціональністю та ціною, тому широко використовується в таких галузях як відеообробка, телекомунікації, промислова автоматизація, вбудовані керуючі системи, робототехніка та автомобільна електроніка. Завдяки підтримці ARM-процесора, високошвидкісних трансиверів і сучасних інтерфейсів

пам'яті, ці ПЛІС ідеально підходять для реалізації систем реального часу з великою кількістю паралельних задач [12].

Arria II GX — це програмовані логічні інтегральні схеми середнього рівня продуктивності, розроблені компанією Altera (нині Intel), що поєднують високу щільність логічних елементів, підтримку високошвидкісних трансиверів і енергоефективну архітектуру. Пристрої побудовані на 40-нм техпроцесі з низьким споживанням енергії, і призначені для застосувань, де потрібна надійна серійна передача даних із високою пропускнуою здатністю при помірній вартості.

Arria II GX має вбудовані трансивери, здатні працювати на швидкості до 6.375 Гбіт/с, що дозволяє реалізовувати такі інтерфейси, як PCI Express (Gen1/Gen2), Serial RapidIO, Gigabit Ethernet, XAUI, SerialLite II, SDI, а також підключення до зовнішніх високошвидкісних приймально-передавальних пристроїв. Архітектура пристрою включає до 256 тисяч логічних елементів, до 8.5 Мб вбудованої пам'яті, до 780 апаратних 18×18 -бітних множників (DSP-блоків) і підтримку широкого спектра I/O стандартів (LVDS, SSTL, HSTL тощо). Крім того, в ПЛІС інтегровано вбудовані контролери пам'яті DDR2/DDR3 та багатоеlementні фазові автопідлаштовуючі контури (PLL) для точного синхронного тактування.

Arria II GX оптимізована для високошвидкісної обробки потокових даних, де критичними є затримка, пропускну здатність і надійність передачі. Пристрої цього сімейства зазвичай використовуються в телекомунікаційних вузлах, мережевих адаптерах, базових станціях та інших складних цифрових пристроях, які потребують швидкої серійної комунікації з високою інтеграцією логіки [13].

4.2 Розробка і моделювання схем

Базуючись на отриманих функціях збудження і вихідних сигналах було створено VHDL код. Повні лістинги коду містяться в Додатку А.

Для перевірки коректності реалізації проєктованих логічних схем було проведено їх тестування за допомогою часових діаграм у середовищі моделювання Quartus II.

4.2.1 Тестування блоку загального керування роботом

Тестування автомата виконувалося з метою перевірки правильності виконання заданих функцій та відповідності вихідних сигналів заданому алгоритму. Часову діаграму тестування автомата зображено на рисунку 4.1.

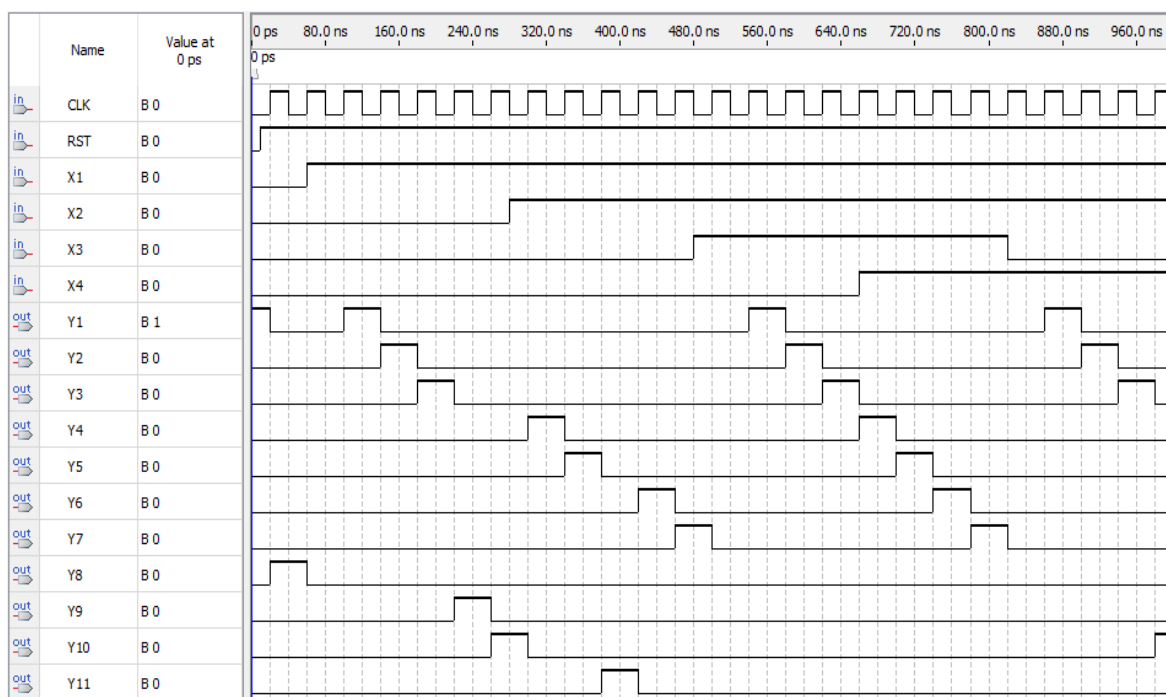


Рисунок 4.1 – Часова діаграма тестування блоку загального керування роботом

Проаналізувавши часову діаграму можна зробити висновок, що автомат працює коректно. Наприклад, при значенні $X1=0$ на сигнал $Y8$ подається позитивне значення, яке повідомляє, що зв'язку з іншими блоками зварювального робота немає, а при значенні $X1=1$ позитивне значення подається вже на сигнал $Y1$, який дає дозвіл на роботу блоку зчитування координат.

4.2.2 Тестування блоку керування зварювальною головкою

Тестування автомата виконувалося з метою перевірки правильності виконання заданих функцій та відповідності вихідних сигналів заданому алгоритму. Часову діаграму тестування автомата зображено на рисунку 4.2.

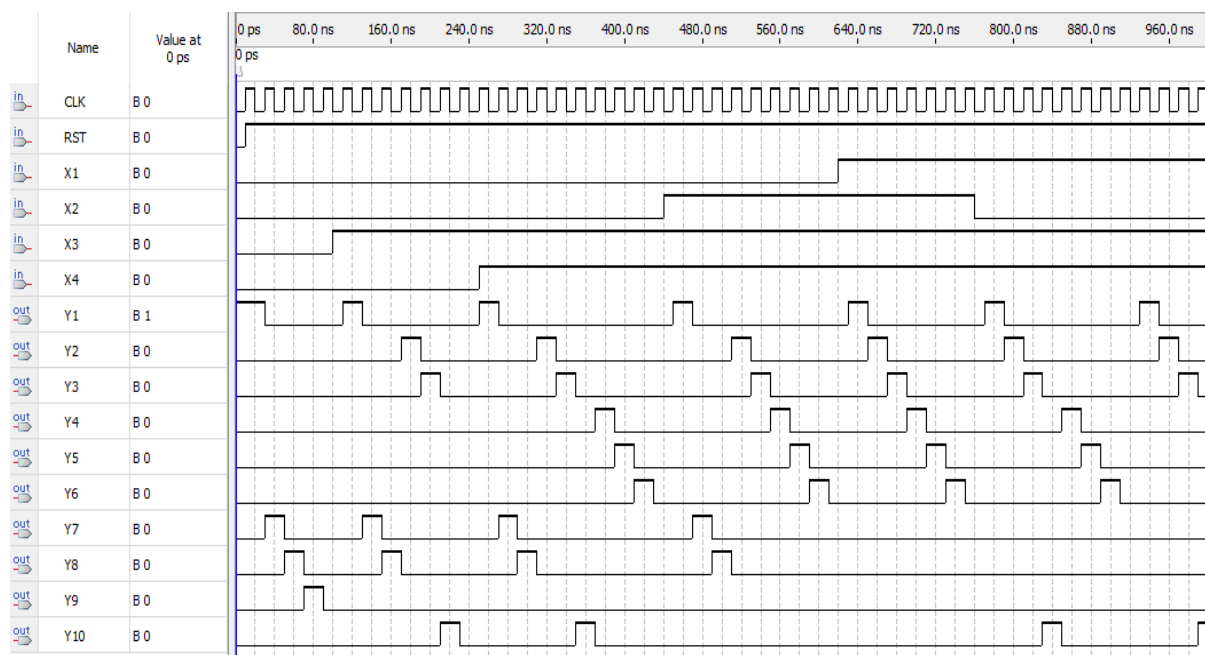


Рисунок 4.2 – Часова діаграма тестування блоку керування головкою

Проаналізувавши часову діаграму можна зробити висновок, що автомат працює коректно. Наприклад, при значенні $X1=0$ на сигнал $Y7$ подається позитивне значення, яке повідомляє про помилку в роботі приводів, далі активується сигнал $Y8$, який дає дозвіл на роботу блоку калібрування приводів. А сигнал $Y10$ набуває позитивне значення тільки тоді, коли $X2=0$.

4.3 Імплементация на різні ПЛІС

4.3.1 Блок керування зварювальним роботом

У процесі роботи було отримано звіти з імплементції проекту на різних мікросхемах фірми Altera. На рисунках 4.3, 4.4, 4.5 зображені звіти з імплементції у середовищі Quartus.

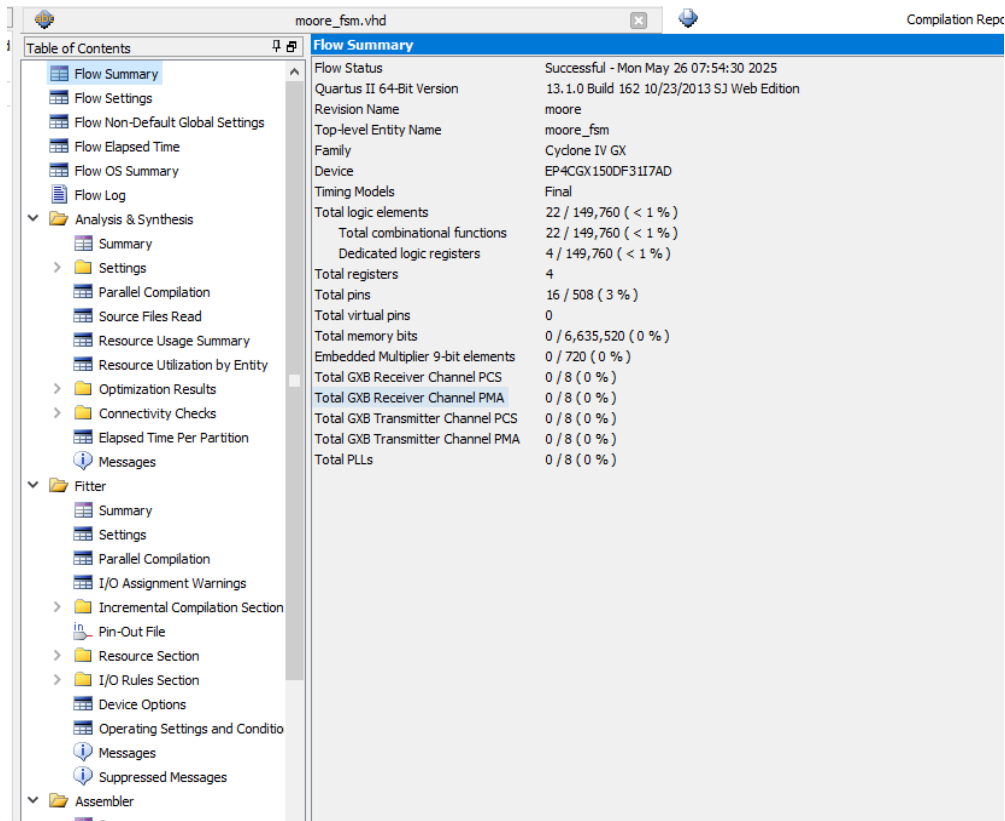


Рисунок 4.3 – Результати імплементації на мікросхемі Cyclone IV

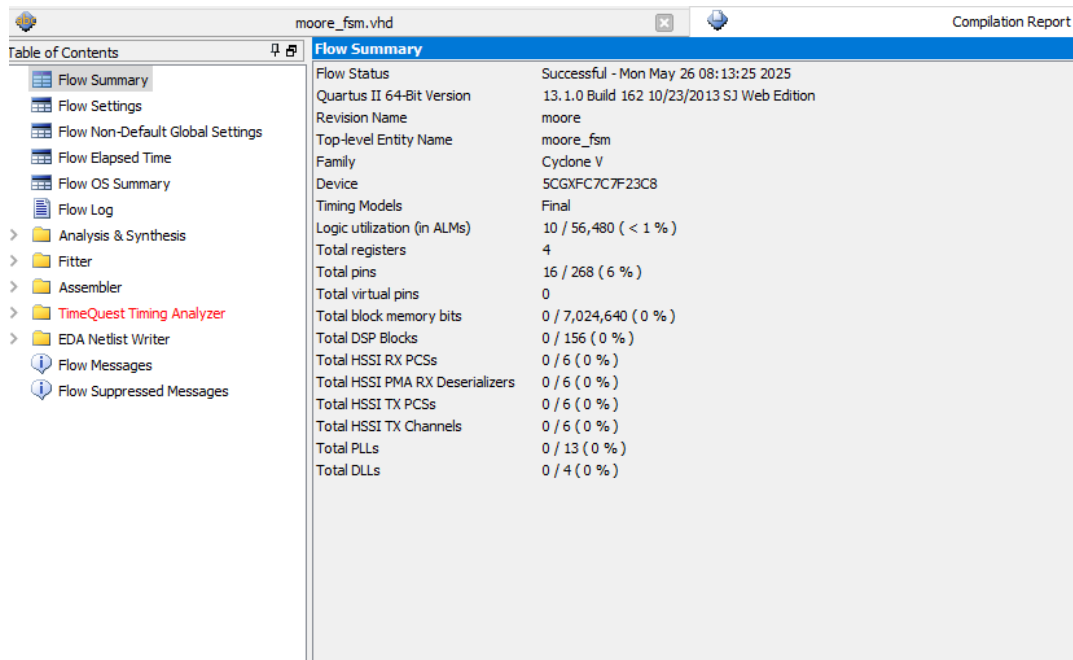


Рисунок 4.4 – Результати імплементації на мікросхемі Cyclone V

Flow Summary	
Flow Status	Successful - Mon May 26 08:15:09 2025
Quartus II 64-Bit Version	13.1.0 Build 162 10/23/2013 SJ Web Edition
Revision Name	moore
Top-level Entity Name	moore_fsm
Family	Arria II GX
Logic utilization	< 1 %
Combinational ALUTs	14 / 36,100 (< 1 %)
Memory ALUTs	0 / 18,050 (0 %)
Dedicated logic registers	4 / 36,100 (< 1 %)
Total registers	4
Total pins	16 / 176 (9 %)
Total virtual pins	0
Total block memory bits	0 / 2,939,904 (0 %)
DSP block 18-bit elements	0 / 232 (0 %)
Total GXB Receiver Channel PCS	0 / 4 (0 %)
Total GXB Receiver Channel PMA	0 / 4 (0 %)
Total GXB Transmitter Channel PCS	0 / 4 (0 %)
Total GXB Transmitter Channel PMA	0 / 4 (0 %)
Total PLLs	0 / 4 (0 %)
Total DLLs	0 / 2 (0 %)
Device	EP2AGX45CU17I3
Timing Models	Final

Рисунок 4.5 – Результати імплементації на мікросхемі Arria II

У результаті імплементації керуючого автомата в середовищі Quartus II було виконано синтез проєкту на трьох різних мікросхемах ПЛІС: Cyclone IV, Cyclone V та Arria II GX. У всіх випадках компіляція завершилась успішно, без помилок і з використанням базових ресурсів мікросхем. Кількість задіяних ресурсів різним типом мікросхем в рамках даного проєкту наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 4.1 – Апаратурні затрати на різних мікросхемах

Family	Logic elements	Total registers	Total pins	Total memory bits
Cyclone IV GX EP4CGX150DF31I7AD	22	4	16	0
Cyclone V 5CGXFC7C7F23C8	10	4	16	0
Arria II GX EP2AGX45CU17I3	14	4	16	0

На рисунках 4.6, 4.7, 4.8 наведені топології мікросхем у середовищі Quartus.

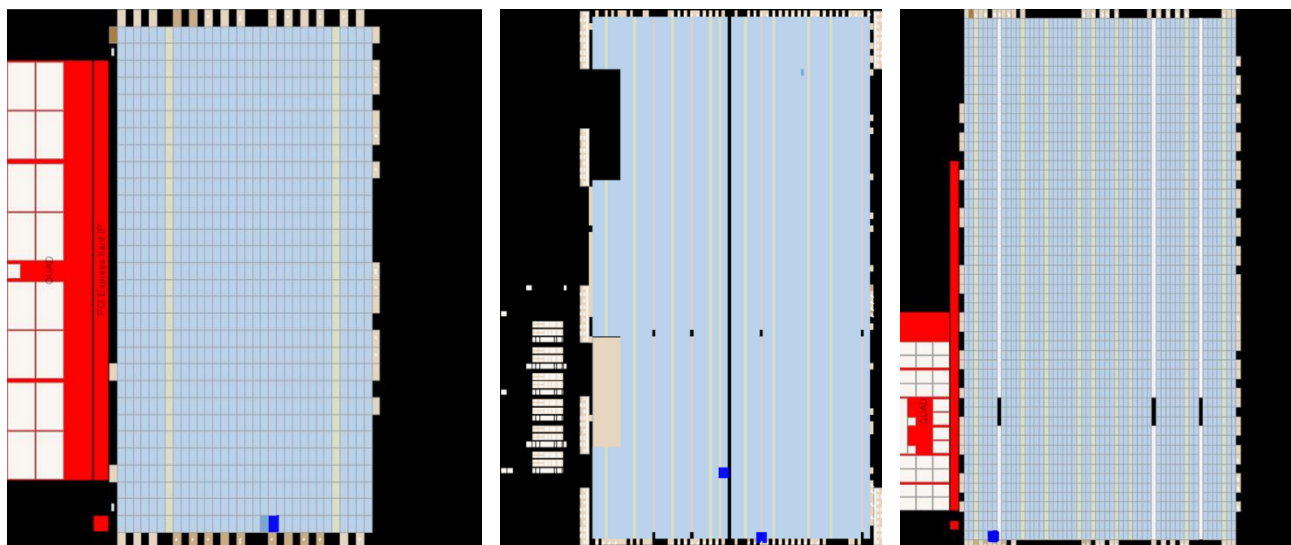


Рисунок 4.6 – 4.8 – Топологія мікросхеми Cyclone IV, Cyclone V, Arria II GX

Реалізація автоматів керування на різних сімействах ПЛІС виявила чіткі відмінності в топологічних рішеннях. На Cyclone IV спостерігається щільне компонування логічних елементів, що обмежує складність реалізації, але забезпечує економічне використання ресурсів. Cyclone V демонструє більш збалансовану архітектуру з покращеними маршрутизаційними можливостями, що дозволяє реалізовувати складніші автомати без суттєвого збільшення вартості. Найбільш просунуті топологічні рішення представлені в Arria II, де спеціалізовані зони та розширені комунікаційні канали забезпечують оптимальні умови для високопродуктивних систем.

Реалізований автомат керування демонструє ефективне використання ресурсів ПЛІС, займаючи лише незначну частину доступного простору на кристалі.

4.3.2 Блок керування зварювальною головкою

У процесі роботи було отримано звіти з імплементації проекту на різних мікросхемах фірми Altera. На рисунках 4.9, 4.10, 4.11 зображені звіти з імплементації у середовищі Quartus.

Table of Contents		Flow Summary	
Flow Summary		Flow Status	Successful - Tue May 27 02:18:00 2025
Flow Settings		Quartus II 64-Bit Version	13.1.0 Build 162 10/23/2013 SJ Web Edition
Flow Non-Default Global Settings		Revision Name	moore
Flow Elapsed Time		Top-level Entity Name	moore_fsm
Flow OS Summary		Family	Cyclone IV GX
Flow Log		Total logic elements	22 / 14,400 (< 1 %)
Analysis & Synthesis		Total combinational functions	22 / 14,400 (< 1 %)
Fitter		Dedicated logic registers	4 / 14,400 (< 1 %)
Assembler		Total registers	4
TimeQuest Timing Analyzer		Total pins	16 / 81 (20 %)
EDA Netlist Writer		Total virtual pins	0
Flow Messages		Total memory bits	0 / 552,960 (0 %)
Flow Suppressed Messages		Embedded Multiplier 9-bit elements	0
		Total GXB Receiver Channel PCS	0 / 2 (0 %)
		Total GXB Receiver Channel PMA	0 / 2 (0 %)
		Total GXB Transmitter Channel PCS	0 / 2 (0 %)
		Total GXB Transmitter Channel PMA	0 / 2 (0 %)
		Total PLLs	0 / 3 (0 %)
		Device	EP4CGX15BF14C6
		Timing Models	Final

Рисунок 4.9 – Результати імплементації на мікросхемі Cyclone IV

Table of Contents		Flow Summary	
Flow Summary		Flow Status	Successful - Tue May 27 02:20:42 2025
Flow Settings		Quartus II 64-Bit Version	13.1.0 Build 162 10/23/2013 SJ Web Edition
Flow Non-Default Global Settings		Revision Name	moore
Flow Elapsed Time		Top-level Entity Name	moore_fsm
Flow OS Summary		Family	Cyclone V
Flow Log		Device	5CGXFC7C7F23C8
Analysis & Synthesis		Timing Models	Final
Fitter		Logic utilization (in ALMs)	10 / 56,480 (< 1 %)
Assembler		Total registers	4
TimeQuest Timing Analyzer		Total pins	16 / 268 (6 %)
EDA Netlist Writer		Total virtual pins	0
Flow Messages		Total block memory bits	0 / 7,024,640 (0 %)
Flow Suppressed Messages		Total DSP Blocks	0 / 156 (0 %)
		Total HSSI RX PCSs	0 / 6 (0 %)
		Total HSSI PMA RX Deserializers	0 / 6 (0 %)
		Total HSSI TX PCSs	0 / 6 (0 %)
		Total HSSI TX Channels	0 / 6 (0 %)
		Total PLLs	0 / 13 (0 %)
		Total DLLs	0 / 4 (0 %)

Рисунок 4.10 – Результати імплементації на мікросхемі Cyclone V

Table of Contents		Flow Summary	
- Flow Summary - Flow Settings - Flow Non-Default Global Settings - Flow Elapsed Time - Flow OS Summary - Flow Log - Analysis & Synthesis - Fitter - Assembler - TimeQuest Timing Analyzer - EDA Netlist Writer - Flow Messages - Flow Suppressed Messages		Flow Status Successful - Tue May 27 02:16:46 2025 Quartus II 64-Bit Version 13.1.0 Build 162 10/23/2013 SJ Web Edition Revision Name moore Top-level Entity Name moore_fsm Family Arria II GX Logic utilization < 1 % Combinational ALUTs 14 / 36,100 (< 1 %) Memory ALUTs 0 / 18,050 (0 %) Dedicated logic registers 4 / 36,100 (< 1 %) Total registers 4 Total pins 16 / 176 (9 %) Total virtual pins 0 Total block memory bits 0 / 2,939,904 (0 %) DSP block 18-bit elements 0 / 232 (0 %) Total GXB Receiver Channel PCS 0 / 4 (0 %) Total GXB Receiver Channel PMA 0 / 4 (0 %) Total GXB Transmitter Channel PCS 0 / 4 (0 %) Total GXB Transmitter Channel PMA 0 / 4 (0 %) Total PLLs 0 / 4 (0 %) Total DLLs 0 / 2 (0 %) Device EP2AGX45CU17I3 Timing Models Final	

Рисунок 4.11 – Результати імплементації на мікросхемі Arria II

У результаті імплементації керуючого автомата в середовищі Quartus II було виконано синтез проєкту на трьох різних мікросхемах. У всіх випадках компіляція завершилась успішно, без помилок і з використанням базових ресурсів мікросхем. Кількість задіяних ресурсів кожним типом мікросхем в рамках даного проєкту наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Апаратурні затрати на різних мікросхемах

Family	Logic elements	Total registers	Total pins	Total memory bits
Cyclone IV GX EP4CGX150DF31I7AD	22	4	16	0
Cyclone V 5CGXFC7C7F23C8	10	4	16	0
Arria II GX EP2AGX45CU17I3	14	4	16	0

Мінімальне навантаження на логічні ресурси (завжди менше 1%) відкриває широкі можливості для розширення функціоналу системи шляхом додавання нових модулів керування на тому ж кристалі.

На рисунках 4.12, 4.13, 4.14 наведені топології мікросхем у середовищі Quartus.

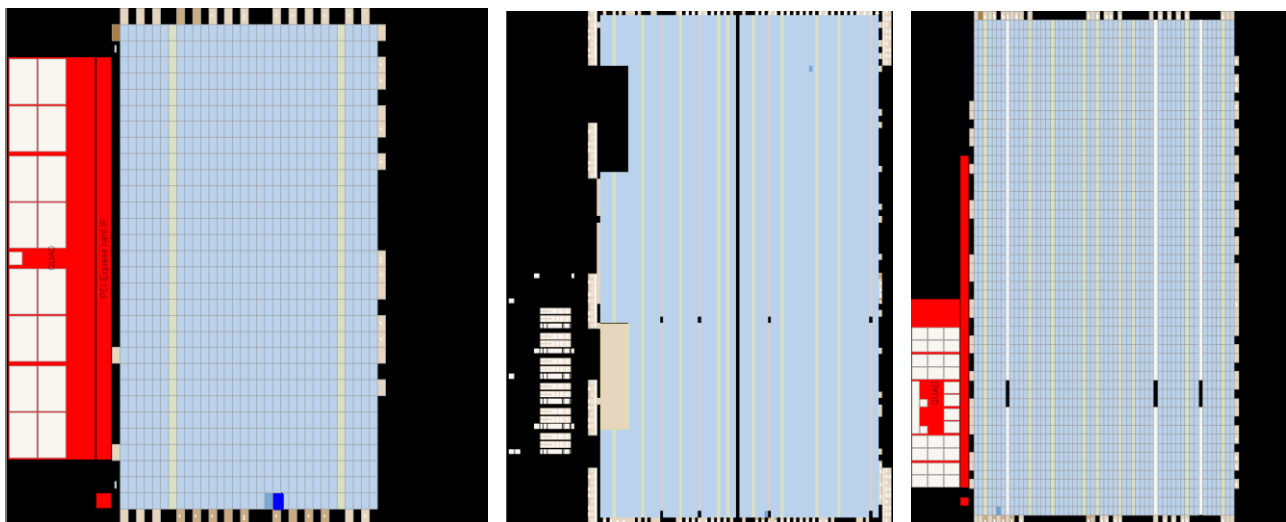


Рисунок 4.12 - 14 – Топологія мікросхеми Cyclone IV, Cyclone V, Arria II GX

Топологічний аналіз реалізації керуючого автомата на різних сімействах ПЛІС виявив характерні особливості кожної платформи. На Cyclone IV спостерігається класична компактна структура з чіткою локалізацією логічних елементів у спеціалізованих зонах кристала, що дозволяє ефективно використовувати доступні ресурси при обмеженій кількості маршрутизаційних каналів. Cyclone V демонструє більш гнучке розміщення завдяки вдосконаленій архітектурі ALM-модулів, де елементи автомата розподілені рівномірніше, що покращує часові характеристики системи. Найбільш просунуту топологію реалізації показує Arria II, де використовуються спеціалізовані зони для високошвидкісних блоків та розвинена система міжз'єднань, що забезпечує мінімальні затримки сигналів.

4.4 Перспективи розробки

Мінімальне використання ресурсів ПЛІС (менше 1% кристала) реалізованими автоматами керування створює значний потенціал для подальшого розвитку системи. Вільні апаратні ресурси дозволяють інтегрувати додаткові функціональні блоки без зміни базової платформи. Першочерговими напрямками розширення є розробка спеціалізованих модулів контролю подачі захисного газу з PID-регулюванням, системи безпеки з швидким аварійним відключенням, а також прецизійного блоку керування позиціонуванням робочого столу.

Архітектура проекту на VHDL передбачає можливість поступового додавання нових модулів у вигляді окремих блоків, що комунікують через внутрішні шини. Це дозволить створити комплексну систему керування зварювальним процесом, де кожен підмодуль виконує спеціалізовані функції при збереженні єдиної апаратної платформи. Особливу перспективу має інтеграція систем технічного зору та аналізу акустичної емісії для покращення якості контролю процесу.

Модульний підхід забезпечує гнучкість у вдосконаленні системи - нові функції можуть додаватись по мірі необхідності без перепроєктування базової архітектури. Вільні ресурси ПЛІС також дозволяють розглядати можливість реалізації алгоритмів машинного навчання для прогнозування оптимальних режимів зварювання, що значно підвищить ефективність роботи системи в динамічних виробничих умовах.

ВИСНОВКИ

У межах дипломної роботи було успішно розроблено та реалізовано автоматизовану підсистему керування зварювальним роботом на базі ПЛІС. Основною метою роботи було створення ефективної, гнучкої та масштабованої архітектури, здатної забезпечити точне керування зварювальним процесом із мінімальним використанням апаратних ресурсів.

В ході розробки було сформовано загальну структуру системи, розроблено алгоритми роботи для загального керування роботом та блоку керування зварювальною головою, сформовано функції збудження пам'яті та функції виходів для кожного блоку. На основі цих функцій було розроблено код, для реалізації даних блоків на мові VHDL.

Функціональність розробленої підсистеми була перевірена шляхом моделювання та тестування у середовищі Quartus II. Використання часових діаграм дозволило детально проаналізувати роботу кожного модуля на різних етапах виконання команд та підтвердити коректність функціонування системи.

Додатково, продуктивність та стабільність роботи підсистеми були підтверджені на реальних FPGA платформах Altera (Intel). Результати тестування продемонстрували стабільну роботу автоматизованої підсистеми керування, підтвердили її сумісність з різними архітектурами ПЛІС та довели доцільність використання такого підходу для задач автоматизації зварювальних процесів та цифрової обробки даних у промислових застосуваннях.

Загалом, розроблена підсистема є кроком у напрямку автоматизації зварювальних процесів, пропонуючи ефективне, гнучке та надійне рішення, яке може бути вдосконалено та масштабовано для вирішення більш складних завдань у майбутньому.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Anikin, P. Automation control system of 3D printing robotic platform with implemented wire + arc welding technology / P. Anikin, G. Shilo, R. Kulykovskiy, D. Molochkov // Electrical Engineering and Power Engineering URL: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-4-4> (дата звернення: 17.03.2025).

2. JHY Robotic. What is a welding robot and how to use a welding robot? URL: <http://uk.jhyrobotic.com/news/what-is-a-welding-robot-and-how-to-use-a-welding-robot/> (дата звернення: 01.04.2025).

3. EVS Robot. Robot intelligent welding system. URL: <https://www.evrobot.com/robot-intelligent-welding-system> (дата звернення: 03.04.2025).

4. Panasonic. GIII Tawers – Arc Welding Robotics. URL: <https://connect.na.panasonic.com/smart-factory/welding-robotics/arc/giii-tawers> (дата звернення: 05.04.2025).

5. KUKA. KUKA ArcTech – Welding Software. URL: https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/software/application-software/kuka_arctech (дата звернення: 08.04.2025).

6. Посібник з технологій проектування комп'ютерних систем. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u34/posibnik_tehnologiyi_proektuvannya_kompyuternih_sistem.pdf (дата звернення: 08.04.2025).

7. Мікроконтролери: навчальний матеріал // Львівський національний університет природокористування. URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/16%2C05/other/tema_10__mikrokontroleri.pdf (дата звернення: 10.04.2025).

8. Конспект лекцій з дисципліни "Автоматичні лінії, роботи та транспорт у зварювальному виробництві" / Національний університет "Запорізька політехніка". URL: <https://eir.zp.edu.ua/server/api/core/bitstreams/72d73792-a143-4a3d-99af-795728010770/content> (дата звернення: 15.04.2025).

9. GeeksforGeeks. Mealy and Moore Machines in TOC. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/mealy-and-moore-machines-in-toc> (дата звернення: 28.04.2025).

10. Electronics Tutorials. D Type Flip-Flop. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/sequential/seq_4.html (дата звернення: 28.04.2025).

11. Intel. Cyclone IV FPGA Devices. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/cyclone/iv> (дата звернення: 14.05.2025).

12. Intel. Cyclone V FPGA and SoC FPGA. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/cyclone/v> (дата звернення: 15.05.2025).

13. Intel. Arria Series FPGAs and SoC FPGAs. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/arria> (дата звернення: 15.05.2025).

ДОДАТОК А

Лістинги програм

Лістинг А.1 – Файл moore_fsm1.vhd

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity moore_fsm is
    port (
        CLK      : in  STD_LOGIC;  -- Clock input
        RST      : in  STD_LOGIC;  -- Reset input
        X1       : in  STD_LOGIC;  -- Input X1
        X2       : in  STD_LOGIC;  -- Input X2
        X3       : in  STD_LOGIC;  -- Input X3
        X4       : in  STD_LOGIC;  -- Input X4
        Y1       : out STD_LOGIC;  -- Output Y1
        Y2       : out STD_LOGIC;  -- Output Y2
        Y3       : out STD_LOGIC;  -- Output Y3
        Y4       : out STD_LOGIC;  -- Output Y4
        Y5       : out STD_LOGIC;  -- Output Y5
        Y6       : out STD_LOGIC;  -- Output Y6
        Y7       : out STD_LOGIC;  -- Output Y7
        Y8       : out STD_LOGIC;  -- Output Y8
        Y9       : out STD_LOGIC;  -- Output Y9
        Y10      : out STD_LOGIC;  -- Output Y10
        Y11      : out STD_LOGIC;  -- Output Y11
    );
end moore_fsm;

architecture Behavioral of moore_fsm is
    -- Component declaration for D-flip-flop
    component d_trigger_code
        port (
            D      : in  STD_LOGIC;
            C      : in  STD_LOGIC;
            R      : in  STD_LOGIC;
            Q      : out STD_LOGIC;
            NotQ   : out STD_LOGIC
        );
    end component;

    -- State signals
    signal Q0, Q1, Q2, Q3 : STD_LOGIC;  -- Current state
    signal D0, D1, D2, D3 : STD_LOGIC;  -- Next state inputs to DFFs
    signal NotQ0, NotQ1, NotQ2, NotQ3 : STD_LOGIC;  -- Inverted state
    outputs

begin
    -- Instantiate D-flip-flops for each state bit

```

```

DFF0: d_trigger_code
  port map (
    D => D0,
    C => CLK,
    R => RST,
    Q => Q0,
    NotQ => NotQ0
  );

```

```

DFF1: d_trigger_code
  port map (
    D => D1,
    C => CLK,
    R => RST,
    Q => Q1,
    NotQ => NotQ1
  );

```

```

DFF2: d_trigger_code
  port map (
    D => D2,
    C => CLK,
    R => RST,
    Q => Q2,
    NotQ => NotQ2
  );

```

```

DFF3: d_trigger_code
  port map (
    D => D3,
    C => CLK,
    R => RST,
    Q => Q3,
    NotQ => NotQ3
  );

```

```
-- Excitation functions for next state
```

```

D0 <= (not Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0) or
      (not Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0 and X1) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0 and not X2) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0 and X2 and X3) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0 and X3) or
      (not Q3 and Q2 and Q1 and not Q0) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0 and not X4) or
      (Q3 and not Q2 and Q1 and not Q0);

```

```

D1 <= (not Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0 and X2) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0) or
      (not Q3 and Q2 and Q1 and not Q0) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0 and X4) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0) or
      (Q3 and not Q2 and Q1 and not Q0);

```

```

D2 <= (not Q3 and not Q2 and Q1 and Q0) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0) or
      (not Q3 and Q2 and Q1 and not Q0);

D3 <= (not Q3 and Q2 and Q1 and Q0) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0) or
      (Q3 and not Q2 and Q1 and not Q0);

-- Output functions
Y1 <= not Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0;
Y2 <= not Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0 and X1;
Y3 <= not Q3 and not Q2 and Q1 and Q0;
Y4 <= (not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0 and X2 and X3) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0 and X3) or
      (not Q3 and Q2 and Q1 and not Q0);
Y5 <= not Q3 and Q2 and Q1 and Q0;
Y6 <= (Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0 and X4) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0);
Y7 <= Q3 and not Q2 and Q1 and not Q0;
Y8 <= not Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0 and not X1;
Y9 <= not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0 and not X2;
Y10 <= (not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0 and X2 and not X3) or
       (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0 and
not X3);
Y11 <= Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0 and not X4;

end Behavioral;

```

Лістинг А.2 – Файл moore_fsm2.vhd

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity moore_fsm is
  port (
    CLK    : in  STD_LOGIC;  -- Clock input
    RST    : in  STD_LOGIC;  -- Reset input
    X1     : in  STD_LOGIC;  -- Input X1
    X2     : in  STD_LOGIC;  -- Input X2
    X3     : in  STD_LOGIC;  -- Input X3
    X4     : in  STD_LOGIC;  -- Input X4
    Y1     : out STD_LOGIC;  -- Output Y1
    Y2     : out STD_LOGIC;  -- Output Y2
    Y3     : out STD_LOGIC;  -- Output Y3
    Y4     : out STD_LOGIC;  -- Output Y4
    Y5     : out STD_LOGIC;  -- Output Y5
    Y6     : out STD_LOGIC;  -- Output Y6
    Y7     : out STD_LOGIC;  -- Output Y7
    Y8     : out STD_LOGIC;  -- Output Y8
    Y9     : out STD_LOGIC;  -- Output Y9
  );

```

```

        Y10      : out STD_LOGIC    -- Output Y10
    );
end moore_fsm;

architecture Behavioral of moore_fsm is
    -- Component declaration for D-flip-flop
    component d_trigger_code
        port (
            D      : in  STD_LOGIC;
            C      : in  STD_LOGIC;
            R      : in  STD_LOGIC;
            Q      : out STD_LOGIC;
            NotQ   : out STD_LOGIC
        );
    end component;

    -- State signals
    signal Q0, Q1, Q2, Q3 : STD_LOGIC; -- Current state
    signal D0, D1, D2, D3 : STD_LOGIC; -- Next state inputs to DFFs
    signal NotQ0, NotQ1, NotQ2, NotQ3 : STD_LOGIC; -- Inverted state
    outputs

begin
    -- Instantiate D-flip-flops for each state bit
    DFF0: d_trigger_code
        port map (
            D => D0,
            C => CLK,
            R => RST,
            Q => Q0,
            NotQ => NotQ0
        );

    DFF1: d_trigger_code
        port map (
            D => D1,
            C => CLK,
            R => RST,
            Q => Q1,
            NotQ => NotQ1
        );

    DFF2: d_trigger_code
        port map (
            D => D2,
            C => CLK,
            R => RST,
            Q => Q2,
            NotQ => NotQ2
        );

    DFF3: d_trigger_code
        port map (

```

```

        D => D3,
        C => CLK,
        R => RST,
        Q => Q3,
        NotQ => NotQ3
    );

-- Excitation functions for next state
D3 <= (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0 and X2) or
      (not Q3 and Q2 and Q1 and Q0 and X4) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0);

D2 <= (not Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0 and X1) or
      (not Q3 and not Q2 and Q1 and Q0) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0 and not X2);

D1 <= (not Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0 and not X1) or
      (not Q3 and not Q2 and Q1 and not Q0) or
      (not Q3 and not Q2 and Q1 and Q0 and not X3) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0 and not X2) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0);

D0 <= (not Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0) or
      (not Q3 and not Q2 and Q1 and not Q0) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0) or
      (not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0 and not X2) or
      (Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0);

-- Output functions
Y1 <= not Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0;
Y2 <= not Q3 and not Q2 and Q0 and ((not Q1 and X1) or (Q1 and
X3));
Y3 <= not Q3 and Q2 and not Q1 and not Q0;
Y4 <= not Q3 and Q2 and Q0 and ((not Q1 and X2) or (Q1 and X4));
Y5 <= Q3 and not Q2 and not Q1 and not Q0;
Y6 <= Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0;
Y7 <= not Q3 and not Q2 and not Q1 and Q0 and not X1;
Y8 <= not Q3 and not Q2 and Q1 and not Q0;
Y9 <= not Q3 and not Q2 and Q1 and Q0 and not X3;
Y10 <= not Q3 and Q2 and not Q1 and Q0 and not X2;

end Behavioral;
```

1

Національний університет “Запорізька політехніка”
Кафедра комп’ютерних систем та мереж

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПІДСИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО АПАРАТУ

Роботу виконав

Студент групи КНТ-511
Міщук Микита Сергійович

Керівник

к.т.н., доцент
Голуб Тетяна Василівна

2

Мета, об’єкт та предмет дослідження

- Метою роботи є розробка підсистеми керування зварювальним апаратом, який забезпечує автоматизацію процесу зварювання.
- Об’єктом дослідження є процес функціонування та керування зварювальним роботом.
- Предметом дослідження є структура системи керування, алгоритми роботи блоків керування, моделювання логіки мовою VHDL.

3

Актуальність та аналоги

- Актуальність:
 - Автоматизація зварювальних процесів — ключ до підвищення точності та продуктивності.
 - Попит на гнучкі, адаптивні рішення в малому і середньому виробництві.
 - Потреба у доступних рішеннях на базі ПЛІС для освітніх та промислових задач.
- Аналоги:
 - EVS Intelligent Welding System – готові комерційні рішення з AI-аналізом, обмежені в модифікації.
 - Panasonic TAWERS – складні промислові системи зі зварювальним контролем, потребують дорогого обладнання.
 - KUKA ArcTech – високоточні роботи з фокусом на серійне виробництво, важкі в налаштуванні.
 - TRIADA Welding – вітчизняні системи, орієнтовані на великий бізнес, без відкритої архітектури.
- Недоліки аналогів:
 - Висока вартість і складність інтеграції.
 - Закриті ПЗ або відсутність можливості модифікації.
 - Надлишкова функціональність для освітніх і малих виробничих задач.
- Переваги розробленої системи:
 - Відкрита структура
 - Простота реалізації
 - Гнучкість і модульність
 - Ефективне використання ПЛІС



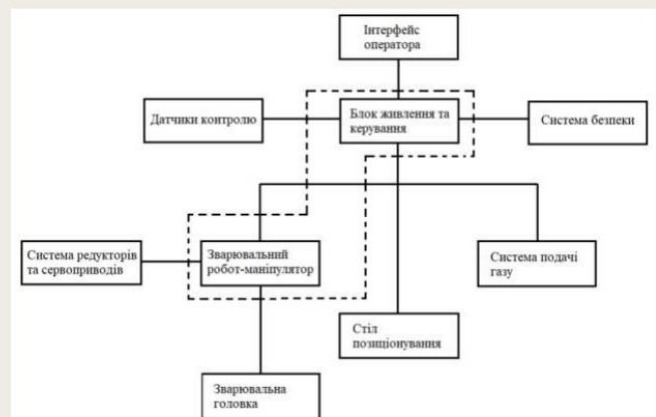
4

Структура системи керування

Проектована система складається з низки функціональних блоків, які взаємодіють між собою через блок керування.

До складу системи входять:

- зварювальний робот-маніпулятор;
- стіл позиціонування деталей;
- система приводів і редукторів;
- блок контролю температури;
- датчики;
- зварювальна головка;
- система подачі газу;
- блок живлення та загального керування;
- система безпеки
- інтерфейс оператора;

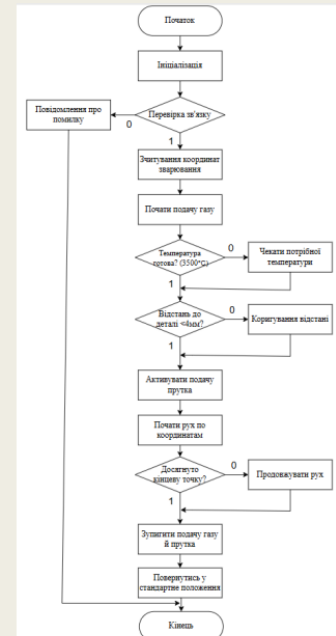


5

Алгоритм загального керування роботом

Для керування послідовністю етапів зварювального процесу було побудовано автомат Мура, в якому кожному стану відповідає визначений набір вихідних дій.

Алгоритм враховує: ініціалізацію системи, перевірку положення, запуск подачі газу, контролювання нагріву, переміщення, завершення циклу тощо.

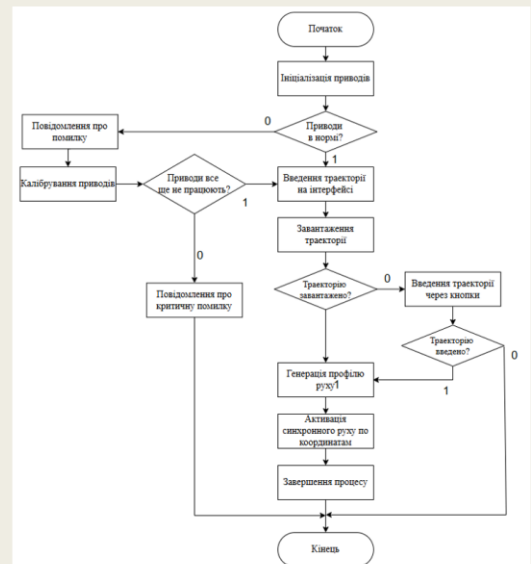


6

Алгоритм керування зварювальною головкою

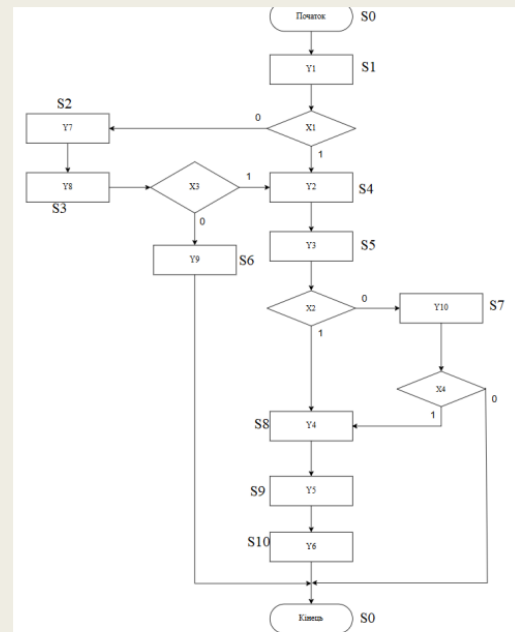
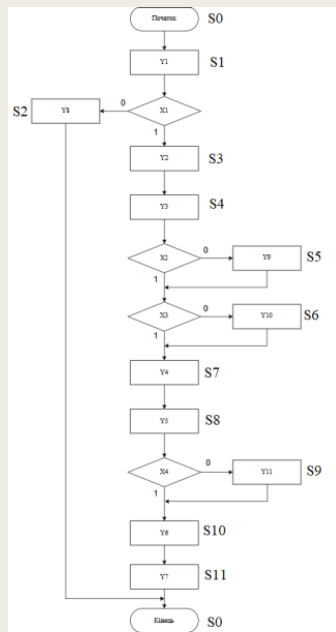
Окремий модуль керує переміщенням зварювальної головки по заданій траєкторії.

Алгоритм враховує: перевірку відстані, координатну синхронізацію, а також завершення після досягнення цільової точки.



7

Розмічені ГСА автомата мур



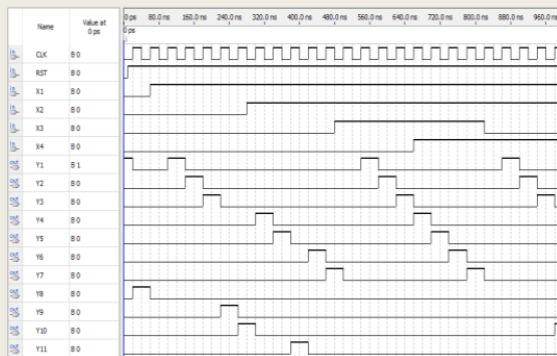
8

Реалізація та моделювання

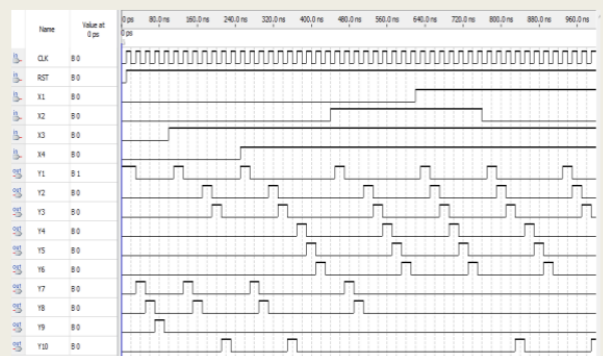
У середовищі Quartus II було створено модуль керування на мові VHDL. За допомогою ModelSim виконано функціональне моделювання автомата.

На часових діаграмах видно конкретну реакцію системи на вхідні сигнали X1–X4 та перемикання станів автомата.

Загальний автомат керування

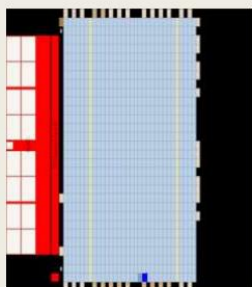


Автомат керування зварювальною голівкою

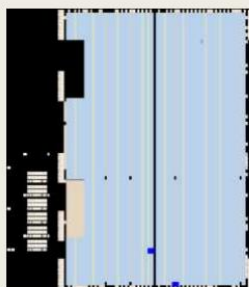


9

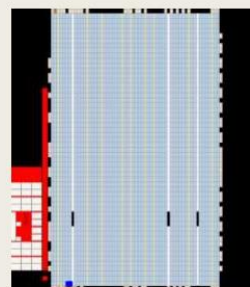
Імплементація загального блоку



Cyclone IV



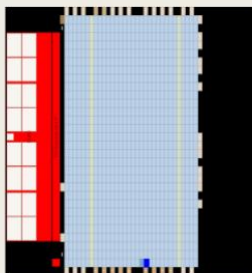
Cyclone V



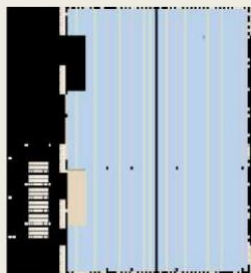
Arria II GX

10

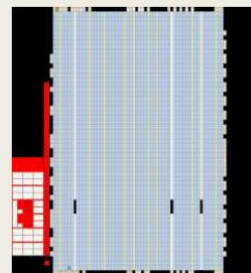
Імплементація блоку керування головою



Cyclone IV



Cyclone V



Arria II GX

11

Тестування автоматів

На таблиці наведено апаратні затрати автоматів керування на різних мікросхемах фірми Altera:

<u>Family</u>	<u>Logic elements</u>	<u>Total registers</u>	<u>Total pins</u>	<u>Total memory bits</u>
Cyclone IV GX EP4CGX150DF3 I17AD	22	4	16	0
Cyclone V 5CGXFC7C7F23C8	10	4	16	0
Arria II GX EP2AGX45CU17I3	14	4	16	0

Cyclone V є найвигіднішим вибором для реалізації керуючої логіки зварювального робота завдяки:

- найнижчим апаратним витратам;
- розширеним можливостям масштабування;
- оптимальній вартості;
- повній підтримці сучасного інструментарію розробника;

12

Перспективи розвитку

Мінімальне використання ресурсів ПЛІС (менше 1% кристала) реалізованими автоматами керування системи дозволяє інтегрувати додаткові функціональні блоки без зміни базової платформи.

Першочерговими напрямками розширення є розробка спеціалізованих модулів:

- контролю подачі газу;
- системи безпеки;
- прецизійного блоку керування позиціонуванням робочого столу.



13

Висновки

У ході виконання дипломного проєкту було розроблено та досліджено автоматизовану підсистему керування зварювальним апаратом, реалізовану у вигляді автомата Мура на базі ПЛІС. Розроблена система забезпечує послідовне керування основними вузлами: загальною системою, зварювальною головкою.

Побудовані алгоритми функціонування реалізовано засобами мови VHDL, що дозволило виконати повне моделювання логіки, а також успішну імплементацію на різних мікросхемах ПЛІС. Реалізація підтвердила працездатність системи та ефективне використання апаратних ресурсів.

14

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ