

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

 **Наталія СТЕЛЬМАХ**

«08» червня 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Система тестування друкованих плат»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПБ-12

Поліщук Денис Борисович

Керівник:

к.т.н., асистент

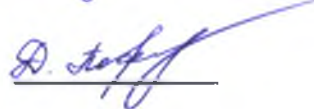
Демченко Марія Олександрівна

Рецензент:

к.т.н., доцент

Півторак Діана Олександрівна





Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент 

Київ - 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультету

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ

«12» квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Поліщука Дениса Борисовича

1. Тема проєкту «Система тестування друкованих плат», керівник проєкту Демченко Марія Олександрівна, кандидат технічних наук, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. №1765-с
2. Термін подання студентом проєкту «05» червня 2025 року.
3. Вихідні дані до проєкту: друкована плата (3D модель, креслення)
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. 1. Конструкторська частина: 1.1 Постановка питання проектування 1.1.1. Основні характеристики друкованих плат. 1.1.2. Огляд існуючих рішень. 1.2 Вимоги до автоматизованої системи тестування друкованих плат. 1.3 Розробка структурної схеми системи. 1.4. Розробка функціональної схеми системи. 1.5 Розробка алгоритму роботи блоку керування. 1.6. Розробка схеми електричної принципової. 1.7 Розробка програми керування системою. 1.8 Вибір складових елементів системи. 1.9. Розрахунок елементів стенду тестування. 1.10. Розрахунок захвату маніпулятора. 2. Технологічна частина: 2.1. Проектування системи тестування друкованих плат. 2.2. Проектування стенду тестування. 2.3. Проектування схеми структурного складу. 2.4. Проектування технологічної схеми складання. 2.5. Проектування руки маніпулятора. Висновки. Перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу: 1. Структурна схема системи. 2. Функціональна схема системи. 3. Електрична принципова схема. 4. Алгоритм роботи блоку керування. 4. Складальне креслення стенду тестування. 5. Креслення захвату маніпулятора. 6. Структурна схема складання. 7. Технологічна схема складання. 8. Деталювання. 9. Специфікація.

6. Дата видачі завдання «12» квітня 2025 р..

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Аналіз предметної області та огляд літературних джерел	12.04.2025	
2.	Формулювання вимог до системи	12.04.2025	
3.	Розрахунок виконавчого механізму	14.04.2025	
4.	Визначення типу виробництва	16.04.2025	
5.	Кінематичний розрахунок кривошипного преса	18.04.2025	
6.	Силовий розрахунок кривошипного преса	20.04.2025	
7.	Підбір складових елементів	25.04.2025	
8.	Проектування захвату робота-маніпулятора	01.05.2025	
9.	Розробка та складання частин системи.	11.05.2025	
10.	Оформлення графічної частини дипломного проєкту	24.05.2025	
11.	Оформлення пояснювальної записки дипломного проєкту	29.05.2025	
12.	Представлення дипломного проєкту до захисту	03.06.2025	

Студент



Денис ПОЛІЩУК

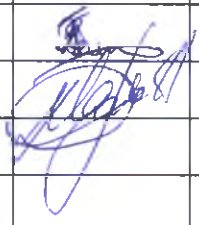
Керівник



Марія ДЕМЧЕНКО

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДПБР.ПБ1210.003.001ПЗ	Пояснювальна записка		
3	A3	ДПБР.ПБ1210.1702.01	Друкована плата	1	
4	A4	ДПБР.ПБ1210.1702.02	Структурна схема системи тестування	1	
5	A3	ДПБР.ПБ1210.1702.03	Функціональна схема системи тестування	1	
6	A3	ДПБР.ПБ1210.1702.04	Принципова електрична схема системи тестування	1	
7	A4	ДПБР.ПБ1210.1702.05	Схема алгоритму керування системою тестування	1	
8	A1	ДПБР.ПБ1210.1702.01СК	Тестовий стенд складальне креслення	1	
9	A3	ДПБР.ПБ1210.1702.02 СК	Система тестування друкованих плат Загальний вигляд	1	
10	A3	ДПБР.ПБ1210.1702.03 СК	Пристрій подачі Складальне креслення	1	
11	A3	ДПБР.ПБ1210.1702.04 СК	Рука захватного пристрою Складальне креслення	1	

				ДПБР.ПБ1210.1702.001 ПЗ		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Поліщук Д.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Демченко М.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. <u>КІТВП</u> Гр. <u>ПБ-12</u>	
Н/контр.						
Зав.каф.						

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Система тестування друкованих плат»**

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект присвячений розробці автоматизованої системи тестування друкованих плат, що забезпечує контроль якості електронних виробів на кінцевому етапі виробництва. Перевірка працездатності електронних компонентів здійснюється за допомогою спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення. Мета даної системи – підвищити ефективність та точність процесу тестування, зменшити вплив людського фактора, а також скоротити час, необхідний для перевірки плат.

Дипломний проект складається з пояснювальної записки та графічної частини у вигляді креслень. Пояснювальна записка поділяється на конструкторську та технологічну частини.

У конструкторській частині дипломного проекту приведено опис основних характеристик друкованих плат, проаналізовано існуючі методи контролю. Представлено вимоги до системи тестування, враховуючи точність, швидкість та ефективність процесу тестування. Розроблено схеми для: організації роботи; взаємодії компонентів системи; опису послідовності дій, які повинна виконувати система при перевірці кожної плати. Наведено опис електричної принципової схеми та програми керування. Підібрано складові елементи, обґрунтовано вибір та описано компоненти. Розраховано елементи стану контролю та захвату маніпулятора.

У технологічній частині розроблено концепцію повної автоматизованої системи тестування для друкованих плат, що включає всі етапи від подачі плати до зчитування результатів тесту. Створено модель стану тестування, скомпоновано його частини. Описано процес монтажу та складання компонентів. Спроектровано механізм маніпулятора для подачі друкованих плат.

ANNOTATION

The thesis project is devoted to the development of an automated printed circuit board testing system that ensures quality control of electronic products at the final stage of production. The performance of electronic components is checked using specialized equipment and software. The purpose of this system is to increase the efficiency and accuracy of the testing process, reduce the influence of the human factor, and reduce the time required to test the boards.

The thesis project consists of an explanatory note and a graphic part in the form of drawings. The explanatory note is divided into design and technological parts.

The design part of the thesis project describes the main characteristics of printed circuit boards and analyzes existing control methods. Requirements for the testing system are presented, taking into account the accuracy, speed, and efficiency of the testing process. Schemes have been developed for: organizing work; interaction of system components; describing the sequence of actions that the system must perform when testing each board. A description of the electrical schematic diagram and control program is provided. The components have been selected, the choice has been justified, and the components have been described. The elements of the control stand and the manipulator gripper have been calculated.

In the technological part, a concept of a fully automated testing system for printed circuit boards has been developed, which includes all stages from feeding the board to reading the test results. A model of the test stand has been created, and its parts have been assembled. The process of mounting and assembling components is described. A manipulator mechanism for feeding printed circuit boards has been designed.

Зміст

Вступ.....	8
1 Конструкторська частина	9
1.1 Постановка питання проектування	10
1.1.1. Основні характеристики друкованих плат	11
1.1.2. Огляд існуючих рішень.....	12
1.2 Вимоги до автоматизованої системи тестування друкованих плат	23
1.3 Розробка структурної схеми системи	25
1.4. Розробка функціональної схеми системи	27
1.5 Розробка алгоритму роботи блоку керування.	29
1.6. Розробка схеми електричної принципової.....	33
1.7 Розробка програми керування системою.....	35
1.8 Вибір складових елементів системи	39
1.9. Розрахунок елементів стенду тестування.....	46
1.9.1 Розрахунок сили прижиму	48
1.9.2 Підбір двигуна.....	49
1.9.3 Кінематичний розрахунок кривошипно-повзунного механізму	50
1.10. Розрахунок захвату маніпулятора.	52
1.10.1 Розрахунок сили затиску	52
1.10.2 Розрахунок максимального моменту опору об'єкта захвату	53
1.10.3 Розрахунок напруги деформації в губках	53
1.10.4 Розрахунок жорсткості захвату	54
2 Технологічна частина	55
2.1. Проектування системи тестування друкованих плат.	56
2.2. Проектування стенду тестування.	58
2.5. Проектування руки маніпулятора.	63
Висновок	67
Перелік використаних джерел	69
Додатки.....	1

Вступ

Тестування друкованих плат є важливим етапом у процесі виробництва електронних пристроїв, оскільки забезпечує перевірку працездатності та якості виготовлених компонентів. Від якості та точності тестування залежить не лише функціонування виробів, а й їх надійність, безпека та довговічність. Сучасні вимоги до електроніки, зокрема вищі стандарти якості та багатосерійність виробництва, вимагають використання автоматизованих систем тестування, що дозволяють значно зменшити вплив людського фактора і підвищити ефективність перевірок, особливо при наявності великої кількості тестових точок на платі.

Через значну трудомісткість, низьку продуктивність та виникнення похибок і дефектів при звичайному, ручному тестуванні, дана тема набуває неабиякої актуальності серед виробників електронного обладнання. У перспективі використання автоматизованої системи тестування не лише забезпечить безпеку, конфіденційність, масштабування виробничих потужностей, але й сприятиме зниженню витрат на виробництво, полегшить інтеграцію нових технологій та підвищить конкурентоспроможність підприємств.

Метою даного дипломного проекту є розробка системи автоматизованого тестування друкованих плат, яка забезпечить внутрішньосхемне швидке тестування електричних характеристик компонентів, зокрема таких, як напруга, струм, опір та цілісність з'єднань. У проекті буде розглянуто питання: проектування системи; вибору компонентів; розробки алгоритмів роботи та програмного забезпечення, а також механічних та електричних елементів стенду контролю. Використаємо пристрої для автоматизації процесу тестування, такі як: актуатор, драйвер контролю обертів крокового двигуна, sms-осі, засоби передачі інформації та програмований логічний контролер, як блок керування затискного пристрою, портального маніпулятора та прижимного механізма.

Результати проектування можуть слугувати основою для впровадження системи в реальному виробництві та базою для можливих модифікацій і удосконалень системи в майбутньому.

1 Конструкторська частина

1.1 Постановка питання проектування

Друкована плата (ДП) — це елемент конструкції електронного пристрою, який забезпечує механічну підтримку для електронних компонентів і одночасно здійснює їх електричне з'єднання через схеми проводки. Це основний елемент в більшості сучасних електронних пристроїв, від комп'ютерів до побутової електроніки. Вони виготовляються з негорючих матеріалів, таких як фенольна смола або скловолокно, покриті металевими шарами (зазвичай міддю) для з'єднання компонентів. На кінцевий продукт встановлюються інтегральні схеми, транзистори, діоди, пасивні компоненти [1]

В залежності від конструкції, способу виготовлення та застосування, розрізняють кілька основних типів друкованих плат (ДП). Односторонні плати — найпростіший тип ДП, у якої усі компоненти та з'єднання розміщені тільки на одній стороні плати, використовуються у простих схемах, що не вимагають великої кількості з'єднань. Двосторонні плати — наявні два шари з контактами для компонентів на обох сторонах плати, додатково можуть встановлюватися перемички між шарами для з'єднання контактів через отвори, що дозволяє значно збільшити щільність компонентів. Багатошарові плати — містять кілька шарів мідних з'єднань, розташованих між шарами ізоляції, зустрічаються у складних електронних пристроях, де необхідно більше з'єднань у обмеженому просторі, таких як мобільні телефони, комп'ютерні плати. Тип плат безпосередньо впливає на метод контролю і тестування.[2]

У даному проєкті, об'єктом контролю є одностороння, невелика плата керування LED-світильником (рис.1.1). В подальшому можлива інтеграція даного компоненту у виробничу продукцію, а система тестування забезпечить внутрішньосхемний контроль ділянок плати та цілісність проводки. Креслення тестованої ДП наведено в Додатку А.

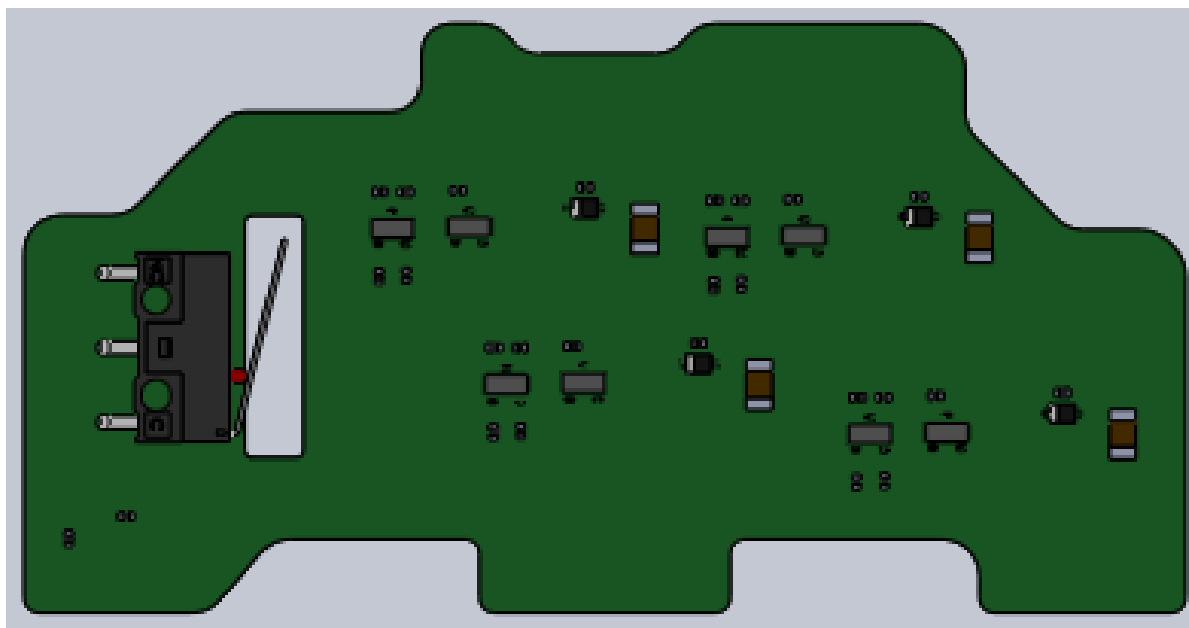


Рис. 1.1 – Вид спереду 3D-моделі тестованої плати. Об'єкт контролю.

1.1.1. Основні характеристики друкованих плат

На процес тестування та проектування контрольного пристосування впливають характеристики об'єкта контролю. Плати можуть мати різні розміри та форми в залежності від пристрою, для якого вони призначені, цим вони визначають форму плити-ложемента, встановлення ДП у пристосування та базування для точного підведення елементів контрольного пристосування. Кількість та розташування тестових точок підключення (контактних майданчиків), від цього залежить складність та точність тестування, оскільки більша кількість точок вимагає більше часу для перевірки кожної з них. Метод тестування обирають від того, за якою технологією виготовлена ДП, що у свою чергу діє на якість з'єднань та елементів, наприклад, для технології поверхневого монтажного з'єднання та для вставних компонентів підбираються різні методи. Розміщення на ДП різноманітних електронних компонентів, як резистори, конденсатори та транзистори, мікросхеми. Проводиться перевірка, чи працюють всі компоненти згідно з технічними вимогами, що обумовлює тип тестування та складність, до прикладу, внутрішньосхемне, ICT (in-circuit test) тест замикання, розривів, напруги, опору, струму. Або FCT — functional circuit test на логіку,

правильність сигналів, взаємодії з іншими пристроями. Функціональність ДП виходить зі схеми з'єднання компонентів між собою. Діелектричні властивості, важливі при перевірці ізоляції між контактами та забезпеченні стабільної роботи плати під час тестування.

Точність тестування друкованих плат залежить від правильного вимірювання параметрів: напруги та струму в кожній точці з'єднання, опору між компонентами, цілісності з'єднань між різними частинами плати, особливо при внутрішньосхемному тестуванні. Слід зауважити, що чим більше контактних точок на платі, тим більше часу та зусиль потрібно для проведення тестування.[3]

Кожен метод має свої переваги і недоліки, і вибір оптимального способу тестування залежить від потреб підприємства, обсягу виробництва та характеристик тестованих плат. Для високошвидкісного тестування в масових виробництвах найкраще підходять автоматизований оптичний контроль та рентгенівська інспекція, а для малосерійного або прототипного виробництва ефективними будуть тестування літаючими зондами або ручне тестування.

1.1.2. Огляд існуючих рішень

Існує кілька підходів до тестування друкованих плат, вибір яких ґрунтується на описаних вище характеристиках ДП. Для виявлення дефектів, браку, контролю характеристик компонентів проводять візуальний огляд та ручне тестування ділянок плати, контактне тестування за допомогою тестових щупів, безконтактне тестування при використанні оптичних сканерів, рентгенографії або ультразвукового тестування для перевірки внутрішніх з'єднань та тестування за допомогою літаючих зондів.

Візуальний та ручний контроль (рис. 1.2) проводиться для виявлення механічних дефектів, таких як тріщини чи пошкоджені контакти, недостатня кількість припою, нестача компонентів, неправильне розташування компонентів, є одним із перших методів перевірки електронних схем, цей метод дуже суб'єктивний і залежить від досвіду оператора.

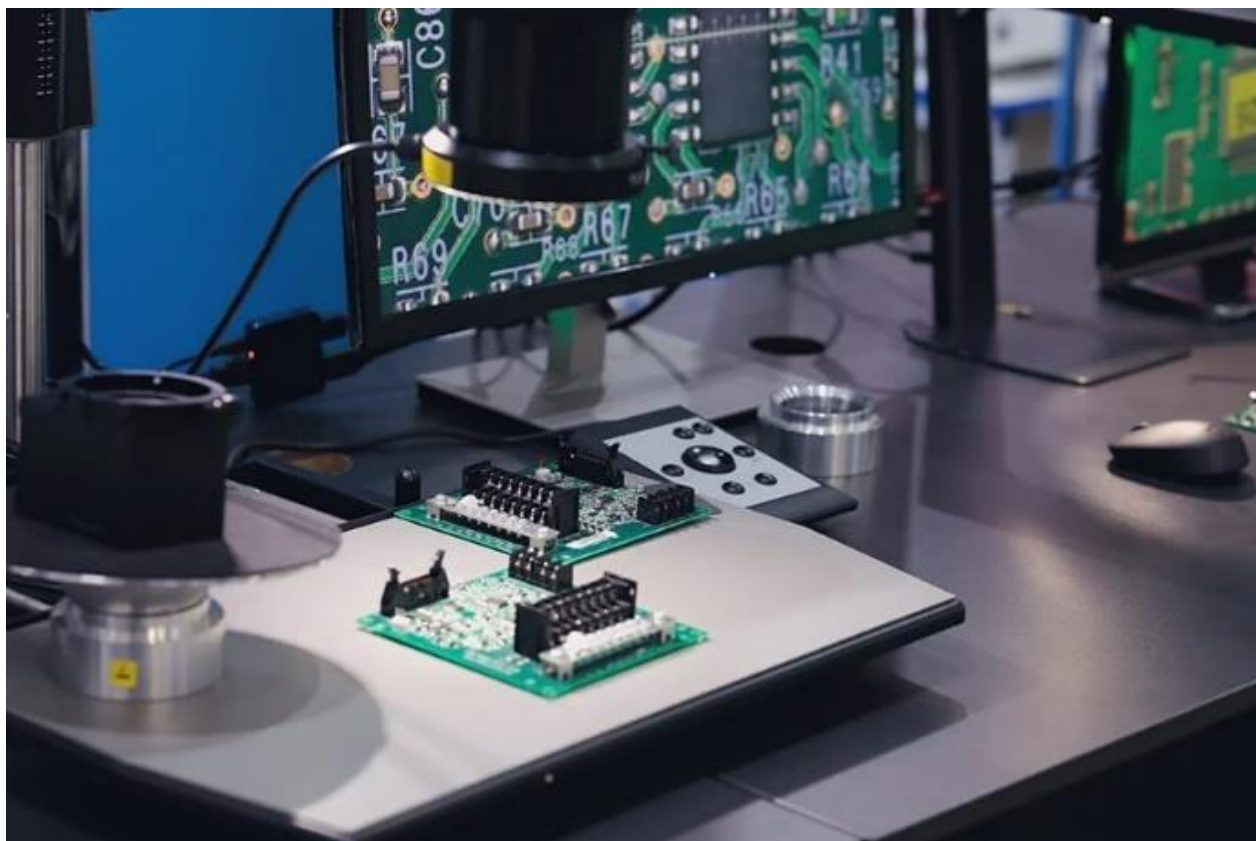


Рис. 1.2 – Метод візуального та ручного контролю[4]

Метод дозволяє виявити видимі оку вади, усунути які можна прямо на складальному столі. Однак через людський фактор і складність друкованих плат, роблять цей метод менш ефективним при багатосерійному виробництві, хоч широко використовується в дизайні друкованих плат і створенні прототипів. Процес контролю здійснюється вручну оператором, який зазвичай використовує лупу або мікроскоп для розгляду дрібних деталей. Ручний контроль здійснюється за допомогою щупів, де оператор вручну перевіряє з'єднання між контактними майданчиками.

До переваг даного методу можна віднести простоту та дешевизну, особливо для малих партій чи прототипів. Виявлення явних механічних дефектів або недоліків в пайці. Легко інтегрується в невеликі виробничі лінії.

Недоліками є суб'єктивність результатів, оператор може пропустити дрібні дефекти або з'єднання. Низька продуктивність, перевірка великих обсягів плат вручну займає значний час. Висока ймовірність людської помилки, особливо при великих обсягах.

Використання автоматизованого оптичного контролю (рис. 1.3) передбачає застосування камери та програмного забезпечення для автоматичного аналізу зображень плати. Сканують ДП і порівнюють її з базовими моделями для виявлення дефектів, таких як помилки в пайці, неправильне розташування компонентів, з'єднання та інші.

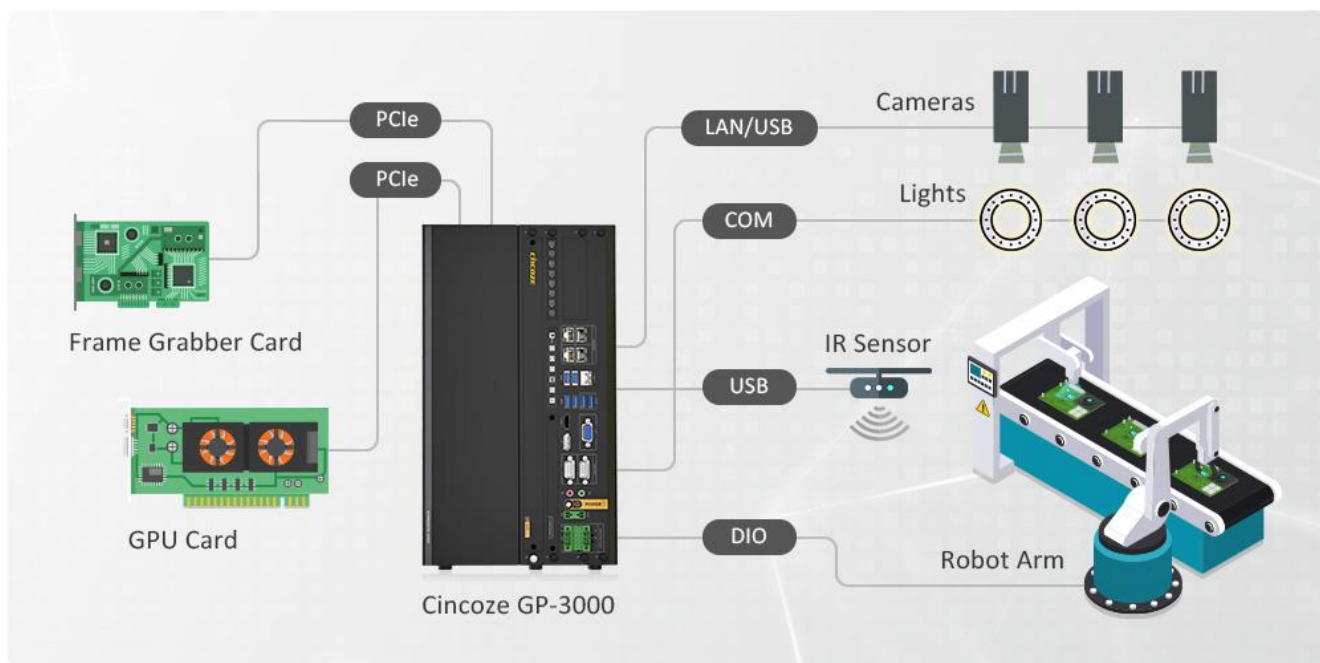


Рис. 1.3 – Метод автоматизованого оптичного контролю [5]

Цей метод дозволяє автоматично перевіряти всі точки плати без залучення людини. Серед переваг: висока швидкість перевірки великих партій, велика точність у виявленні дефектів пайки та інших механічних проблем, мінімізація людської помилки та значне підвищення ефективності. Серед недоліків: висока вартість обладнання, обмежена здатність до перевірки дефектів, що важко визначити оптично, наприклад, внутрішні дефекти або складні електричні несправності, потребує висококваліфікованого персоналу для налаштування і обслуговування системи.

Метод автоматизованої рентгенівської інспекції (рис. 1.4) застосовується для виявлення дефектів на плоских і багатошарових платах, які неможливо побачити за допомогою оптичних методів, таких як короткі замикання, тріщини в мідних з'єднаннях та внутрішні дефекти.



Рис. 1.4 - Автоматизована рентгенівська інспекція [4]

Принцип в тому, що рентгенівські промені проникають через плату, і детектори фіксують зображення внутрішніх дефектів. Плюси даного методу у: можливості виявлення дефектів, які неможливо побачити за допомогою інших методів, зокрема на багатошарових платах, висока точність у виявленні внутрішніх дефектів, таких як короткі замикання або розриви, даний тип тестування підходить для складних плат, де потрібен високий рівень перевірки. Серед мінусів: висока вартість обладнання та експлуатації, обмеження у швидкості перевірки, особливо для великих партій та потреба спеціальної підготовки персоналу для роботи з рентгенівським обладнанням.

Тестування за допомогою тестових щупів передбачає фізичне підключення щупів до контактних майданчиків плати для перевірки її електричних характеристик: напруги, струму, опору. Це зазвичай здійснюється вручну або за допомогою спеціалізованих тестових систем, таких як ICT (In-Circuit Test), обладнання, яке використовується має назву – Bed of nails (рис. 1.5).

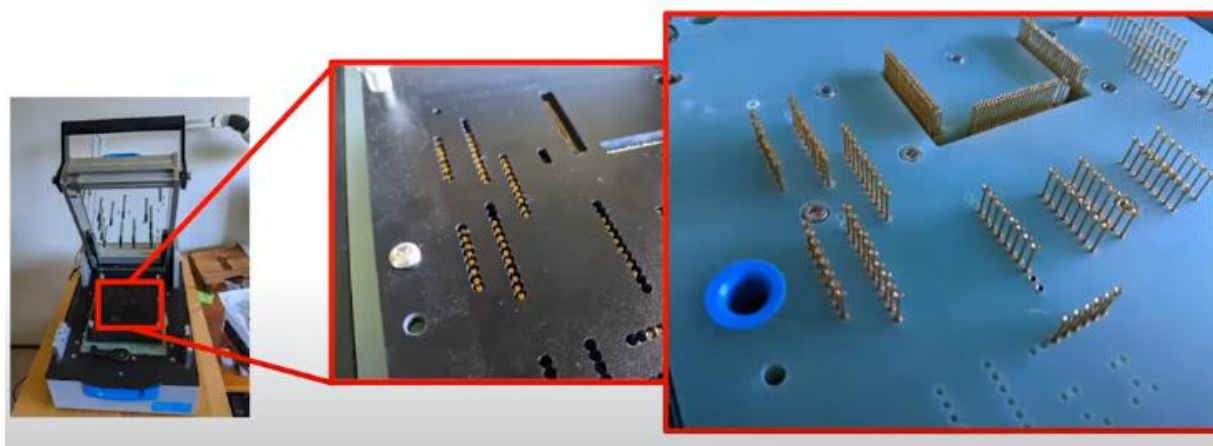


Рис. 1.5 – Метод тестування обладнанням bed-of-nails [6]

Такий метод полягає у використанні спеціальних щупів (Рис. 1.6) із пружинними контактами, які підключаються до плати для вимірювання параметрів у реальному часі.

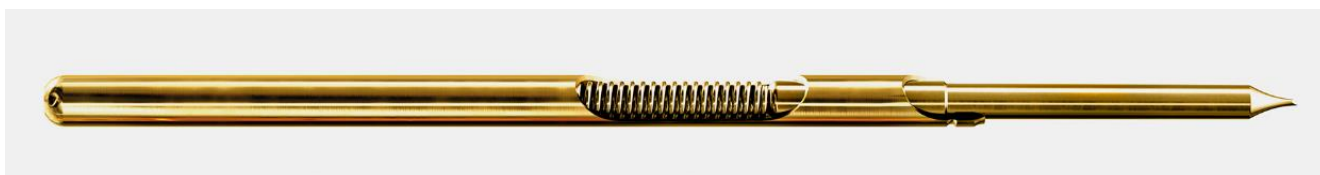


Рис. 1.6 – Щуп (Pogo-pin) [7]

Перевагами методу є можливість перевірити всі електричні характеристики плати (напруга, струм, опір), зручний для малих партій та специфічних перевірок, можливість використовувати для діагностики проблем із компонентами та з'єднаннями. Але можливі проблеми з точністю вимірювань, якщо тестові щупи неправильно підключені або пошкоджені.

В методі тестування літаючими зондами (Flying Probe Test) (Рис. 1.7) використовують комп'ютерно керовані зонди, які переміщуються по платі і перевіряють електричні з'єднання. Зонди можуть вимірювати напругу, опір, та інші параметри, необхідні для тестування. Це безконтактний метод, де зонди автоматично тестують всі точки плати, без необхідності створення спеціальних тестових контактів.

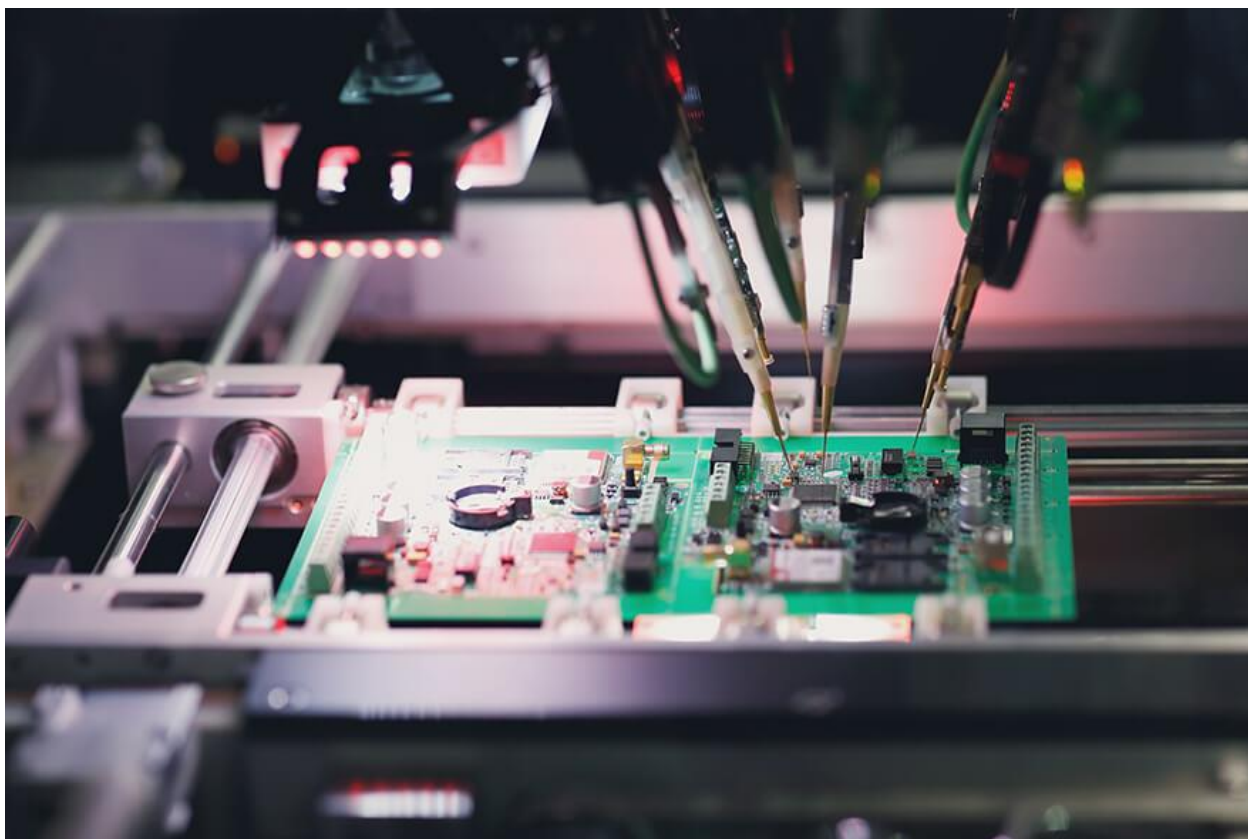


Рис. 1.7 – Метод тестування літаючими зондами [4]

До сильних сторін даного методу можна віднести безконтактний метод тестування, що дозволяє знизити ризик пошкодження плати. Тестування підходить для мало- та середньосерійного виробництва, оскільки не потребує створення складних тестових щупів або плат для контролю. Зручний для перевірки складних плат, які мають велику кількість точок з'єднання. Слабкості методу у високій вартості обладнання та необхідності налаштування. Даний спосіб контролю значно повільніший за інші автоматизовані методи тестування, особливо для великих серій. Тому підходить лише для перевірки електричних характеристик.[3]

Традиційне тестування (наприклад, візуальний або ручний контроль,) займає багато часу і залежить від кваліфікації оператора, що може призвести до помилок або несвоєчасного виявлення дефектів. Впровадження автоматизованої системи тестування для "Bed of Nails" з використанням портального маніпулятора для автоматичної подачі плат і їх прикріплення до тестових контактів дозволить знизити людський фактор і значно прискорити процес тестування. Автоматичний

прижим забезпечить точне і швидке фіксування плати на тестовому стенді, що усуне необхідність ручного втручання і зменшить можливість помилок.

При ручному тестуванні оператор може пропустити дефекти, зокрема дрібні проблеми з контактами або з'єднаннями. Використання нової системи дозволить з високою точністю перевіряти всі контактні точки плати, без ризику пропустити дефекти через людську неуважність. Цифрові системи вимірювань забезпечать стабільну та точну перевірку кожної точки з'єднання на платі.

Метод візуального тестування та ручного тестування не завжди дозволяють виявити дефекти, які знаходяться в середині багат шарових плат за допомогою оптичних методів (наприклад, внутрішні з'єднання чи мікротріщини). Система з тестовими щупами дозволяє проводити тестування всіх контактних точок плати через прецизійне підключення до контактних майданчиків. Це дає змогу проводити електричне тестування плати, виявляючи короткі замикання, відсутні з'єднання та інші дефекти, які не можуть бути виявлені безпосередньо за допомогою оптичних методів.

Автоматичний прижим дозволяє точно фіксувати плати в потрібному положенні, що важливо для тестування з високою точністю, коли необхідно протестувати велику кількість плат з однаковими умовами для кожної з них.

Автоматична подача плат на тестовий стенд зменшує час на завантаження і підготовку плат до тестування, автоматизуючи цей процес та знижуючи потребу в ручному втручанні.

Портальний маніпулятор використовується для подачі та відведення плат на тестовий стенд. Це дозволяє не тільки знизити час циклу тестування, але й забезпечити точне розміщення плат для тестування без людського втручання. Маніпулятор дозволяє обробляти великі об'єми плат, підвищуючи швидкість і ефективність тестування, що особливо важливо для виробництва з високим темпом випуску.

Після проведення тестування, браковані плати автоматично відсортовуються і виводяться з процесу тестування для подальшого ремонту або утилізації. Це зменшує ризик попадання бракованої продукції в кінцеву стадію

виробництва, підвищуючи якість продукції та скорочуючи витрати на виправлення дефектів.

Проведемо огляд патентів.

Однією з передових компаній, що впровадила автоматизовану систему для тестування одношарових плат методом Bed-of-nails є Shenzhen Chuangxin Automation Equipment Co., Ltd. Патент на конструктивні вузли стану CN212244196U.[8].

Патент захищає конструкцію повністю автоматичного стану тестування плат, з автоматизованим подавачем, порталним механізмом укладки плат, механізмом сортування ОК/НОК. Автоматизована система тестування «Auto Test 3000» наведена на (рис. 1.8).

Призначення: автоматичний стан для ICT (In-Circuit Test), FCT (Functional Test), Sorting PASS / FAIL. Має вбудовану платформу Bed-of-Nails (платформа для пого-пінів). Технічні характеристики системи наведені у (табл. 1.1)



Рис. 1.8 – Система тестування друкованих плат «Auto Test 3000»[9]

Алгоритм тестування можна представити у вигляді виробничої лінії з SMT лінією. Плата після пайки поступає на Feeder Auto Test 3000. Робот захоплює і кладе на Bed-of-Nails, проводиться перевірка відсутності коротких замикань, перевірка живлення, прошивки (запуск мікроконтролера), частоти/сигналів. Далі автоматичне сортування в ОК/НОК. Повна статистика зберігається у MES/ERP.

Автоматизована система тестування "Bed of Nails" з автоматичним прижимом, подачею плат, відсортуванням бракованих плат та використанням портального маніпулятора дозволяє ефективно вирішити багато проблем, які виникають при використанні традиційних методів тестування. Завдяки автоматизації процесів, система забезпечує точне тестування та зменшення впливу людського фактору.

Таблиця 1.1 Технічні характеристики «Auto Test 3000»

Параметр	Значення
Робочий цикл	5–10 сек на одну плату
Тип подачі	Конвеєр або касетний подавач (Feeder)
Притискна плита	Електрична або пневматична (в нових моделях — серво)
Підтримка плат	50 мм × 50 мм до 450 мм × 450 мм
Тип тестів	ICT (In-Circuit Test), FCT (Functional Circuit Test), I/O Test
Тип інтерфейсу	Ethernet + USB + іноді GPIB (для старих приладів)
Інтерфейс до сервісу	HMI + PC + ПО для логування (зазвичай LabVIEW або TestStand)
Інтеграція зі сторонніми приладами	DMM, AWG, Power Supply, Loads
Сортування	2-3 бункери (OK / NOK / Repair)
Приводи	Серводвигуни (XY або X) — портал або вакуумний маніпулятор

Розглянемо детальніше архітектуру діагностики друкованих плат. Патент EP 0838688 B1 [10] під назвою "Device and procedure for testing printed circuit boards" описує конструкцію та принцип роботи автоматизованої системи тестування друкованих плат за методом «bed-of-nails». Основою цієї технології є багатоконтактна тестова платформа, у якій реалізовано щільне розміщення контактних елементів — так званих пого-пінів (від англ. pogo pins), призначених для короткочасного електричного з'єднання з тестовими точками на друкованій платі (рис. 9).

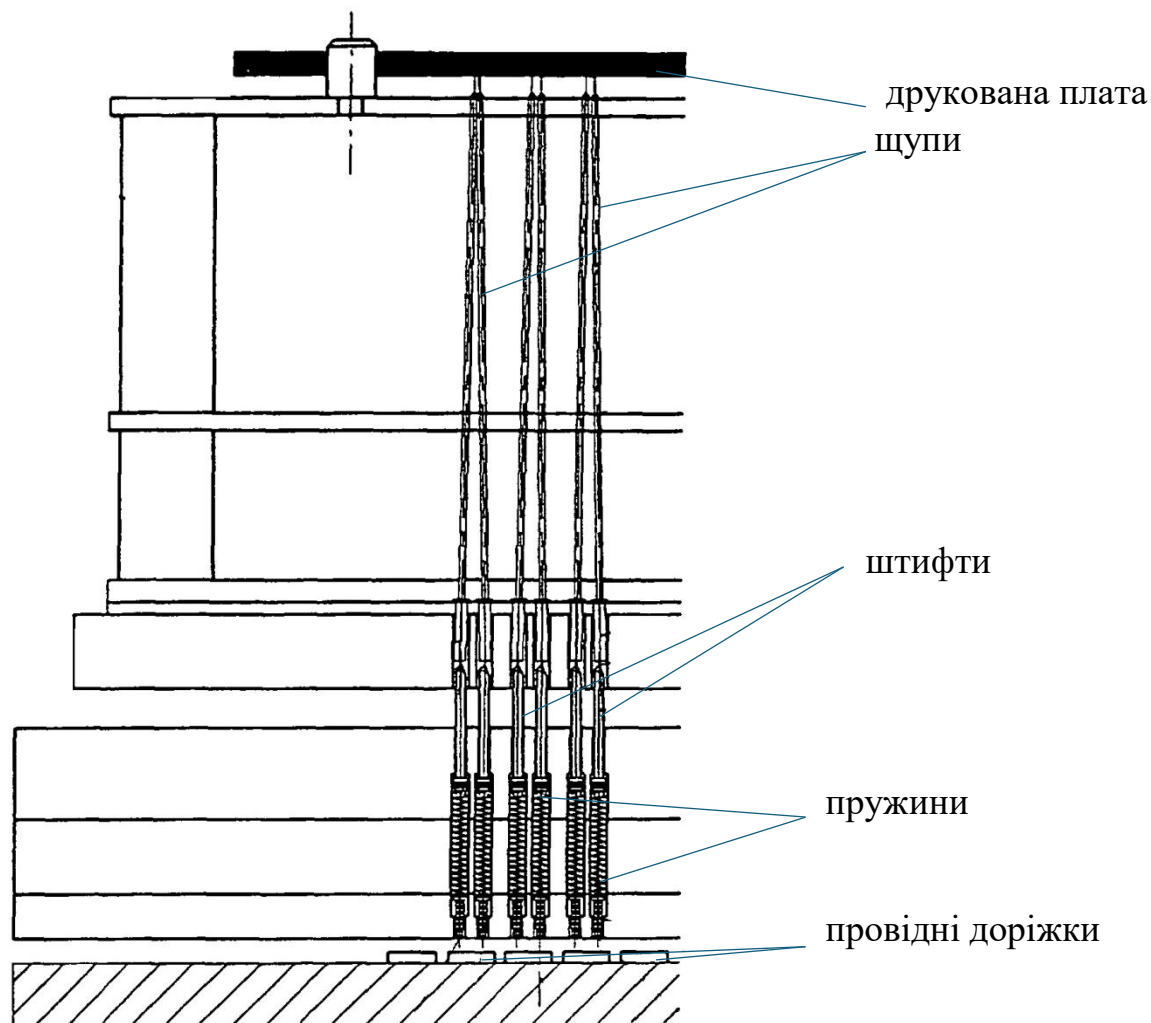


Рис. 1.9 – Пристрій тестування друкованих плат

Серцем конструкції є тестовий стенд, що включає нижню основу з матрицею пружинних штифтів (пого-пінів), верхню притискну плиту, яка забезпечує фіксацію плати у необхідному положенні, а також механізм притиску, що забезпечує необхідне зусилля для надійного контакту без пошкодження елементів. Контактна панель із пого-пінами механічно або пневматично піднімається до контрольованої плати, що розташовується на плиті-ложементі, після чого автоматично або вручну активується прижим. Контактні щупи стикаються з відповідними паяними або металізованими площадками плати, передаючи сигнали до системи аналізу.

Пого-піни, які є ключовими елементами цієї технології, мають циліндричну форму з вбудованою пружиною. Стандартна конструкція складається з трьох частин: зовнішньої трубки, центрального плунжера та стискуючої пружини між ними. При натисканні на пін він стискається, зберігаючи постійний контакт з

платою, навіть у разі невеликого відхилення по висоті або кутах розміщення контактних точок. Така особливість конструкції гарантує стабільний електричний зв'язок без потреби в жорсткому закріпленні плати, що особливо важливо при масовому або багаторазовому тестуванні.

У процесі тестування система аналізує цілісність з'єднань, функціонування окремих електричних ланцюгів, рівні сигналів, можливі короткі замикання та інші типові дефекти. Плати, які проходять перевірку, сортуються відповідно до отриманого результату: «пройдено» або «брак». Керування процесом здійснюється через центральний контролер, що зчитує інформацію з усіх активних контактів через мультиплексори або канали вимірювального інтерфейсу.

Перевага такої технології полягає у можливості швидкої та повторюваної перевірки великої кількості контактів за один цикл. У порівнянні з ручними методами або літаючими зондами, система типу «bed-of-nails» забезпечує високу продуктивність, мінімальні затрати часу та зменшення людського фактора в процесі тестування.

Узагальнюючи розглянуті підходи до контролю якості друкованих плат, можна дійти висновку, що найбільш доцільним рішенням є впровадження методу тестових щупів для внутрішньосхемного тестування з використанням стенду типу "Bed of Nails". Цей метод, відзначаючись високою надійністю та універсальністю, забезпечує ефективну перевірку електричних параметрів плати без потреби її активації у складі кінцевого пристрою. Впровадження автоматизованої системи з електроприводним прижимом, механізованою подачею плат і сортуванням бракованої продукції значно підвищує продуктивність та виключає помилки, властиві ручному тестуванню. Додаткове використання портального маніпулятора дозволяє забезпечити точне й повторюване позиціонування друкованих плат у тестовій зоні, що особливо важливо для серійного виробництва з високими вимогами до якості. У комплексі запропоноване рішення демонструє збалансовану інтеграцію сучасних технічних засобів, спрямовану на підвищення точності, швидкодії та стабільності процесу контролю.

1.2 Вимоги до автоматизованої системи тестування друкованих плат

Для розробки системи тестування друкованих плат необхідно визначити основні вимоги, які забезпечать високу точність, швидкість та ефективність процесу тестування. Враховуючи специфіку тестування різних видів плат, наступні вимоги є критичними для успішної реалізації автоматизованої системи тестування:

1. Система повинна забезпечувати точне вимірювання таких параметрів, як напруга, струм, опір та цілісність з'єднань на кожній точці плати, точно визначати короткі замикання, відсутні з'єднання, пошкодження компонентів (наприклад, неправильно припаяні компоненти) або неправильні значення опору.

2. Використання автоматичних механізмів, таких як порталні маніпулятори для подачі плат на тестування та автоматичний прижим для фіксації плат без втручання людини.

3. Від подачі плат на тестування до виведення результатів тестування повинна бути забезпечена повна автоматизація для мінімізації людського втручання.

4. Використання тестових стендів з відсортюванням бракованих плат після завершення перевірки, що забезпечує високу продуктивність і знижує можливість людської помилки.

5. Завдяки автоматизації всі тестові операції виконуються за чітко визначеним алгоритмом, що значно знижує ймовірність помилок, властивих ручному тестуванню.

6. Використання якісних компонентів для тестових стендів та надійних механізмів, таких як маніпулятори, які мають високу міцність і довговічність для тривалої експлуатації.

7. Система повинна бути енергоефективною, щоб мінімізувати витрати на енергоспоживання під час роботи тестового стенду.

8. Система має відповідати всім стандартам безпеки, забезпечуючи захист персоналу і уникнення несправностей, пов'язаних з електричними або механічними частинами.

До основних функціональних та технічних вимог, яким має відповідати стенда контролю відносяться:

1. Процес встановлення та вилучення плати пристрою має бути зручним для оператора стенда. Має бути достатньо місця для рук.
2. Плата має рівномірно притискатися прижимом, з відсутністю деформацій в зафіксованому стані.
3. Рухома плита має підводитися впритул до нерухомої плити.
4. Допускається притискання плит з зусиллям не більше 20 Н.
5. Швидкість підводу-відводу прижима (в одну сторону) - 1...3 секунди.
6. Повний робочий хід прижима - 80 мм.

Стенд має бути спроектований таким чином, щоб забезпечити легкий доступ до основних компонентів для очищення та обслуговування. Повинна бути можливість легкої заміни вузлів чи деталей.

Для забезпечення тестування ДП, перше що потрібно перевірити – це наявність коротких замикань на будь-якій з шин живлення. Для цього необхідні тестові точки для виконання цих тестів (рис. 1.10).

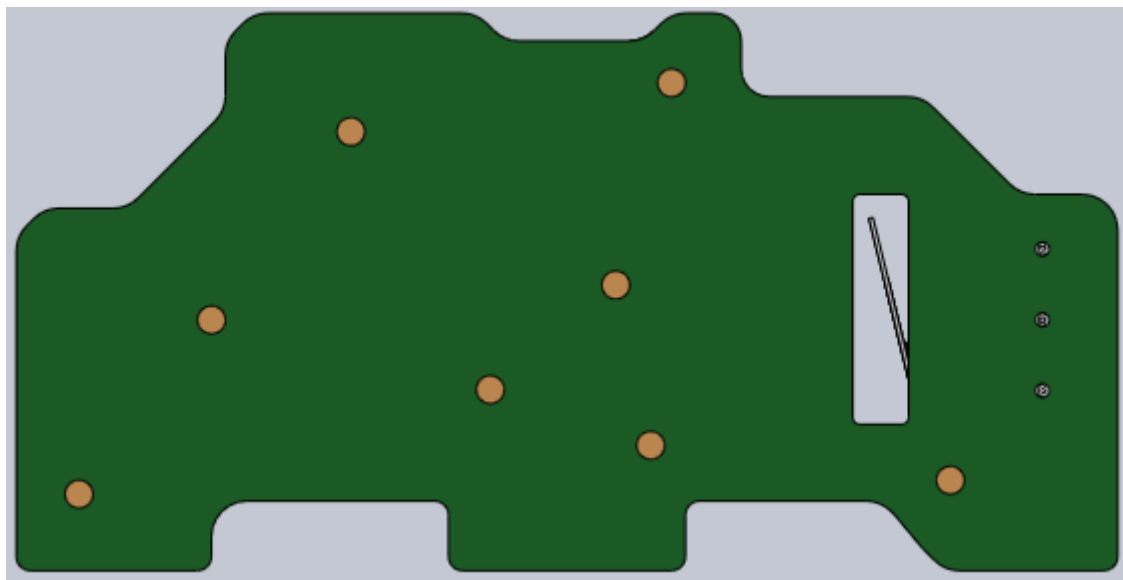


Рис. 1.10 – Зображення тестових точок на об'єкті керування

Вимоги до системи тестування друкованих плат включають високу точність вимірювань, швидкість виконання тестів і ефективність процесу. Всі ці характеристики дозволяють створити автоматизовану систему, яка забезпечить

стабільно високу якість продукції, зменшить кількість помилок та скоротить час на тестування. Врахування цих вимог дозволить досягти значного поліпшення якості тестування в умовах серійного та масового виробництва.

1.3 Розробка структурної схеми системи

На структурній схемі (Рис. 1.11) зображено архітектуру розробленої системи тестування друкованих плат, яка виконує автоматизований контроль якості виробів за допомогою електричних та функціональних тестів.

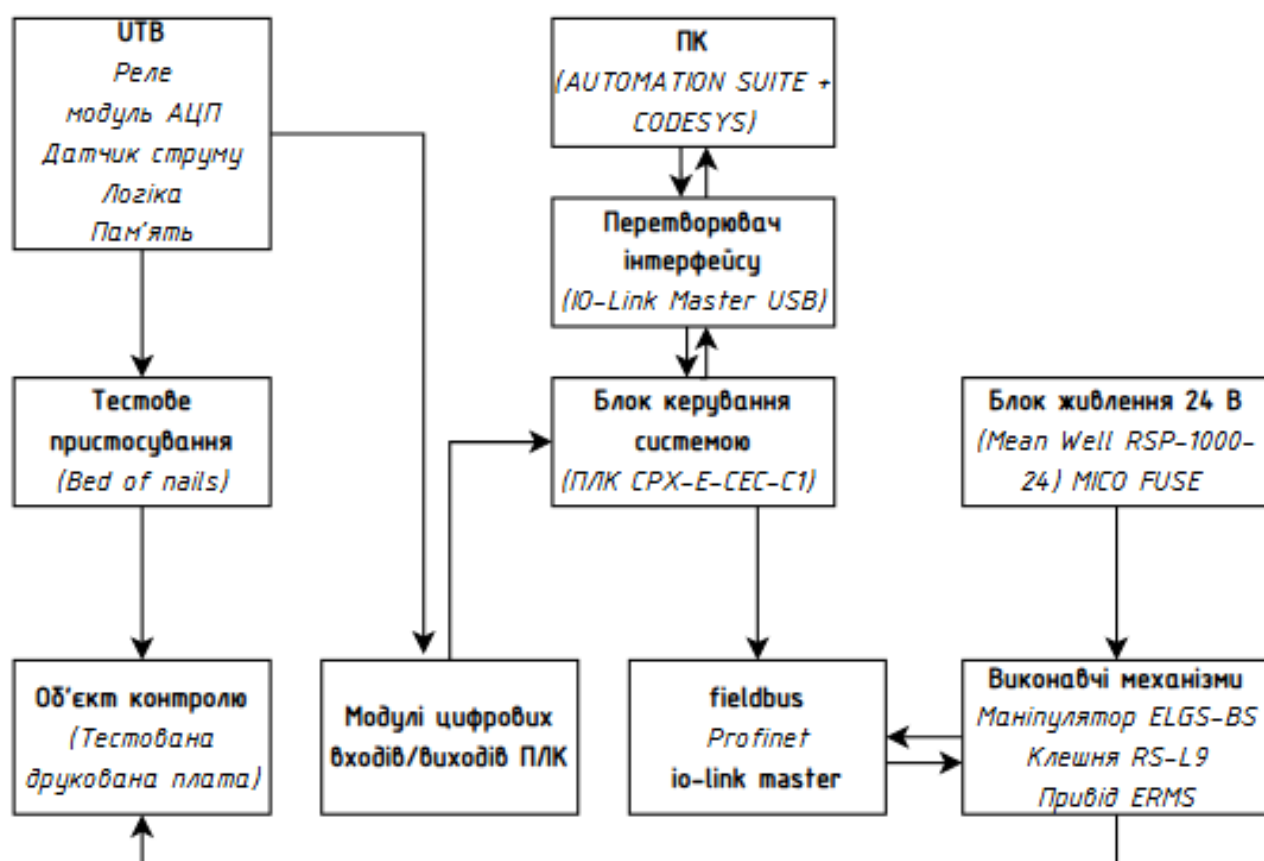


Рис. 1.11 – Структурна схема автоматизованої системи тестування

Розроблена структурна схема автоматизованої системи тестування друкованих плат ґрунтується на чітко визначеному функціональному розподілі між усіма компонентами, що забезпечує високу стабільність, гнучкість та масштабованість рішення. Основним елементом системи є програмований логічний контролер Festo CPX-E-CEC-C1, який виконує функцію

централізованого керування процесом: від прийому завдання з персонального комп'ютера до реалізації послідовності дій тестування і сортування плат. Передача даних між ПК та ПЛК здійснюється через інтерфейс IO-Link Master USB, що дозволяє уніфікувати комунікацію за сучасними протоколами промислової автоматизації.

Підсистема комунікації представлена модулями fieldbus (Profinet) та IO-Link Master, які забезпечують інтеграцію системи до внутрішньої мережі підприємства і підтримують зв'язок із сенсорними та виконавчими пристроями. Завдяки цим модулям, усі виконавчі механізми, включно з портальним маніпулятором, актуатором RS-L9 та приводом ERMS, отримують керуючі команди з мінімальною затримкою, що критично важливо при циклічній роботі.

Особливе місце у структурі займає UTB (універсальний тестовий блок), що виконує функції вимірювання, комутації та аналізу електричних параметрів тестованої плати. Він включає модуль АЦП, реле, датчики струму та логічні елементи. Його робота координується ПЛК, а зчитані результати автоматично передаються на ПК для обробки і збереження.

Тестування реалізується через пристосування типу “Bed-of-Nails”, що забезпечує багаторазовий, стабільний і швидкий контакт з тестовими точками плати за допомогою пого-пінів. Цей підхід дозволяє одночасно зчитувати десятки або сотні сигналів без потреби в перемиканні або механічному пересуванні датчиків, що значно прискорює цикл контролю.

Виконавчі механізми — маніпулятор ELGS-BS, привід ERMS та захват з актуатором RS-L9 — відповідають за механічну взаємодію із платами: їх захоплення, позиціонування на тестовому пристрої, фіксацію та сортування після завершення перевірки. Всі ці елементи живляться від централізованого блоку живлення на 24 В (Mean Well RSP-1000-24), з розгалуженням через модуль захисту MICO FUSE, що гарантує безпечну роботу навіть при пікових навантаженнях.

Логіка роботи системи організована таким чином, що оператор на ПК задає параметри тесту, які надсилаються на ПЛК. Контролер формує команди для

виконавчих механізмів і одночасно координує роботу УТВ та системи вводу/виводу. Після позиціонування плати на контактне поле, запускається цикл тестування. За його результатами ПЛК приймає рішення щодо класифікації плати як придатної або бракованої, після чого портальний маніпулятор виконує відповідне сортування.

Запропонована архітектура системи повністю відповідає вимогам до сучасного автоматизованого тестування друкованих плат. Вона забезпечує високу швидкодію, адаптивність до змінних умов, можливість масштабування та простоту в обслуговуванні. Поєднання апаратної надійності з програмною гнучкістю формує надійний технічний фундамент для впровадження у виробниче середовище з високими вимогами до якості та повторюваності процесів.

1.4. Розробка функціональної схеми системи

На рисунку 1.12, представлена функціональна схема автоматизованої системи тестування друкованих плат, що реалізує повний цикл перевірки функціональних і електричних параметрів виробу з подальшим сортуванням результатів тестування.

Основні підсистеми:

1) ПЛК (AUTOMATION SUITE + CODESYS V3). Виступає в ролі верхнього рівня керування, виконує налаштування параметрів тестування, збір та обробку результатів, а також візуалізацію. Зв'язок з системою здійснюється через перетворювач інтерфейсу IO-Link Master USB (CDSU-1) по USB → Ethernet.

2) Блок керування системою (ПЛК CPX-E-CEC-C1). Центральний контролер, який виконує: логікою процесу тестування; взаємодію з периферією по Modbus / EtherCAT; обробку сигналів від пристроїв і датчиків.

3) УТВ (Універсальний тестовий блок). Містить: модуль АЦП для вимірювання аналогових сигналів; реле для комутації тестових ліній; датчик струму для вимірювання споживання плати; вбудовану логіку та пам'ять для локальної обробки тестових послідовностей. УТВ з'єднаний з тестовим

пристосуванням (Bed-of-Nails) та забезпечує комутацію тестових пінів із контактними площадками об'єкта контролю (тестованої друкованої плати)

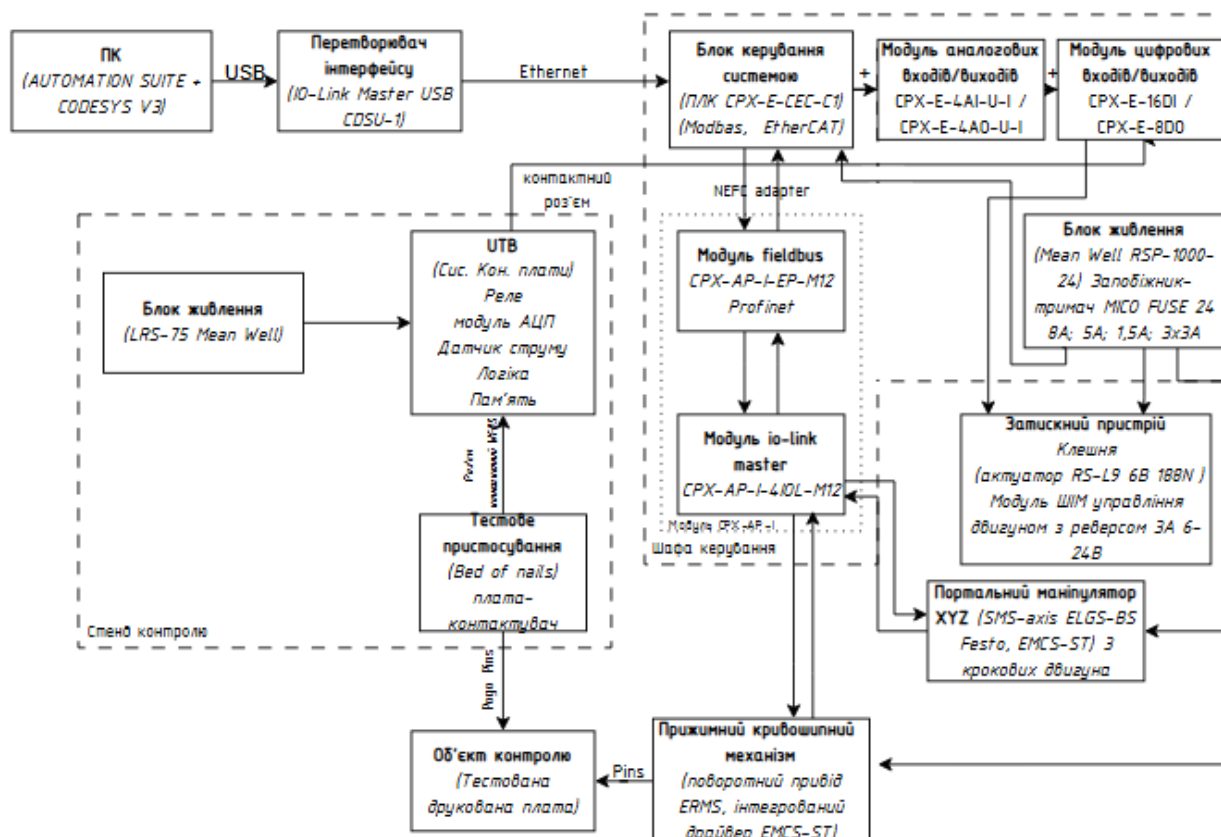


Рис. 1.12 – Функціональна схема системи тестування

4) Модулі введення/виведення: модуль аналогових входів/виходів → CPX-4AE-U-I / CPX-4AO-U-I. Модуль цифрових входів/виходів → CPX-E-16DI / CPX-E-8DO. Ці модулі виконують збір аналогових і цифрових сигналів, необхідних для тестових процедур.

5) Модулі fieldbus та IO-Link: CPX-AP-I-EP-M12 (fieldbus Profinet) — зв'язок із системами верхнього рівня. CPX-AP-I-4IOL-M12 (IO-Link master) — підключення IO-Link сенсорів та виконавчих механізмів.

6) Блоки живлення: Для UTB — LRS-75 Mean Well для стенду контролю. Для всієї системи — Mean Well RSP-1000-24 (40 A) з модулем захисту MICO FUSE 24.

7) Виконавчі механізми. Затискний пристрій (клешня) – рух за допомогою актуатора RS-L9 (6B 188N), привід із ШІМ-управлінням 3А, 6–24 В. Портальний маніпулятор (XYZ): на базі SMS-axis ELGS-BS (Festo), оснащений 3 кроковими

двигунами із інтегрованими драйверами EMCS-ST. Притискний кривошипний механізм: поворотний привід ERMS-25 (інтегрований драйвер EMCS-ST).

Система працює наступним чином. ПК формує тестову задачу та передає її на ПЛК CPX-E-SEC-C1. ПЛК координує роботу: портального маніпулятора, що автоматично подає плату на тестове пристосування (Bed-of-Nails); приймального механізму, який фіксує плату у тестовому положенні. УТВ проводить вимірювання параметрів: струму споживання; напруг на ключових вузлах; логічних рівнів сигналів. Результати тестування аналізуються та передаються на ПК для збереження та виводу на екран. Після завершення тесту плата автоматично переміщається у відповідний бункер PASS / FAIL за допомогою виконавчих механізмів.

До переваги розробленої системи можна віднести: високий рівень автоматизації - мінімізація ручної праці; модульна структура - можливість розширення; використання сучасних комунікаційних протоколів (Profinet, EtherCAT, IO-Link); інтеграція в MES/ERP системи для повного контролю виробничого процесу.

Розроблена функціональна схема демонструє повний цикл взаємодії між апаратними та програмними компонентами системи тестування друкованих плат. Схема відображає послідовність обробки інформації, починаючи від надходження керуючих команд з ПК до ПЛК, далі — до УТВ та тестового пристосування, і завершуючи збором та передачею результатів тестування.

Завдяки використанню сучасних комунікаційних інтерфейсів (IO-Link, Profinet, EtherCAT) забезпечено високу гнучкість та масштабованість системи.

1.5 Розробка алгоритму роботи блоку керування.

На рисунку 1.13, відображено блок-схему алгоритму роботи ПЛК для автоматизованої системи тестування друкованих плат. Вона демонструє рівень продуманості системи, послідовність контролю, взаємодію елементів ПЛК з периферією. [11]

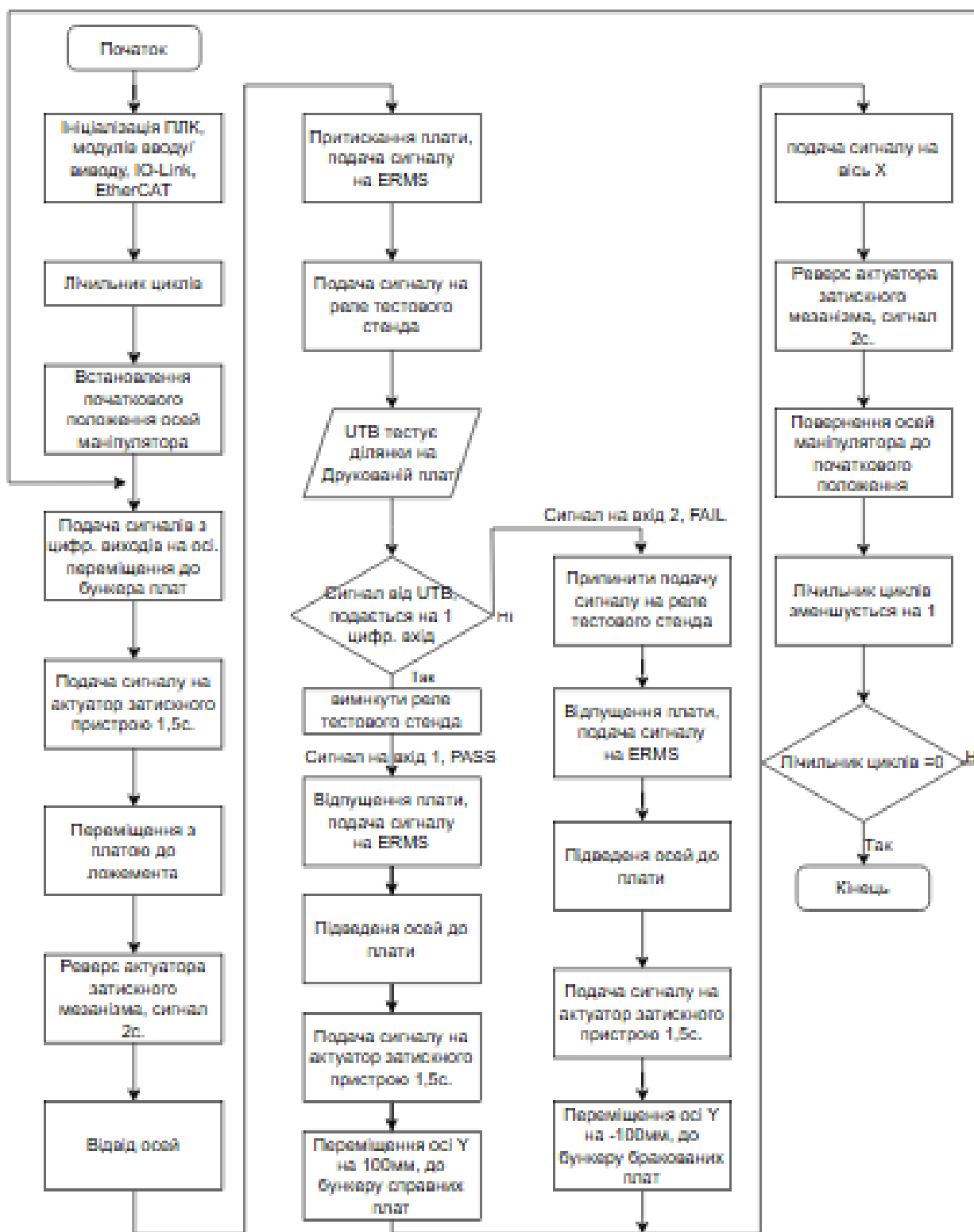


Рис. 1.13 – Алгоритм роботи системи тестування

Схема чітко показує послідовність операцій, переходи між станами, умови прийняття рішень, цикли. Схема служить прямим шаблоном для написання програми ПЛК або скрипта в CODESYS, Ladder, ST чи іншій мові. Кожен блок алгоритму — це, по суті, майбутній фрагмент коду. Під час моделювання або

налагодження системи схема допомагає знайти помилки логіки (наприклад, відсутність умовного переходу, пропущену дію або нескінченний цикл).

Логіка програми наступна: драйвери крокових двигунів портального маніпулятора, осі z, осі y, осі x, також драйвер крокового притискного механізму стенду ERMS, підключені до модуля io-link master, той у свою чергу до модуля fieldbus, і програмованого логічного контролера.

Притискний механізм стенду ERMS при подачі струму робить поворот на 180 градусів і зупиняється.

Тестування друкованої плати відбувається через UTB, в залежності від того чи плата справна, чи ні подається сигнал на цифрові входи ПЛК, якщо сигнал приходить на 1 вхід - плата справна, якщо на 2 вхід - брак.

До модулю цифрових входів у вихідний цифровий контакт 3 підключено реле прямого руху актуатора затискного пристрою (клешні), у вихідний цифровий контакт 4 підключено реле реверсивного руху актуатора затискного пристрою.

Алгоритм наступний: встановлюється початкове положення затискного пристрою через осі портального маніпулятора, положення по осі $z=140$, $y=100$, $x=100$ мм.

Захват і переміщення плати. Відбувається переміщення до бункеру друкованих плат координати Y та X ті ж самі, координата $Z=80$, опустилась, ПЛК подає сигнал на 3 цифровий вихід 1,5 секунди (затискний пристрій відкрився на 7,5мм), потім переміщується вісь X на -40 мм, подається сигнал на 4 цифровий вихід 2 секунди (замикається затискний механізм), вісь X переміщується на 40 мм, вісь Z переходить у координату 140, вісь X переміщується на -90мм, Z переміщається на координату 130, подача сигналу на 3 цифровий вихід 1,5 секунди, вісь X переміщається на 90мм.

Подача сигналу на притискний механізм ERMS, поворот його на 180 градусів.

Подача сигналу на реле стенду контролю, відбувається контроль друкованої плати. Якщо сигнали в нормі, то подається сигнал від UTB на 1 цифровий вхід

ПЛК. Якщо плата бракована, подається сигнал від UTB на 2-й цифровий вхід ПЛК. Сигнал слугує початком руху після тестування.

Вимикається реле стенду контролю. Подається сигнал на притискний механізм ERMS, поворот його на 180 градусів, рух осі X на -90мм, подача сигналу на 3 цифровий вихід 1,5 секунди, рух осі Z на координату 140, рух осі X на 90мм, якщо плата справна рух осі Y на 100мм в кінцеве положення (до лівого бункера зі справними платами), якщо плата бракована рух осі Y на -100мм в кінцеве праве положення. Далі рух осі X на -30мм, подача сигналу з 4 цифрового виходу 2 секунди. Цикл завершено. Повернення осей у початкове положення. Лічильник встановлений на 3 плати у бункері, після завершення циклу, від числа лічильник віднімається 1, при досягненні 0, робота системи завершується.

Опишемо основні етапи роботи системи тестування:

1. Початковий етап

Ініціалізація ПЛК та всіх модулів: цифрові/аналогові входи/виходи, IO-Link, EtherCAT.

Встановлення значення лічильника циклів (кількість плат, які потрібно протестувати). Маніпулятор переміщується у початкову позицію: $X = 100$ мм, $Y = 100$ мм, $Z = 140$ мм.

2. Захоплення плати з бункера

Подаються сигнали на керування осями маніпулятора — плата береться з завантажувального бункера. Актуатор затискного пристрою (клешні) відкривається — подається сигнал на вихід 3 на 1.5 с. Осі переміщуються до позиції захоплення, далі затискний механізм закривається — подається сигнал на вихід 4 на 2 с. Відведення осей до позиції встановлення на тестовий стенд (ложемент)

3. Початок тестування

Подається сигнал на ERMS → механізм повертається на 180° і притискає плату. Подається сигнал на реле тестового стенду — починається тест. UTB тестує контрольні ділянки друкованої плати.

4. Обробка результату тесту

Якщо від UTB надходить сигнал на вхід 1 (PASS): вимикається реле тестового стенду, повторно активується ERMS (відпускання плати), осі підводяться до плати, плата захоплюється (сигнал на вихід 3), переміщення осі Y на +100 мм — до бункера справних плат.

Якщо сигнал надходить на вхід 2 (FAIL): реле стенду вимикається, повторна подача сигналу на ERMS (відпускання), підведення осей до плати, захоплення, переміщення осі Y на -100 мм — до бункера бракованих плат.

5. Вивантаження та завершення циклу

Подається сигнал на вісь X для вивантаження. Актуатор клешні відкривається (реле 4 на 2 с) — скидання плати у відповідний лоток. Всі осі повертаються до початкового положення. Зменшується лічильник циклів на 1.

Якщо лічильник $\neq 0$ — виконується наступний цикл.

Якщо лічильник = 0 — система завершує роботу.

Особливості алгоритму:

Враховано розділення обробки справних і бракованих плат; присутня двостороння логіка реагування на результат тестування; кожен рух та дія чітко зв'язана із сигналом ПЛК; присутній лічильник для контролю загальної кількості плат, що дозволяє зупиняти цикл після завершення партії; система є повністю автоматизованою, і не потребує втручання оператора під час виконання основних операцій. [12]

1.6. Розробка схеми електричної принципової

Принципова електрична схема, зображена на рисунку 1.14, демонструє повну взаємодію між основними вузлами системи автоматизованого керування тестуванням друкованих плат. Вона охоплює джерела живлення, пристрої захисту, логічний контролер, модулі зв'язку, виконавчі механізми та елементи керування ними.

Живлення подається з мережі змінного струму 220 В через стандартний роз'єм ІЕС С14. На схемі видно два блоки живлення типу RSP-1000-24, які виконують перетворення змінної напруги в постійну 24 В для живлення різних

підсистем. Один із цих блоків живить безпосередньо контролер PLC CPX-E-CEC-C1, а також модуль стенду тестування UTB через твердотіле реле (DC SSR), що забезпечує електричну розв'язку між силовою частиною і логічними колами. Інший блок живлення використовується для подачі напруги на крокові двигуни та пов'язані з ними драйвери. Перед підключенням до навантаження струм проходить через захисний блок — MICO FUSE 24, який виконує функцію захисту від перевантаження та короткого замикання. На схемі він зображений як окремий вузол із чотирма вихідними лініями, що живлять контролер, IO-Link модулі та інші вузли.

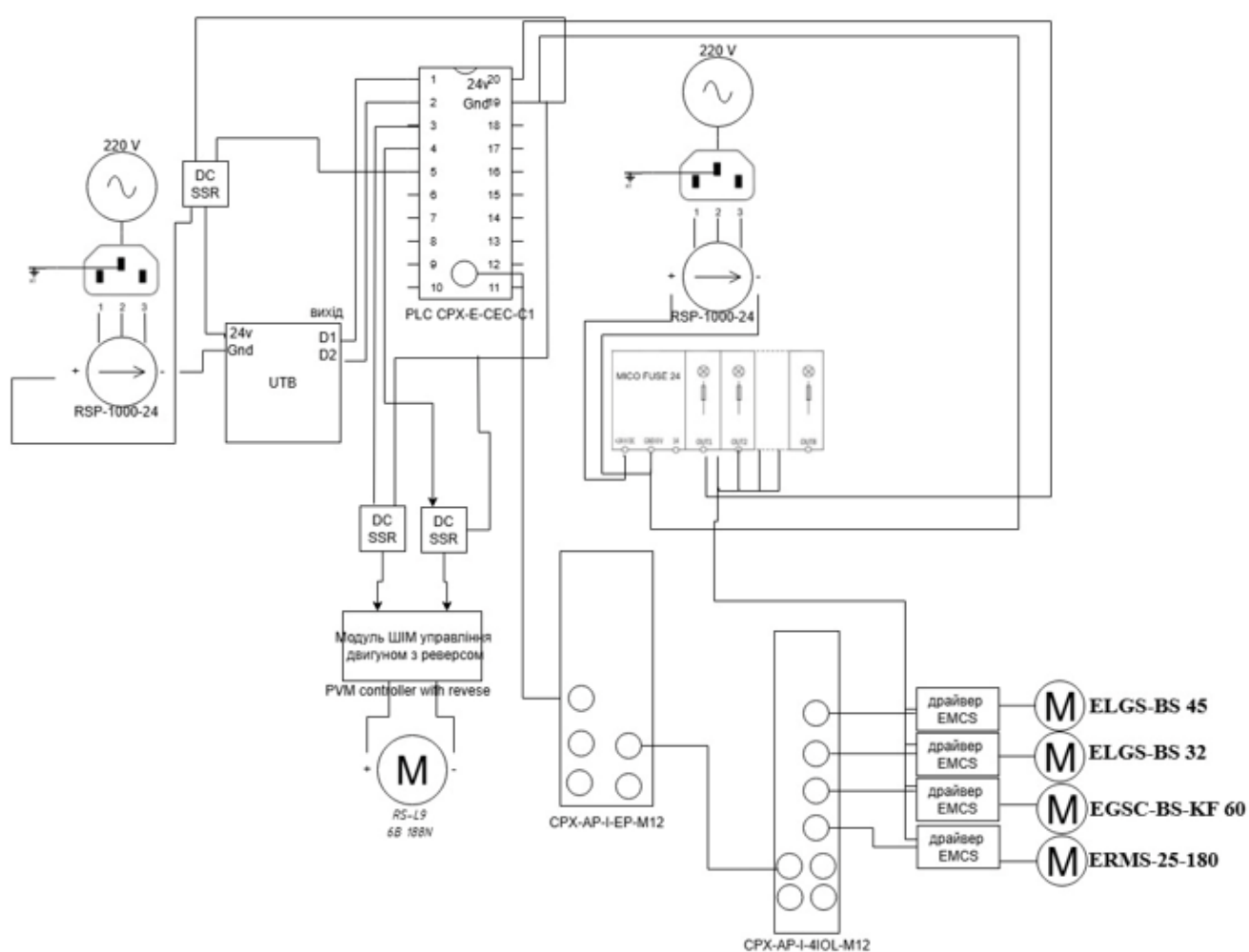


Рис. 1.14 – Електрична принципова схема елементів системи

Центральною частиною системи є програмований логічний контролер CPX-E-CEC-C1. Він приймає сигнали з тестового стенду UTB по цифрових входах D1 та D2, які інформують про статус перевіреної плати (справна або бракована). У разі наявності сигналу контролер активує відповідний вихід, який через твердотілі

реле подає керуючі сигнали до актуатора притискного механізму — модуль PWM-регулювання з можливістю реверсу. Це дозволяє виконати дії, наприклад, притиснути або відпустити плату в залежності від результату перевірки. Така схема керування є надійною, оскільки твердотілі реле забезпечують швидке комутування та мають довший ресурс порівняно з електромеханічними аналогами.

До контролера CPX-E-CEC-C1 через модуль розширення CPX-AP-I-EP-M12 підключається IO-Link Master CPX-AP-I-4IOL-M12. Цей модуль виконує роль посередника між логічною частиною та виконавчими пристроями. Він дозволяє організувати адресний обмін даними з драйверами EMCS, до яких безпосередньо підключено крокові двигуни. У схемі чітко позначено чотири виконавчі механізми: ELGS-BS 45, ELGS-BS 32, EGSC-BS-KF 60 та ERMS-25-180. Кожен із цих двигунів виконує конкретне завдання в порталній структурі маніпулятора — наприклад, переміщення плат по осях X, Y, Z та привід затискного механізму.

Керування цими двигунами здійснюється через драйвери EMCS, які приймають сигнали STEP та DIR від IO-Link Master. Це дозволяє точно задавати напрямок обертання та кількість імпульсів, що відповідає заданому переміщенню. Такий принцип широко застосовується в системах точного позиціонування, зокрема в маніпуляторах та обробних комплексах.

Таким чином, електрична схема забезпечує логічно завершене, надійне і безпечне функціонування всієї системи. Всі компоненти мають чітко визначені функції: джерела живлення формують стабільну напругу, контролер обробляє сигнали і приймає рішення, реле передають ці рішення до виконавчих механізмів, а IO-Link забезпечує гнучку і масштабовану структуру зв'язку між пристроями. Такий підхід дозволяє легко адаптувати систему до змін у технологічному процесі та забезпечити безперервність і повторюваність дій на високому рівні точності.

1.7 Розробка програми керування системою

Програма керування в системі автоматизованого тестування друкованих плат виконує ключову роль в організації та синхронізації всіх процесів, які

забезпечують ефективну, точну та повторювану перевірку якості плат. Її створення дозволяє автоматизувати контроль якості без участі оператора, зменшити час перевірки, підвищити точність і мінімізувати ймовірність людської помилки.

Для ПЛК Festo CPX-E-CEC-C1 програма реалізується в середовищі Automation Suite (Рис. 1.15) використовується програмування згідно зі стандартом IEC 61131-3, який підтримує кілька мов. Festo Automation Suite дозволяє створювати структуровану візуальну програму за допомогою Function Blocks або SFC (Sequential Function Chart), де кожна дія або крок — це блок або перехід у послідовному процесі.

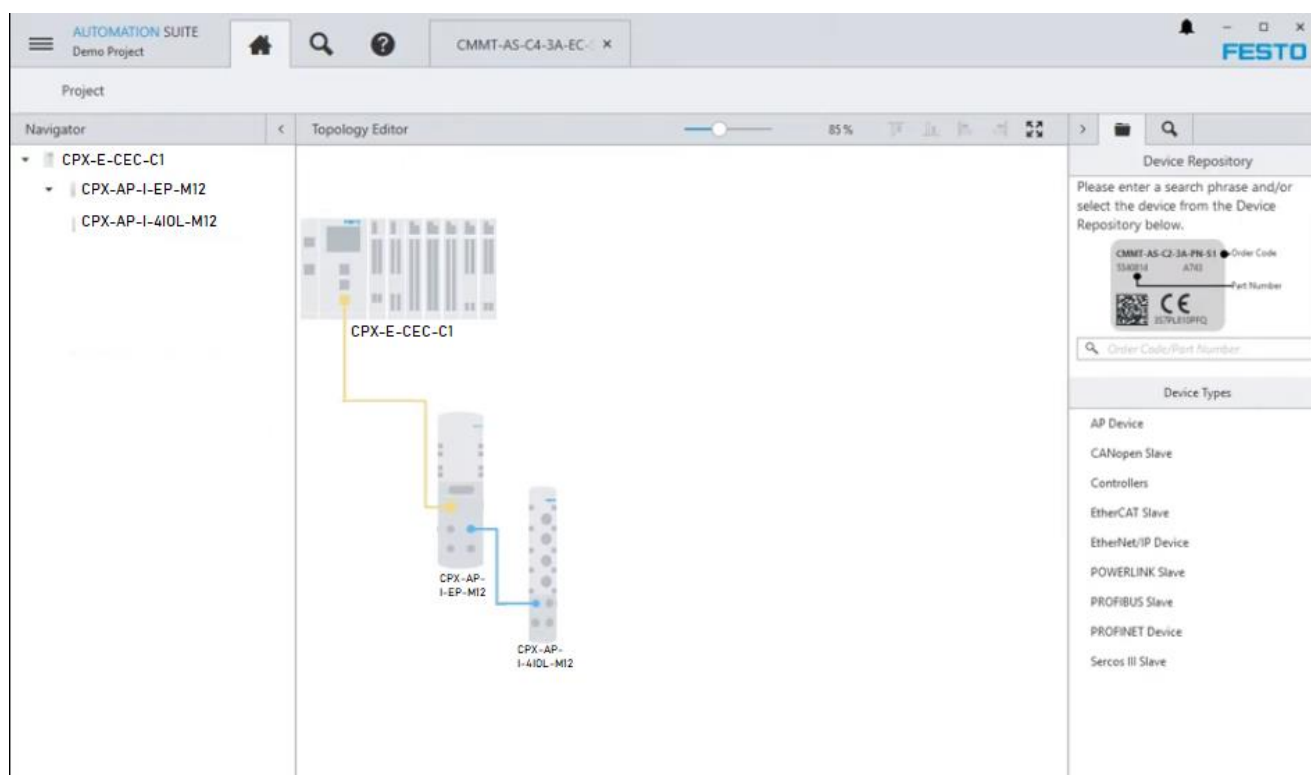


Рис. 1.15 – Програмне середовище Automation Suite, етап реалізації програми керування системою тестування

Програма керування в системі автоматизованого тестування друкованих плат відіграє визначальну роль у чіткому координуванні всіх етапів перевірки. Її впровадження дозволяє забезпечити надійну, послідовну і повністю автоматизовану роботу системи, мінімізуючи втручання оператора. Як наслідок, зменшується час на кожен тестовий цикл, підвищується точність контролю, а

вплив людського фактора практично усувається. За аналогією з промисловим конвеєром, де кожен рух чітко спланований, програма синхронізує всі дії — від захоплення плати до сортування результатів тестування.

У системах на базі ПЛК Festo CPX-E-CEC-C1 програмна логіка розробляється у середовищі Festo Automation Suite, яке підтримує стандарт IEC 61131-3. Це забезпечує гнучкість у виборі мов програмування: від текстових інструкцій у Structured Text (ST) до візуальних блок-схем у Function Block Diagram (FBD) чи послідовних алгоритмів у SFC (Sequential Function Chart). При цьому кожна дія — це логічна ланка, яку можна детально описати, протестувати й масштабувати. Приклад текстової логіки на мові ST наведено у Додатку Е.

Програма охоплює увесь спектр дій, необхідних для керування системою. На початковому етапі вона ініціалізує всі підсистеми: вводи/виводи, IO-Link, EtherCAT, драйвери та виконавчі механізми. Далі відбувається встановлення початкових координат маніпулятора. Керування рухом здійснюється по трьох осях — X, Y і Z — що дозволяє точно позиціонувати плату в межах робочого простору. Після подачі плати в зону перевірки активується затискний механізм: команда на відкриття або закриття клешні надходить через відповідні цифрові виходи ПЛК. У момент, коли плата утримується в правильному положенні, активується тестовий стенд. Його реле отримує сигнал на запуск, і після завершення тесту на один із цифрових входів ПЛК надходить результат: сигнал на вхід D1 означає, що плата справна; на D2 — що виявлено дефект.

Залежно від отриманого результату система приймає рішення про подальший маршрут плати. Справні направляються в один бункер, браковані — в інший. Це досягається переміщенням маніпулятора по осі Y. Після завершення дії програма повертає всі осі в початкове положення, і цикл повторюється. Така побудова дозволяє обробляти кілька плат підряд із урахуванням лічильника циклів.

Процес розробки програми починається зі створення нового проєкту в Festo Automation Suite. Обирається тип контролера — CPX-E-CEC-C1-EP (з підтримкою EtherNet/IP). До структури проєкту додаються модулі: контролер, польовий

модуль CPX-E-EP, IO-Link Master CPX-AP-I-4IOL-M12, драйвери крокових двигунів, а також цифрові входи/виходи. Для кожного модуля задається адреса в IO-структурі (контролер підтримує до 64 байтів вводу/виводу). Далі виконується автоматичне сканування пристроїв (device scan) або ручне налаштування IO-Link, з перевіркою кожного з'єднання.

Комунікація з IO-модулями налаштовується через EtherNet/IP. Контролер працює як підлеглий пристрій (EtherNet/IP Slave), що взаємодіє з CPX-AP через мережу. IP-адреса задається вручну або через утиліту FFT. Стан з'єднання контролюється за допомогою індикаторів (наприклад, синє світло підтверджує синхронізацію з IO-Link драйверами).

Програмна логіка в CODESYS (IEC 61131-3) може будуватись у кількох мовах. Зокрема, Structured Text (ST) використовується для опису умов, перемикачів станів, обробки входів/виходів. Ось приклад глобальних змінних:

```
VAR_GLOBAL
DO_OpenGripper AT %QX0.3 : BOOL;
DO_CloseGripper AT %QX0.4 : BOOL;
DO_ERMS AT %QX0.5 : BOOL;
DO_TestStand AT %QX0.6 : BOOL;
DI_PASS AT %IX0.1 : BOOL;
DI_FAIL AT %IX0.2 : BOOL;
END_VAR
```

Основна програма (MainProgram) включає визначення змінної стану (State) і реалізується через CASE або SFC, які поетапно виконують логіку. Серед типових дій — ініціалізація, переміщення осей за допомогою блоків SoftMotion, управління захопленням, запуск тесту, обробка результату та сортування. За потреби можна реалізувати лише базові сигнали step/direction, якщо SoftMotion недоступний.

Після написання логіки програма компілюється (Compile & Build), перевіряється на наявність помилок і завантажується в ПЛК через Ethernet. У режимі онлайн доступна візуалізація (HMI): значення змінних, активні режими,

сигнали з датчиків. Це зручно для тестування та налагодження в режимі реального часу.

Перший цикл проводиться з тестовою платою. Спостерігаються такі параметри, як час виконання кроків, коректність переміщення та захоплення, точність визначення результату, правильність сортування. За потреби коригуються таймінги (наприклад, паузи WAIT чи затримки SoftMotion), перевіряється функція аварійної зупинки та перезапуску.

Таким чином, програма керування не просто виконує набір команд, забезпечує адаптивний, стабільний і масштабований процес тестування. Вона є основою всієї логіки системи, яка дозволяє досягти високого рівня продуктивності, мінімізувати похибки і забезпечити точне сортування продукції за результатами контролю. [14]

1.8 Вибір складових елементів системи

У процесі побудови автоматизованої системи тестування друкованих плат було обрано компоненти, які забезпечують максимальну гнучкість, точність керування та зручність масштабування. Центром системи виступає програмований логічний контролер Festo CPX-E-CEC-C1 [15], має вбудовану підтримку мереж Profinet, EtherCAT та Modbus TCP, і є головною ланкою для комунікації між всіма складовими системи. Характеристики програмованого логічного контролера наведені у таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики ПЛК CPX-E-CEC-C1

Назва характеристики	Значення
Електричний контроль	Fieldbus Інтегрований контролер
Номінальна робоча напруга DC	24 В
Максимальне живлення	8 А
Максимальна кількість модулів	10
Габаритні розміри Ш x В x Г	50 мм × 130 мм × 75 мм

До контролера фізично підключають модулі аналогових та цифрових входів і виходів, в залежності від того, який пристрій та який сигнал потрібно надіслати чи отримати, їхні характеристики можна побачити у таблиці 1.3 [16]

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики модулів входу/виходу

Назва характеристики	Значення
Номінальна робоча напруга DC	24 В
Макс. загал. струм на модуль	1,4 А
Кіл-ть аналогових входів/виходів	4/4
Кіл-ть цифрових входів/виходів	8/8
Габаритні розміри Ш х Д х В	18,9 мм х 76,6 мм х 124,3 мм
Макс. загал. вих. струм на модуль	(Цифровий) 4 А
Макс. загал. вх. струм на модуль	(Цифровий) 1,8 А
Макс. загал. вих. струм на модуль	(Аналоговий) 2 А
Макс. загал. вх. струм на модуль	(Аналоговий) 1,4 А

Контролер з'єднано з модулем fieldbus, тобто модулем польової шини CPX-AP-I-EP-M12, даний модуль є інтерфейсом між програмованим логічним контролером (ПЛК) і модульною системою вводу/виводу CPX-AP-I, яка підтримує розширення IO-Link, цифрових і аналогових сигналів. Характеристики CPX-AP-I-EP-M12 наведені у таблиці 1.4 . Тобто замість того, щоб підключати всі пристрої безпосередньо до ПЛК, CPX-AP-I-EP-M12 дозволяє передавати дані по єдиному кабелю, суттєво зменшуючи витрати на проводку та час інсталяції. Також даний модуль потрібен для підключення до IO-Link Master CPX-AP-I-4IOL-M12.

Таблиця 1.4 – характеристики шини CPX-AP-I-EP-M12

Назва характеристики	Значення
Номінальна робоча напруга DC	24 В
Максимальне живлення	2 x 4 А (потрібен зовн. запобіжник)
Максимальна кількість модулів	80
Інтерфейс Fieldbus, тип	Ethernet
Інтерфейс Fieldbus, протокол	EtherNet/IP
Інтерфейс Fieldbus, ф-ція	Роз'єм шини

Інтерфейс Fieldbus, техн. під-ння	M12x1, D-кодування EN 61076-2-101
Інтерфейс Fieldbus, к-ть контактів	4
Комунікаційний інтерфейс, ф-ція	Сист. зв'язок XF20 OUT / XF21 OUT
Інтерфейс зв'язку, техн. підк-ння	M8x1, D-кодування EN 61076-2-114
Інтерфейс зв'язку, к-ть контактів	4
Електропостачання, техн. під-ння	M8x1, A-кодування EN 61076-2-104
Напруга живлення, к-ть полюсів	4
Передача напруги, техн. під-ння	M8x1, A-кодування EN 61076-2-104
Передача напруги, к-ть полюсів	4
Габаритні розміри Ш x Д x В	45 мм x 170 мм x 35 мм

Використання IO-Link — це значний крок уперед у порівнянні з класичними цифровими входами/виходами. IO-Link є відкритим стандартом «точка-точка» для комунікації між польовими пристроями (датчиками та виконавчими механізмами) та контролером. Він дозволяє не тільки передавати дискретні сигнали, але й надсилати діагностичні, конфігураційні та аналітичні дані, що суттєво покращує обслуговування та надійність системи.

Мастер-модуль IO-Link, призначений для підключення до чотирьох IO-Link пристроїв — таких як датчики, приводи, крокові контролери, актуатори тощо. Він служить мостом між цифровим контролером і "розумними" периферійними пристроями. Характеристики даного модулю приведені у таблиці 1.5. [17]

Таблиця 1.5 – характеристики CPX-AP-I-4IOL-M12

Назва характеристики	Значення
Номінальна робоча напруга DC	24 В
Максимальне живлення	2 x 4 А (потрібен зовн. запобіжник)
Протокол	IO-Link
Комунікаційний інтерфейс, ф-ція	Сист. зв'язок XF10 IN / XF20 OUT
Інтерфейс зв'язку, техн. під-ння	M8x1, D-кодування EN 61076-2-114
Інтерфейс зв'язку, к-ть контактів	4
Електропостачання, техн. під-ння	M8x1, A-кодування EN 61076-2-104
Напруга живлення, к-ть полюсів	4
Передача напруги, техн. під-ння	M8x1, A-кодування EN 61076-2-104
Передача напруги, к-ть полюсів	4

Електричне під-ння IO-Link	M12x1, A-кодування EN 61076-2-101
IO-Link, версія протоколу	Master V 1.1
Розміри Ш х Д х В	30 мм х 170 мм х 35 мм

Через IO-Link Master до системи підключаються чотири інтегровані драйвери EMCS для керування кроковими двигунами маніпулятора, характеристики наведені в таблиці 1.6. [19]

Таблиця 1.6 – характеристики інтегрованого драйвера EMCS

Назва характеристики	Значення
Номінальна напруга DC	24 В
Номінальний струм	0,3 А
Підключення живлення	NEBL-T12W4-E-5-N-LE4 5м
Підключення логіки	NEFC-M12G8-...-M12G5-LK 5м

Як виконавчі механізми для осей X та Y застосовуються модулі EGSC-BS-KF-32-100-8P та ELGS-BS 32, вони являють собою лінійний електромеханічний привід із зубчастим ременем, натягнутий між шківками, один з яких з'єднаний з кроковим або серводвигуном. Коли двигун обертається, шків передає рух ременю, який у свою чергу переміщує каретку (слайдер), прикріплену до ремня.

У таблиці 1.7 наведено загальні характеристики sms-осі . SMS-вісь (від англ. Simplified Motion Series axis) — це електромеханічний виконавчий модуль лінійного переміщення, який поєднує в собі лінійний привід на базі гвинта, ремня або зубчастої передачі, електродвигун та вбудовану систему керування з базовими функціями. [20]

Таблиця 1.7 – характеристики sms-осі ELGS-BS

Назва характеристики	Значення	
ELGS-BS	45	32
Номінальна напруга DC	24 В	
Номінальний струм	3А	3А
Робоче переміщення	200	100

Горизонтальне навантаження	10 кг	2 кг
Макс. сила подачі	100 Н	40 Н
Макс. швидкість переміщення	0,25 м/с	0,18 м/с
Макс. прискорення	5 м/с ²	
Точність повторення	±0,015 мм	
Виявлення позиції	Енкодер двигуна, датчик наближення	
Тип двигуна	кроковий	
Датчик положення ротора	Абсолютний однооборотний енкодер	
Макс. момент M_y	4,7 Нм	
Макс. сила F_y по всій осі	300 Н	
Макс. момент M_x		1,3 Нм
Макс. сила F_x по всій осі		150 Н

Вісь Z реалізована на базі ELGS-BS-KF-45, лінійного модуля із передачею руху, замість ремня, використовується гвинтовий механізм (кульковий гвинт). Обертання двигуна передається на гвинт, який обертається в нерухомій гайці. В результаті гайка переміщається вздовж осі, здійснюючи лінійне переміщення каретки.. Технічні характеристики EGSC-BS-KF-32-100-8P

наведені у таблиці 1.8.

Усі ці осі оснащені кроковими двигунами з високою роздільною здатністю, що дозволяє досягати точності позиціонування до 0,1 мм. Типовий кроковий двигун, використаний у цих модулях, має крок 1,8° з можливістю мікрошагування до 1/32, забезпечуючи плавний хід та стабільне позиціонування. Кожен двигун підключається до драйвера живленням 24 В через роз'єм M12, а сигнали керування надходять по IO-Link кабелю (4-жильний, екранований). [21]

Таблиця 1.8 – характеристики EGSC-BS-KF-32-100-8P

Назва характеристики	Значення
Робоче переміщення	100
Макс. сила подачі	100 Н
Макс. швидкість переміщення	0,25 м/с
Макс. прискорення	15 м/с ²
Точність повторення	±0,015 мм
Тип двигуна	Кроковий двигун

Окрему частину системи становить прижимний механізм, керований поворотним приводом ERMS-25-180-ST-M-H1-PLK-AA. Цей виконавчий елемент має кут повороту 180° , внутрішній редуктор та індуктивний датчик положення. Через планетарний редуктор передає крутний момент на поворотну платформу. Платформа обертається на вбудованому підшипниковому вузлі, а зупинка здійснюється за допомогою індуктивних датчиків положення, які фіксують крайні положення — зазвичай 0° і 180° . Керування реалізоване через IO-Link, що спрощує монтаж і налаштування. Технічні характеристики наведені у таблиці 1.9. [22]

Таблиця 1.9 – технічні характеристики ERMS-25-180-ST-M-H1-PLK-AA

Назва характеристики	Значення
Номінальна напруга DC	24 В
Номінальний струм	3 А
Кут повороту	180°
Передаточне число	9:1
Макс. частота обертання	150 об/хв
Визначення положення	Енкодер двигуна
Максимальне осьове зусилля	350 Н
Максимальна радіальна сила	450 Н
Кутове прискорення	$\leq 140 \text{ рад/с}^2$
Піковий обертовий момент	2,7 Нм
Ø вихідного вала	12 мм
Висота вала	20 мм

У якості приводу затискного механізму (клепні) використовується актуатор RS-L9 6В 188N. Технічні характеристики актуатора наведені у таблиці 1.10. Для його керування застосовується модуль широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), який дозволяє здійснювати реверсивне керування через два твердотільні реле BSSR-1DD. Перше реле активує рух у прямому напрямку, друге — у зворотному, залежно від сигналів цифрових виходів ПЛК. Параметри модуля широтно-імпульсної модуляції наведено у таблиці 1.11.

Таблиця 1.10 – технічні характеристики актуатора RS-L9

Назва характеристики	Значення
Номінальна напруга DC	6 В
Номінальний струм	1,5 А
Макс. зусилля	19 кг
Самоблокуюче навантаження	23,96 кг
Швидкість переміщення штоку	5 мм / с
Хід	10 мм-100 мм
Довжина установки	155 мм
Довжина у відкритому стані	255 мм
Вимикачі-обмежувачі	Вбудовані (нерегульовані)

Таблиця 1.11 – параметри модуля ШІМ

Назва характеристики	Значення
Напруга живлення DC	6...24 В
ШІМ робочий цикл	0..100 %
Макс. струм навантаження	3 А
Габаритні розміри Ш х Д х В	57 мм х 37 мм х 21 мм

Цифрові модулі CPX-E-16DI та CPX-E-8DO використовуються для прямого підключення UTV (універсальної тестової плати), а також для керування реле стенду та зчитування результатів тестування (вхідні сигнали PASS/FAIL). Аналогові модулі CPX-E-4AI-U-I / CPX-E-4AO-U-I можуть бути задіяні у подальшому для підключення температурних або струмових датчиків.

Перевагою запропонованої архітектури є модульність та масштабованість. Завдяки шині CPX-AP-I можна легко додавати нові модулі без потреби переробки системи керування. Наприклад, можна підключити додаткові осі, реле, сенсори або системи візуального контролю як через IO-Link, так і через цифрові входи/виходи.

У плані фізичного підключення, живлення на драйвери подається від блоку Mean Well 24 В через роз'єми типу M12. Логіка керування реалізована через ІО-

Link (4-жильні кабелі), а сигнали з UTВ подаються на входи ПЛК через стандартні 2-жильні кабелі з оптичним ізолюванням.

У порівнянні з класичною системою на основі лише цифрових входів/виходів, представлена система на базі ІО-Link дозволяє суттєво підвищити якість діагностики, забезпечити гнучке переналаштування без зміни апаратного забезпечення та підвищити загальну надійність роботи. Третій варіант — повністю аналогова система з використанням частотних перетворювачів або ПД-контролерів — хоча й забезпечує плавність керування, значно поступається в точності позиціонування та гнучкості.

Таким чином, обрана конфігурація на базі CPX-E-CEC-C1 з ІО-Link є оптимальним рішенням для автоматизованої системи тестування, що дозволяє легко масштабувати систему, інтегрувати нові вузли, забезпечити точне позиціонування і просту діагностику всіх компонентів. Вона не тільки підвищує технічну ефективність, а й суттєво спрощує обслуговування та адаптацію до нових вимог виробництва. [25]

1.9. Розрахунок елементів стенду тестування

Кривошипно-повзунні механізми є основними складовими конструкцій (рис. 1.16), які забезпечують перетворення обертального руху у зворотно-поступальний. Такий принцип широко використовується в технічних системах, зокрема — у пресах, автоматизованих лініях та контрольно-випробувальних установках. Основним елементом цього механізму виступає кривошип, який, обертаючись навколо фіксованої осі, через шатун передає зусилля на прижимну плиту, що переміщується прямолінійно.

Основними метричними параметрами кривошипно-повзунного механізму є довжина кривошипа $l_1 = l_{OA}$, довжина шатуна $l_2 = l_{AB}$, а також ексцентриситет напрямної повзуна e . У більшості розрахункових схем, що передбачають центральний прижим без зсуву направляючої, $e = 0$, що спрощує розрахунки та забезпечує симетричну геометрію силових навантажень.

У технологічних умовах найчастіше номінальне зусилля у кривошипних пресах прикладається при куті повороту кривошипа $\alpha \leq 20..30^\circ$, оскільки саме в цій зоні створюється найвигідніше співвідношення між зусиллям приводу і моментом сили на повзуні. Перевантаження преса можливе як по допустимому зусиллю, так і по потужності. У першому випадку це призводить до деформації чи руйнування вузлів механізму. У другому — до перегріву і виходу з ладу електроприводу, особливо за умов тривалого навантаження.

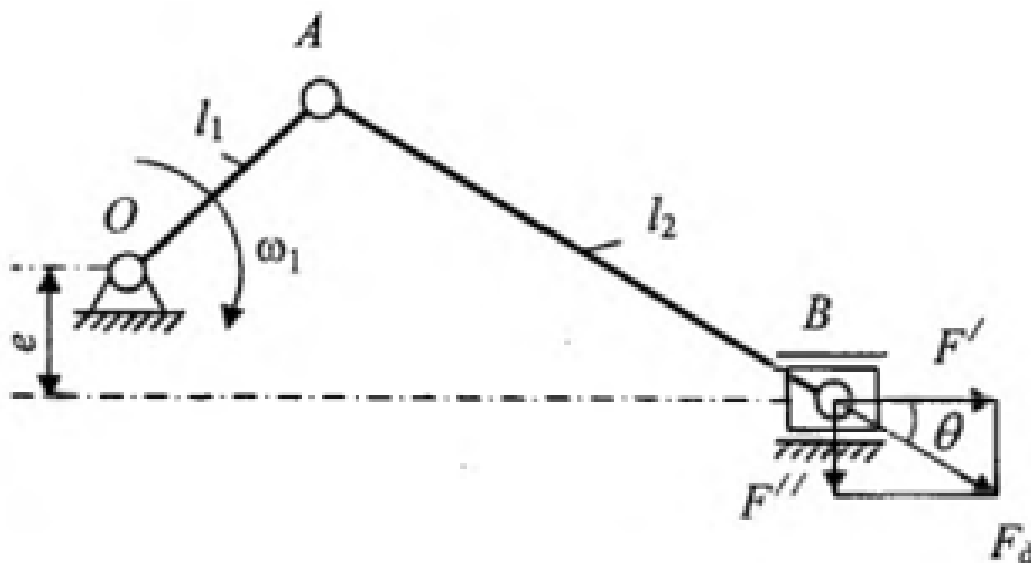


Рис. 1.16 – Кінематичне зображення кривошипно-повзунного механізму

Під час проектування, метричний синтез кривошипно-повзунних механізмів включає визначення довжин ланок та перевірку умов провертання кривошипа, що задається нерівністю $l_1 + e < l_2$. У разі недотримання цієї умови механізм втрачає здатність виконувати повний оберт. У запропонованій схемі при $l_1 = 0,04$ м та $l_2 = 0,06$ м і $e = 0$ умова провертання виконується.

Для ефективної передачі зусиль важливо дотримуватись умов мінімізації кута тиску θ , що є кутом між напрямом сили в ланці та вектором швидкості точки прикладення сили. Для робочих ходів доцільно обмежити цей кут $\theta < 30^\circ$, а для холостих — $\theta < 45^\circ$. В конкретному випадку при $e = 0$, максимальне значення θ , визначається як, $\theta_{\max} = \arcsin \frac{l_1}{l_2} = \arcsin \lambda = 41,81^\circ \approx 42^\circ$.

1.9.1 Розрахунок сили прижиму

При передачі моменту від ERMS через кривошип, сила в шатуні буде:

$$F_{sh} = \frac{F_M}{R \cdot \sin \theta} \quad (1.1)$$

Ця сила передається на плиту під кутом α , і відповідна горизонтальна компонента сили прижиму становитиме:

$$F_p = F_{sh} \cdot \cos \alpha \quad (1.2)$$

Щоб отримати максимальне значення сили, беремо кут $\theta \approx 90^\circ$ або $\pi/2$ коли момент рукояті перпендикулярний до шатунної осі. У цьому положенні:

$$\sin \theta = 1 \text{ та}$$

$$F_{sh} = \frac{F_M}{R} \quad (1.3)$$

Якщо $\alpha \approx 0^\circ$, тоді $\cos \alpha \approx 1$, тобто

$$F_p \approx \frac{F_M}{R} \quad (1.4)$$

Момент приводу: $F_M = 3 \text{ Нм}$.

Довжина кривошипа: $R = 0,04 \text{ м}$.

$$\text{Тоді, } F_p \approx \frac{3}{0,04} = 75 \text{ Н}$$

Тобто сила, що передається на прижимну плиту — 75 Н, що відповідає масі $\sim 7,5 \text{ кг}$, прикладеній зверху, чого достатньо для фіксації друкованої плати без пошкодження.

Перевіримо допустиме навантаження на пого-піни:

Сила яка буде прикладена на один пін прижимної плити, дорівнюватиме

$$\frac{F_p}{7} \approx \frac{75}{7} \approx 10,7 \text{ Н}$$

Це значення не перевищує допустимих навантажень на типові контактні щупи, що розраховані на 30–40 Н

Вказані розрахунки враховують лише статичну дію приводу. Для врахування динаміки (розгін, інерція, пружність пінів) бажано вводити коефіцієнт запасу:

$$k_z = 1.5 - 2.$$

1.9.2 Підбір двигуна

Час одного повного оберту кривошипа встановлюється у межах 4 с, що забезпечує оптимальну швидкість прижиму/відведення. Це відповідає частоті обертання:

$$n_{\text{крив.}} = 1/4 = 0,25 \text{ об/с}; n_{\text{вих}} = 60/4 = 15 \text{ об/хв};$$

І кутовій швидкості:

$$\omega_{\text{крив.}} = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 15}{30} = 1,57 \text{ рад/с (для повного оберту)}$$

Визначення потужності на виході пристрою з поступальним рухом, номінальна потужність визначається за формулою:

$$N_{\text{вих}} = P_{\text{вих}} \cdot V_{\text{вих}}, \text{ Вт} \quad (1.5)$$

де $P_{\text{вих}}$ – сила корисного опору на виході пристрою, Н,

$V_{\text{вих}}$ - лінійна швидкість руху вихідної ланки, м/сек.

Результати розрахунку переміщення, швидкості та прискорення наведені в таблиці 1.12

Вихідна потужність при корисному зусиллі $P = 20 \text{ Н}$ і швидкості $V = 0,0725 \text{ м/с}$ дорівнює $N = 1,45 \text{ Вт}$.

Вхідний момент для передачі цього зусилля розраховується за формулою:

$$N = M \cdot \omega, \quad (1.6)$$

звідси

$$M = N / \omega = 0,924 \text{ [нм]}$$

M — момент корисного опору нм на валу кривошипа

Діаметр вала кривошипа, або ж опорної шийки розрахуємо з формули, виходячи з умов міцності при розтягуванні

$$d_0 \geq 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{M}{0,2 \cdot \tau}} = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,924}{0,2 \cdot 53}} = 4,43 \text{ мм},$$

де $[\tau]$ – допустиме напруження розтягування для матеріалу, 53 МПа

З таблиці стандартних розмірів валів для шорсткості Ra 20, визначаємо:

$$d_0 = 6 \text{ мм}$$

Ефективність механізму забезпечується високим ККД, а необхідна потужність приводу визначається з урахуванням поправочних коефіцієнтів. Виходячи з цього, обирається двигун з запасом.

$$N_{\text{вх}} = \frac{N_{\text{вих}}}{\eta_{\text{сп}}}, \quad (1.7)$$

де

$$\eta_{\text{сп}} = \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{пм}} \cdot \eta_{\text{вм}}, \quad (1.8)$$

де $\eta_{\text{м}}$ – ККД муфти (приймаємо $\eta_{\text{м}} = 1$)

$\eta_{\text{пм}}$ - ККД передавального механізму: $\eta_{\text{пм}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n$;

тут $\eta_{\text{пм}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n$ – ККД окремих передач передаточного механізму,

$\eta_{\text{вм}}$ - ККД відповідного виконавчого механізму (при його наявності),

$$\eta_{\text{пм}} = 0,97$$

$$\eta_{\text{сп}} = 1 \cdot 0,97 \cdot 0,85 \approx 0,82$$

$$N_{\text{вх}} = 1,45 / 0,82 \approx 1,77$$

За величиною розрахованої вхідної потужності за каталогами оберемо двигун з урахуванням співвідношення:

$$N_{\text{дв}} \geq N_{\text{вх}}$$

$$N_{\text{дв}} = (1,2 \dots 1,3) N_{\text{вх}}$$

$$N_{\text{дв}} > 1,77$$

Для накопичення та гасіння імпульсного навантаження, що виникає при швидкій зміні напрямку руху, використовуються гвинтові пружини стиснення (4 шт.), які розташовуються симетрично навколо напрямної плити. Вони виконують роль амортизаторів, компенсуючи динамічні коливання. Пружини розраховуються на максимальне стискання до 5 Н кожна, що відповідає загальному пружному зусиллю 20 Н.

1.9.3 Кінематичний розрахунок кривошипно-повзунного механізму

Кінематика повзуна визначається відповідними рівняннями руху. У кривошипному пресі, що має центральний кривошипно-повзунний механізм, переміщення повзуна визначають по формулі:

$$S = R((1 - \cos\alpha) + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\alpha)), \quad (1.9)$$

де R – радіус ведучого кривошипа, мм; α — кут повороту ведучого кривошипа, градуси;

λ — коефіцієнт довжини шатуна, рівний відношенню радіусу ведучого кривошипа до довжини шатуна.

Швидкість повзуна обчислюють по залежності:

$$V = \omega \cdot R(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha), \quad (1.10)$$

де ω — кутова швидкість обертання ведучого кривошипа, 1/с.

Прискорення повзуна визначаємо по виразу[26]:

$$J = -\omega^2 R(\cos\alpha + \lambda\cos\alpha), \quad (1.11)$$

Для кожного кута повороту кривошипа (від 0 до 180° через 10°) визначаються значення переміщення, швидкості та прискорення, які заносяться до аналітичної таблиці 1.12. Такі дані дозволяють не лише верифікувати модель, але й передбачити поведінку системи в критичних положеннях.

Таблиця 1.12 Результати розрахунку переміщення, швидкості та прискорення прижимної плити

α , градуси	Величина		
	S , м	V , м/с	a , м/с ²
0°	0.0	0.0	-0.164327
10°	0.00100974	0.0180647	-0.16183
20°	0.003972	0.0349346	-0.154417
30°	0.00869232	0.0495288	-0.142311
40°	0.0148672	0.0609824	-0.125882
50°	0.0221128	0.0687229	-0.105627
60°	0.03	0.0725152	-0.0821633
70°	0.0380928	0.0724684	-0.056203
80°	0.0459854	0.0690055	-0.028535
90°	0.053	0.0628	0.0
100°	0.0598772	0.0546863	0.028535
110°	0.0654544	0.045557	0.056203
120°	0.07	0.0362576	0.0821633
130°	0.0735358	0.0274923	0.105627

140°	0.0761508	0.0197518	0.125882
150°	0.0779743	0.0132712	0.142311
160°	0.0791474	0.00802318	0.154417
170°	0.0798	0.00374548	0.16183
180°	0.08	0.0	0.164327

Таким чином, розрахунок кривошипно-повзунного виконавчого механізму охоплює кінематику та динаміку, забезпечуючи повну відповідність вимогам технологічного процесу.

1.10. Розрахунок захвату маніпулятора.

Для забезпечення надійного захвату плати під час тестування в автоматизованій системі, доцільно використати захватний механізм, що складається з гнучких губок DHAS-GF-60 від компанії Festo у поєднанні з лінійним актуатором RS-L9 (6 В, 188 Н). Така конструкція забезпечує м'яке, але достатньо жорстке утримання крихкого або делікатного компонента — зокрема, друкованої плати — без її деформації чи пошкодження.

З огляду на специфіку роботи маніпулятора, який виконує операції з позиціонуванням та тимчасовою фіксацією об'єкта тестування, розрахунок параметрів захвату повинен враховувати силу затискання, деформацію елементів захоплення, зусилля тертя та центр тиску.

1.10.1 Розрахунок сили затиску

Сила затиску розраховується за наступною формулою:

$$F_Z = \eta \cdot F_a \quad (1.12)$$

де F_Z — ефективна сила затискання губок, Н,

η — коефіцієнт передачі сили від актуатора до губок (враховує втрати на тертя та деформацію, типові значення: 0.8–0.9),

F_a — номінальна сила, створювана актуатором RS-L9, тобто 188 Н.

Для $\eta = 0,85$:

$$F_z = 0,85 \cdot 188 = 159,8 \text{ Н}$$

Отже, губки створюють затискне зусилля близько 160 Н.

1.10.2 Розрахунок максимального моменту опору об'єкта захвату

Для оцінки стійкості захопленого об'єкта при прикладенні збурень (наприклад, вібрацій або зсувів) використовується:

$$M_{max} = \mu \cdot F_z \cdot l, \quad (1.13)$$

де μ — коефіцієнт тертя між губками та об'єктом (для гуми та склотекстоліту: 0.7–0.9),

l — відстань від точки захвату до центра ваги плати, м.

Оскільки $l = 0,04\text{м}$; $\mu = 0,8$, тоді

$$M_{max} = 0,8 \cdot 160 \cdot 0,04 = 5,12 \text{ Нм.}$$

Це дозволяє втримати друковану плату при помірному навантаженні на згин.

1.10.3 Розрахунок напруги деформації в губках

Оскільки DHAS-GF-60 — це гнучкі полімерні губки, важливо визначити, чи допустима деформація губок не призведе до втрати жорсткості або виникнення розривних напружень:

$$\sigma = \frac{F_z}{A}, \quad (1.14)$$

де σ — механічна напруга в матеріалі губки, Па,

A — площа дотику між губкою і платою, м^2 (припустимо, $A = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$).

Тоді

$$\sigma = \frac{160}{25 \cdot 10^{-6}} = 6,4 \text{ МПа,}$$

Дане значення не перевищує допустимих меж для технічної гуми або силікону, що говорить про можливість їх використання в якості матеріалу для виготовляються губок захвату.

1.10.4 Розрахунок жорсткості захвату

Пружна деформація губок впливає на точність позиціонування. Для оцінки жорсткості системи:

$$k = \frac{F_z}{\delta}, \quad (1.15)$$

де k — жорсткість, Н/м,

δ — деформація губки, м (візьмемо $\delta=1,5 \text{ мм} = 0,0015 \text{ м}$).

Тоді

$$k = \frac{160}{0,0015} \approx 106,667 \text{ Н/мм.}$$

Це значення дозволяє забезпечити достатню амортизацію без втрати точності затискання.

Система захвату на основі актуатора RS-L9 у поєднанні з DHAS-GF-60 демонструє високий ступінь надійності та точності. Сила захоплення становить до 160 Н, що з лишком перебиває потреби для утримання стандартних плат розміром 80×40 мм. М'який контакт, забезпечений полімерними губками, запобігає механічним пошкодженням плати навіть при точковому тиску. Жорсткість системи достатня для стабільного утримання без вібрацій, а обмеження по центру тяжіння дозволяють грамотно спроектувати положення плати відносно центра захвату.

2 Технологічна частина

модуль EGSC-BS-KF-32-100-8P, що забезпечує компактність і надійність у напрямку захвату плати. Усі осі кріпляться між собою відповідно до рекомендацій виробника, що гарантує правильну геометрію та зниження похибок при роботі маніпулятора.

Захоплення плат виконується за допомогою актуатора RS-L9 6V 188N, встановленого у вертикальному корпусі із Т-подібними пазами для базування. Гнучкі захоплювальні губки DHAS GF 60 компанії Festo, виготовлені з м'якого полімерного матеріалу, дозволяють здійснювати маніпуляції з крихкими платами без ризику їх пошкодження. Процес затиску реалізований через модуль широтно-імпульсної модуляції, що підключається до двох твердотільних реле постійного струму типу BSSR-1DD. Це забезпечує реверсивне керування напрямком руху штока актуатора залежно від сигналу цифрового виходу ПЛК.

Плати розміщуються у трьох бункерах: загальному (вхідному), бункері з протестованими (праворуч) та бункері з бракованими платами (ліворуч). Усі бункери мають два Т-подібні пази для точного базування і дозволяють розміщення плат у вертикальному положенні з міжшаровими інтервалами, достатніми для роботи губок затиску. Бункери встановлені на загальному столі разом із тестовим стендом. Центр загального бункера вирівнюється з віссю Y маніпулятора для забезпечення оптимального ходу.

Стенд тестування, виконаний у вигляді двоярусної конструкції, розміщується позаду бункерів, впритул до їх задніх стінок. У верхній частині розміщено пого-пінову плату і притискний механізм (на базі ERMS-25-180-ST-M-N1-PLK-AA), що забезпечує надійний контакт між тестовою платою та універсальною тестовою платою UTB, яка розташована в нижній частині конструкції. Під композитною основою стенду знаходиться шафа керування, яка розміщує всі електронні компоненти системи.

Усередині шафи на DIN-рейці встановлено ПЛК, IO-Link Master, модуль шини CPX-AP-I, цифрові модулі CPX-E-16DI та CPX-E-8DO, аналогові модулі CPX-E-4AI-U-I / CPX-E-4AO-U-I, а також блок живлення на 100 Вт, модуль ШІМ-регулятора і відповідні реле. Таке компонування забезпечує логічну

структурованість системи, дозволяє легко масштабувати її у майбутньому (наприклад, для інтеграції систем візуального контролю чи нових типів сенсорів).

Загальна архітектура системи дозволяє досягти високої точності позиціонування, адаптивності до різних форматів плат, а також оперативної діагностики і зручного обслуговування. Завдяки використанню сучасних протоколів зв'язку та стандартів інтерфейсів забезпечується надійна передача даних, мінімізується кількість з'єднань, і водночас відкриваються широкі можливості для адаптації системи до потреб конкретного виробництва. [27]

2.2. Проектування стенду тестування.

Конструкція стенду тестування є критично важливою складовою всієї тестувальної системи, адже саме в його межах розміщуються основні компоненти, які забезпечують виконання функціональних операцій — від подачі живлення на УТВ до безпосереднього тестування друкованих плат. Конструкційно стенд складається з двох частин — верхньої та нижньої, що з'єднуються між собою за допомогою двох замків J105. Такий підхід дозволяє забезпечити легкий доступ до внутрішніх вузлів, що особливо важливо при виконанні технічного обслуговування, модернізації або заміни компонентів.

На (рис.2.2) зображено ізометричний вигляд спроектованої 3D-моделі нижньої частини стенду тестування із встановленими нижче зазначеними компонентами. Основою нижньої частини виступає жорсткий каркас, сформований з алюмінієвого верстатного профілю 20×20. Використання саме такого типу профілю пояснюється його високою геометричною точністю, стійкістю до деформацій та універсальністю монтажу. Зібрана рама з 12 профільних відрізків різної довжини (по 85 мм, 188 мм і 221 мм) утворює міцну конструкцію, придатну для точного позиціонування елементів. З'єднання профілів здійснюється за допомогою 16 алюмінієвих кутників, які фіксуються Т-гайками 6 мм пазу та гвинтами DIN 912. Таке з'єднання забезпечує жорсткість у всіх площинах, не порушуючи при цьому мобільності монтажу — конструкцію при потребі можна легко модифікувати або розібрати без шкоди для з'єднань.

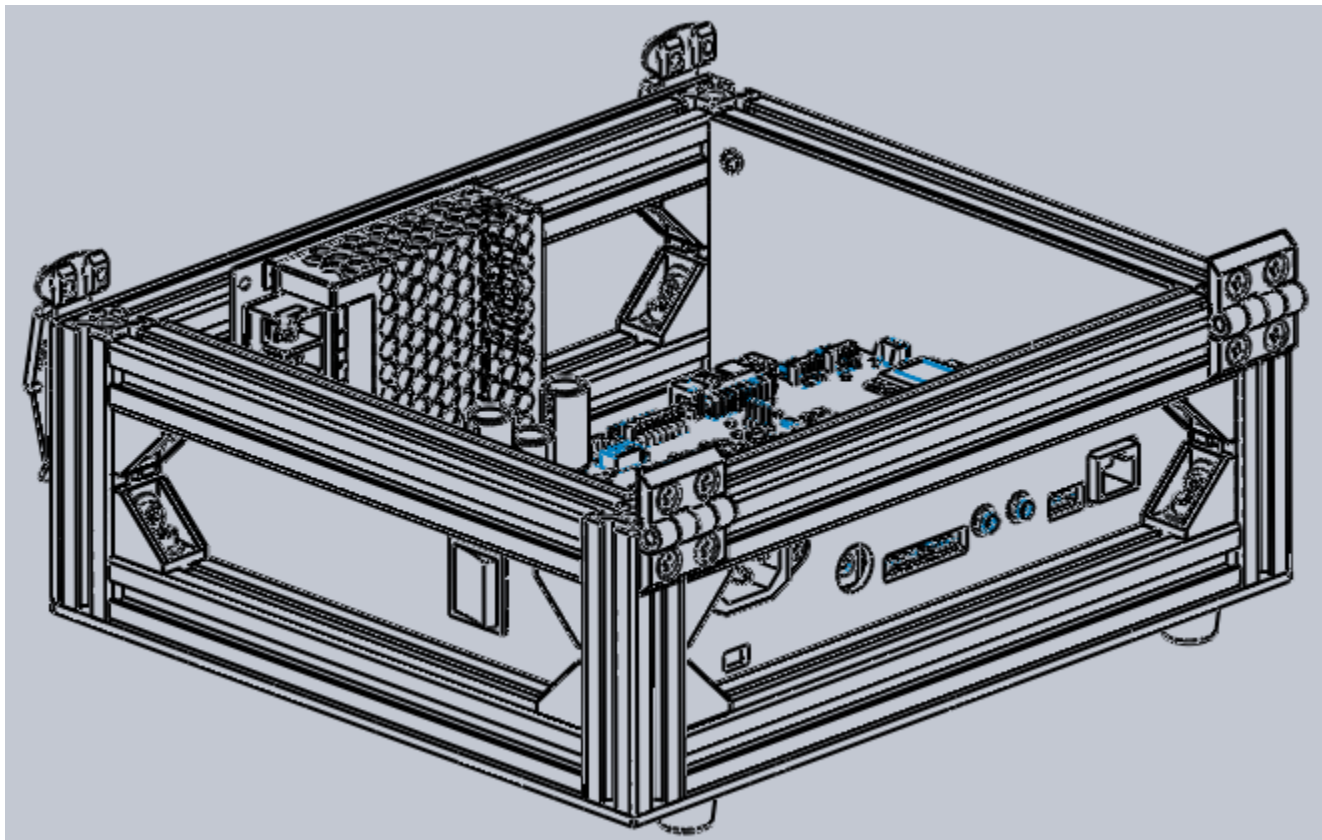


Рис. 2.2 – Ізометричний вид 3D-моделі нижньої частини стенду тестування

Кожна з чотирьох панелей, надрукованих на 3D-принтері, виконує окрему функцію. Передня панель — це фасадна частина конструкції, що з'єднується з боковими та нижньою. Вона забезпечує естетичний вигляд і механічну фіксацію. Бічна панель управління має прорізи під кнопки керування УТВ і кабельні вводи — це дозволяє організувати зручне керування системою ззовні. Панель живлення обладнана отворами під роз'єм IEC C14 Entrada, Ethernet-порт та перемикач MIRS-201-4, що дозволяє централізовано подавати живлення та організувати з'єднання з мережею. Нижня композитна панель служить основою для монтажу внутрішніх елементів — до неї кріпиться сама тестувальна плата УТВ, а також блок живлення LRS-75 Mean Well.

Усі панелі фіксуються до каркасу за допомогою Т-гайок 6 мм та гвинтів DIN 7985 M3×8, що дозволяє забезпечити точне прилягання до профілю без додаткової обробки. Крім того, на панелі живлення встановлено дві петлі H2020 — кожна складається з двох завіс 40×30 та штифта, які забезпечують функцію розкриття конструкції, дозволяючи легко відкривати та закривати верхню частину

стенду. Монтаж петель виконується чотирма Т-гайками 6 мм пазу та чотирма гвинтами DIN 965 M4×8 на кожную, що гарантує надійність кріплення навіть при багаторазовому використанні.

Роз'єм живлення IEC C14 Entrada фіксується до панелі живлення за допомогою стандартного кріплення: двох гвинтів DIN 965 M3×12, двох плоских шайб DIN 125, пружинних шайб DIN 7980 та гайок DIN 934 M3. Така комбінація забезпечує механічну стійкість з'єднання, а також компенсацію вібрацій і розтягів, які можуть виникати під час підключення чи відключення кабелю живлення.

Плата UTB кріпиться до нижньої композитної панелі через сім стійок TFM-M3 M3×30, які фіксуються гвинтами з використанням збільшених шайб DIN 9021 M3. Вибір саме таких стійок обґрунтований необхідністю створення сталого повітряного зазору між платою та основою — це забезпечує вентиляцію, а також полегшує прокладання дротів чи кабелів знизу.

Вся конструкція фіксується на робочій поверхні через чотири гумові ніжки розміром 17×14×10 мм, що розташовані по кутах нижньої панелі. Кожна ніжка закріплюється через Т-гайку M3 у паз профілю гвинтом DIN 912 M3×12. Завдяки цьому забезпечується не лише антивібраційний захист, а й стійкість конструкції на поверхні — стенд не ковзає під час експлуатації.[28]

Верхня частина тестового стенду (Рис. 2.3) розкриває складну, проте виважену конструкцію, що забезпечує точне механічне позиціонування плати-контактувача та ефективну роботу прижимного механізму. В основі каркасу — дев'ять алюмінієвих верстатних профілів 20×20 мм, які скріплені між собою за допомогою алюмінієвих кутників і стандартного кріплення Т-гайки та гвинти DIN 912. Така конструкція формує жорсткий і стабільний каркас, стійкий до вібрацій і деформацій. Це особливо важливо для забезпечення стабільної геометрії тестового процесу, де будь-який зсув може призвести до помилкових результатів перевірки друкованої плати.

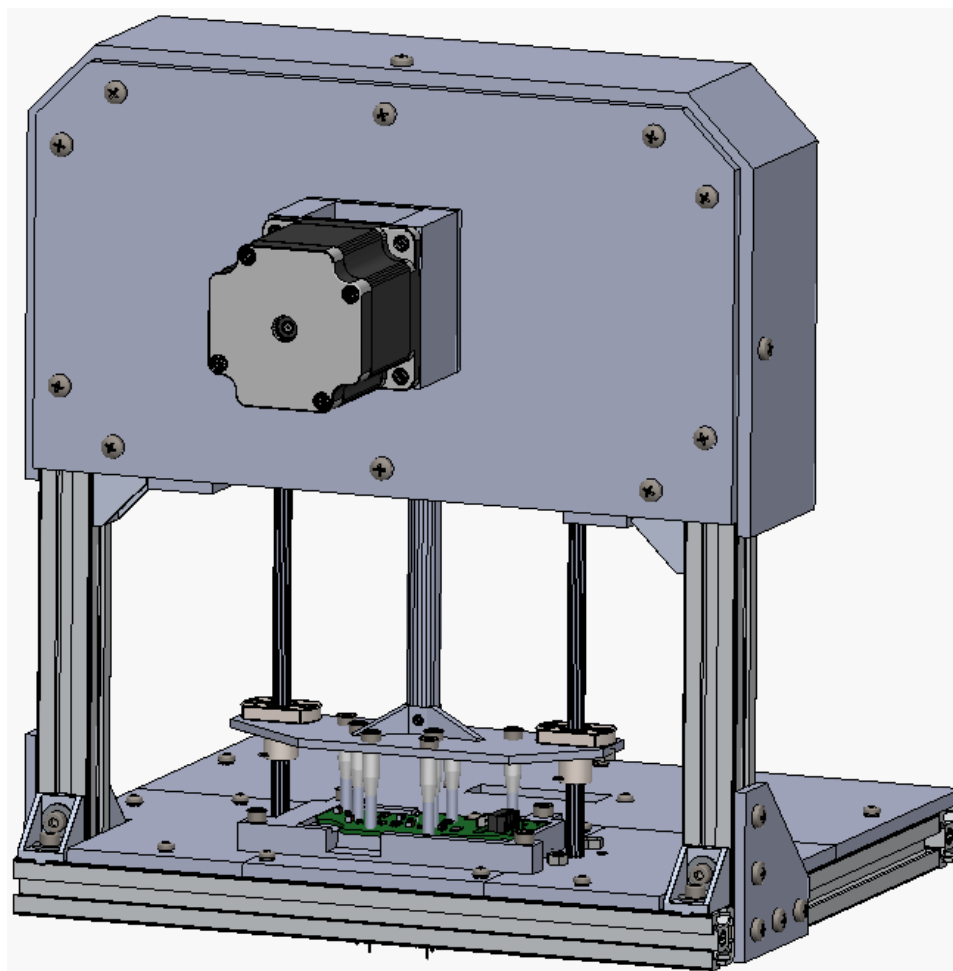


Рис. 2.3— 3D-модель верхньої частини стану тестування

Горизонтальна основа створює рівну поверхню для встановлення нижньої плити та плити обслуговування. Два вертикальні профілі формують підйомну площину висотою 300 мм, яка забезпечує достатній простір для встановлення плати-контактувача, пого-пінів та механізму прижиму. Додаткові профілі, розташовані горизонтально, слугують для підсилення жорсткості та зменшення вигину площини при навантаженні.

Нижня поверхня верхньої частини стану конструктивно поділена на дві частини — нижню плиту та плиту технічного доступу. Такий поділ дозволяє обслуговувати елементи конструкції без потреби демонтажу всієї нижньої частини. Кріплення обох плит до каркасу виконане за допомогою Т-гайок і гвинтів DIN 7985 M3×8, що забезпечує надійне з'єднання й можливість багаторазового розбирання без втрати жорсткості.

Плита-ложемент розміщена по центру конструкції, і її основна функція — забезпечити правильне та стабільне розташування пого-пінів щодо контрольних точок тестованої плати. Отвори в плиті повністю відповідають розміщенню пінів у платі-контактувачі, що виключає зміщення або некоректний контакт. Кріплення плати-контактувача до ложемента здійснюється дистанційними стійками TFM-M3 із шайбами DIN 9021, що забезпечує зазор між платами для точного налаштування глибини виступу пінів.

Розрахунок висоти плити-ложемента напряму залежить від довжини встановлених пого-пінів. У середньому довжина виступу контактної щупи при максимальному прижиманні становить 3–4 мм (залежно від моделі), тому висота зазору між платою-ложементом і контактувальною платою регулюється відповідно до цього значення. Наприклад, для пінів довжиною 20 мм з ходом деформації 3 мм, при висоті плити 12 мм забезпечується оптимальний хід без перевантаження пінів. [29]

Плита-ложемент встановлена на дві напрямні з лінійними підшипниками типу LMH6UU (34), які гарантують точність прямолінійного руху без зазорів. Кріплення підшипників до ложемента виконане двома гвинтами DIN 912 кожен, що дозволяє легко демонтувати або замінити компонент у разі потреби. Для обмеження ходу вверх використовуються гвинти круглої гайки, які фіксуються жорстко, утворюючи обмежувач для зворотного ходу ложемента. Між ложементом і нижньою плитою розміщено чотири пружини — це дозволяє плиті автоматично повертатися у вихідне положення після натискання.

Направляючі осі прижимної плити встановлюються крізь нижню плиту за допомогою опор типу Shaft Support SHF-6-1 (тримач валу), які кріпляться до нижньої плити гвинтами DIN912 M10. Верхнє кріплення здійснюється за допомогою Shaft Support SK-6-6, який утримує вісь у канавці профілю. Для додаткового фіксування використовується гвинт M7, що запобігає ослабленню затиску під час роботи. [30]

Прижимна плита, що переміщується по напрямних, має сім пінів, які створюють тиск на плату в контрольних точках. Кожен пін кріпиться до плити

гвинтом DIN 912. Саме притискання відбувається через шатунний механізм, який з'єднаний із фланцем редуктора привода ERMS. Передача обертового моменту в поступальний рух забезпечується вилочним з'єднанням — через штифт, встановлений у отвори шатуна та вушка на плиті. Таке з'єднання надійне і дозволяє вільне хитання плити без перекосів.

Привід ERMS з редуктором встановлюється на задній кришці корпусу, яка не лише захищає механізм від пилу та випадкових механічних пошкоджень, але й виконує функцію захисту персоналу, унеможливлюючи контакт з рухомими частинами. Для кріплення використовуються гвинти DIN M10. Вся конструкція зібрана в єдиний функціональний блок із передньою та задньою кришками, які фіксуються до алюмінієвого профілю Т-гайками та гвинтами — це дозволяє швидко розбирати та обслуговувати вузол, не втрачаючи геометрію встановлення.

Таким чином, кожен елемент конструкції несе функціональне навантаження: від точного позиціонування до забезпечення безпеки та надійності роботи. Використання стандартизованих елементів і кріплень робить конструкцію не тільки ремонтпридатною, а й зручною у виробництві, даючи змогу легко масштабувати або модифікувати систему відповідно до нових вимог. Кожен компонент конструкції стенду контролю підібраний з урахуванням його функціонального призначення, механічної надійності та зручності у збиранні. Комбінація стандартних кріпильних елементів і конструктивних рішень на основі верстатного профілю дозволяє створити модульну, адаптивну та довговічну основу для тестування електронних плат. Це важливо як для лабораторного використання, так і для серійного виробництва, де стабільність і повторюваність умов тестування мають вирішальне значення. [31]

2.5. Проектування руки маніпулятора.

У рамках даного проєкту для забезпечення високоточної та надійної маніпуляції з друкованими платами було обрано конструкцію портального маніпулятора, яка включає три координатні осі: X, Y та Z (Рис. 2.4). Такий тип кінематичної схеми є оптимальним для систем, де критичними є точність

позиціонування, повторюваність та стабільність руху. Осі Y та Z реалізовані на базі SMS-осьових модулів компанії Festo, що є лінійними електроприводами зі вбудованими кроковими двигунами, які підтримують керування через IO-Link або цифрові інтерфейси. Ці модулі відзначаються компактністю, високою динамічною жорсткістю та можливістю інтеграції в обмежених просторових умовах.

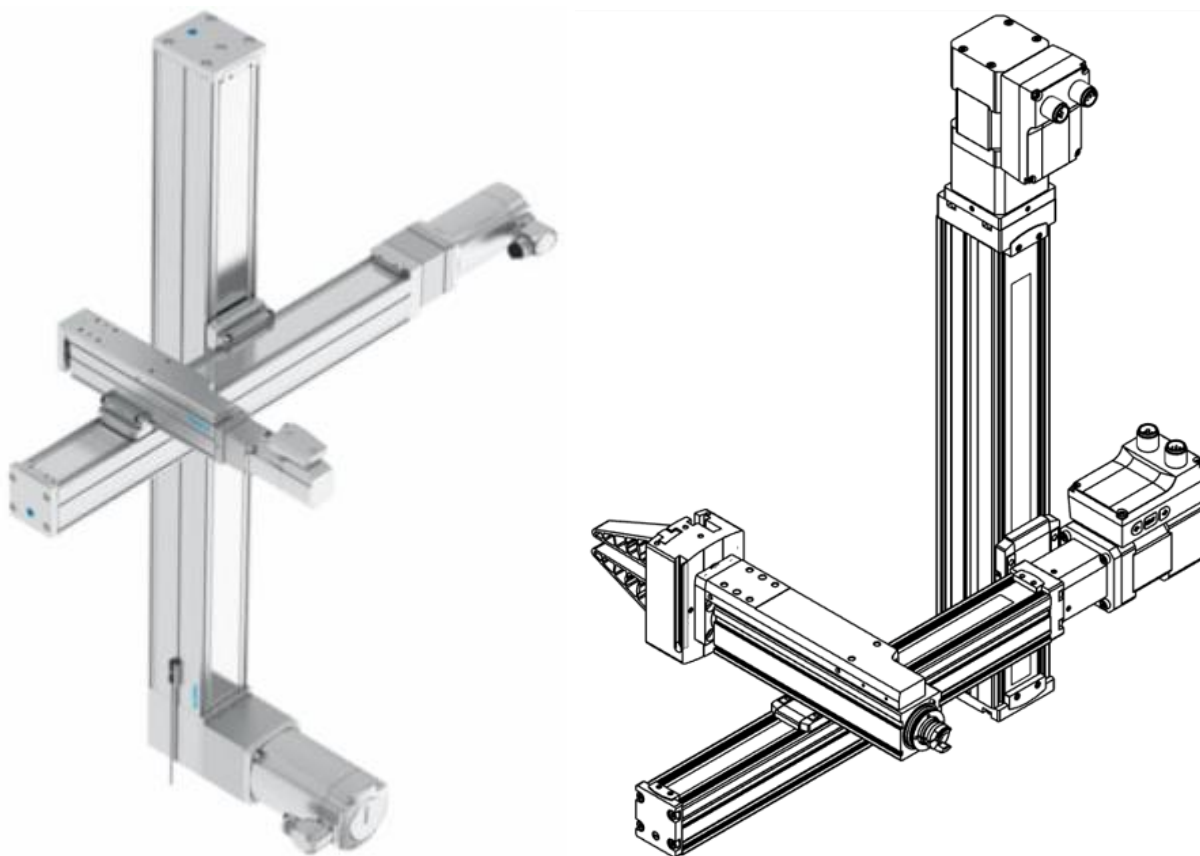


Рис. 2.4 – Приклад портального маніпулятора, скомпонованого механічними осями ELGD

Вісь X виконана у вигляді лінійного електромеханічного модуля EGSC-BS-KF-32-100-8P. Цей компонент має вбудовану кулькову гвинтову пару, що забезпечує плавне і точне переміщення платформи на задану відстань. Завдяки жорсткій алюмінієвій конструкції та прецизійним направляючим вісь X забезпечує надійну опору для затискного вузла, виключаючи люфти та небажані коливання. Висока точність позиціонування (до 0,05 мм) дозволяє маніпулятору точно подавати губки захватного пристрою до заданої точки на платі, що особливо важливо при роботі з дрібними або тендітними компонентами.

До монтажної платформи осі Х за допомогою гвинтового з'єднання прикріплено корпус затискного актуатора. В даному рішенні використовується компактний лінійний електроактуатор RS-L9 (6 В, 188 N), що забезпечує поступальний рух штока з високим зусиллям при малих габаритах. Корпус цього виконавчого елемента оснащено двома вертикальними Т-подібними пазами, в яких встановлено відповідні Т-подібні гвинти. Через ці гвинти кріпляться скоби-тримачі губок, що дозволяє не лише надійно фіксувати елементи захвату, а й швидко адаптувати конструкцію під вироби з різними розмірами.

У якості робочого органа використано гнучкі полімерні губки DHAS-GF-60 від Festo, які спеціально розроблені для обережного захоплення крихких деталей. Їх геометрія дозволяє рівномірно розподіляти тиск по поверхні об'єкта, зменшуючи ризик деформацій або подряпин, що критично при роботі з друкованими платами. Матеріал губок має підвищену зносостійкість та стабільні пружні характеристики, що зберігаються навіть при багаторазовому циклуванні.

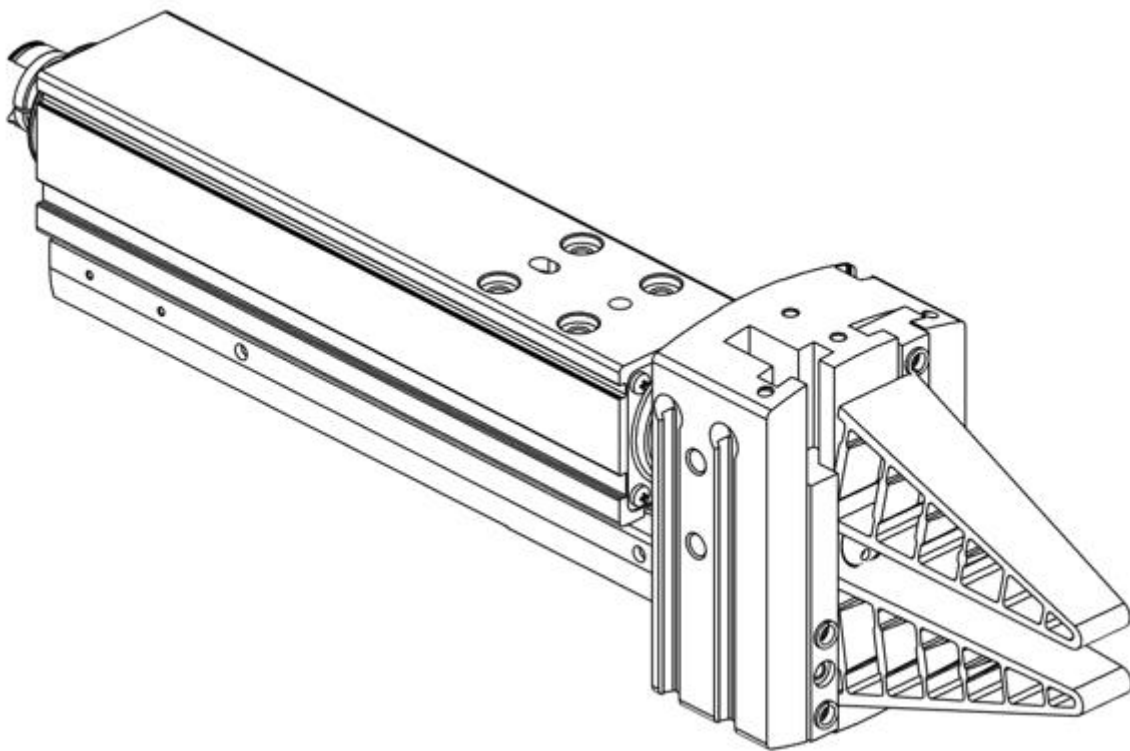


Рис. 2.5 – Захват маніпулятора

Принцип дії затиску базується на цифровому керуванні електроактуатором через модуль широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що дозволяє точно

контролювати швидкість та напрям руху штока. Реалізація реверсивного керування відбувається шляхом комутації живлення через два твердотільних реле постійного струму BSSR-1DD. Сигнали керування надходять від цифрових виходів ПЛК. Така архітектура є технічно простою у реалізації, але водночас дуже надійною. Реле забезпечують швидке перемикання без механічного зносу, що підвищує довговічність системи.

Обрана конфігурація дозволяє з високою точністю здійснювати захоплення, транспортування та позиціонування об'єктів у просторі. Перевагою використання електричних приводів, а не пневматичних, є можливість регулювання сили захоплення, що критично важливо для роботи з тонкими або ламкими платами. Крім того, система не потребує додаткових пневматичних магістралей, компресорів чи систем осушування повітря, що суттєво спрощує експлуатацію та знижує загальні витрати.

З технічної точки зору, маніпулятор такого типу легко масштабується — можна змінювати хід осей, замінювати захоплювачі, інтегрувати нові модулі або сенсори, використовуючи наявну платформу. Використання стандартних інтерфейсів від Festo забезпечує сумісність із більшістю сучасних контролерів та SCADA-систем. У результаті отримується компактна, функціональна та модульна система, адаптована до промислового середовища. [32]

Висновок

У результаті виконання дипломного проєкту розроблено автоматизовану систему тестування друкованих плат, яка об'єднує сучасні технічні засоби, перевірені інженерні рішення та інноваційні підходи до контролю якості. У межах конструкторської частини проєкту на основі аналізу характеристик друкованих плат і вивчення існуючих методів їх тестування сформульовано технічну задачу, окреслено вимоги до системи та визначено ключові функціональні блоки. Ретельний огляд аналогів дозволив обґрунтувати доцільність вибору методу внутрішньосхемного контролю за допомогою тестових щупів, що реалізується через стенд типу «Bed-of-Nails».

На етапі розробки структурної та функціональної схем системи визначено логіку взаємодії між усіма підсистемами: блоком керування на базі ПЛК Festo CPX-E-SEC-C1, комунікаційними модулями, виконавчими механізмами, тестовим обладнанням та комп'ютером оператора. Алгоритм роботи блоку керування реалізований у середовищі Automation Suite із застосуванням мов програмування стандарту IEC 61131-3, що забезпечило гнучкість налаштувань, зручність масштабування та прозорість логіки.

Одним з ключових аспектів проєктування стало моделювання електричної принципової схеми, яка охоплює як схему підключення виконавчих пристроїв, так і інтерфейс зв'язку з UTB та елементами керування. До складу системи підібрані компоненти провідних виробників, зокрема модулі IO-Link, цифрові та аналогові входи/виходи, крокові двигуни, приводи ERMS, актуатори та відповідні комутаційні пристрої. Усі вибрані елементи не лише сумісні між собою, а й задовольняють вимоги промислової надійності та швидкодії.

У розрахунковій частині здійснено аналіз механіки стенду тестування та системи захоплення плат. Виконано перевірку параметрів притискного механізму, обраховано навантаження, кути повороту та зусилля при контакті з тестованим об'єктом. Окрему увагу приділено геометрії плити-ложемента, оскільки від її висоти залежить точність контакту з пого-пінами. Також проведено розрахунок ефективності захвату маніпулятора на основі актуатора RS-L9 у поєднанні з

гнучкими губками DHAS GF 60, що дозволяє працювати з платами без ризику механічного пошкодження.

У межах технологічної частини розроблено повну модель системи тестування: спроектовано конструкцію тестового стенду, бункерів та шафи керування. Визначено положення ключових елементів у просторі для забезпечення оптимального ходу маніпулятора, мінімізації траєкторії переміщення та точного позиціонування плат. Окремо опрацьовано конфігурацію руки маніпулятора, враховуючи взаємне розташування осей, довжину ходів і жорсткість з'єднань згідно з рекомендаціями виробника Festo.

Загалом реалізоване рішення поєднує в собі точність, надійність і гнучкість, що дозволяє впроваджувати його у виробничі лінії з різною інтенсивністю та номенклатурою продукції. Створена система здатна виконувати автоматизований контроль друкованих плат із мінімальним втручанням оператора, забезпечуючи високу повторюваність результатів, ефективне сортування та адаптацію до змін у виробничому процесі. Це свідчить про успішну реалізацію поставлених завдань і практичну цінність розробленої системи для застосування в сучасній електронній промисловості.

Перелік використаних джерел

- [1] В. А. Захаров, Основи проектування друкованих плат. Вид-во «Техніка», 2016.
- [2] W. Bosshart, Printed Circuit Boards: Design and Technology. McGraw-Hill Book Co., 2013.
- [3] В. М. Кузнецов, Технології тестування та діагностики електронних пристроїв. Вид-во Техніка, 2017.
- [4] “Все про тестування друкованих плат і електроніки – методи, обладнання, важливість проведення.” [Онлайн]. Доступно: <https://kedrsolutions.ru/blog/metody-testirovaniya-pechatnyh-plat-i-elektroniki>
- [5] “Cincoze GP-3000 та автоматизований контроль тестування друкованих плат”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.proxis.ua/uk/solution/cincoze-gp-3000-powers-high-precision-aoi-for-pcba-testing/>
- [6] “How to Design Custom PCB Bed-of-Nails Test Fixtures”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.youtube.com/watch?v=jEBBgkq-HaY&t=2150s>
- [7] “INGUN test probes: versatile, precise & reliable from INGUN”. [Онлайн]. Доступно: <https://ingun.com/en-GB/products/test-probes/>
- [8] “A full-automatic test equipment for circuit boards and its feeding mechanism”. [Онлайн]. Доступно: <http://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/conventionalSearch%20CN212244196U/>
- [9] “Nail-bed Test”. [Онлайн]. Доступно: <https://youtu.be/Uwrw7kzZhjk?si=jPTvoKOK9JsbgaoX>
- [10] “Device and procedure for testing printed circuit boards”. [Онлайн]. Доступно: <https://patents.google.com/patent/EP0838688B1/en>
- [11] “Алгоритм роботи мікроконтролера для управління п кмеу”. [Онлайн]. Доступно: <https://studfile.net/preview/7220739/page:30/>
- [12] “PCB Electrical Test (E-test): Nails Fixture Test Vs. Flying Probe Test”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.linkedin.com/pulse/pcb-electrical-test-e-test-nails-fixture-vs-flying-probe>

[13] V. Savulyak, S. Savulyak, H. Savulyak Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv ta vyrobnytstv: pidruchnyk. Lviv: Vyd-Vo Lvivskoi Politekh., 2018.

[14] W. Bolton, Programmable Logic Controllers. 6th Edition. Oxford: Newnes (Elsevier), 2015.

[15] “Software package GSAY-A6”. [Онлайн]. Доступно: https://www.festo.com/media/catalog/237005_documentation.pdf

[16] “Модуль цифрових входів CPX-E-16DI”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.festo.com/ua/uk/a/download-document/datasheet/4080492>

[17] “Інтерфейс EtherNet/IP CPX-AP-I-EP-M12”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.festo.com/ua/uk/a/download-document/datasheet/8086610>

[18] “IO-Link Master CPX-AP-I-4IOL-M12”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.festo.com/ua/uk/a/download-document/datasheet/8086604>

[19] “I EMCS-ST Integrated drive”. [Онлайн]. Доступно: https://media.festo.com/assets/attachment-files/9339c76939b55c0421a3a48002796f2abbd36cdc5b1b8d1e0765cebb739d0cdb40f034e961c90f9f75c9369f3cc167ccd7ca3a57a57cb76d349f8a0626d0bfe7/EMCS-ST_operating-instr_2024-08f_8222335g1.pdf?sv=2024-08-04&se=2025-06-13T05%3A07%3A28Z&sr=b&sp=r&rscd=inline%3B+filename%3DEMCS-ST_operating-instr_2024-08f_8222335g1.pdf&rsct=application%2Fpdf&sig=NgM%2FPiZ56SFozHuzIzeZY6omgBGwM7MyYJMQ9C5%2BO8g%3D

[20] “Елемент осі шпинделя ELGS-BS-KF-45-400-10P-ST-M-H1-PLK-AA”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.festo.com/ua/uk/a/download-document/datasheet/8083473>

[21] “Mini slide EGSC-BS-KF-32-100-8P”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/4356032>

[22] “Елемент поворотного привода ERMS-25-”. [Онлайн]. Доступно: <https://www.festo.com/ua/uk/a/download-document/datasheet/8087808>

[23] “Лінійний актуатор міні RS-L9 6B 188N-”. [Онлайн]. Доступно: <https://arduino.ua/prod4430-liniinii-aktyator-mini-rs-l9-6v-188n>

[24] “Модуль ШІМ управління двигуном з реверсом 3А 6-24В ”. [Онлайн].
Доступно: <https://arduino.ua/prod4351-modyl-shim-upravleniya-dvigatелеm-s-reversom-3a-6-24v>

[25] “Remote I/O system CPX-AP-I”. [Онлайн]. Доступно:
https://www.festo.com/media/catalog/202707_documentation.pdf

[26] Ковальсько-штампувальне обладнання. Кропивницький: ЦНТУ, 2018.

[27] “Automation system CPX-E”. [Онлайн]. Доступно:
https://www.festo.com/media/catalog/202715_documentation.pdf

[28] К. Н. Schmid, Mechanical and Electrical Equipment for Buildings. 12th Edition. Hoboken: Wiley, 2014.

[29] G. L. Smith, PCB Test Probes and Fixtures: A Practical Guide to Spring-Loaded Contact Probes and Bed-of-Nails Test Design. Chicago: TestWorks Publ., 2017.

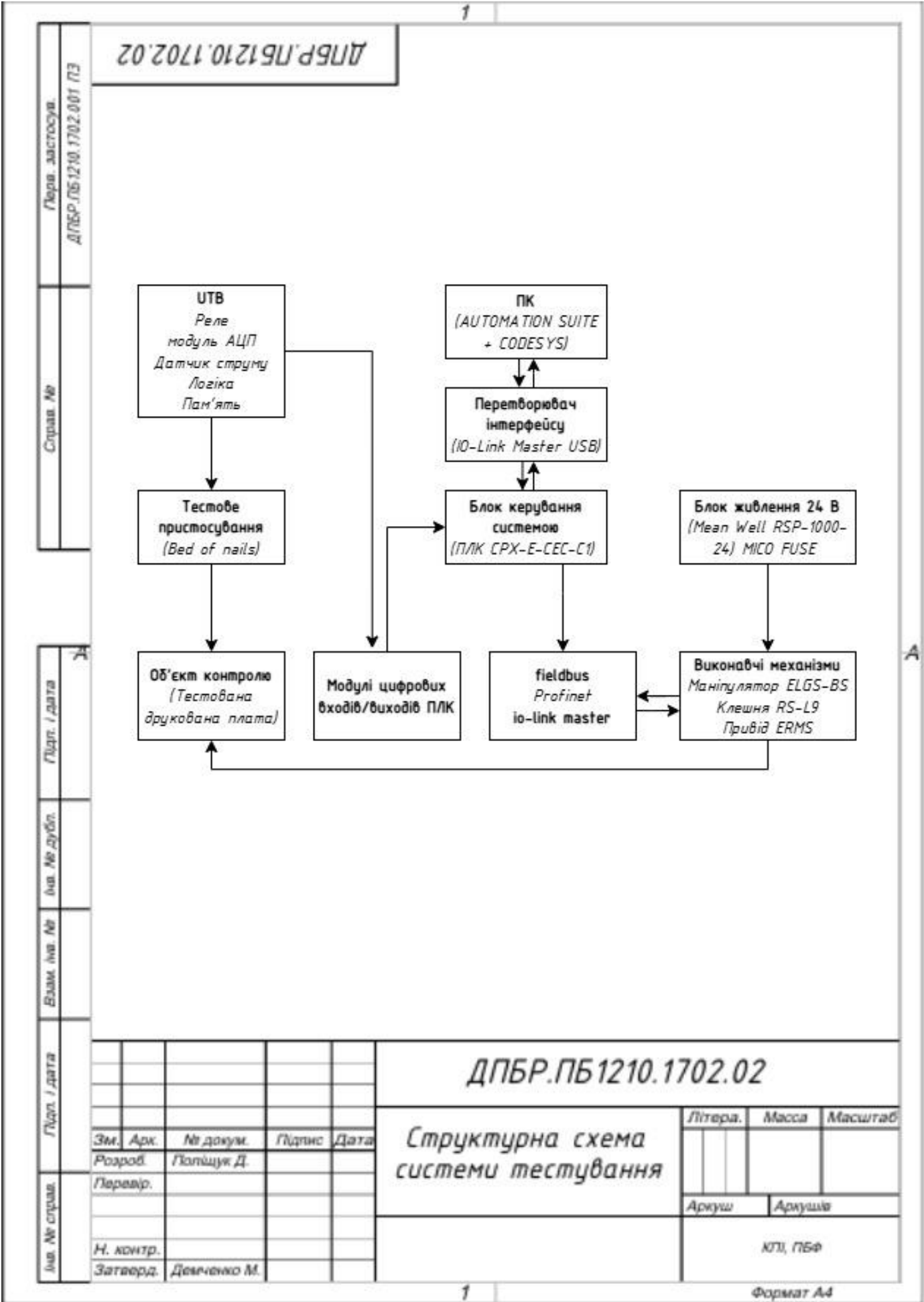
[30] В. О. Румбешта, Технологія складання, регулювання та випробування приладів. Київ, 2013.

[31] В. О. Румбешта, Основи технології складання приладів. Київ, 2010.

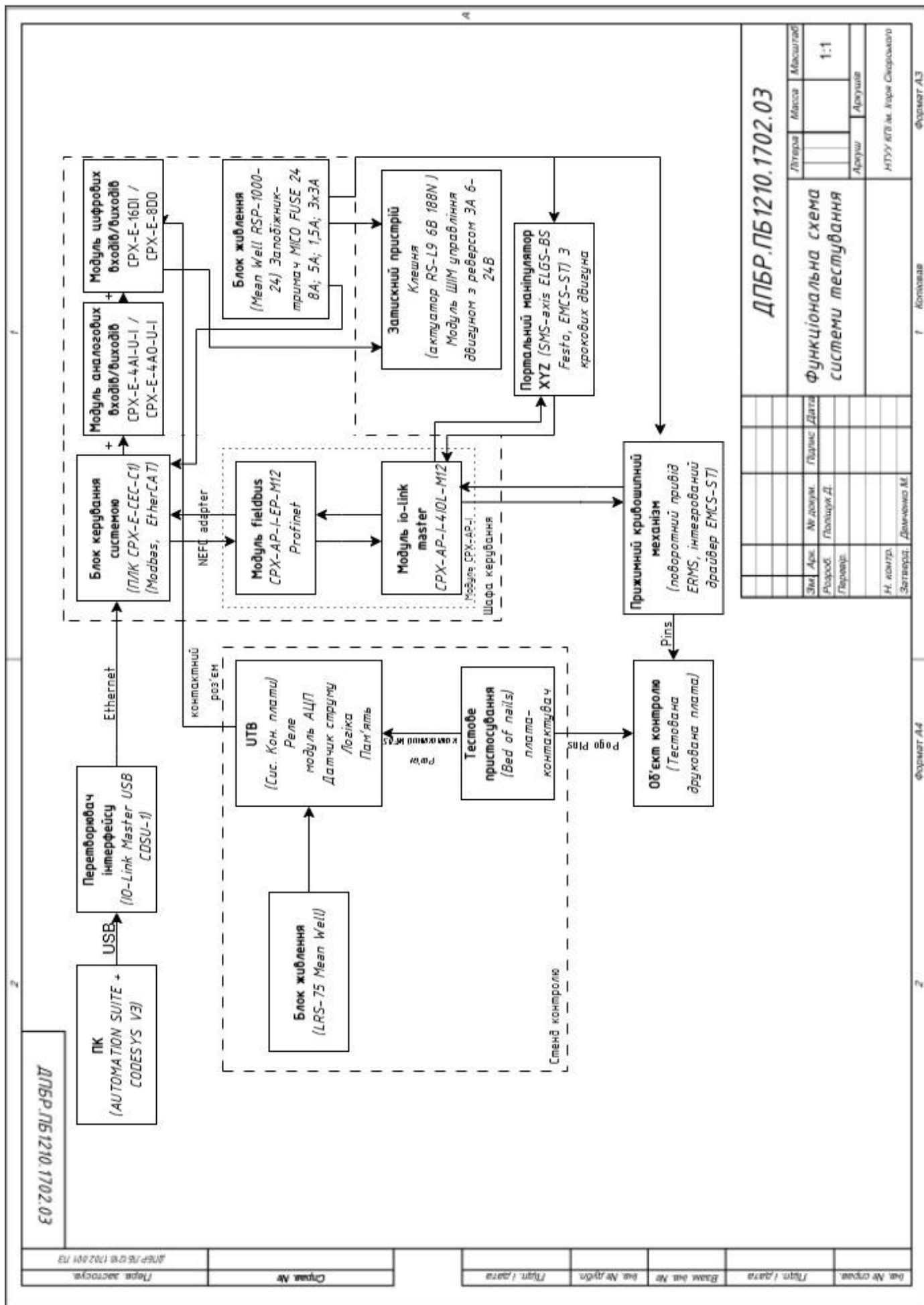
[32] О.Ф. Костенко, Основи автоматизованого керування приводами. Київ, 2020.

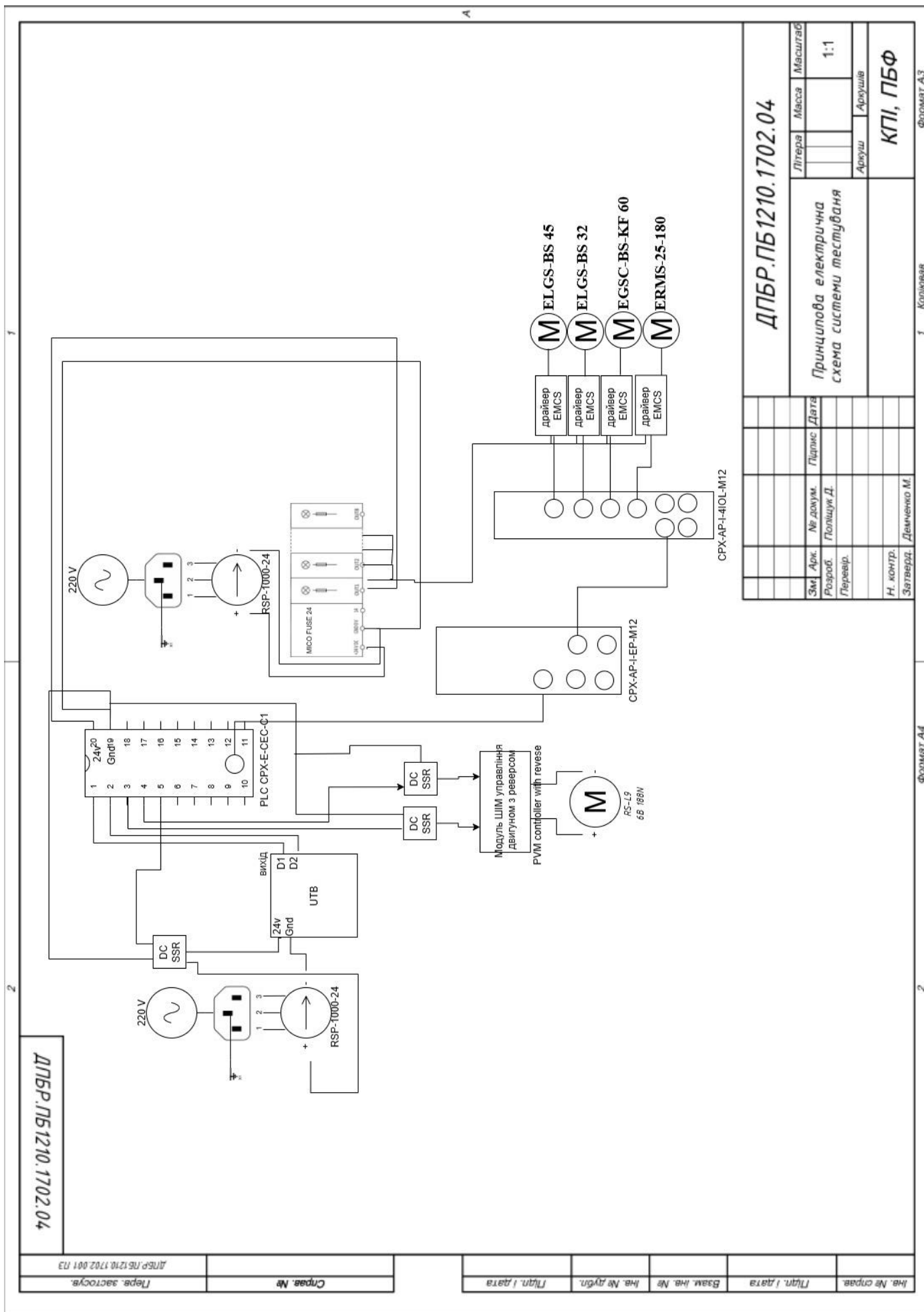
Додатки

Додаток Б

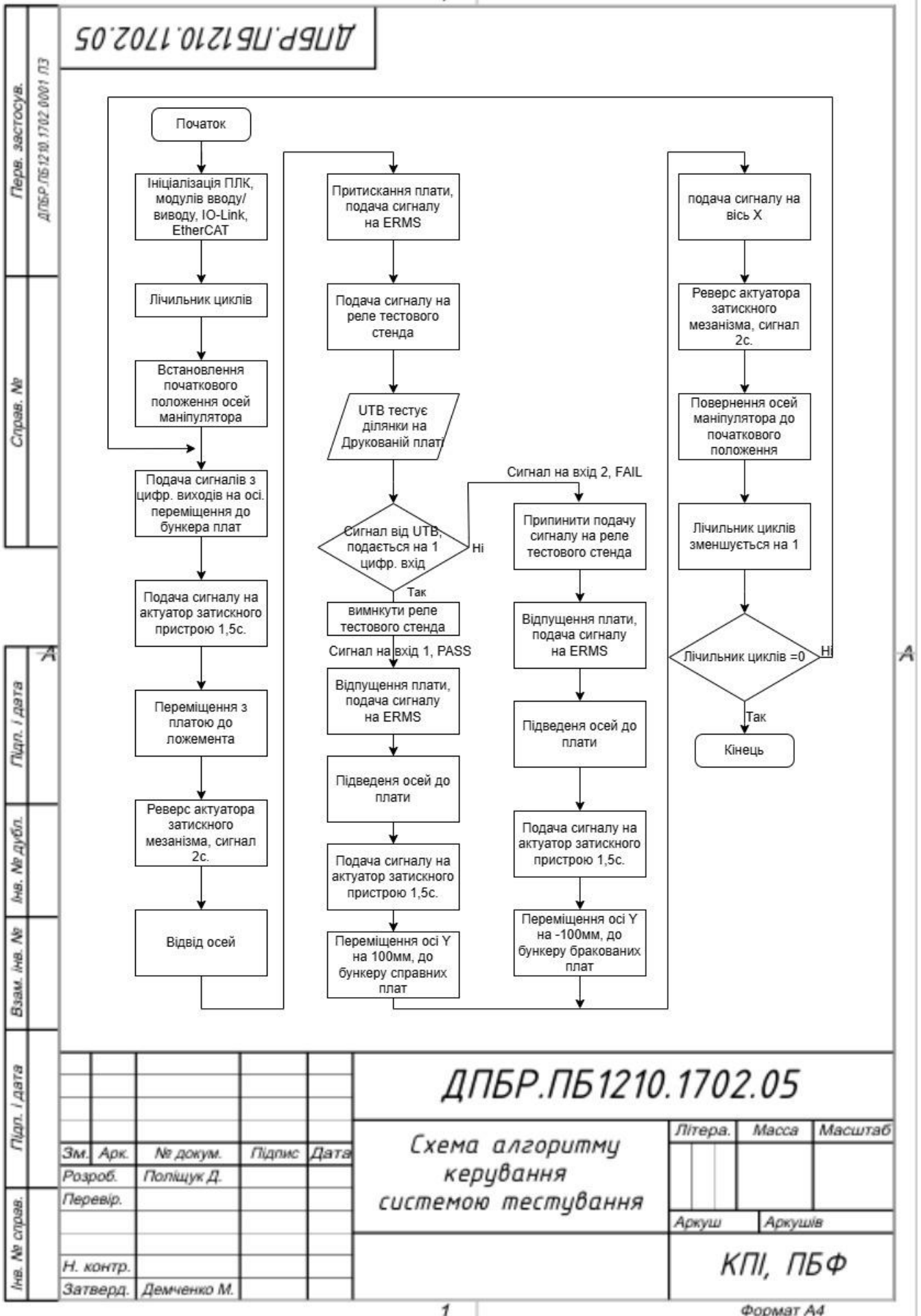


Додаток В

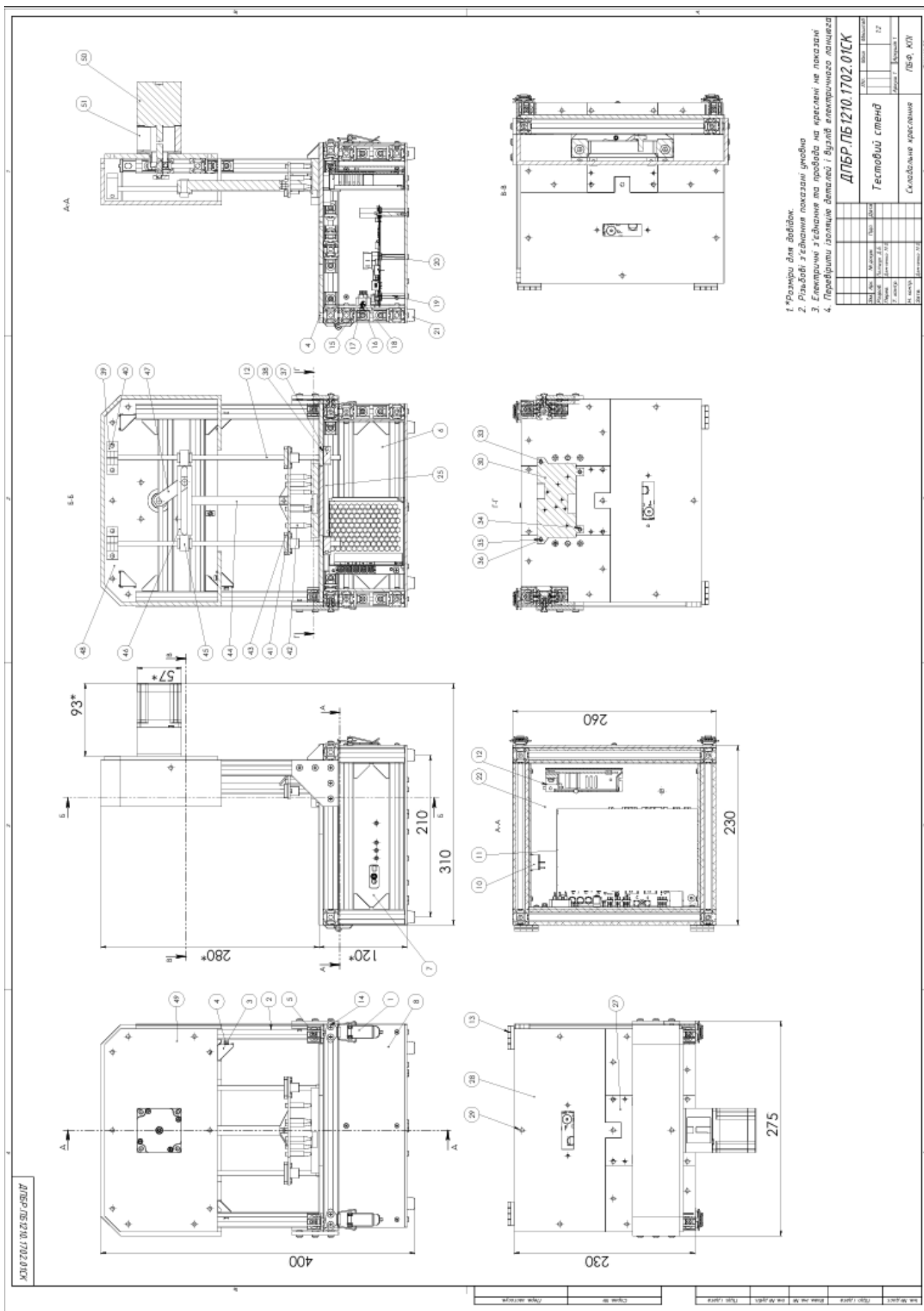




Додаток Д



Додаток Е



ДПБР.ПБ1210.1702.02 СК

ДПБР.ПБ1210.1702.001 ПЗ

Нев. застосув.

Справ. №

Лістк. і дата

Взам. інв. №

Інв. № дубл.

Лістк. і дата

1

2

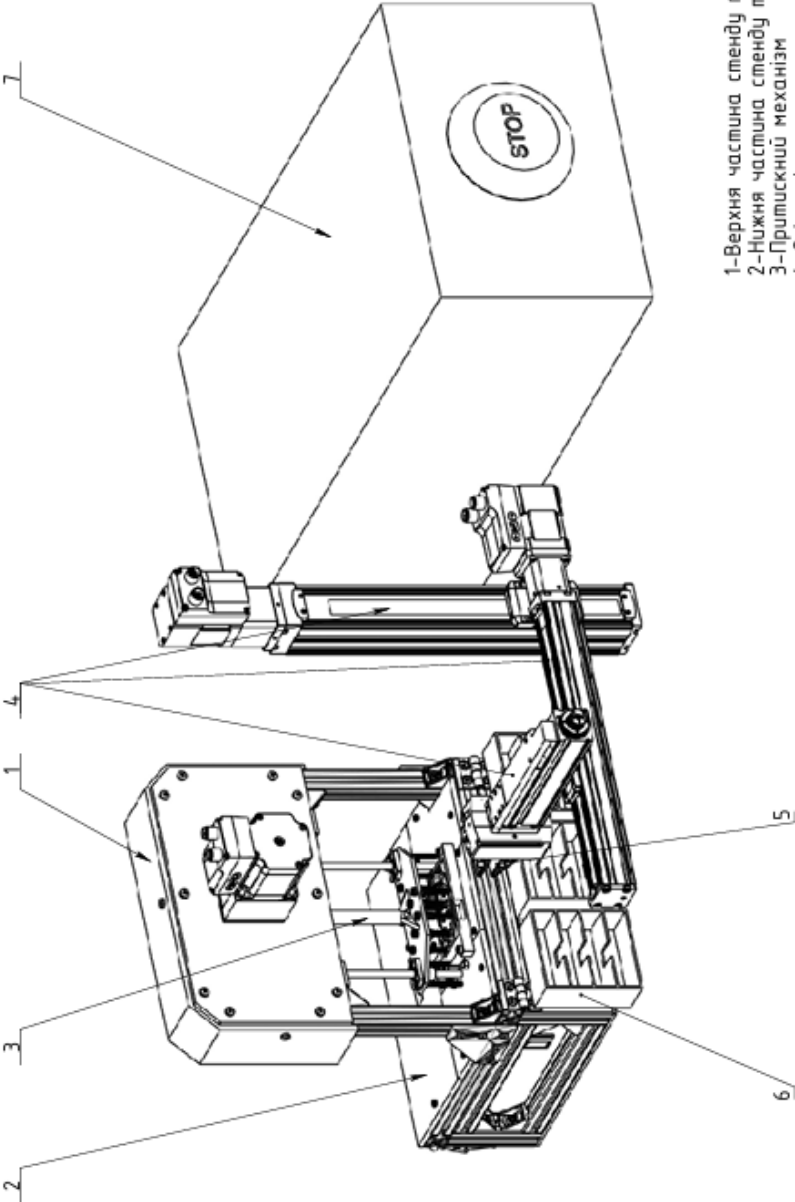
3

4

5

6

7



1-Верхня частина стенду тестування
2-Нижня частина стенду тестування
3-Притискний механізм
4-Осі маніпулятора
5-Затискний механізм
6-Бункери для плат(Fail, Both, Pass)
7-Шафа керування

Технічні характеристики

Параметри	Значення
Вага	40 000 г.
Напруга	24 В.
Обмін даними	Ю-Link Master
Точність позиціонування	±0,1 мм
Кількість осей	3
Робоче переміщення	100х200х200

ДПБР.ПБ1210.1702.02 СК

Система тестування друкованих плат

Загальний вигляд

Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Полішук Д.			
Перевір.				
Н. контр.				
Затверд.	Демченко М.			

Літера	Масштаб
	1:1
Аркуш	Аркушів
	КП, ПБФ

Формат А3

[illegible]

1. *Розміри для довідок

Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Перевір.	Полішук Д.		
Н. контр.	Затверд.	Демченко М.		

ДПБР.ПБ1210.1702.04 СК

ДПБР.ПБ1210.1702.04 СК				
Рука захватного пристрою		Літера	Маса	Масштаб
Складальне креслення		Аркус	Аркусів	1:1

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
				<u>Стандартні вироби</u>		
		1		Замок J105	2	
		2		Алюмінієвий профіль 20 × 20, 85 мм	4	
				Алюмінієвий профіль 20 × 20, 190 мм	6	
				Алюмінієвий профіль 20 × 20, 220 мм	7	
				Алюмінієвий профіль 20 × 20, 260 мм	4	
		3		Алюмінієвий кутник	32	
				Збільшена шайба M4, DIN 9021	64	
		4		T-гайка 6мм пазу	64	
		5		Гвинт M4*6, DIN 912	64	
		10		Роз'єм живлення IEC C14 Entrada	1	
		13		Петлі H2020	2	
		14		Гвинт M4x8, DIN 965	8	
		15		Гвинт M3x12, DIN 965	2	
		16		Шайба M3, DIN 125	2	
		17		Пружна шайба M3, DIN 7980	2	
		18		Гайка M3, DIN 934	2	
		19		Стійка TFM-M3 M3x30	7	
		20		Шайба M3, DIN 9021	7	
		21		Гумові ніжки	4	
				ДПБР.ПБ1210.1702.01		
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.			
Розробник.	Поліщук Д.Б.			Тестовий стенд		
Перев.						
Н.контр.						
Затв.	Демченко М.О.					
					Літера	Аркуш
						2
						3
					КПІ, ПБФ	

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
		23		Т-гайка М3	4	
		24		Гвинт М3х12, DIN 912	4	
		26		Пого-піни (Контрольні щупи)	7	
		29		Гвинт М3х8 DIN 7985	10	
				Т-гайка М3	10	
		33		Напрямна	2	
		34		Підшипник лінійний	2	
		35		Гвинт круглої гайки	2	
		36		Пружина 5Н	4	
		37		Опора Shaft Support SHF-6-1	2	
		38		Гвинт М10, DIN 912	4	
		39		Shaft Support SK-6-6	2	
		40		Гвинт М7	2	
		42		Прижимні піни (зуби)	7	
		43		Підшипник лінійний LMH6UU	2	
		45		Підшипник лінійний KBA-12S-UU-DTE	2	
				<u>Інші вироби</u>		
		12		БЖ LRS-75 Mean Well	1	
		50		Кроковий двигун	1	
		51		Редуктор планетарний 1:9	1	
				ДПБР.ПБ1210.1702.01		
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата	Тестовий стенд	
Розробник.	Поліщук Д.Б.					
Перев.						
Н.контр.						
Затв.	Демченко М.О.					
					Літера	Аркуш
						3
					Аркуші	3
					КПІ, ПБФ	

Додаток I

PROGRAM PLC_Testing_Cycle

VAR

Step : INT := 0;

Timer1 : TON;

Timer2 : TON;

TimerDone : BOOL := FALSE;

StartCycle : BOOL := TRUE;

CycleCounter : INT := 5; (* Кількість циклів для виконання *)

DO_OpenGripper AT %QX0.3 : BOOL; (* Відкрити затискач *)

DO_CloseGripper AT %QX0.4 : BOOL; (* Закрити затискач *)

DO_ERMS AT %QX0.5 : BOOL; (* Притискний механізм ERMS *)

DO_TestStand AT %QX0.6 : BOOL; (* Реле тестового стенду *)

DI_PASS AT %IX0.1 : BOOL; (* Сигнал справної плати *)

DI_FAIL AT %IX0.2 : BOOL; (* Сигнал бракованої плати *)

Axis_X : INT := 100; (* Координата X *)

Axis_Y : INT := 100; (* Координата Y *)

Axis_Z : INT := 140; (* Координата Z *)

END_VAR

CASE Step OF

0:

IF StartCycle AND CycleCounter > 0 THEN

(* Встановлення початкових координат *)

Axis_X := 100;

Axis_Y := 100;

Axis_Z := 140;

Step := 1;

ELSIF CycleCounter = 0 THEN

Step := 999; (* Кінець *)

END_IF

1:

(* Опускання до рівня плати *)

Axis_Z := 80;

Step := 2;

2:

(* Відкрити затискач на 1.5 сек *)

DO_OpenGripper := TRUE;

Timer1(IN := TRUE, PT := T#1.5s);

IF Timer1.Q THEN

DO_OpenGripper := FALSE;

Timer1(IN := FALSE);

Step := 3;

END_IF

3:

(* Зміщення по X для захоплення плати *)

Axis_X := Axis_X - 40;

Step := 4;

4:

(* Закриття затискача на 2 сек *)

DO_CloseGripper := TRUE;

Timer2(IN := TRUE, PT := T#2s);

IF Timer2.Q THEN

DO_CloseGripper := FALSE;

Timer2(IN := FALSE);

Step := 5;

END_IF

5:

(* Повернення по X назад *)

Axis_X := Axis_X + 40;

Step := 6;

6:

(* Підняття плати *)

Axis_Z := 140;

Step := 7;

7:

(* Переміщення до тестового стенду *)

Axis_X := Axis_X - 90;

Step := 8;

8:

(* Опускання до стенду *)

Axis_Z := 130;

Step := 9;

9:

(* Відпустити плату перед тестуванням *)

DO_OpenGripper := TRUE;

Timer1(IN := TRUE, PT := T#1.5s);

IF Timer1.Q THEN

DO_OpenGripper := FALSE;

Timer1(IN := FALSE);

Step := 10;

END_IF

10:

(* Повернення у центр стенду *)

Axis_X := Axis_X + 90;

Step := 11;

11:

(* Притиск плати до стенду *)

DO_ERMS := TRUE;

Step := 12;

12:

(* подача сигналу на тестовий стенд *)

DO_TestStand := TRUE;

Step := 13;

13:

(* очікування результату тестування *)

IF DI_PASS THEN

Step := 14;

ELSIF DI_FAIL THEN

Step := 20;

END_IF

(* === Обробка PASS === *)

14:

DO_TestStand := FALSE;

DO_ERMS := TRUE; (* Відпустити після тесту *)

Step := 15;

15:

Axis_X := Axis_X - 90;

Step := 16;

16:

```

DO_OpenGripper := TRUE;
Timer1(IN := TRUE, PT := T#1.5s);
IF Timer1.Q THEN
    DO_OpenGripper := FALSE;
    Timer1(IN := FALSE);
    Step := 17;
END_IF

```

17:

```

Axis_Z := 140;
Axis_X := Axis_X + 90;
Axis_Y := Axis_Y + 100; (* Бункер справних плат *)
Axis_X := Axis_X - 30;
DO_CloseGripper := TRUE;
Timer2(IN := TRUE, PT := T#2s);
IF Timer2.Q THEN
    DO_CloseGripper := FALSE;
    (* Повернення у початкове положення *)
    Axis_X := 100;
    Axis_Y := 100;
    Axis_Z := 140;
    CycleCounter := CycleCounter - 1;
    Step := 0;
END_IF

```

(* === Обробка FAIL === *)

20:

```

DO_TestStand := FALSE;
DO_ERMS := TRUE;
Step := 21;

```

21:

Axis_X := Axis_X - 90;

Step := 22;

22:

DO_OpenGripper := TRUE;

Timer1(IN := TRUE, PT := T#1.5s);

IF Timer1.Q THEN

DO_OpenGripper := FALSE;

Timer1(IN := FALSE);

Step := 23;

END_IF

23:

Axis_Z := 140;

Axis_X := Axis_X + 90;

Axis_Y := Axis_Y - 100; (* Бункер бракованих плат *)

Axis_X := Axis_X - 30;

DO_CloseGripper := TRUE;

Timer2(IN := TRUE, PT := T#2s);

IF Timer2.Q THEN

DO_CloseGripper := FALSE;

Axis_X := 100;

Axis_Y := 100;

Axis_Z := 140;

CycleCounter := CycleCounter - 1;

Step := 0;

END_IF

(* === Кінець === *)

999:

DO_OpenGripper := FALSE;

DO_CloseGripper := FALSE;

```
DO_ERMS := FALSE;  
DO_TestStand := FALSE;  
END_CASE
```