

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

До захисту допущено:

В.о. зав.кафедри

 Андрій МОВЧАНЮК

« 13 » 06 2024 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології
радіоелектронної техніки», за спеціальністю 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»**

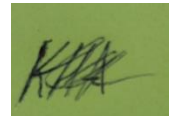
на тему: «Оптичний сенсор фотосепаратора для зерна»

Виконав :

студент IV курсу, групи РЕ-01

Кравченко Назар Андрійович

Прізвище, ім'я, по батькові



Керівник: к.т.н., доцент, Зінгер Яна Леонідівна

Посада, науковий ступінь, вчене звання

Прізвище, ім'я, по батькові



Рецензент: к.т.н., доцент, Піддубний Володимир Олексійович

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові



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

Студент Кравченко Н. А.

Київ – 2024 року

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

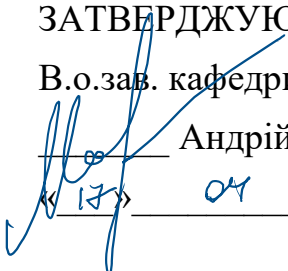
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології
радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.зав. кафедри

Андрій МОВЧАНЮК


17 04 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

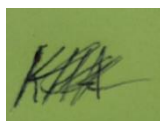
Кравченку Назару Андрійовичу

1. Тема проєкту «Оптичний сенсор фотосепаратора для зерна », керівник проєкту Зінгер Яна Леонідівна, к.т.н. доцент, затверджені наказом по університету від «29» травня 2024 р. №2178-с
2. Строк подання студентом проєкту 7 червня 2024 року
3. Вихідні дані до проєкту Напруга живлення 12 В та 5 В, струм до 0.3 А, можливість підключення до зовнішнього драйвера форунок, монохромний сенсор, розширення 300 DPI, швидкість обробки до 20 тис. лінійних кадрів на секунду, розрядність цифрового сигналу 12 біт.
4. Зміст пояснювальної записки Вступ, Огляд ринку, Технічний огляд, Розробка оптичного модуля фотосепаратора, Алгоритм роботи, Прототипування, Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Схема електрична структурна, Схема електрична принципова, Перелік елементів, Електронний модуль, Друкована плата.
6. Дата видачі завдання 17 квітня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд ринку	17.04.24-23.04.24	
2	Огляд технічних рішень	24.04.24-01.05.24	
3	Розробка оптичного модуля фотосепаратора	02.05.24-15.05.24	
4	Алгоритм роботи	16.05.24-24.05.24	
5	Прототипування	25.05.24-30.05.24	
7	Оформлення текстової та графічної документації	01.06.24-07.06.24	

Студент



Назар КРАВЧЕНКО

Керівник проєкту



Яна ЗІНГЕР

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект складається з пояснювальної записки обсягом 73 сторінки, що містить 57 ілюстрацій, 1 таблицю, 6 додатків та 65 посилань.

Метою даного дипломного проекту є виконання замовлення приватного підприємця, що включає розробку оптичного сенсора фотосепаратора для зерна, а саме для сортування «зеленої» гречки. Оптичний модуль включає інтеграцію в готовий станок та комунікацію із іншими елементами системи для коректної роботи.

Пристрій включає основну плату до якої підключається зовнішній оптичний давач для встановлення у станок та підключення шлейфом розробленої плати до драйвера форсунок, що входить у вже наявну систему фотосепаратора.

Ключові слова: фотосепаратор, оптичний давач, сортування, сепарація, очищення, агропродукція, зерно.

ANOTATION

The diploma project consists of an explanatory note of 73 pages, containing 57 illustrations, 1 table, 6 appendices and 65 references.

The purpose of this diploma project is to fulfil the order of a private entrepreneur, which includes the development of an optical sensor for a grain photoseparator, namely for sorting green buckwheat. The optical module includes integration into a ready-made machine and communication with other elements of the system for correct operation.

The device includes a main board to which an external optical sensor is connected for installation in the machine and connection of the developed board to the nozzle driver, which is part of the existing photoseparator system.

Keywords: color sorter, optical sensor, sorting, separation, cleaning, agricultural products, grain.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Оптичний сенсор фотосепаратора для зерна»

Київ – 2024 року

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Огляд ринку.....	5
1.1 Етапи очищення агропродукції	5
1.2 Виробники оптичного устаткування.....	7
1.1.1 Meyer	8
1.1.2 Bühler.....	10
1.1.3 Satake.....	12
1.1.4 Tomra	14
2 Огляд технічних рішень.....	16
2.1 Структура фотосепаратора та принцип роботи	16
2.2 Огляд готових оптичних модулів	24
3 Розробка оптичного модуля фотосепаратора	28
3.1 Розробка структурної схеми	28
3.2 Розробка принципової схеми	30
3.1.1 Сенсори та фільтри	32
3.1.2 Інтерфейси комунікації	39
3.1.3 Обробка даних.....	40
3.1.4 Управління блоком форсунок.....	42
3.3 Підбір компонентної бази	42
3.1.5 Оптичний сенсор TSL1301	43
3.1.6 Операційний підсилювач MC33079.....	43

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Кравченко Н.А.			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Балаш М.О.			1	73	
Н. Контр.					PE-01 РТФ		
Затверд.		Зінгер Я. Л.					

3.1.7	Nucleo-STM32G431	44
3.1.8	Буфери.....	45
3.1.9	Здвиговий регист.....	48
3.1.10	Конектори	48
3.1.11	Інші компоненти	49
3.4	Трасування друкованої плати	49
4	Алгоритм роботи	58
5	Протитипування.....	63
	Висновки	66
	Перелік джерел посилань	67
	Додаток А. Схема електрична структурна	75
	Додаток Б. Схема електрична принципова	76
	Додаток В. Перелік елементів.....	79
	Додаток Г. Друкована плата	82
	Додаток Д. Електронний модуль.....	83
	Додаток Е. Специфікація.....	84

ВСТУП

Сільське господарство є основою економіки України, забезпечуючи населення продуктами харчування, сировиною для промисловості та доходу з експорту. Зернові культури займають ключове місце серед аграрної продукції, і їх якість безпосередньо впливає на ефективність подальших технологічних процесів. Важливою складовою підготовки зерна до зберігання і переробки є процес сепарації, що включає видалення домішок, сортування зерна за розмірами, вагою і іншими параметрами.

Сепарація зерна забезпечує отримання високоякісної продукції, підвищуючи її цінність і конкурентоспроможність на ринку. Цей процес також сприяє зниженню витрат під час зберігання та транспортування, а також підвищенню ефективності переробки зернових культур.

У сучасних умовах розробка і впровадження нових методів сепарації зерна є актуальним завданням, що потребує системного підходу та використання передових технологій. В дипломному проєкті розглянуто основні методи сепарації зерна, зокрема фотосепарації.

Методом сепарації можна відділити тверді, рідкі та газоподібні складові. Ми будемо розглядати саме перший напрям, в якому найчастіше використовується саме фотосепаратори.

Фотосепаратор — це обладнання, що дозволяє здійснювати сортування будь-якого сипучого матеріалу, за допомогою розрізнення кольорів. Також важливою перевагою можна зазначити, що цей метод найбільш м'який для сипучих матеріалів з усіх автоматизованих способів обробки. Продукт не піддається механічному впливу та зберігаючи свою цілісність. Використання фотосепараторів дозволяє отримати гомогенний, очищений на 99,9% продукт найвищої якості [1].

Потрібно розуміти, що попри таку високу ефективність фотосепаратора, в ряді сепарації різних зернових культур дане очищення являється останнім етапом, а не основним, оскільки перед усім варто очистити продукцію від інших культур, комах, бруду. Також необхідно, щоб сировина, яка поступає у

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

сортувальне обладнання була попередньо звільнена від великих і дрібних домішок, виконана калібрована на фракції, а також за розміром і питомою вагою [2].

Фотосепаратори відносяться до високоефективних виробничих устаткувань, і хоча майже в кожній країні випускають свої обладнання, всупереч всій їх складність створення, на цей час в Україні не існує компаній які займаються виготовленням подібного агрегату. Саме тому в основі принципу роботи фотосепаратора було вирішено реалізувати найпростішу працездатну конструкцію.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		4

1 ОГЛЯД РИНКУ

Очищення агропродукції є невід'ємною частиною виробничого циклу, що починається з моменту збирання врожаю і закінчується підготовкою продукції до зберігання та переробки. Від правильності проведення цих процесів залежить збереження поживних властивостей, товарного вигляду та строків зберігання продуктів.

На ринку представлені різноманітні технології очищення, що відрізняються за своїми характеристиками, ефективністю та вартістю. Вибір приладу фотосепарації визначається типом агропродукції, вимогами до якості, швидкістю обробки та доступністю обладнання. Тому розглянемо ключові етапи очищення агропродукції, що включають:

- збір врожаю;
- попереднє очищення;
- первинну обробку;
- вторинну обробку.

1.1 Етапи очищення агропродукції

Варто зазначити, що хоча фотосепаратори застосовуються як для очищення пластику, мінералів і інших видів матеріалів, в даній роботі буде розглядатися сепарація саме агропродукції, до прикладу пшениці чи гречки.

Процес від збору врожаю до готового для споживача продукту можна розділити на наступні етапи, які також проілюстровані на рис.1.1:

1. Збір врожаю – перший етап, під час якого виконується збір нашої основної продукції, але із яким можливе потрапляння сторонніх часток: зелене насіння, паростки інших рослин, шкідники, грудки землі, каміння. Даний продукт не придатний навіть для зберігання через підвищену забрудненість, яка може сягати до 50%, що призводить до підвищення вологості та псування продукту.

2. Попереднє очищення – для того, щоб почати очищення чи навіть зберігання продукту у зерносховищах, потрібно провести певні етапи

					PE01.201113.001 ПЗ	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

видалення сторонніх домішок, які із часом можуть зіпсувати весь зібраний врожай. Для цього, проводиться висушення у зерносушарках хоча б до рівня 14% вологості для пшениці, після чого можливе подальше зберігання на термін від 6 місяців. Даний показник залежить від типу агропродукції, значення включених домішок та температури повітря. Також важливим є видалення домішок до рівня 10% для кращої сепарації на наступному рівні [3].

3. Первинна обробка – перший етап, який допускається для подальших дій над продуктом із метою використання споживачем. Містить всі можливі варіанти механічної обробки для видалення лушпиння, інших зернових культур, сухих паростків. Використовують магнітні системи, концентратори, пневмосепарування, трієрування і т.п. Також виконується розділення за допомогою сит різного розміру. На виході даного етапу важливо отримати рівномірний за розміром, масою та аеродинамічними властивостями продукт для кращої вторинної обробки. Варто зазначити, що вихідний матеріал включає фізичні включення не більше 3%, та вологість до 10% [4 – 5].



Рисунок 1.1 – Етапи очищення пшениці

4. Вторинна обробка – являється останнім етапом очищення та включає фотосепарацію. Даний процес займає більше часу ніж вторинна чи попередня обробка але шляхом нього допускається вихідна чистота до 99.9 %

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

за умови проходження попередніх етапів сепарації. Даний метод включає виявлення тих включень, які не можливо видалити механічним способом, до прикладу уражене пліснявою зерно, частково пошкоджене або недозріле. Використовуючи оптичні RGB та IR сенсори досягається максимальна чистота продукту, що однозначно входить у 1 категорію [6].

1.2 Виробники оптичного устаткування

На сьогодні існує велика кількість підприємств які розвиваються у технології виготовлення фотосепаративного обладнання по всьому світу, тому буде розглянуто лише найпопулярніші бренди. Своєю чергою, за будовою ринок пропонує різноманітну конструкцію устаткування, як тип конвеєра, фотосенсорів, форсунок, так і кількості етапів очищення, паралельність процесів чи навіть сепарація різних культур. Якщо коротко, то фотосепаратори можна поділити на дві окремі групи [7]:

- Стрічкові – більш щадний для сировини шляхом складнішої механічної конструкції, більших габаритів, але із меншою кількістю фотосенсорів. Використовується для горіхів, заморожених ягід, чипсів.
- Лотковий – застосовуються для більш твердої продукції, мають спрощену механічну конструкцію, менші габарити, але більше кутів огляду продукту через збільшення фотосенсорів. Притаманні для сортування пластику, скла, зернових та бобових культур.

В нашому випадку, враховуючи вимоги ТЗ буде розглянуто саме лотковий тип конвеєра для порівняння ринку. Попри більш детальної різновидності, такі як тип фотосенсорів, форсунок та етапів очищення, вони притаманні обом великим групам.

Досліджуючи регіональну перевагу можна зазначити, що Азійсько-тихоокеанський регіон (Китай, Японія, Корея, Індія, Австралія, Індонезія, Таїланд, Філіппіни, Малайзія та В'єтнам) лідирує на всесвітньому ринку та займає провідну нішу виготовлення фотосепараторів із часткою 28%. Своєю

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		7

чергою, Європа лідирувала на світовому ринку з найбільшою часткою доходу понад 33% [8,9].

1.1.1 Meyer

Країна: Китай

Рік заснування: 1993

Про компанію:

MY MEYER є першим відомим брендом кольорових сортувальників, завдяки якому Аньхой став «столицею кольорових сортувальників» із потужним науково-дослідним виробництвом. Компанія спеціалізується на виробництві машин для сортування рису, чаю, зерна, горіхів і пластику. Вона також виробляє машини для огляду, такі як рентген ультра HD, рентгенівський апарат для вантажів і рентгенівський огляд шин. Її продукція оснащена сортувальником штучного інтелекту та технологіями СВСТ [10, 11].



Рисунок 1.2 – Фотосепаратор MY MEYER серії "CG2"

Розглядаючи продукцію компанії, варто переглянути універсальний фотосепаратор серії CG2 (див. рис.1.2). Дана серія є високопродуктивним і універсальним обладнанням як для зерна, бобів, горіхів, так і для пластику, ягід, кондитерських та макаронних виробів. Завдяки різноманіттю сортувальної продукції дані апарати являються габаритними для

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

встановлення, та пристосовані для великих приміщень. Попри їх розмір, дані агрегати мають передову електроніку та програмне забезпечення [12]:

- Промислові кольорові камери CCD «Comptar» 5400 пікселів (Японія)
- Процесор ALTERA CYCLONE FPGA IV (США)
- Автоматичне відображення в реальному часі кількості відсортованого матеріалу і вмісту небажаних домішок.
- Частота фільмування 30 000 кадрів в секунду 10кГц
- Можливість встановити InGaAs інфрачервоні камери для виявлення каменів, пластика, мушлі та інших неорганічних домішок, ідентичних за кольором з продуктом
- Фонове RGB LED підсвічування «OSRAM» (Японія).

Для невеликих виробничих приміщень компанія пропонує універсальне обладнання серії 120М, яка є портативним устаткуванням для постійного переміщення (див. рис.1.3) [13].



Рисунок 1.3 – Фотосепаратор MY MEYER серії «120М»

Попри свою портативність, станок включає наступне комплектування:

- Високошвидкісний FPGA процесор Cyclone III
- CMOS сенсори виробництва Японії
- RGB LED підсвічування «NIPPON» (Японія)
- Фільтри, ежектори, пневматика «SMC», Японія

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

1.1.2 Bühler

Країна: Швейцарія

Рік заснування: 1860

Про компанію:

Bühler Group складається з трьох основних галузей промисловості, по-перше, харчові продукти зі зернових культур, виробництва борошна, очищення, зберігання та обробку зерна. Другий – харчовий сектор, виробництво вафельного печива, змішування та газування крему, випічка, перероблення шоколаду та горіхів тощо. Третій – матеріали, захист навколишнього середовища за допомогою енергоефективних транспортних засобів, технологій та будівель. Bühler займається розробкою та виробництвом кольорових сортувальних машин зі стабільною якістю продукції [10].



Рисунок 1.4 – Фотосепаратор Bühler серії SORTEX A

SORTEX A MultiVision - це оптичний сортувальник для бобових, горіхів, насіння, кави та пластику, що відповідає вимогам АТЕХ. (див. рис.1.4) Він виявляє та видаляє різноманітні кольорові дефекти, небажані розміри та сторонні матеріали, а також сортує до 5 жолобів з продуктивністю до 40 т/год. Дана інновація від компанії Bühler включає наступні переваги [14]:

- Вдосконалена система виявлення всіх відомих дефектів і сторонніх домішок для найскладніших завдань сортування

					РЕ01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

- Широкосмугове світлодіодне освітлення
- Технологія SmartEject, для точного вибивання
- Заднє підсвічування змінюється залежно від рівня освітленості, забезпечуючи стабільну роботу
- Сенсори за технологією InGaAs



Рисунок 1.5 – Фотосепаратор Bühler серії WB

Приведена сортувальна машина (див. рис.1.5) належить до бюджетного класу для використання малим та середнім аграріям. Основні частини деталей, вузлів та електронних комплектуючих виробляються на заводі Bühler у китайській провінції Хефей, що дозволило знизити ціну на агрегат. Попри нові лінійки SORTEX, які оснащені InGaAs сенсорами, серія WB включає звичайні CDD RGB сенсори, що спрощує як саму електроніку, так і програмну обробку.

До основних характеристик даного апарата можна віднести [15, 16]:

- Сортувальна потужність становить до 18 т/год (пшениця)
- Можливість запису до 100 режимів сортування
- Високошвидкісні інжектори до 64 каналів/жолоб

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1.1.3 Satake

Країна: Японія

Рік заснування: 1896

Про компанію:

У 1896 році компанія Satake винайшла першу потужну машину для рису в Японії, яка значно сприяла ефективному розвитку сільського господарства. Сфера діяльності компанії розширилася від перероблення зерна до вирощування, зрізання, збору врожаю, сушіння, зберігання, приготування їжі та утилізації відходів, забезпечуючи комплексні розв'язання проблем, з якими стикається весь ланцюг зернової промисловості. Поточна продукція Японії Satake для сортування рису в основному включає серію XS, SSM, CS (тип стрічковий) та EM. Її продукція широко використовується в сортуванні рису та інших видів обробки зерна, в основному висококласні кольорові сортувальники з високою вартістю [10, 17].



Рисунок 1.6 – Фотосепаратор Satake серії Evolution

EVOLUTION (див. рис.1.6) повністю інтегровано з технологією сортування за розміром і формою. Можливість відрізнити прийнятний продукт від забрудненого того ж кольору. Оптичний сортувальник оснащений технологією MIR (багатохвильовий інфрачервоний діапазон) використовує численні смуги ІЧ-променів, щоб видалити найбільшу кількість сторонніх матеріалів, колір і форму яких можуть не виявити. Основні переваги [17]:

- Поєднання повноколірного RGB та багатохвильової ІЧ-технології

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- Висока щільність інжекторів для кращого відділення фракцій
- Власне програмне забезпечення обробки захоплення зображень зі здатністю виявляти дефекти та точно їх видаляти.



Рисунок 1.7 – Фотосепаратор Satake серії FMSR-IR

FMSR-IR — це ефективний сортувальник середнього розміру, який має технологію Full Color RGB + Shape + Infrared. (див. рис.1.7) Він ідеально підходить для сортування таких продуктів, як сухі боби, кукурудза, горіхи, кава, насіння, пластик, а також різноманітні сорти зерна. Особливості сортувальника [19]:

- Технологія повноколірної RGB-камери з високою роздільною здатністю
- Інфрачервоні камери, а також сортування за розміром і формою забезпечують додаткову безпеку для видалення сторонніх матеріалів
- Високопотужні повітряні ежектори діаметром 5 мм, здатні здійснювати точний повітряний потік для видалення дефектного продукту
- Відбір зразків у режимі реального часу дозволяє оптимізувати сортування та полегшує оптимальні налаштування машини

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.1.4 Tomra

Країна: Норвегія

Рік заснування: 1972

Про компанію:

TOMRA Sorting Solutions є світовим лідером у сфері сенсорних технологій сортування. Вони спеціалізуються на наданні інноваційних рішень для сортування у різних галузях промисловості, включаючи перероблення, гірничодобувну та харчову промисловість. На початку 21 століття компанія почала активне розширення шляхом викупу компаній, що займаються передовими технологіями сортування, таких як TITECH, Onwak, Commedas і Ultrasor. Tomra вийшла на китайський ринок у 2010 році та заснувала компанію Tomra Sorting Technology (Xiamen), що дало поштовх до більшого розвитку технологій та розширення ринку користувачів. Сьогодні рішення Tauran, засновані на сенсорних технологіях, широко використовуються в інтелектуальних машинах для перероблення пляшок для напоїв, у відновленні ресурсів, харчовій та мінеральній промисловості [10, 17, 20].



Рисунок 1.8 – Фотосепаратор TOMRA серії 3С

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Даний оптичний сортувальний апарат (див. рис.1.8) призначений для горіхів, насіння та різного зерна. Ця машина може виявляти найтонші дефекти кольору та форми, порожні оболонки та інші сторонні матеріали, включаючи скло та прозорий пластик. Він розроблений для того, щоб дбайливо поводитися з горіхами, насінням і зернами. Для більшості, даний станок використовують в якості сортування горіхів, внаслідок виявлення дефектів горіхів, такі як паростки арахісу, проростання, тріщини в шкаралупі та укуси комах. До основних інженерних переваг можна віднести [21, 22]:

- Подвійне лазерне індуковане розсіювання
- Двосторонні RGB-камери в поєднанні з високою інтенсивністю, сфокусованим світлодіодним освітленням
- Високошвидкісний клапан з прямим підключенням форсунки
- М'який жолоб з можливістю зняття без інструментів
- Блоки ближнього ІЧ-випромінювання

Отже, після огляду всіх етапів сепарації матеріалів, особливу увагу приділяючи сортуванню агропродукції було визначено, що незважаючи на малий обсяг видалення забруднень під час вторинної обробки, даний процес посідає одну із ключових етапів для отримання максимально чистого продукту 1-го гатунку. Розглядаючи фотосепаратори неможливо виділити який кращий, так як дані устаткування дуже різнопланові, створені як для малих так і для великих масштабів, що в свою чергу відповідає за розширення технологічності чи доступності.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15

2 ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

В даному розділі буде розглянуто основний принцип роботи лоткового фотосепаратора, а саме: ознайомлення з основними блоками конструкції та їх принцип дії, етапи роботи станка та вибір блоку для подальшої детальної розробки.

2.1 Структура фотосепаратора та принцип роботи

Вважаючи, що конструктив фотосепаратора залежить від рівня технологічності пристрою та методу підходу до розробки, буде розглядатися лише базовий принцип дії, який охоплює основу всіх фотосепараторів, незалежно від обробки зерна, бобових, пластику.

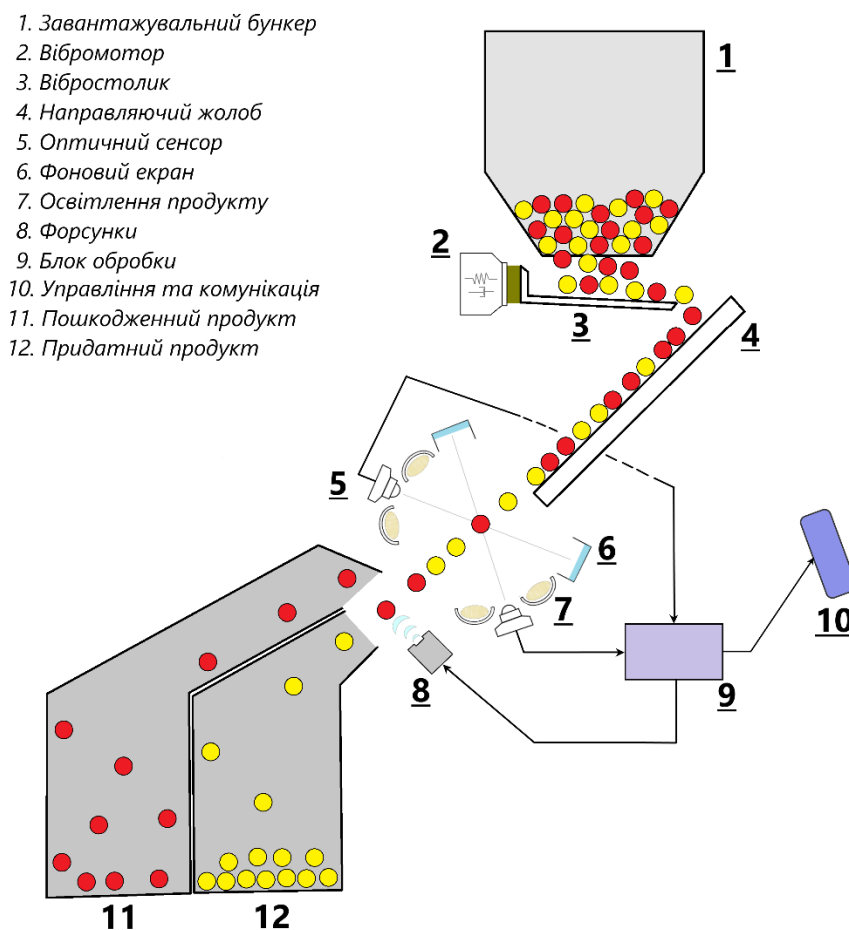


Рисунок 2.1 – Спрощена структура фотосепаратора

Для кращого розуміння будови фотосепараторного обладнання була надана можливість фізичного огляду та теоретично вивчено через електронні

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

джерела. Оскільки станки складаються із декількох лотків, секцій форсунок та оптичних сенсорів, своєю чергою дублюються надалі для збільшення виробленого продукту на одиницю часу, буде розглядатися лише один вузол, який умовно відповідає одній зернинці (див.рис.2.1).

На вищезгаданому рисунку входять лише базові блоки, які виконують основну функцію у сортуванні матеріалу. Також для прикладу буде продемонстровано їх реальне розташування на прикладі фотосепаратора від компанії AMD (див.рис.2.2).

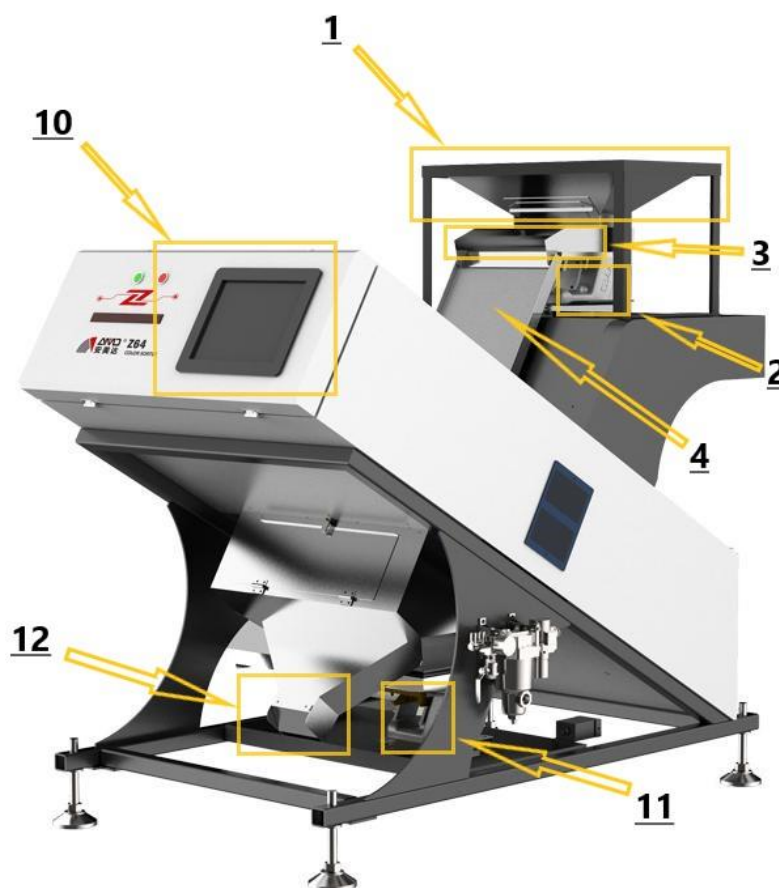


Рисунок 2.2 – Приклад розташування компонентів на фотосепараторі від AMD [23]

Далі буде розглянуто більш детально вплив на систему кожного із цих блоків [24 – 26]:

1. Завантажувальний бункер – є воронкою в яку засипається необхідний для сепарації матеріал. Надалі вона може розподіляти продукт на один або декілька лотків, залежно від типу обладнання, чим і визначається можливість станка сортувати за раз різного роду продуктів чи лише одного. На масштабних підприємствах даний процес автоматизований, тому у воронку одразу потрапляє продукт після первинної обробки.
2. Вібромотор – являється простим генератором механічних коливань, використовується для їх передачі на вібростолик. Частотою коливань, яка сягає в середньому 1500 – 2000 об./хв., регулює інтенсивність переміщення зернинок по вібростолику та їх швидкість потрапляння на скатну поверхню.
3. Вібростолик – розподіляє скупчення продукту за допомогою вібрацій в один шар рівний зернинці. Через те, що столик розміщений під кутом декілька градусів до горизонту, то зерна потрапляють на скатну платформу, швидкість переміщення яких залежить від інтенсивності вібрацій.
4. Напрямний жолоб – становить собою скатну поверхню із відполірованого металу для меншого тертя продукту по ньому, який розміщений приблизно під кутом 45 градусів. Розрахований на один блок оптичного сенсора та одну групу форсунок. Бувають варіації із пропилами для певного виду продукту та із гладкою поверхнею.
5. Оптичний сенсор – модуль який відповідає за розпізнання кольору продукту (див.рис.2.3). Представляє одну лінії або їх масив фоточутливих елементів, які можуть розпізнавати інтенсивність світла (монохром), спектр видимого діапазону (RGB) або інфрачервоного випромінювання (IR). Має свій блок обробки даних який передає готові значення відфільтрованого кольору на інші модулі. Також обов'язковим є встановлення лінзи для розширення діапазону захоплення матеріалу.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18



Рисунок 2.3 – Оптичний модуль [27]

6. Фоновий екран – екран який розташований після продукту, що падає, виконує функцію переведення значень камери в одне стале положення, зазвичай середнє, яке надалі буде вважатися опорним. Особливою характеристикою є розсіяне слабке джерело світла із мінімальними пульсаціями, яке може бути як кольоровим, так і білим.
7. Освітлення продукту – являє собою світлодіодні лампи із розсіювачем, важливим параметром яких є якісне освітлення продукту без мерехтіння (див. рис.2.4). Можливий варіант кольорового освітлення, білого та інфрачервоного, залежно від типу оптичного сенсора. Розташовується в близькості до продукту, при чому освітлення не повинно засвічувати оптичні датчі.



Рисунок 2.4 – Лампа освітлення [28]

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		19

8. Форсунки – представляє блок із певною кількістю соленоїдних клапанів, до якого приходить стиснуте повітря від помпи (див. рис.2.5). В основному розміщені довільним чином, після чого, спеціальними трубками влаштовуються в один прямолінійний масив. При подачі певного сигналу на контакт, відкривається відповідний клапан та пропускає стиснуте повітря через отвір приблизно 3 мм на 2 мм. В середньому частота спрацювань сягає 1 – 1.2 кГц, що є ключовою характеристикою частоти вибивання зайвого продукту і відповідає за загальний об’єм обробки матеріалу т/год.



Рисунок 2.5 – Блок форсунок [28]

9. Блок обробки – центральний модуль який відповідає за комунікацію між всіма елементами системи та в більшості випадків виконує ключовий алгоритм по обробці вхідних даних оптичного сенсора та подальшого визначення сигналу на певний клапан форсунки.

10. Управління та комунікація – відповідає за налаштування певних параметрів користувачем, моніторинг стану системи та її налагодження. Можливий варіант вбудованого Wi-Fi модуля для комунікації через хмарні середовища.

11. Пошкоджений продукт – представляє контейнер для непотрібного, пошкодженого продукту, куди в процесі роботи форсунки його

					РЕ01.201113.001 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибивають. Можливий варіант повторного очищування даного відділу, при наявності конвеєра для повторного завантаження.

12. Придатний продукт – являє такий же контейнер, в який потрапляє корисний і очищений нам продукт. В більшості випадків переміщається на конвеєр для подальшого пакування.

Також варто відзначити додаткові вузли, які є ключовими для фотосепаратора, але не були позначені на рисунку через непрямий вплив на процес сортування:

1. Система очищення оптики – виконане у вигляді набору щіток які із певною періодичністю виконують чищення скла, за якими знаходяться оптичні модулі, фонові екрани та елементи освітлення (див. рис.2.6). Під час даного процесу зупиняється весь алгоритм сепарації, тобто припиняється подача продукту на скатний лоток, його аналіз та спрацювання форсунок. [29]

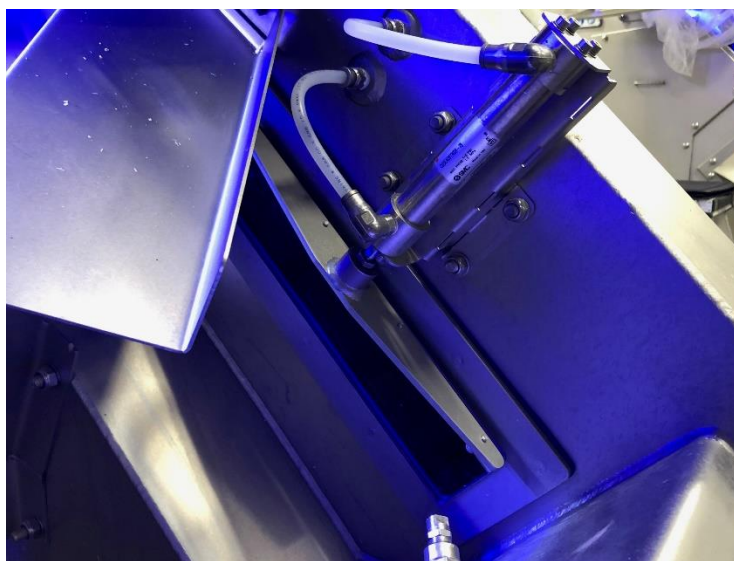


Рисунок 2.6 – Система очистки оптики [30]

2. Система подачі повітря – відповідає за один із важливих параметрів в сепарації та правил користування фотосепаратором. Запорука довговічності роботи апарата та якість продукту залежить в першу чергу від його чистоти, що напряму пов'язано із повітрям, яке приходить на форсунки. Саме тому продумана система подачі повітря, яка складається із відповідних частин. Звісно вона може бути

					РЕ01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

скорочена, але повною комплектацією вважаються наступні складові, які показані на рис.2.7 [31, 32]:

- Повітряний компресор, потужність якого залежить від використання фотосепаратором та варіюється приблизно на рівні 10 – 30 к.с.
- Цистерна стиснутого повітря – є важливою частиною системи, оскільки обладнання може споживати об’єм повітря на рівні 1 – 10 м³, що відповідно потребує своєрідного буфера між компресором та споживачем. Також важливою характеристикою є тиск, більшість оптично сортувального обладнання розраховане на значення 0.5 – 2.5 МПа.
- Фільтр повітря – для якісного очищення продукту та чистоти станка, повітря має бути максимально очищене від часток пилу чи іншого забруднення. В більшості професійного обладнанні фільтр також вбудований на самому фотосепараторі, після якого повітря одразу потрапляє на форсунки.
- осушувач повітря – забезпечує сталу температуру повітря, яка варіюється на рівні 20 – 40 °С та його вологості менш як 40%. Більшість власників виключають даний блок, але через підвищену вологість можлива погана робота фільтрів та закупорення форсунок.

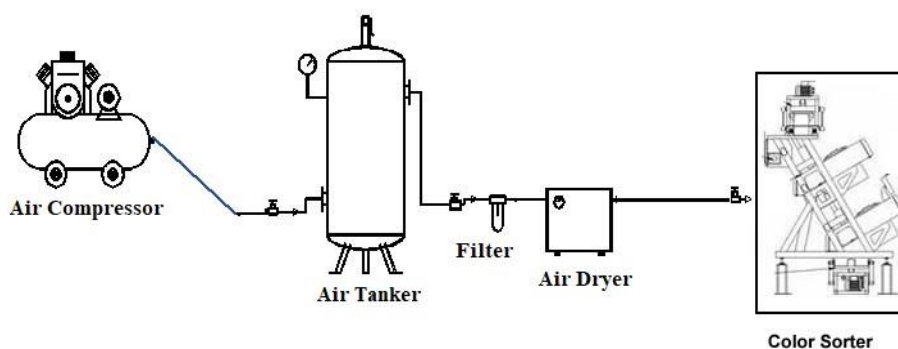


Рисунок 2.7 – Система подачі стиснутого повітря

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Після огляду всіх частин системи оптичного сортувальника можна розглянути принцип його роботи, в якому залучені всі вищенаведені модулі. Спочатку проходить процес підготовки, в якому відбувається наповнення цистерни стиснутим повітрям до вказаного тиску який підтримує сортувальник. Далі, перед початком роботи, станок проходить самотестування, в якому перевіряє справність всіх модулів системи, особливо це стосується форсунок через закупореність яких може не тільки виконуватися погане очищення, але і є шанс виходу її із ладу, що може повпливати на інші частини системи. Також виконується очищення оптичного блоку, що включає фотосенсори, лампи та фонові екрани, які розміщені за відповідним склом. Повторне очищення блоку залежить від засміченості продукту та може відбуватися із періодичністю декількох годин. Для початку роботи користувач повинен обрати тип продукту та інші вхідні параметри, такі як: діаметр зерна, його вага, швидкість обробки, кольоровий діапазон чистого/засміченого продукту; інші параметри варіюються від типу обладнання та продукції.

Робота починається після запуску налаштованої системи, в якій за допомогою систем норій зерно потрапляє до завантажувального бункера, після чого, залежно від інтенсивності коливань вібростолика залежить швидкість подачі продукту на скатну поверхню. Шаром в одну зернину, продукт скочується вниз де потрапляє спочатку в секцію оптичної обробки, де виконується сканування кольору продукту. Засновуючись на вказаних параметрах та алгоритмі, система обробки виконує відповідні дії з отриманими даними та передає їх на блок форсунок. Через те, що між оптичними сенсорами та форсунками присутня певна відстань, алгоритм повинен врахувати відповідну затримку вибиття. У більшості переглянутих на цей час апаратів дана затримка вказується користувачем, та являється приблизним часом в мс. Після настання відповідного часу, зернинки які були оброблені як зайві/пошкоджені, будуть видалені за допомогою стиснутого повітря, яке випускається через певний клапан форсунки. Продукт, який не змінював свою траєкторію падіння, а відповідно був визнаний придатним

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- Видимий спектр 300 – 1050 нм.
- Роздільна здатність оцифрування 16-біт.
- Частота сканувань до 138 лінійних кадрів на секунду.
- Час експозиції 0.1 – 6500 мс.
- Протокол передачі даних USB 2.0.

Важливою особливістю є використання поширеного сенсора Toshiba TCD1304DG та можливість підключення до комп'ютера для перегляду всіх даних і проведення налаштувань. Ключовим мінусом є відсутність в наборі відповідної лінзи та зберігання у власній пам'яті до 4 лінійних кадрів, що зобов'язує приймач одразу їх зчитувати, інакше вони будуть заміщені новоприбулою інформацією.



Рисунок 2.9 – Лінійка монохромна камера TCN/TCE-1304-U [35]

До прикладу саморобної реалізації оптичного модуля буде наведений проєкт (див.рис.2.10) із використанням того ж сенсора TCD1304 для порівняння можливостей власного створення та фабричної реалізації. Основні характеристики даної розробки [36, 37]:

- Лінійний монохромний масив із 3648 пікселями.
- Розмір пікселя 8 на 200 мкм.
- Видимий спектр 300 – 1050 нм.
- Роздільна здатність оцифрування 12-біт.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

- Частота сканувань до 125 лінійних кадрів на секунду.
- Час експозиції 10 мкс – 35 хв.
- Протокол передачі даних UART/SPI/USB.

Даний проєкт містить декілька варіацій збірки на різних мікроконтролерах, та підтримує STM32F401, STM32F405 та STM32F103, перший має найкращі характеристики частоти лінійних кадрів до 125 на секунду. Також для заміни комп'ютера пропонується використання портативного варіанту із Raspberry Pi та вивід через неї GUI, що є не обов'язковою складовою при наявності першого та не відповідає за обробку сенсора. Важливо зазначити, що хоча роздільна здатність оцифрування менша (12 біт проти 16 біт), для більшості випадків цього цілком достатньо і не потребує такої точності. Також варто порівняти частоту кадрів, що незначно менше та не вплине на подальше використання (125 проти 138 кадрів/с). Одним із важливих плюсів є низька ціна, що в першому випадку невиправдано велика (40\$ проти 650\$).

Отже, дана публікація та інші які були знайдені в процесі роботи дають нам зрозуміти, що створення власного оптичного модуля із використання монохромного сенсора та мікроконтролера цілком рентабельно, враховуючи доступність компонентів на українському ринку.

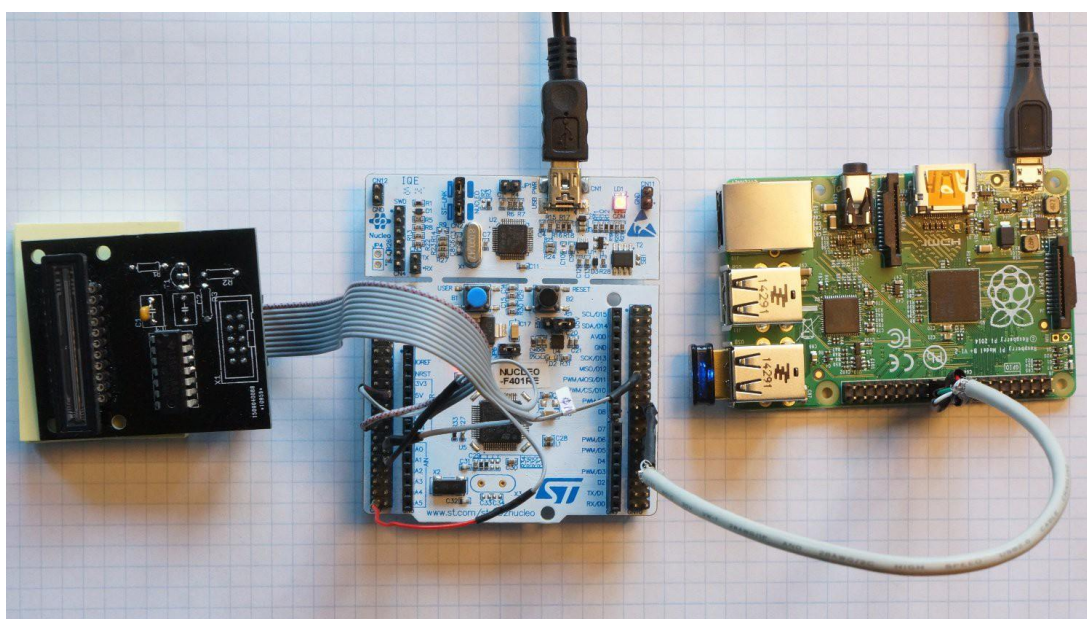


Рисунок 2.10 – Розробка оптичного модуля на TCD1304 [36]

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Отже, після розгляду принципу роботи фотосепаратора та його основних блоків, було виділено один із важливих модулів структури, який відповідає за точність визначення кольору та в подальшому на процес обробки даних, які в подальшому будуть передані на блок форсунок для вибивання відповідного матеріалу. Оптичний модуль відповідає за обробку фотосенсора, який в свою чергу приймає відбите світло від продукту та обробляє його. Незважаючи на те, що існує велика кількість готових рішень, які можуть бути як універсальними, так і спеціалізованими під певний прилад, виконання власного модуля, як було вище наведено, може не поступатися по характеристикам та в свою чергу бути інтегрованим в певний станок, під який може не існувати готових модулів. Також варто зауважити, що даний модуль був спроектований на замовлення під певний апарат, що підтвержує можливість власної реалізації.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		27

3 РОЗРОБКА ОПТИЧНОГО МОДУЛЯ ФОТОСЕПАРАТОРА

В даному розділі буде розглянуто повний процес розробки оптичного модуля, в який буде включатися розробка структурної та принципової схеми, підбір компонентної бази, симуляція та трасування друкованої плати.

3.1 Розробка структурної схеми

Розглядаючи готові оптичні модулі та принцип їх реалізації у наявній апаратурі було визначено для себе власну структурну схему блоку, яка пристосована до наявних інших вузлів фотосепаратора, що були надані замовником. Вважаючи, що дана розробка являється прототипом і була створена із можливістю налагодження та перевірки працездатності, додатковими модулями було використано: драйвер управління форсунками – пряма комунікація, освітлення, фонові екрани – додаткові вузли. Структурна схема прототипу показана на рис.3.1.

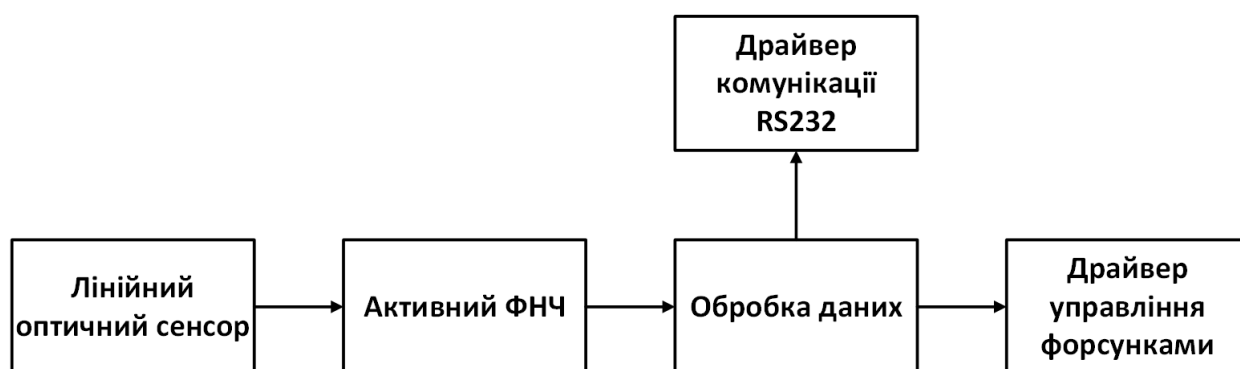


Рисунок 3.1 – Структурна схема прототипу оптичного модуля

Аналізуючи вище наведену структурну схему варто розглянути більш детально кожний із даних блоків:

1. Лінійний оптичний сенсор – представляє лінійний масив фоточутливих елементів які зчитують інтенсивність навколишнього освітлення (монохромний тип). Більшість монохромних сенсорів мають на виході аналоговий сигнал із

кожного пікселя, перемикання між якими можливе за допомогою тактового імпульсу.

2. Активний ФНЧ – являється активним фільтром низьких частот для обробки вхідного аналогового сигналу від зайвих шумів. Хоча даний блок є необов'язковим, але було вирішено про його використання беручи до уваги наявність у фабричних реалізаціях. Він має бути розрахований на більшу частоту, ніж максимально можлива частота фотосенсора.
3. Обробка даних – даний блок є багатозадачним та виконує функцію оцифрування сигналу за допомогою АЦП, реалізація вказаного алгоритму та комунікація із зовнішніми модулями. Хоча даний вузол можливо розділити на відповідні частини, було прийнято рішення перевірки потужностей за допомогою одного мікроконтролера.
4. Драйвер комунікації RS232 – відповідає за комунікацію із зовнішніми модулями системи та було додано на прохання замовника. Включає можливість передачі даних із сенсора або вихідних даних після обробки алгоритмом.
5. Драйвер управління форсунками – являється додатковим драйвером для управління більш потужним вузлом, що відповідає за форсунки, виконує передачу сигналу для подальшого їх спрацювання. Вважаючи, що основний драйвер форсунок було надано замовником, даний попередній драйвер було налаштовано під відповідну плату.

Отже, для початку було розглянуто варіанти реалізації фабричних модулів, після чого, на основі наявних вузлів системи було розроблено відповідну структурну схему під яку в подальшому етапі роботи була виконана реалізація принципової схеми та трасування. Дана реалізація включає можливі варіанти комунікації та фільтрації для прототипу, які в подальшій розробці можливо будуть усунені із цілей нерациональності.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		29

3.2 Розробка принципової схеми

Після розробки структурної схеми можна провести етап створення принципової схеми, за основу якої обрано компоненти з українського ринку. Схема електрична принципова поділена на два аркуші та представлена на рис.3.2 та рис.3.3.

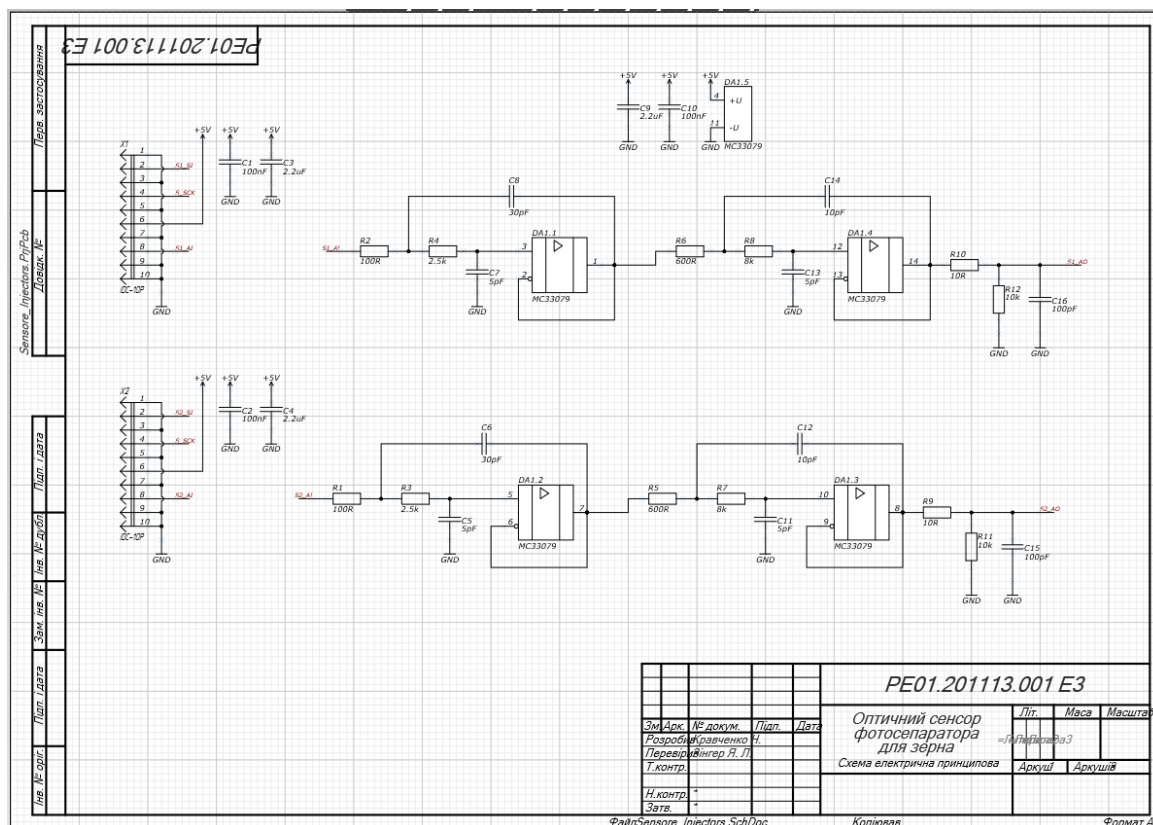


Рисунок 3.2 – Схема електрична принципова. Частина 1

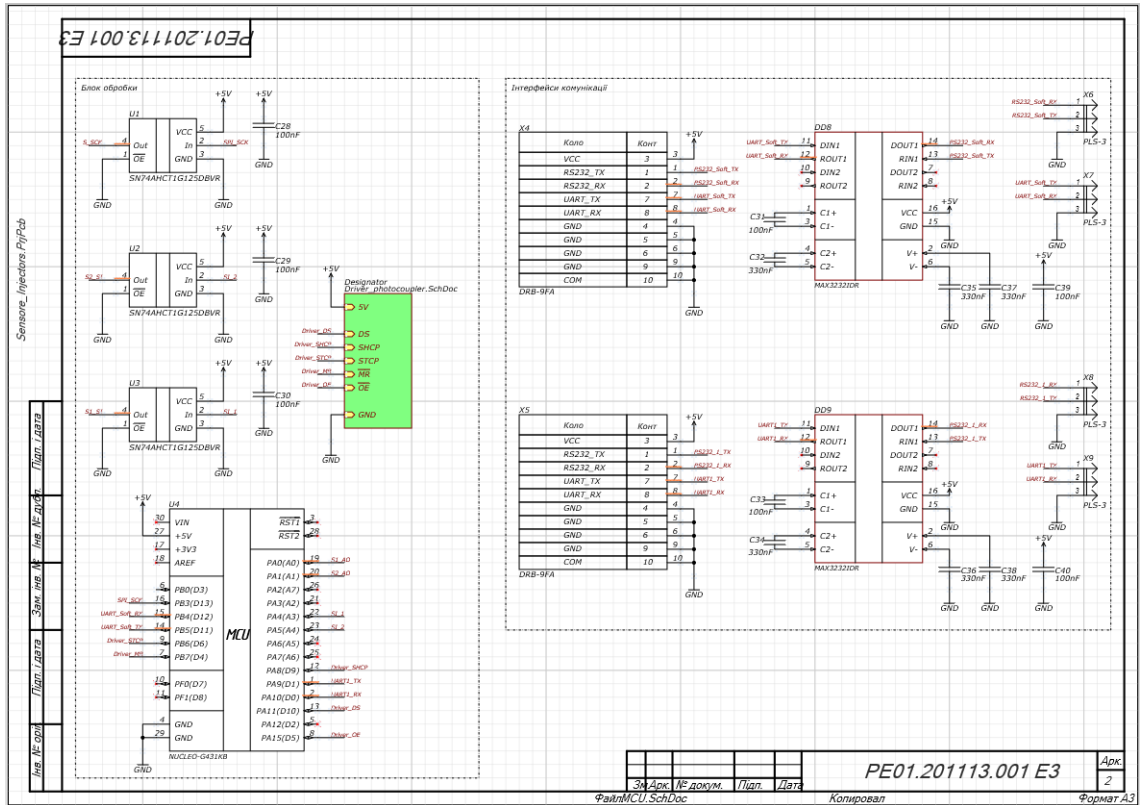


Рисунок 3.3 – Схема електрична принципова. Частина 2

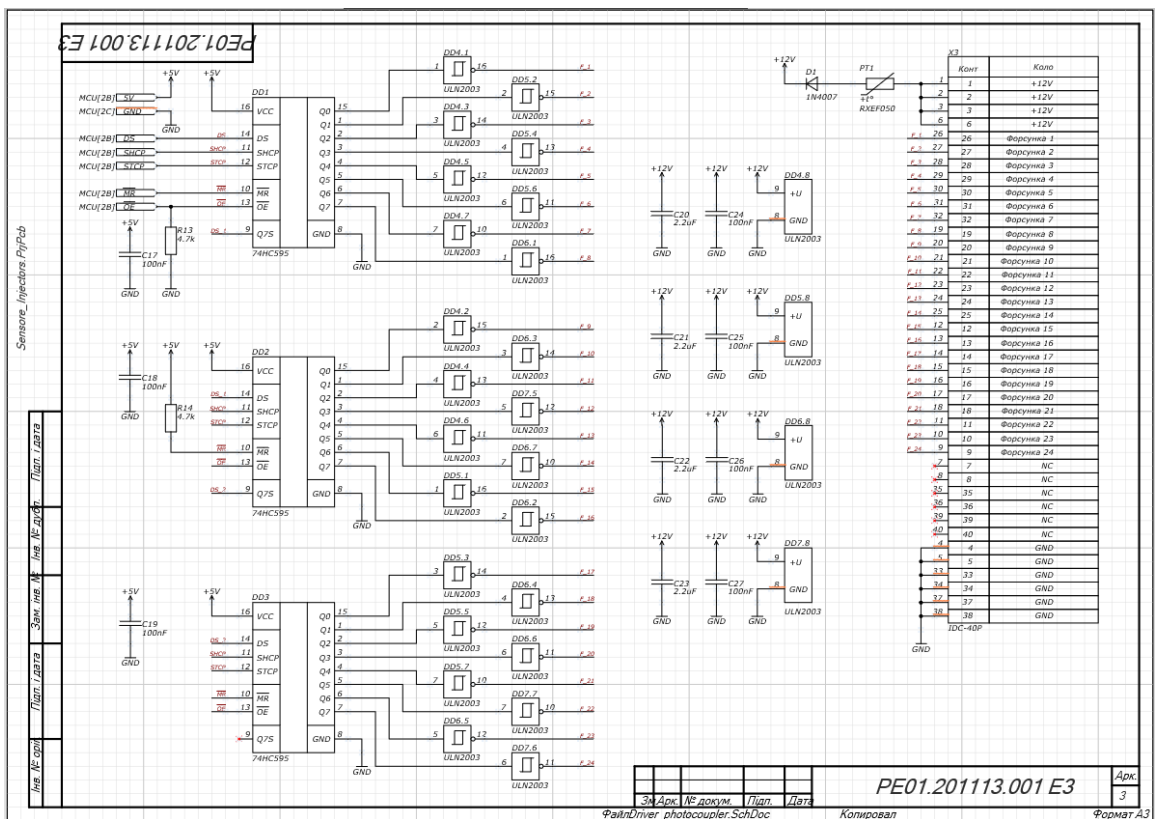


Рисунок 3.4 – Схема електрична принципова. Частина 3

Розглядаючи вище наведені аркуші можна відмітити, що вся схема поділена на відповідні блоки, кожний із яких відповідає за певну функцію яку далі буде більш детально розглянутого.

3.1.1 Сенсори та фільтри

Даний блок відповідає за вхідні дані та включає два оптичних сенсори TSL1301, що підключаються у відповідні конектори X1 та X2, і також фільтр низьких частот 4-го порядку для кожного із них, який побудований на компоненті DA1, що включає чотири операційні елементи (див.рис.3.2). Для даної роботи цілком вистачить активний ФНЧ 2-го порядку, що включає лише один операційний підсилювач на сенсор, але вважаючи, що на момент розробки схеми по відповідним характеристикам та низькій ціні був доступний компонент MC33079, який включає 4 елементи, було вирішено використати весь потенціал та розробити фільтр 4-го порядку, із використання 2-х операційних підсилювачів на кожний із сенсорів.

Оскільки оптичні сенсори були надані замовником, то першим етапом було підібрано відповідний ОП, який зміг би працювати на частоті хоча б 4 МГц в режимі одиничного коефіцієнта підсилення із відкритим контуром. Також важливим параметром є підтримання вихідного значення напруги від 0.3 до 2.4 В, які генеруються оптичним сенсором, при напрузі живлення операційного підсилювача 5 В. Інші характеристики ОП будуть розглянуті в підрозділі 3.3 Підбір компонентної бази.

Під час розробки даного блоку було взято стандартну структуру активного фільтра низьких частот та в якості опорних розрахункових значень використано онлайн калькулятор фільтрів від Analog Device із наступними вхідними параметрами, які вказані на рис.3.5 [38].

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		32

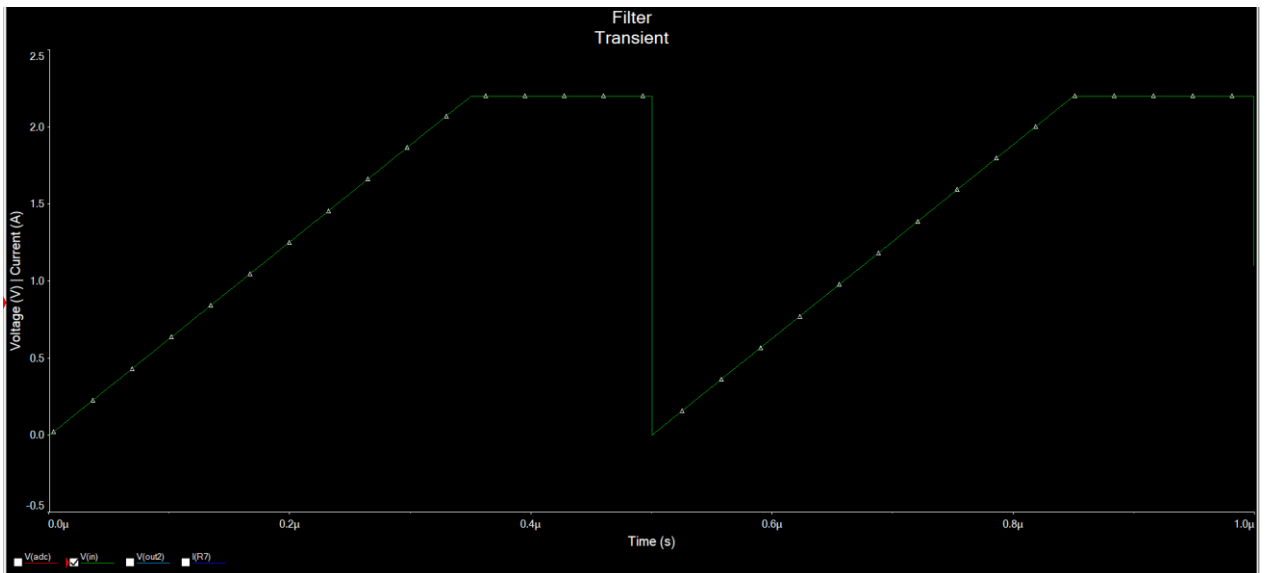


Рисунок 3.9 – Емуляція вихідного сигналу датчика

Далі, на основі опорної схеми ФНЧ та значень номіналів, показаних на рис.3.6, було дослідницьким шляхом підбрано нові значення для кращого значення вихідних параметрів. Конденсатор C5 був доданий в якості буфера та забезпечує сталі значення напруги при вибірці АЦП, яке буде заряджати внутрішню ємність вибірки. Для простого розрахунку даного значення варто дотримуватися, щоб ємність даного елемента перевищувала у 20 разів загальну ємність конденсаторів вибірки та при тому була меншою ніж у 60 разів. Даний елемент являється важливим, оскільки під час незначного часу вибірки, який при використанні STM32G431 становить 41 нс, не було перевантаження на ОП, який не здатний так швидко зреагувати на зміну вхідного імпедансу, що буде вносити відповідні похибки виміру. При правильному підборі буферного конденсатора значення напруги на ньому не повинно опускатися нижче рівня 95% при вибірці, що буде означати достатню кількість заряду для конденсаторів АЦП. Резистор R5 слугує відповідною розв'язкою між ОП та вузлом буферного конденсатора із АЦП та повинен складати від одиниць до десятків Ом. Для перевірки відсутності затягування наростання фронту, що можливо через RC ланцюг, варто перевірити значення за формулою 1, при якому, вихідне значення має бути значно меншим за час вибірки АЦП, щоб не впливати на кінцевий результат [40-42].

$$t_{ACQ} \gg k \cdot R_{EXT} \cdot C_{EXT} \quad (1)$$

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де t_{ACQ} - час вибірки АЦП, нс; k – кількісна константа часу; R_{EXT} – зовнішній опір, Ом; C_{EXT} – зовнішня ємність, нФ.

Використовуючи значення наведені у схемі та значення кількісної константи часу k , яка рівна 9 [42, ст.10] при використанні 12-ти бітного АЦП з урахуванням похибки 0.5 LSB, ми отримуємо порівняння значень 41 нс – для часу вибірки, та 9 нс – для розрахованого значення, що майже у 5 разів менше та підтверджує використання даних номіналів. Вихідне відфільтроване значення буде зчитуватися із контакту OUT2.

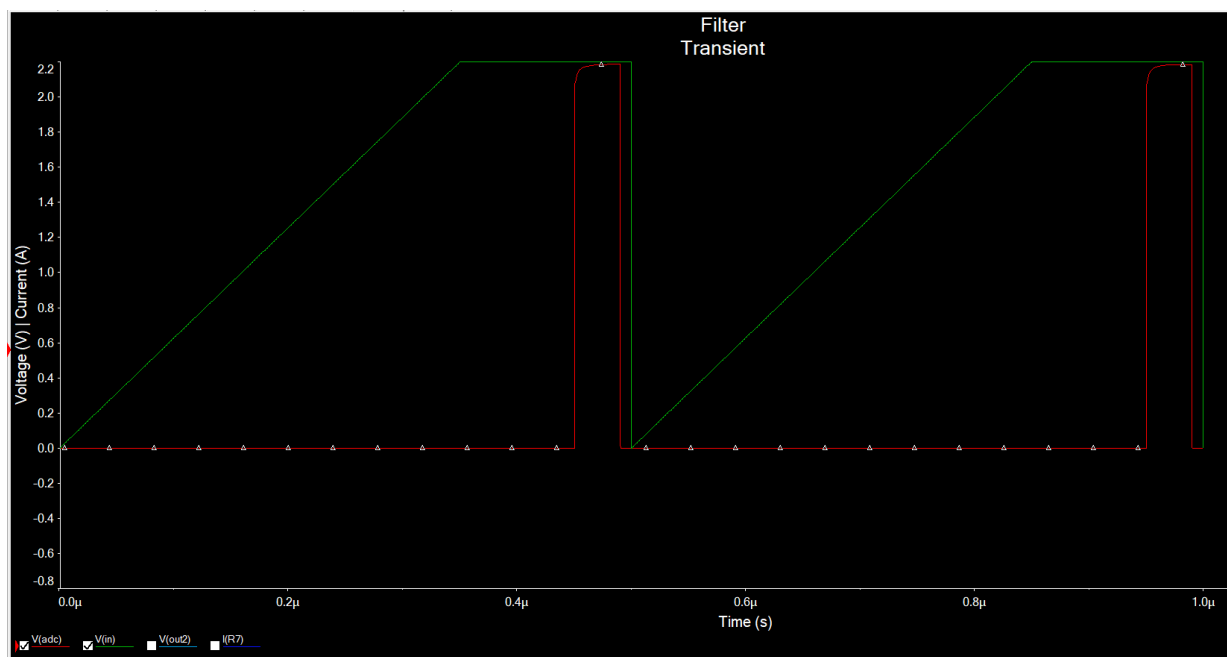


Рисунок 3.10 – Сигнал вибірки із вихідним сигналом сенсора

Далі, в якості симуляції роботи АЦП, а саме його перемикання під час вибірки та заряд конденсаторів, було створено блок після мітки OUT2. Перемикач S1 відповідає за внутрішній перемикач МК, який під час вибірки підключений на аналоговий контакт, тобто до виходу фільтра, а під час конверсії і стану очікування до опорного значення для порівняння, після чого, заряд на конденсаторах скидається стягуванням до землі, що відповідає другій позиції перемикача. Джерело опорного значення залежить від МК, воно заряджає конденсатори вибірки до певної напруги для порівняння значень, та типово складає 3.3 В. Оскільки в даному МК присутня зміна опорного значення, можливий варіант вибору джерела на рівні 2.5 В, що дасть змогу

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

використання майже всього діапазону. В якості алгоритму вибірки встановлено генератор V4, який через кожні 450 нс від початку наростаючого фронту тактового імпульсу на сенсор робить вибірку на 40 нс (див.рис.3.10) [43].

В якості опору перемикача було додано невелике значення через резистор R7, та ємності конденсаторів вибірки, значення якого зазначено в документації, конденсатор С6. Далі було проведено кінцеву симуляцію роботи блоку, а саме визначення впливу на вихідний сигнал давача ФНЧ та роботи АЦП. На рис.3.11 показано графік сигналі, кожному із яких притаманний певний колір: зелений – вхідний сигнал із давача, блакитний – сигнал після ФНЧ, червоний – значення на АЦП, фіолетовий – струм через перемикач АЦП.

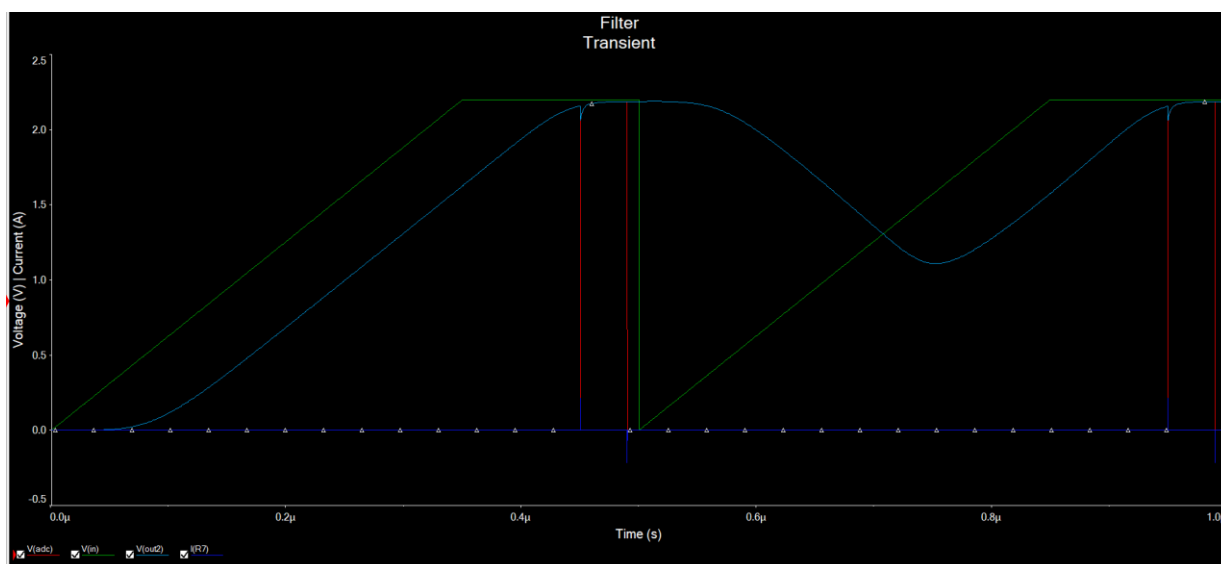


Рисунок 3.11 – Діаграма сигналів симуляції блоку обробки сенсора

Як можна спостерігати, під час наростання сигналу на сенсорі від 0 до 2.2 В вихідне значення після фільтра також поступово вирівнюється до вказаного значення із певним часовим зсувом. Попри те, що даний зсув впливає на вихідний сигнал, а саме здвиг фази, ми маємо можливість знімати вибірку навіть після закінчення тактового імпульсу, оскільки фільтр продовжує певний час видавати потрібне нам значення, що дозволяє розпочати вибірку навіть на рівні 480 нс, при цьому не буде захоплено сигнал із наступного пікселя через затримку. Під час вибірки вихідний сигнал просідає через початковий малий імпеданс від конденсаторів АЦП, що допомагає

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

підтримувати на відповідному рівні буферний конденсатор. Також підтвердженням заряду/розряду конденсатора вибірки є піковий струм на внутрішньому опорі перемикача, який в такому випадку показано через резистор R7. Тепер варто перевірити чи достатньої ємності обраний буферний конденсатор, для цього потрібно перевірити відхилення напруги при вибірці та значення до її початку, що продемонстровано на рис.3.12 за допомогою двох маркерів.

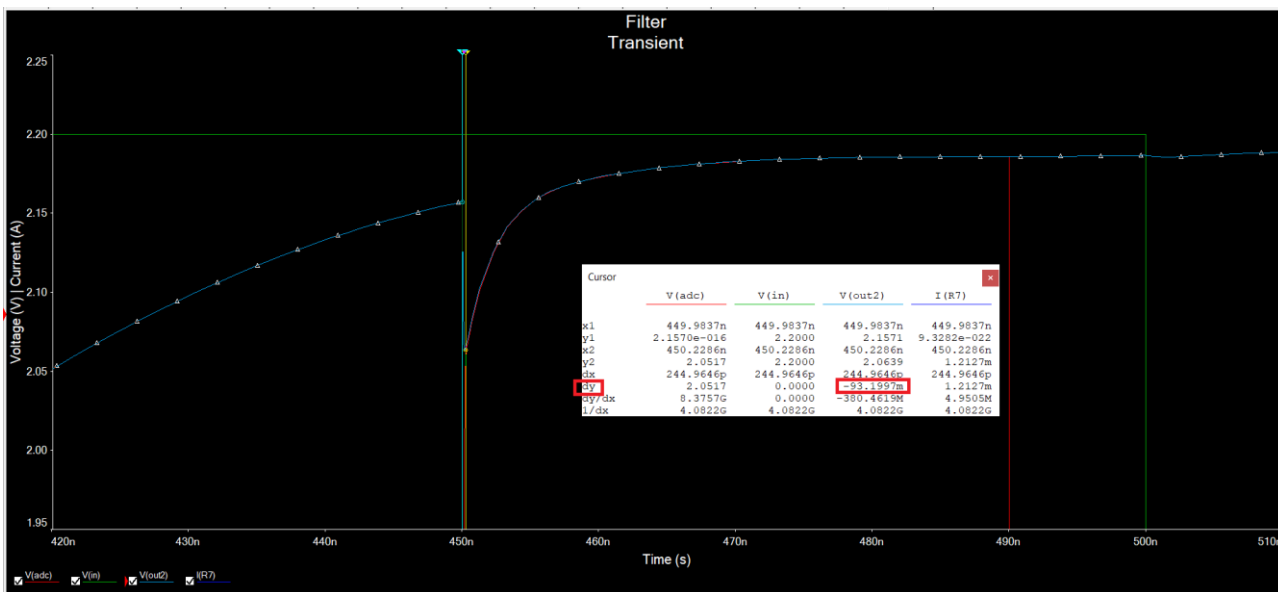


Рисунок 3.12 – Перевірка зміни напруги при вибірці

Використовуючи формулу (2) можна перевірити відсоткову зміну ідеального значення відносно просадки напруги в піку вибірки.

$$\delta_{ACQ} = \left| \frac{\Delta U_{OUT}}{U_{max}} \right| \cdot 100\% \quad (2)$$

де δ_{ACQ} - зсув при початку вибірки, %; ΔU_{OUT} – напруга зсуву, В; U_{max} – максимальна напруга сигналу, В.

Отримане значення рівне 4.2%, що підтверджує теоретичне допустиме значення яке має бути меншим ніж 5%. Можливе підвищення даного номіналу для зменшення початкової напруги зсуву, але це може повпливати на роботу ОП, оскільки він буде працювати із більшою вихідною ємністю, що може призвести навіть до виходу із ладу компонента. В такому випадку було розглянуто найгірший варіант вхідного сигналу, який для реальної моделі сенсора є майже неможливим, що підтверджує роботу схеми у більш м'якому

режимі роботи. Далі буде наведено графік АЧХ та ФЧХ фільтра, що підтверджує його коректну роботу (див.рис.3.13).

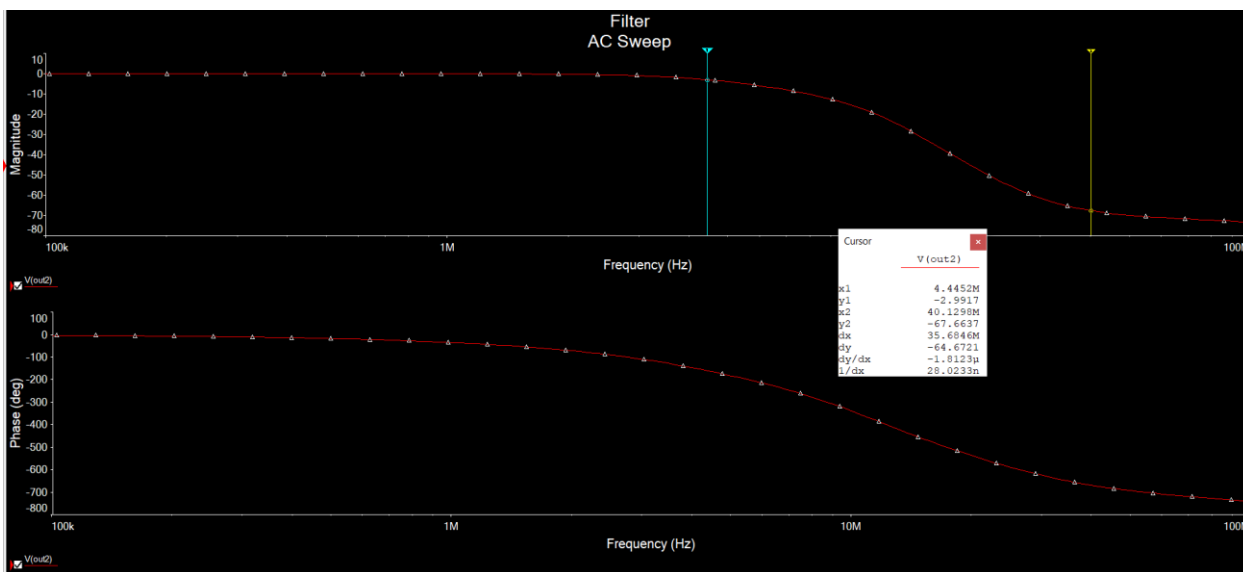


Рисунок 3.13 – АЧХ та ФЧХ ФНЧ 4-го порядку

Звісно отриманий результат не ідеальний, та має менш полого значення з збільшення частоти ніж для фільтра 4-го порядку, але даний результат є найкращий із врахуванням найменшого викривлення вихідного сигналу. Отримана частота зрізу становить приблизно 4.4 МГц, що являється оптимальним для наших задач.

Отже, блок сенсора та фільтра відповідає поставленим задачам, а саме: виконує функцію ФНЧ 4-го порядку при мінімальному викривленні вихідного сигналу, навіть під час роботи АЦП. Після завершення симуляції можливий перехід до затвердження даного вузла на трасування.

3.1.2 Інтерфейси комунікації

Блок інтерфейсів, який заснований на простому конверторі UART-RS232 був доданий в якості можливої подальшої реалізації комунікації між іншими модулями системи на прохання замовника (див.рис.3.14). В якості ліній зв'язку обрано один апаратний UART та один програмний, для можливості різної реалізації подальшого алгоритму. Протокол RS232 був обраний через його доступність та простоту, який в такому випадку реалізований через

урахування підвищеної частоти тактування, внаслідок чого доступна можливість швидкого виконання алгоритму, по зрівнянню з стандартним сімейством F4. Також не маловажливим є наявність високошвидкісного АЦП, який має виконувати від 2 мегавибірок на секунду із високою роздільною здатністю оцифрування. Оскільки у МК та оптичного сенсора різні логічні рівні, а саме 3.3 В та 5 В відповідно, для можливості захисту та точності спрацювання цифрових сигналів встановлено спеціальні буфери які виконують функцію конверторів логічних рівнів. Також показаний «символ листа» який посилається на наступний аркуш принципової схеми де наведений блок управління форсунками, який буде розглядатися далі.

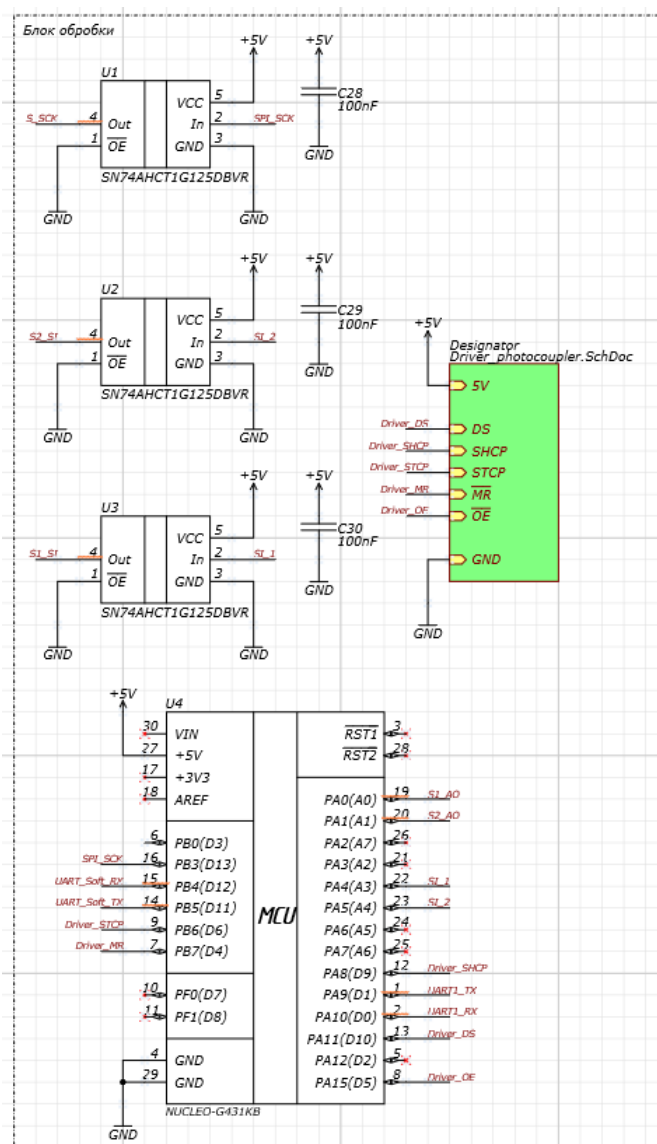


Рисунок 3.15 – Блок обробки даних

									Арк.
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

3.1.4 Управління блоком форсунок

Даний блок являється найбільшим, що пов'язано із керування 24-а клапанами форсунок, драйвер яких розміщений на іншій платі, яка входить у систему фотосепаратора (див.рис.3.4). Для управління 24-а цифровими лініями було задіяно три здвигові регістри DD1, DD2 та DD6, підключені послідовно для утворення одного 24-х бітного регістру. Дане рішення дозволяє залучити лише 3 цифрових лінії МК, за допомогою яких послідовна передача даних конвертується у паралельний формат, що є своєрідним розширювачем кількості цифрових портів виводу. Оскільки плата драйвера форсунок розрахована на вхідний цифровий сигнал 12 В було додано відповідний буфер на кожен лінію, які об'єднані у суцільному корпусі, в кожному із яких присутньо 7 елементів та позначені як DD3-DD5, DD7. Дані компоненти виступають у ролі конверторів логічних рівнів. Аналізуючи плату драйвера форсунок було визначено, що на ній присутній ряд оптопар, які виступають в якості гальванічної розв'язки, тому додатково дану опцію не було додано.

Важливим фактором є встановлення відповідних буферних конденсаторів поряд із кожною мікросхемою які запобігають поширенню пульсацій на загальну лінію в момент перемикання та мають відповідний обсяг заряду для підтримки моментальних стрибків струму. Також було додано самовідновлювальний запобіжник PTC1, який у випадку замикання на лінії захистить плату драйвера форсунок. Діод D1 виконує функцію захисту можливого переполюсування.

3.3 Підбір компонентної бази

Оскільки основні характеристики були описані в попередньому підрозділі, тут буде більш детально розглянуті основні складові та їх характеристики які впливають на побудову модуля.

					РЕ01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

3.1.5 Оптичний сенсор TSL1301

Через те, що даний проєкт був розроблений на прохання замовника, було надано деяку компонентну базу яка включає монохромні лінійні оптичні давачі від компанії TAOS маркування TSL1301 (див.рис.3.16). Основні характеристики такі [39]:

- Кількість пікселів 102×1 .
- Розширення 300 DPI.
- Частота тактування до 2 МГц.
- Спектр роботи 400 - 1000 нм.
- Струм споживання 2.5 мА, при напрузі 5 В.
- Час інтеграції від 42.5 мкс до 100 мс.
- Корпус подібний до DIP8.
- Присутній аналог TSL1401.



Рисунок 3.16 – Оптичний лінійний давач TSL1301 [45]

3.1.6 Операційний підсилювач MC33079

Було підібрано доступний на українському ринку модель ОП від компанії Texas Instruments моделі MC33079 (див.рис.3.17). Вважаючи, що найкращим за ціною була саме дана модель, було вирішено використати всі 4-и елементи

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		43

ОП для фільтра, замість запланованих 2-х. Також важливою характеристикою при виборі була перевірена можливість компонента при напрузі 5 В коректно відпрацьовувати на виході значення напруги 0.3 В – 2.2 В. Основні характеристики компонента [46]:

- Смуга пропускання 15 МГц, при одиничному коефіцієнті посилені розімкнутого контуру 7 МГц.
- Напруга живлення до ± 15 В.
- Рівень вихідного шуму 4.5 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$.
- Швидкість наростання вихідного сигналу 7 В/мкс.
- Рівень спотворень 0.002%.
- Корпус SO-14.
- Наявність 4-х елементів.



Рисунок 3.17 – Операційний підсилювач MC33079 [47]

3.1.7 Nucleo-STM32G431

В якості основного центру обробки алгоритму було однозначно вибрано мікроконтролери STM32 від компанії STMicroelectronics. Оскільки була

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4.4

необхідність високої продуктивності для обробки інформації та високошвидкісний АЦП який здатний обробляти аналоговий сигнал на частоті 2 МГц, було зупинено пошук на сімействі G4, яке відповідає всім необхідним критеріям. При виборі конкретного МК із достатньою кількістю пам'яті та портів вводу/виводу було обрано STM32G431KB, яка доступна у вигляді плати розробки Nucleo (див.рис.3.18). Більш детальні характеристики наведені далі [48, 49]:

- Частота тактування 170 МГц.
- Продуктивність 213 DMIPS.
- Ядро ARM Cortex-M4.
- Високий рівень інтеграції.
- SAR АЦП 12-бітний.
- Частота дискретизації 4 MSPS.
- Час вибірки АЦП від 41 нс.
- Модульне виконання.
- Наявність середовища для відлагодження.

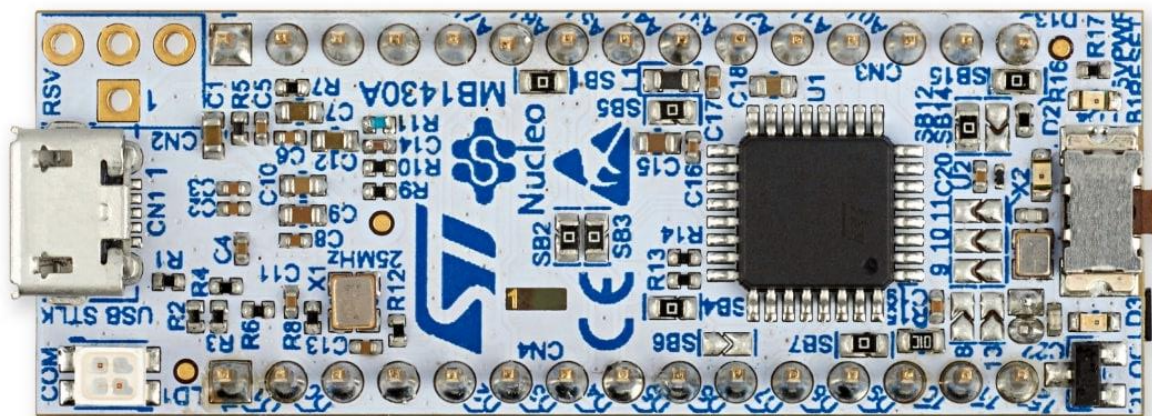


Рисунок 3.18 – Плата розробки Nucleo-STM32G431KB [48]

3.1.8 Буфери

В більшості випадків, буфери відповідають за своєрідне підвищення струму вхідного сигналу, але в такому випадку було використано їх другу важливу характеристику, а саме можливість працювати в широкому діапазоні

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

напруг, що було використано для реалізації конвертора логічних рівнів. Як елемент комунікації між напругою 3.3 В -> 5 В було обрано SN74АНСТ1G125 від компанії Texas Instruments, який відповідає наступним характеристикам [50, 51]:

- Сумісність із TTL та CMOS логікою.
- Напруга роботи 4.5 В - 5.5 В.
- Кількість каналів: 1.
- Швидкість наростання 20 нс/В.
- Мінімальна вхідна напруга для високого лог. рівня 2 В.
- Вихідний струм ± 8 мА.
- Можливість увімкнення/вимкнення.
- Корпус SOT-23-5 (див.рис.3.19).

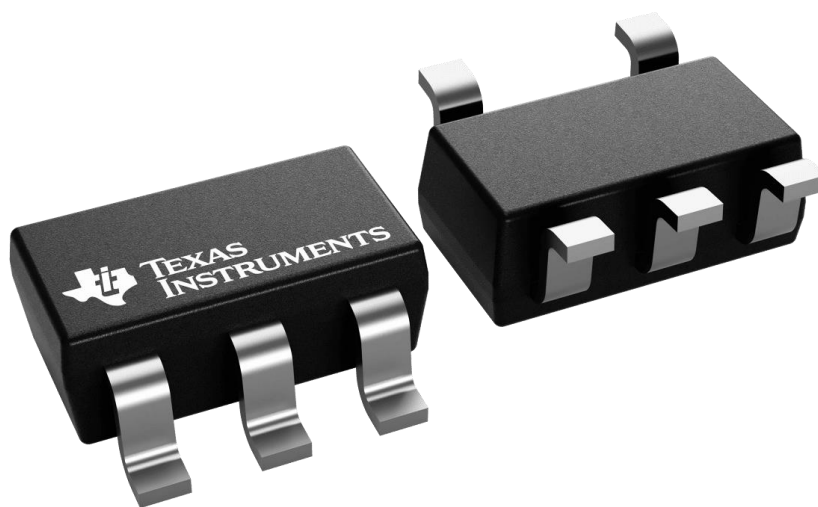


Рисунок 3.19 – Корпус SOT-23-5 [51]

В якості конвертора рівні між напругою із здвигових регістрів та платою драйвера форсунок використано збірку Дарлінгтона від тієї ж компанії, маркування ULN2003, за допомогою яких буде можливість конвертувати лог. рівень 5 В -> 12 В. Дана збірка представляє до 7 елементів в одному корпусі, та має наступні основні характеристики [52, 53]:

- Сумісність із TTL та CMOS логікою.

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

- Кількість збірок: 7.
- Час затримки 250 нс.
- Максимальна напруга перемикання до 50 В.
- Максимальний струм до 0.5 А.
- Загальний струм до 2.5 А.
- Корпус SOIC-16 (див.рис.3.20).

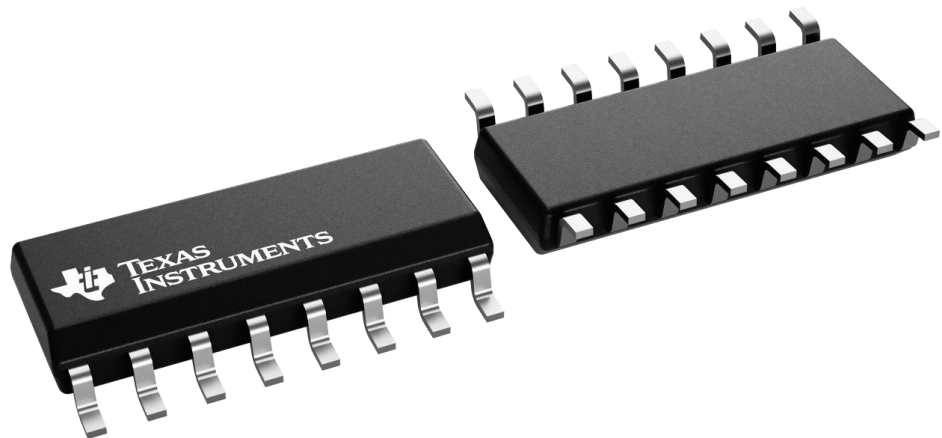


Рисунок 3.20 – Корпус SOIC-16 [52]

Драйвер протоколу UART-RS232 MAX3232

Як конвертор рівні між напругою зі здвигових регістрів та платою драйвера форсунок використано збірку Дарлінгтона від тієї ж компанії, маркування ULN2003, за допомогою яких буде можливість конвертувати лог. рівень 5 В -> 12 В. Дана збірка представляє до 7 елементів в одному корпусі, та має наступні основні характеристики [52, 53]:

- Кількість драйверів приймача та передавача: 2.
- Швидкість передачі даних до 250 кбіт/с.
- Напруга роботи 3 В або 5 В.
- Струм живлення 300 мкА.
- Корпус SOIC-16 (див.рис.3.20).

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		47

3.1.9 Здвиговий регист

Для можливості економії портів мікроконтролера було вирішено використовувати 8-ми розрядний здвиговий регістр маркування SN74HC595 (див.рис.3.22). Оскільки потрібно було керувати 24-а цифровими входами, було використано 3 даних мікросхеми у послідовному з'єднанні для формування цілісного 24-х розрядного регістру. Основні характеристики наведені далі [56, 57]:

- 8-ми бітний послідовно-паралельний конвертор.
- Напруга роботи 2 В - 6 В.
- Мінімальна вхідна напруга для високого лог. рівня 3.15 В.
- Вихідний струм ± 6 мА.
- Частота роботи до 25 МГц.
- Корпус SOIC-16 (див.рис.3.20).

3.1.10 Конектори

В даному проєкті було використано два типи конектори, а саме DB9 для передачі даних через протокол RS232, які являються стандартизовані (див.рис.3.21) та IDC конектори із вертикальними застібками, які використовуються і різних апаратах де присутні значні вібрації (див.рис.3.22). Також попередньо згадані конектори були використані у станку фотосепаратора, звідки були взяті інші модулі системи, що спрощує пошук відповідної частини та шлейфа.

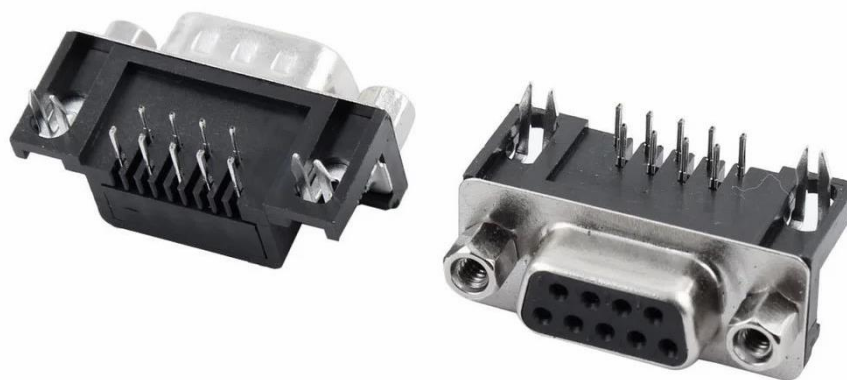


Рисунок 3.21 – Конектор DB9 кутовий на плату [58]

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		48

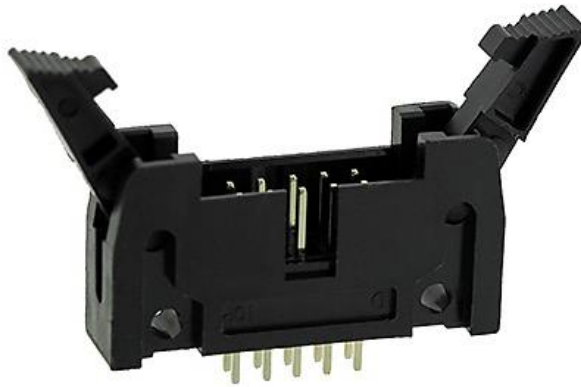


Рисунок 3.22 – IDC конектор із вертикальними зажимами [59]

3.1.11 Інші компоненти

Інші компоненти, такі як резистори та конденсатори, не потребують детального опису, хоча поширений параметр на всі ці компоненти являється використання корпусу 0603 для SMT монтажу.

Єдиною особливістю є використання резисторів із похибкою 1% і нижче, це потрібно для меншого відхилення параметрів при використанні їх для ФНЧ. Конденсатори варто обирати із діелектриком X5R або X7R через кращі їх характеристики ємності при зміні напруги, особливо кращому даному параметру відповідає другий варіант. Для конденсаторів низької ємності, на рівні від одиниць до сотень пФ, варто застосувати діелектрик G0P або NP0.

3.4 Трасування друкованої плати

Після завершення розробки електричної принципової схеми, її симуляції та затвердження, наступним етапом є трасування друкованої плати в програмному середовищі Altium Designer, де попередньо була створена схема та бібліотека під використані компоненти.

Для розрахунків було визначено мінімальну допустиму ширину провідників для певних ланцюгів схеми з урахуванням величини струму який через них буде протікати. В якості онлайн калькулятора для розрахунків було використано можливості сайту з виготовлення плат PCBWAY. Як вхідні дані було введено: товщина міді, струм який буде протікати, температура

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		49

навколишнього середовища та величина її зміни, довжина провідника; приклад заповнення полів та отриманий результат показано на рис.3.23.

Parameter	Internal Layers	External Layers in Air
Current (I)	0.01 A	0.01 A
Ambient Temperature	25 °C	25 °C
Thickness (t)	1 oz/ft ²	1 oz/ft ²
Trace Length	190 mm	190 mm
Temperature Rise (TRise)	10 °C	10 °C
Minimum Trace Width	0.05363395480 mil	0.0005236724796 mm
Required Trace Width (W)	0.05363395480 mil	0.0005236724796 mm
Resistance	70.38441208 Ω	183.1008137 Ω
Voltage Drop	0.7038441208 V	1.831008137 V
Power Loss	0.007038441208 W	0.01831008137 W

Рисунок 3.23 – Шаблон заповнення даних для обрахунку ширини провідника [60]

До розрахунку буде включено такі ланцюги: загальні сигнальні, живлення 5 В та 12 В. Враховуючи товщину міді 1 унцію та максимальну довжину 190 мм, при зміні температури на 10 °С, отримані дані було занесено до Таб.1.

Таблиця 1 – Ланцюги схеми із їх основними параметрами

Призначення ланцюга	W, мм	I, А
Сигнальний	0.0005	0.01
+5 В	0.033	0.2
+12 В	0.045	0.25

Оскільки вищенаведені параметри є мінімальним значенням ширини провідника для протікання відповідного струму ми маємо можливість збільшити даний параметр до комфортного нам значення, яке при цьому має

бути більшим ніж мінімальна можлива ширина зазначена виробником. В якості постачальника друкованих плат було обрано сервіс JLCPCB, який надає можливість виготовлення ДП із наступними можливостями [61]:

1. Матеріал ламінату: FR-4 (Tg 135 / Tg140 / Tg155 / Tg170), Aluminum, Copper core, Rogers / PTFE Teflon.
2. Фінішне покриття: HASL (свинець / без свинцю), ENIG, OSP (лише для плат із мідною основою).
3. Мінімальний розмір ДП: 5x5 мм.
4. Максимальний розмір ДП: 400x500 мм.
5. Кількість шарів: 1 – 20 шарів.
6. Товщина ламінату: 0.4 – 2.5 мм (0,4/0,6/0,8/1,0/1,2/1,6/2,0 мм (2,5 мм доступно лише з 12 шарами або більше).
7. Можлива товщина міді для зовнішніх шарів: 1, 2 oz (35, 70 мкм).
8. Можлива товщина міді для внутрішніх шарів: 0.5, 1, 2 oz (18, 35, 70 мкм).
9. Мінімальна ширина провідника (1 - 2 шари): 0.127 мм.
10. Інтервали між друкованими елементами:
 - a. Провідник – провідник: 0.127 мм
 - b. Провідник – пад: 0.2 мм
 - c. Отвір – отвір (одна мережа): 0.254
 - d. Отвір – отвір (різні мережі): 0.5
11. Мінімальний гарантійний поясок: 0.13 мм.
12. Допустимий розмір отвору: 0.3 – 6.3 мм.
13. Мінімальна товщина лінії шовкографії: 0.15 мм.
14. Мінімальна відстань від КМ до захисної маски: 0.038 мм.

Отже, аналізуючи отримані дані по можливостях ми отримуємо мінімальну ширину доріжки 0.127 мм. Для кращих фізичних властивостей провідників, меншому падінню напруги та естетичності було обрано значення 0.5 мм для всіх провідників.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		51

Вважаючи, що даний прототип був виготовлений на замовлення під певний фотосепаратор, було використано надані габарити плати із кріпленнями для гвинтів, що було надано в ТЗ (див.рис.3.24).

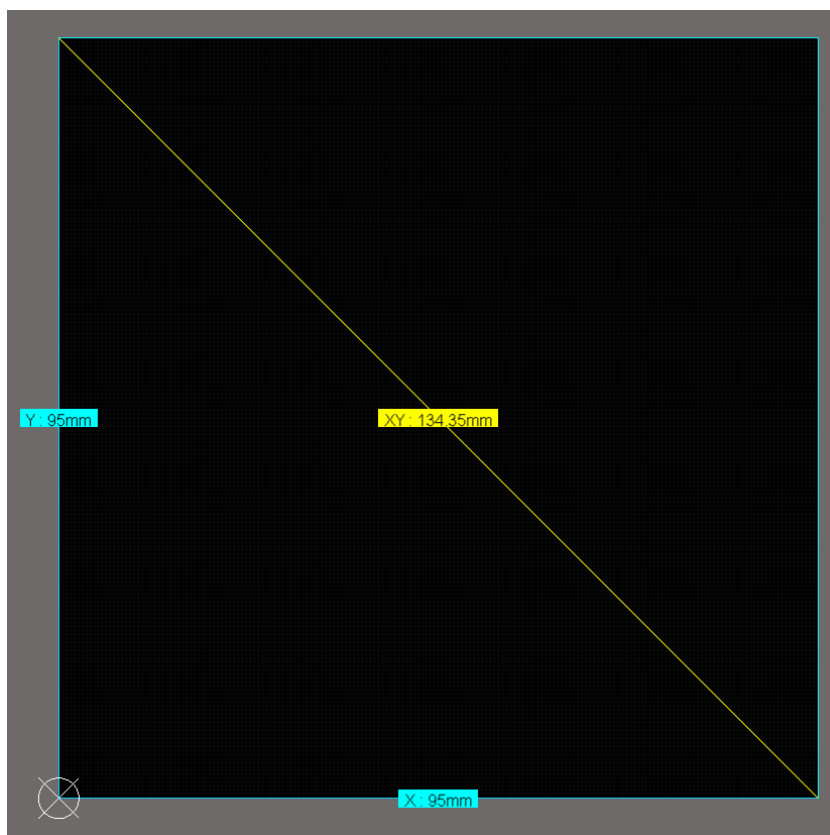


Рисунок 3.24 – Задані розміри основи для ДП

Під час трасування ДП потрібно використовувати відповідні методи дизайну, через те, що у даному проєкті використовуються аналогові вузли, цифрові та із підвищеною напругою. Основні правила які були використані при даній розробці перераховано далі.

1. Перехресні перешкоди – однією із найпоширеніших проблем є вплив одного сигналу на інших, у більшості випадків даний ефект проявляється через близьке розміщення провідників або їх перетинання на різних шарах ДП, без розділення «земляним» шаром між ними. Для розв'язання даної проблеми потрібно зменшити вплив полів провідників один на інший, що можливо через їх замкнення на спільну шину. Для прикладу розділу двох цифрових сигналів наведено рис.3.25 [62].

					PE01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

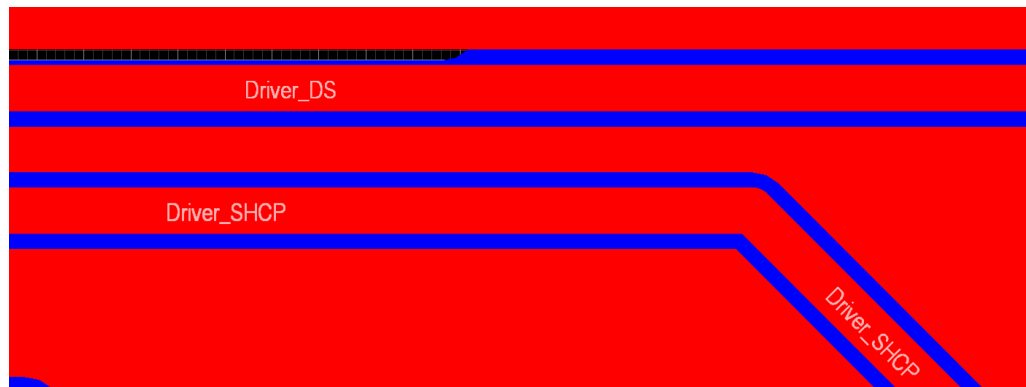
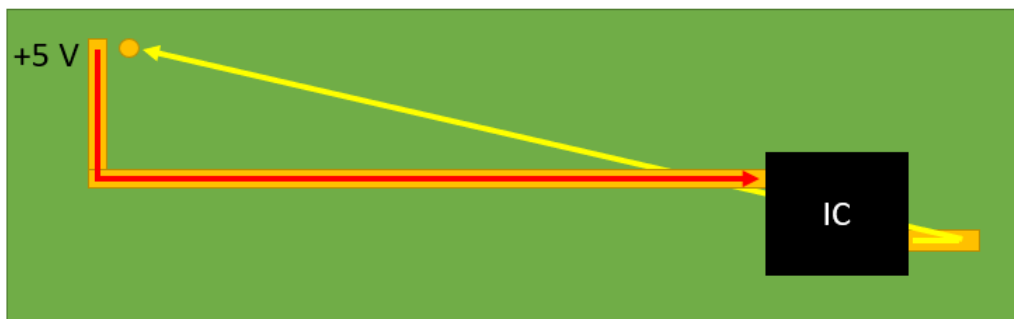


Рисунок 3.25 – Приклад захисту від перехресних перешкод

2. Зворотні струми – однією із важливих правил в дизайні ДП є прорахування протікання всіх струмів, як прямих, так і зворотних. Важливо зазначити, що для постійних прямих струмів – зворотних струм прямує у напрямку найменшого опору, що може не збігатися із прокладанням основного провідника прямого протікання (див.рис.3.26); для прямих змінних струмів – протікання зворотних направлено по найменшому імпедансу, що повторює шлях прямого протікання (див.рис.3.27). Даний фактор важливих для розділення «землі», який надалі буде розглянутий [63].

Top view



Side view

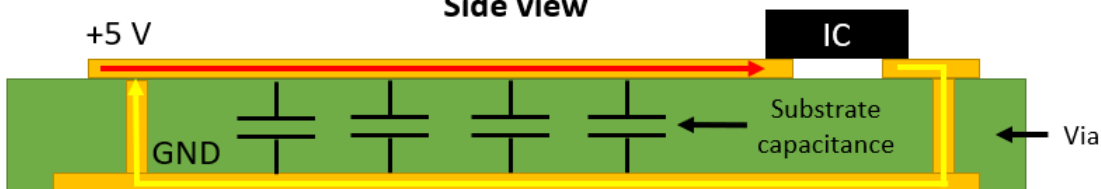


Рисунок 3.25 – Протікання постійних струмів [63]

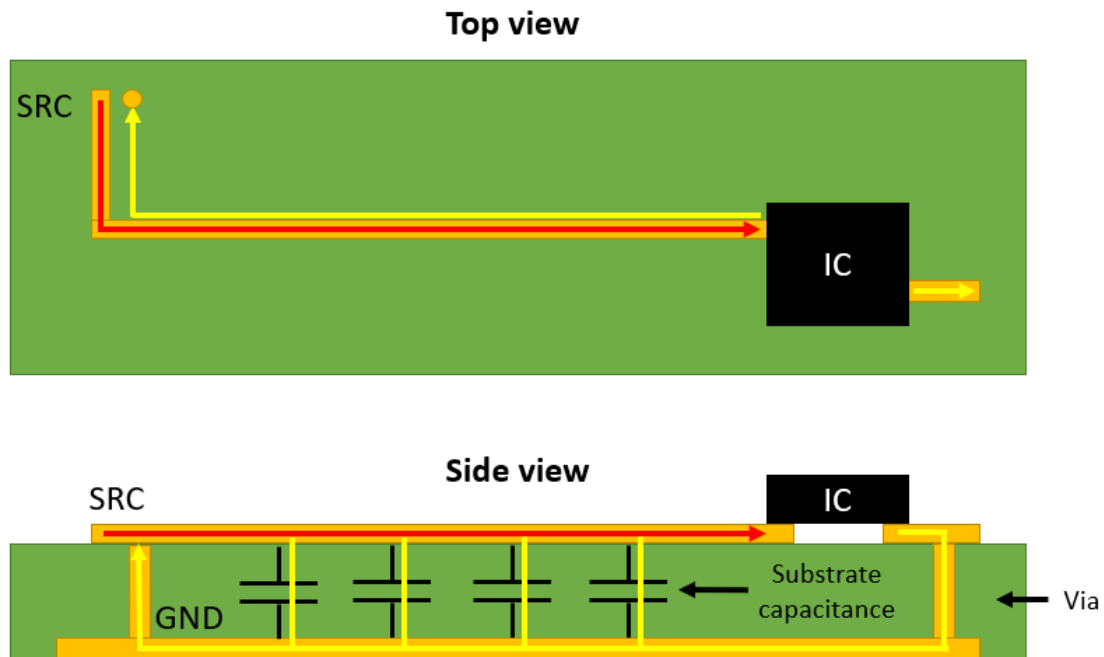


Рисунок 3.26 – Протікання змінних струмів [63]

3. Розділення «землі» – при поєднанні в одній розробці двох різних за сигналом структур: аналогову та цифрову; важливо дотримуватися їх розміщення на певній відстані, це правило стосується і спільної шини. Попри те, що вона для цифрового та аналогового сигналу, потрібно забезпечити протікання зворотних струмів по землі без перехрещення цих різних типів сигналів, єдине місце з'єднання – кінцевий вузол. Реалізувати дану техніку можливо із розділенням землі на певні «острови» за допомогою яких ми наочно будемо бачити, де саме протікає зворотний струм (див.рис.3.27) [64].

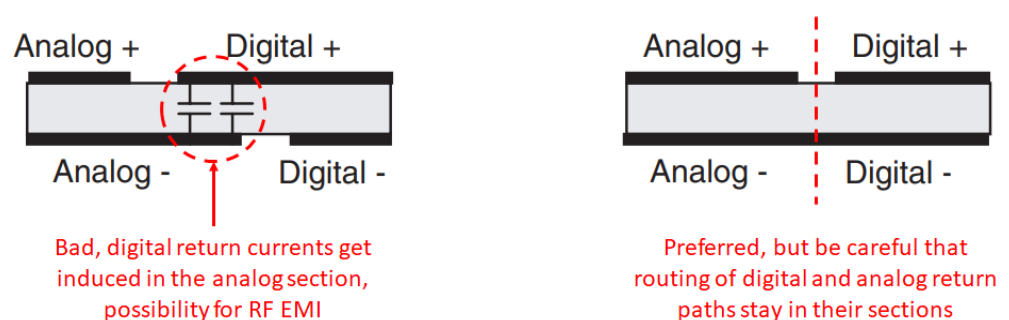


Рисунок 3.27 – Розміщення сигналів відносно відповідної «землі» [64]

4. Топологія трасування живлення – на цей час існує велика кількість різних топологій трасування провідників які відповідають під певні задачі, але найкращим методом є тип «зірка», яка включає мінімальне протікання струмів по одній шині від різних блоків схеми, об'єднуючи все лише в один вузол

(див.рис.3.28). Даний метод корисний тим, що навіть якщо в певному блоці протікають великі струми це мінімально буде впливати на інший блок, навіть при використанні одного джерела живлення [65].

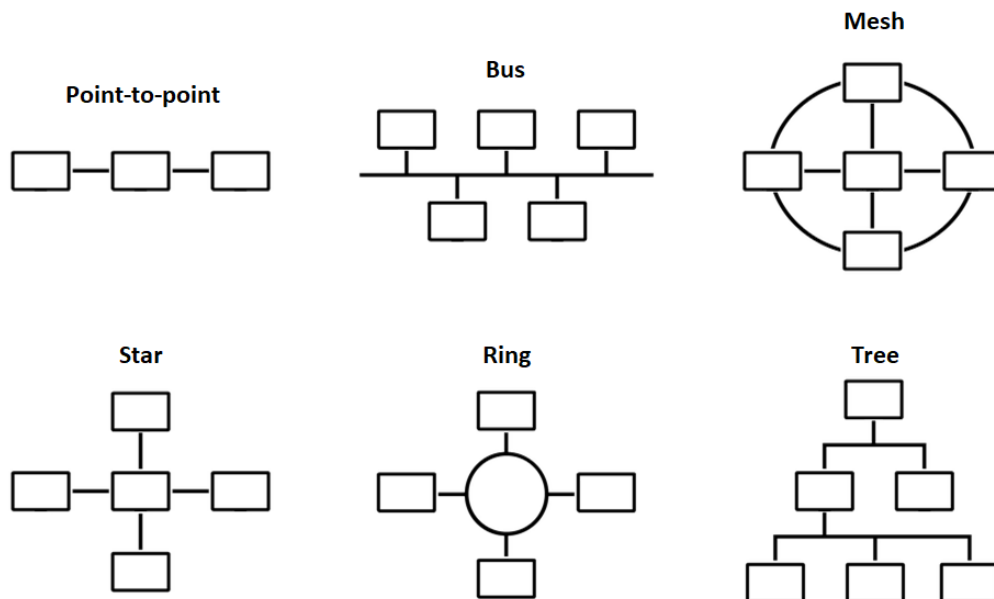


Рисунок 3.28 – Топології маршрутизації плати [65]

Із урахування всіх вищенаведених правил та використання базових принципів трасування було розроблено 2-х шарову ДП. Верхній шар показано на рис.3.29, нижні на рис.3.30.

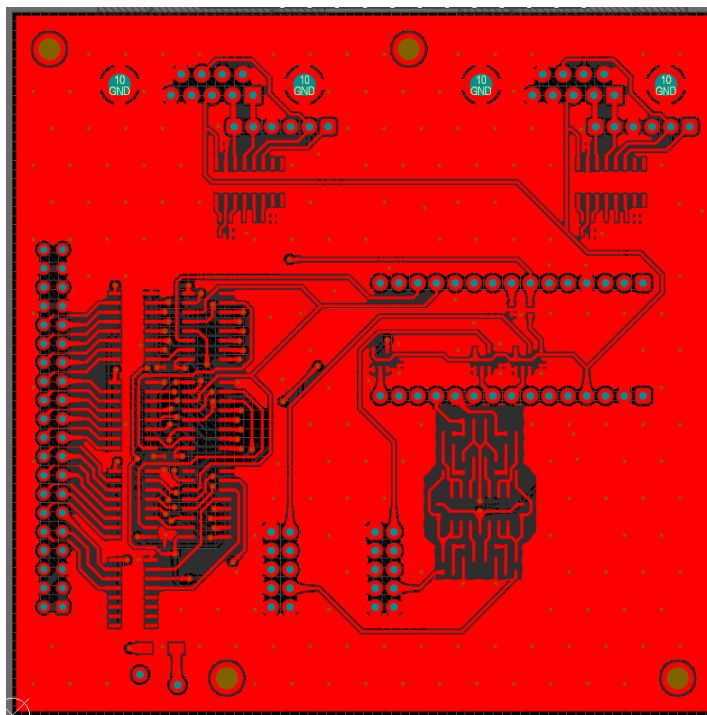


Рисунок 3.29 – Верхній шар трасування

Отже, під час процесу повної наскрізної розробки, а саме: розробка структурної схеми, створення та симуляція принципової схеми, підбір компонентної бази та розробка друкованої плати; було виконано всі необхідні етапи для перевірки та розрахунку розробки, яка була передана на виробництво для створення ДП із подальшим власним монтажем та тестування.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

4 АЛГОРИТМ РОБОТИ

В даному розділі буде описано алгоритм роботи модуля, що включає послідовність дій які виконує код написаний під МК STM32. В процесі розробки ПЗ було перевірено декілька методів найшвидшої роботи із використанням різного методу обробки. Блок схема основного алгоритму роботу показано на рис.4.1.

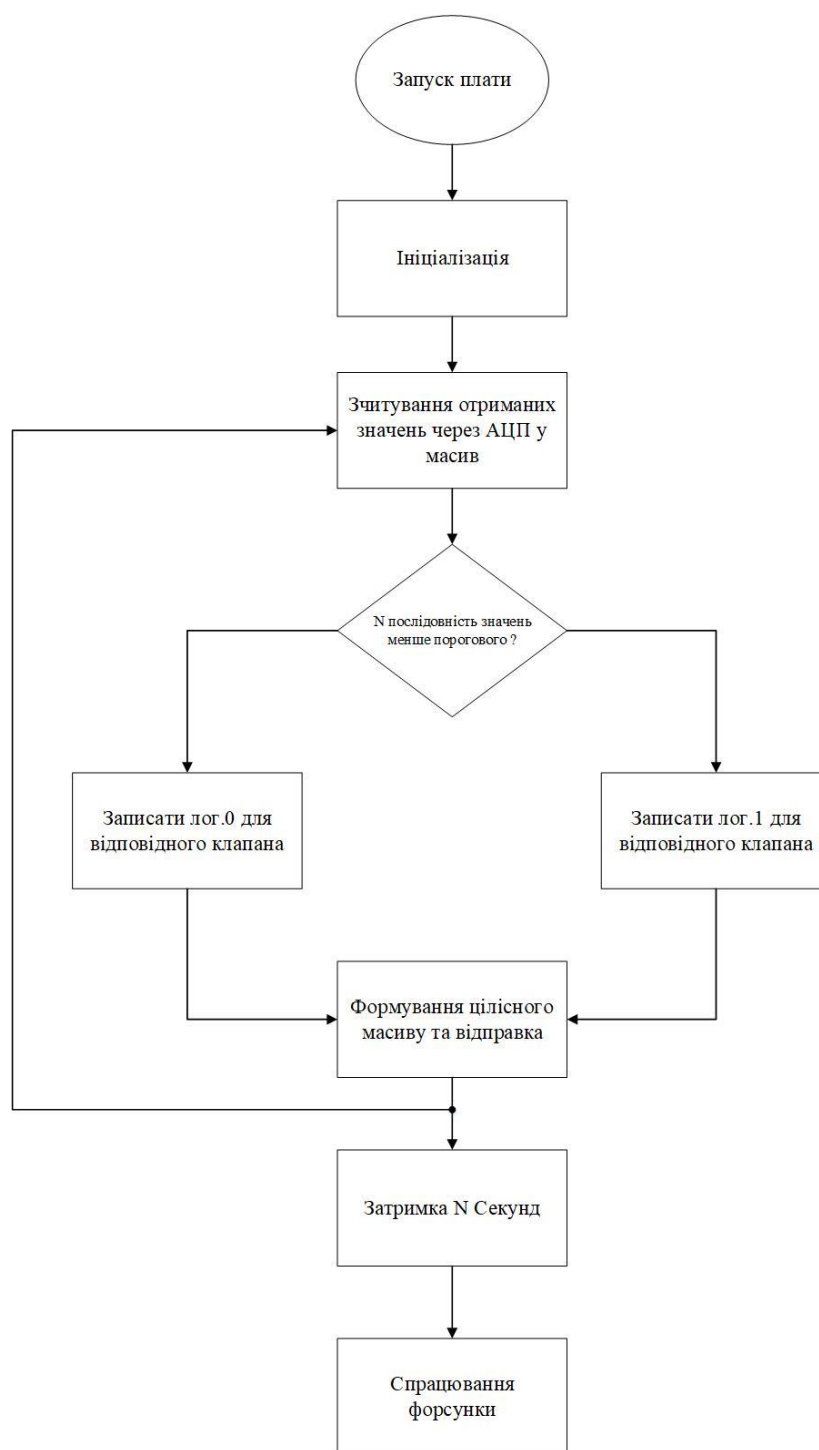


Рисунок 4.1 – Спрощена блок схема алгоритму роботи

Описуючи алгоритм роботи плати можна розділити на такі пункти: ініціалізація та запуск, зчитування даних оптичного сенсора, обробка отриманих даних, надсилання на зовнішній блок форсунок. Розглянемо більш детально кожний із них вищенаведених пунктів:

1. Ініціалізація та запуск – вони включають запуск плати, подаючи на неї живлення та проводячи ініціалізацію основних модулів в МК. Виконується налаштування двох таймерів, які відповідають за формування тактового імпульсу (TIM8) та сигналу «старту» (TIM2) які йдуть на сенсор TSL1301. Дані таймери сполучені, тобто коли ми вмикаємо таймер «старту» він автоматично вмикає таймер який відповідає за тактування давача. Також проведено налаштування АЦП (ADC1) у режимі одиничного захоплення по тригеру, в якості тригера виступає третій додатковий таймер (TIM1) який виконує вибірку після певного часу від початку наростаючого фронту імпульсу тактування, що дозволяє вирахувати рівно 350 нс, які вказані в документації для точного виміру аналогового значення. Для швидкої роботи та розвантаження ядра МК було використано прямий доступ до пам'яті (DMA1_Chanel1), який напряму відправляє дані з АЦП до вказаного місця пам'яті (масиву). І одним з основних, це було проведено налаштування цифрових портів, які будуть відповідати за керування сенсором та регістрами зсуву. Для точного виміру часу падіння і залучення моментального спрацювання було залучено додатковий таймер TIM7, який відправляє дані на форсунки через певний час після зчитування із фотосенсора. Частота на якій працює регістр зсуву залежить напряму від частоти роботи цифрових пінів, та була обмежена до 10 МГц.

2. Зчитування даних оптичного сенсора – даний блок являється повністю апаратно реалізований, внаслідок високої інтеграції в МК, що дозволяє збільшити швидкодію та використати час ядра на подальшу паралельну обробку. Для початку варто зазначити, що всі апаратні модулі для комунікації із сенсорами були синхронізовані та пов'язані, що своєю чергою спрощує запуск системи за допомогою керування лише одним таймером TIM2.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		59

Для кращої наочності роботи блоку зчитування наведено блок схему на рис. 4.2. Варто зазначити, що якщо запускається таймер TIM2 виконується подальша послідовність дій апаратно, без виконання алгоритму ядром, і в тому числі завершується також апаратно весь процес, по команді вимкнення таймера TIM2, а саме не виконується формування нового імпульсу запуску. Період який налаштований у TIM2 включає час на тактування всіх 102 пікселів сенсора та час інтеграції, який може бути поза часом на тактування, та як вказано у документації складати до 100 мс. Під час інтеграції поза часом тактування можливе виконання алгоритму обробки, але вважаючи, що тактування та зчитування реалізовані апаратно, то під час даного процесу ядром паралельно виконується обробка, після формування повністю заповненого масиву даними від АЦП.

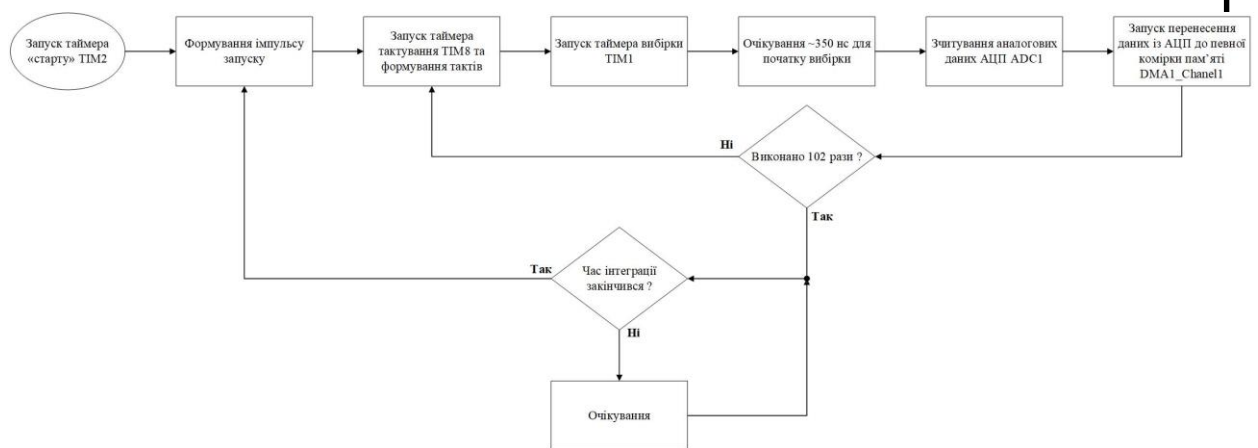


Рисунок 4.2 – Блок схема апаратної системи зчитування даних

3. Обробка отриманих даних – даний блок, на відміну від попереднього, виконаний програмно, тобто повністю виконується ядром МК. Прорахований та протестований час обробки дорівнює приблизно часу зчитування даних із сенсора, відповідно, ми виконуємо обробку даних із сенсора після повного його зчитування, в той час, як виконується обробка першого пакету, зчитується другий пакет, і так відповідно чергуються дії. Було протестовано варіант розширення тимчасового буфера до 6, цим самим, наскільки б довгою не була обробка даних, отримані вхідні значення, які ми зчитали, не будуть втрачені. Відповідно до того, що час падіння зернинки складає від сотень мікросекунд до одиниць мілісекунд, а час обробки

приблизно 75 мкс, ми однозначно встигаємо зчитати та обробити інформацію до моменту коли потрібно вибивати відповідний кадр.

Розглядаючи сам принцип обробки, він виконується коли апаратний модуль прямого доступу до пам'яті (DMA1_Channel1) встановлює відповідне переривання про завершення завантаження буфера, а саме про зчитування всіх комірок лінійного сенсора. Після чого, виконується сам процес обробки, який включає простий алгоритм: порівняння значення комірки із встановленим для вибивання, при наявності послідовності N комірок із меншим значенням, записувати в буфер на форсунки лог.1 на відповідний клапан, інакше ігнорувати. Виконання дії лише при умові послідовності пікселів зроблено для захисту від хибних спрацювань форсунок, оскільки розмір зерна гречки відповідає 3 мм, а після лінзи одна фоточутлива комірка відповідає 0.5 мм, тобто оптимальне значення $N = 3$. Звісно було пророблено випадок, коли зернинка потрапить між двома клапанами форсунок, в такому випадку послідовності для певного клапана може бути менше N , що призведе до неспрацювання клапана або відкриття лише одного, відповідно до чого зернинку може закрутити повітрям та направити в придатний продукт. Для цього враховується загальна послідовність, незалежно від приналежності до певного клапана, і якщо отриманий результат припадає між двома клапанами, то відкриваються відповідно два. Даний метод має свої недоліки, бо є шанс вибити придатний продукт, але основна концепція фотосепаратора це вибити по максимум непридатний продукт, саме тому деякі підприємці повторно проводять очищення вибитого продукту через те, що навіть у фабричних варіантах є шанс вибивання придатного зерна. Приклад обробки значень сенсора та конвертація їх для спрацювання форсунок показано на рис. 4.3, зі значенням $N = 3$, та 12 клапанів на сенсор. Як можна спостерігати, 1-й та 102-й піксель були вилучені, це пов'язано із тим, що вони йдуть майже завжди затінені та не використовуються для обробки. Першому та останньому клапану відповідає 10 комірок фотосенсора, а на всі інші рівно по 8 комірок,

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		61

це було зроблено для рівномірного розподілу, що відповідає розташуванню форсунок у фотосепараторі.

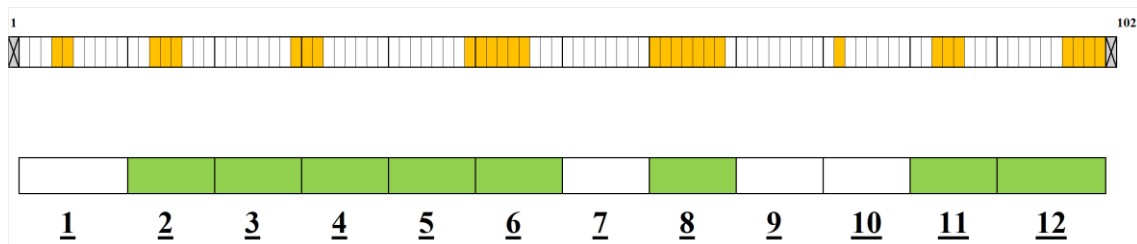


Рисунок 4.3 – Принцип обробки фотосенсора на відповідні клапани

4. Надсилання на зовнішній модуль форсунок – даний блок коду виконує передачу масиву форсунка на здвигові регістри, які своєю чергою переводять послідовні дані на паралельні порти виводу, де залучаються відповідні клапани. Час затримки від моменту зчитування до моменту спрацювання налаштовується через таймер TIM7. Частота роботи регістру зсуву складає до 25 МГц, що вкладає свої обмеження на час реакції, але вони нівелюються, вважаючи що час падіння зернинки значно більший.

Отже, після розгляду блок схеми відповідного алгоритму, який поділяється на ініціалізацію, обробку та відправку, було написано відповідні функції коду для виконання повталених завдань та протестовано за допомогою вбудованого тестування у програмному забезпеченні Cube IDE.

5 ПРОТИТИПУВАННЯ

Після проведення всіх вищенаведених етапів, які були описані в розділах, останній етап включає перевірку працездатності, а саме прототипування. Було проведено закупку всіх компонентів на українському ринку та замовлено друковану плату, після чого проведено процес монтажу із запайкою та отримано результат показаний на рис. 5.1.

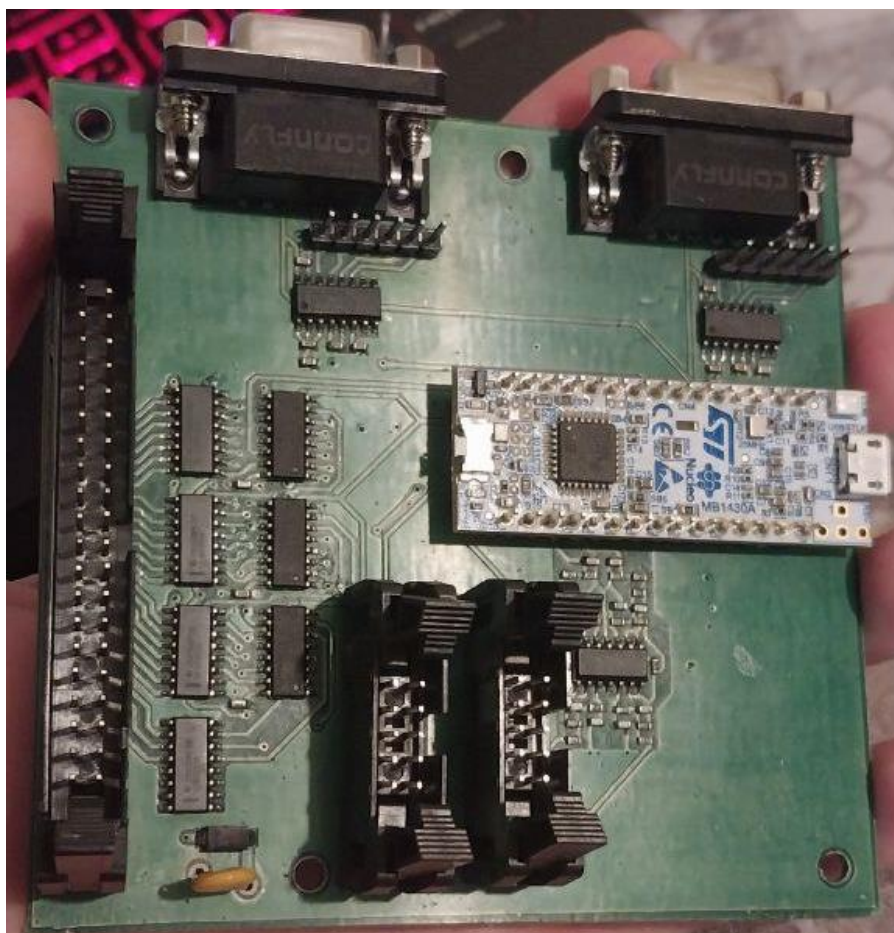


Рисунок 5.1 – Зібраний модуль оптичного сенсора

Даний модуль був протестований за допомогою інших плат фотосепаратора, під які виконувалась дана розробка. Також було перевірено відповідні сигнали на всіх портах, що підтвердило правильність трасування та розробку схемотехніки. В якості драйвера форсунок була підключена плата показана на рис. 5.2, яка складається із двох частин, а саме гальванічної розв'язки, силових ключів, живлення, та частин які виділяють значну кількість тепла при роботі та поміщені на радіатор, а саме діоди Шоттки для захисту MOSFET.

					РЕ01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

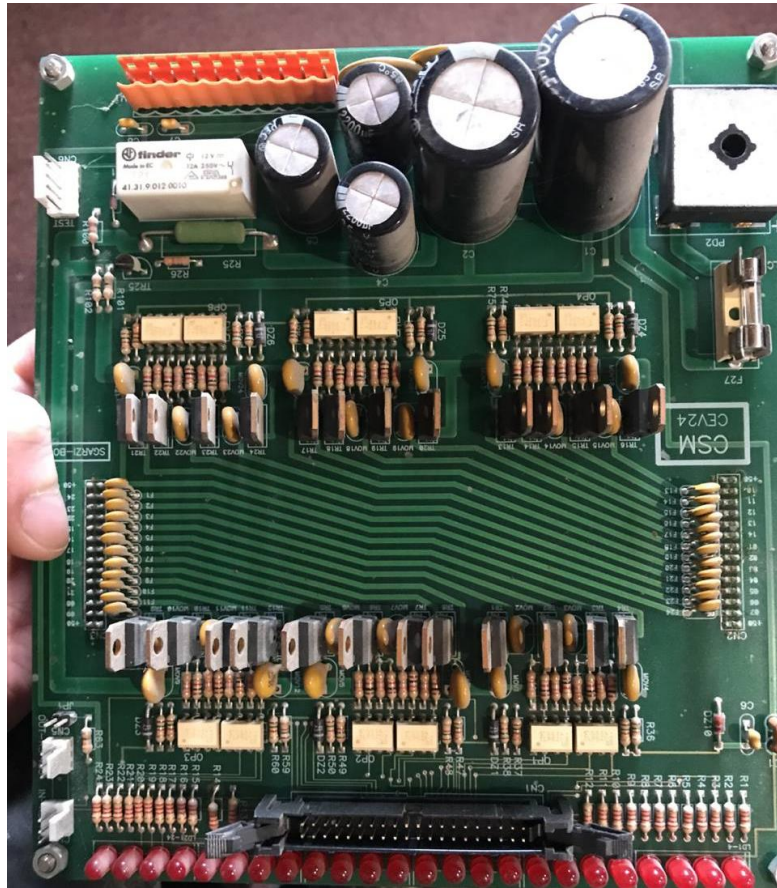


Рисунок 5.2 – Плата драйвера форсунок

Після експериментального налаштування всіх параметрів в кодї, які йдуть за замовчуванням для роботи алгоритму, було проведено очищення «зеленої» гречки, із вхідним продуктом який показано на рис. 5.3 та вихідним результатом наведеним на рис. 5.4.



Рисунок 5.3 – Неочищена «зелена» гречка

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64



Рисунок 5.4 – Очищений продукт

Отже, після повної збірки модуля оптичного сенсора який був розроблений під інтеграцію у певний фотосепартор, проведено налаштування відповідних коефіцієнтів та затримок, було отримано результат сортування, який повністю задовільняє вимоги замовника та відповідає всім посталеним критеріям.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		65

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломного проєкту розроблено оптичний модуль фотосепаратора. В процесі розробки виконано наступні кроки:

1. огляд етапів сортування агропродукції, бренди які представляють готові прилади та визначення актуальності даного напрямку;
2. розглянуто принцип роботи фотосепаратора, його структури, зовнішніх модулів та пошук оптичних модулів для власної інтеграції.
3. розроблено структурну та принципової схеми оптичного модуля фотосепаратора. Виконано симуляцію окремих вузлів, підібрано компонентну базу та розроблено друковану плату із подальшим її замовленням на виробництві.
4. Розроблена блок схема для програмного алгоритму під задіяний мікроконтролер та аналіз роботи.
5. Виконано прототипування із інтеграцією розробленого модуля у готовий станок та перевірено його на працездатність.

Після всіх вищенаведених етапів роботи було доведено до кінцевого результату прототип, який в свою чергу не має схемотехнічних помилок та в якому був відлагоджений алгоритм обробки. Після завершення реального тестування та ознайомлення із необхідними змінами для повної інтеграції, буде прийнято відповідні зміни у розробці та продовжено проєкт за бажанням замовника та власним інтересом. Отриманий результат сепарації повністю задовольняє поставлені задачі, а саме вибивання чорного зерна із «зеленої» гречки.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		66

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Фотосортувальне обладнання. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://pis.com.ua/fotoseparatory/>. Останній вхід 09.06.2024.
2. Технології роботи фотосепараторів. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://orientway.com.ua/tehnologiya>. Останній вхід 09.06.2024.
3. Зберігання зернових культур. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://trotec.com.ua/uk/blog/zberigannya-zernovyh-kultur/>. Останній вхід 09.06.2024.
4. Очищення зерна. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://ua.aeromeh.com.ua/article/grain-cleaning/>. Останній вхід 09.06.2024.
5. Первинне очищення зерна. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://agrosep mash.ua/uk/pervinne-ochishhennya-zerna/>. Останній вхід 09.06.2024.
6. Очищення зерна - важливий технологічний процес [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.cherk-consumer.gov.ua/novyny/3868-ochyshchennia-zerna-vazhlyvyi-tekhnologichnyi-protse>. Останній вхід 09.06.2024.
7. Colour sorter. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://en.wikipedia.org/wiki/Colour_sorter. Останній вхід 09.06.2024.
8. COLOR SORTER MARKET REPORT OVERVIEW. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/color-sorter-market-103726>. Останній вхід 09.06.2024.
9. Report Overview. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://grandviewresearch.com/industry-analysis/sorting-machines-market-report>. Останній вхід 09.06.2024.
10. Top 10 color sorter manufacturers. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.colorsorter-machine.com/Top-10-color-sorter-manufacturers-id3587039.html>. Останній вхід 09.06.2024.

					РЕ01.201113.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

11. 13 Color Sorter Manufacturers in 2024. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://us.metoree.com/categories/3842/>. Останній вхід 09.06.2024.
12. Фотосепаратор серії «CG2». [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://orientway.com.ua/machines/photo-separators-cg-series>. Останній вхід 09.06.2024.
13. Фотосепаратор серії «120M». [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://orientway.com.ua/machines/fotoseparatory-serii-m>. Останній вхід 09.06.2024.
14. SORTEX A MultiVision. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.buhlergroup.com/global/en/products/sortex_a_multivisionopticalsorter.html. Останній вхід 09.06.2024.
15. Компанія Bühler виводить на ринок недорогий оптичний сортувальник. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://elevatorist.com/spetsproekt/54-buhler-vyivel-na-ryinok-byudjetnyiy-opticheskiy-sortirovschik>. Останній вхід 09.06.2024.
16. Bühler WB optical sorter. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <http://m.sanitaryindustry.com/upload/201607/13/201607131612467961.pdf>. Останній вхід 09.06.2024.
17. Top color sorter manufacturers [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.machinemfg.com/top-color-sorter-manufacturers/>. Останній вхід 09.06.2024.
18. Evolution Series. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://satake-usa.com/product/evolution-the-revolution-in-optical-sorting/>. Останній вхід 09.06.2024.
19. FMSR-IR Sorter. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://satake-usa.com/product/fmsr-ir/>. Останній вхід 09.06.2024.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>68</i>

20. Best Color Sorter Manufacturers And Brands In India 2024. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://colorsorters.in/best-color-sorter-manufacturers/>. Останній вхід 09.06.2024.
21. TOMRA 3C. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.tomra.com/en/food/machines/tomra-3c>. Останній вхід 09.06.2024.
22. TOMRA 3C OPTICAL SORTER. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.kundert-ing.ch/view/data/8051/NEWS/Tomra_10.02.2021/Tomra_3C_en.pdf. Останній вхід 09.06.2024.
23. AMD® Mini Grain Color Sorter Machine. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.amdsortex.com/amd-mini-grain-color-sorter-machine_p99.html. Останній вхід 09.06.2024.
24. Color Sorting Machine 101. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <http://www.colorsorter-machine.com/Color-Sorting-Machine-101-id45888487.html>. Останній вхід 09.06.2024.
25. Four technical upgrades of sorting machine from monochrome-recognition to artificial intelligence [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.grotechcolorsorter.com/blog/four-technical-upgrades-of-sorting-machine-from-monochrome-recognition-to-artificial-intelligence_b96. Останній вхід 09.06.2024.
26. Технології роботи фотосепараторів. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://orientway.com.ua/tehnologiya>. Останній вхід 09.06.2024.
27. How does rice COLOR SORTER machine perform in working? [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://medium.com/@faithgreen/how-does-rice-color-sorter-machine-perform-in-working-a81aa165d45c>. Останній вхід 09.06.2024.
28. Original spares [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://venuscoloursorters.com/original-spares/>. Останній вхід 09.06.2024.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

29. What is a color sorter machine? [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://skysorter.com/color-sorter-machine-working-principles-benefits/>. Останній вхід 09.06.2024.

30. Seasonal Maintenance Tips for Sorters and Shakers. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.key.net/en/parts-services/service-advisor/seasonal-maintenance-tips-for-conveyors-and-sorters/>. Останній вхід 09.06.2024.

31. Installation of Auxiliary Facilities [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.amdsortex.com/service_d5. Останній вхід 09.06.2024.

32. Color Sorter Machine Installation Guide. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.metakcolorsorter.com/metak-color-sorter-machine-installation-guide>. Останній вхід 09.06.2024.

33. What Is Optical Sorting? [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://satake-usa.com/sorting-overview/>. Останній вхід 09.06.2024.

34. Фотосепаратори. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://m.kittrade.com.ua/?page=photoseparatori/photoseparatori&lang=uk>. Останній вхід 09.06.2024.

35. USB2.0 3648-Pixel 16-bit CCD Line Camera with External Trigger. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.mightexsystems.com/product/usb2-0-3648-pixel-16-bit-ccd-line-camera-with-external-trigger/>. Останній вхід 09.06.2024.

36. Linear CCD module. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://hackaday.io/project/9829-linear-ccd-module>. Останній вхід 09.06.2024.

37. The TCD1304 Linear CCD. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://tcd1304.wordpress.com/>. Останній вхід 09.06.2024.

38. Analog Filter Wizard. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://tools.analog.com/en/filterwizard/>. Останній вхід 09.06.2024.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>70</i>

39. TSL1301 datasheet. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet_pdf/taos/TSL1301.pdf. Останній вхід 09.06.2024.

40. Front-End Amplifier and RC Filter Design for a Precision SAR Analog-to-Digital Converter. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/front-end-amp-and-rc-filter-design.html>. Останній вхід 09.06.2024.

41. Start with the right op amp when driving SAR ADCs. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/CommunityServer-Discussions-Components-Files/14/7288.forum2_5F00_SAR_5F00_OPA.pdf. Останній вхід 09.06.2024.

42. Optimize Your SAR ADC Design. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/14/4478.PA_2D00_001--Optimize_5F00_SAR_5F00_converter_5F00_design-REV-b.pdf. Останній вхід 09.06.2024.

43. STM32G4 ADC use tips and recommendations. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5346-stm32g4-adc-use-tips-and-recommendations-stmicroelectronics.pdf. Останній вхід 09.06.2024.

44. Опис RS-232. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://vkmodule.com.ua/Description/Description1.html>. Останній вхід 09.06.2024.

45. 1PCS TSL1401R TSL1401R-LF TSL1401 DIP8. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.ebay.co.uk/itm/395151065242>. Останній вхід 09.06.2024.

46. MC33079 Low noise quad operational amplifier. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/mc33079.pdf>. Останній вхід 09.06.2024.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		71

47. ORIGINAL MC33079DT MC33079 Low Noise Quad OpAmp SOIC-14 STMicroelectro. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.tokopedia.com/lisuinstrument/original-mc33079dt-mc33079-low-noise-quad-opamp-soic-14-stmicroelectro>. Останній вхід 09.06.2024.

48. STM32 Nucleo-32 development board with STM32G431KB MCU, supports Arduino nano connectivity. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g431kb.html#overview> . Останній вхід 09.06.2024.

49. STM32G4 series Enabling advanced mixed-signed applications. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.st.com/resource/en/product_presentation/microcontrollers-stm32g4-series-product-overview.pdf. Останній вхід 09.06.2024.

50. SN74AHCT1G125 Single Bus Buffer Gate With 3-State Output. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ahct1g125.pdf?ts=1717387625543>. Останній вхід 09.06.2024.

51. SN74AHCT1G125 Single 4.5-V to 5.5-V buffer with TTL-compatible CMOS inputs and 3-state outputs. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.ti.com/product/SN74AHCT1G125>. Останній вхід 09.06.2024.

52. ULN2003A 50-V, 7-ch darlington transistor array, -20C to 70C. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.ti.com/product/ULN2003A>. Останній вхід 09.06.2024.

53. ULN200x, ULQ200x High-Voltage, High-Current Darlington Transistor Arrays. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf?ts=1717346524919&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FULN2003A. Останній вхід 09.06.2024.

54. MAX3232, 3- to 5.5-V dual channel 250kbps RS-232 line driver/receiver with +/-15-kV ESD protection. [Електронний ресурс]. Доступно

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		72

за посиланням: <https://www.ti.com/product/MAX3232>. Останній вхід 09.06.2024.

55. MAX3232 3-V to 5.5-V Multichannel RS-232 Line Driver and Receiver With ± 15 -kV ESD Protection. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням:

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/max3232.pdf?ts=1717411244411&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FMAX3232. Останній вхід 09.06.2024.

56. SN74HC595, 8-bit shift registers with 3-state output registers. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням:

<https://www.ti.com/product/SN74HC595>. Останній вхід 09.06.2024.

57. SNx4HC595 8-Bit Shift Registers With 3-State Output Registers. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням:

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc595.pdf?ts=1717426276352&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FSN74HC595%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dasc-null-null-GPN_EN-cpc-pf-google-ww%2526utm_content%253DSN74HC595%2526ds_k%253DSN74HC595+Data%2526sheet%2526DCM%253Dyes%2526gad_source%253D1%2526gclid%253DCj0KCQjw0_WyBhDMARIsAL1Vz8tXAA40Lzm3vXSGSyqco2BPcy0_Tc8zmCJXL6MyIySg5cbhGmeGdWkaAorwEALw_wcB%2526gclid%253Daw.ds. Останній вхід 09.06.2024.

58. DB9 Connector Female Right Angle. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://www.indiamart.com/proddetail/db9-connector-female-right-angle-2852310379497.html>. Останній вхід 09.06.2024.

59. 10 Pin IDC Male Header Straight PCB Mount with Lock – 2.54mm Pitch. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням:

<https://sharvielectronics.com/product/10-pin-idc-male-header-straight-pcb-mount-with-lock-2-54mm-pitch/>. Останній вхід 09.06.2024.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

60. PCB Trace Width Calculator. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: [PCB Trace Width Calculator - PCB Prototype the Easy Way - PCBWay](#). Останній вхід 09.06.2024.

61. PCB Manufacturing & Assembly Capabilities. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>. Останній вхід 09.06.2024.

62. PCB Design Rules For Wiring And Crosstalk. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://semiengineering.com/pcb-design-rules-for-wiring-and-crosstalk/>. Останній вхід 09.06.2024.

63. What is the Electrical Return Path in a PCB? [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://resources.altium.com/p/what-return-current-path-pcb>. Останній вхід 09.06.2024.

64. PCB Design Guidelines for Analog Circuits. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://resources.altium.com/p/pcb-design-rules-analog-circuits>. Останній вхід 09.06.2024.

65. Routing Topology Configuration in PCB Design for Power, Data, and Peripherals. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://resources.altium.com/p/routing-topologies-in-your-pcb-and-computer-peripherals>. Останній вхід 09.06.2024.

					<i>PE01.201113.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		74