Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)
Кафедра _Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____перший (бакалаврський)_____
_____Розроблення системи керування автоматичного формування коробів_____
_____на ТОВ "ФМ ХЛАДОПРОМ"_____
(тема)

Виконав:
здобувач _____3____ року навчання,
групи _____АКТАКІТу-23-1_____
_____Євгеній ШЕВЧЕНКО_____
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність ___174 Автоматизація, _____
___комп'ютерно-інтегровані технології та___
_____робототехніка_____
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми ____освітньо-професійна_____
Освітня програма ____Автоматизація та____
____комп'ютерно-інтегровані технології____
(повна назва освітньої програми)

Керівник ____ст. викл. Сергій ТЕСЛЮК____
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Завідувач кафедри _____ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)
2026 р.

Я, Шевченко Євгеній Вікторович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"09" червня 2026 р.  Євгеній ШЕВЧЕНКО

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКІТС

Кафедра КІТАРБІ

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«20» травня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Шевченко Євгенію Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи керування автоматичного формування коробів на ТОВ "ФМ ХЛАДОПРОМ"
затверджена наказом університету від 20.05.2026 р. № 411Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15.06.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Платформа на базі мікроконтролера STM32;
3.2 Продуктивність 6 коробів на хвилину;
3.3 Напруга живлення 220 В, напруга комутації 24 В;
3.4 Кількість вихідних сигналів 11;
3.5 Кількість вхідних сигналів 14;
3.6 Індикація режимів роботи входів / виходів 25;
3.7 Керування циклами формоутворення коробів в автоматичному режимі.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Аналіз технічного завдання та аналогічних систем керування за темою;
4.2 Аналіз причин низької надійності аналогічних систем керування;
4.3 Розроблення системи керування;
4.4 Збірка системи керування та перевірка її працездатнісоті;
4.5 Конструкторсько-технологічні розрахунки;
4.6 Перевірка стійкості системи управління;
4.7 Питання з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал у вигляді презентації PowerPoint (*.pptx) – 15 с.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	23.05.2026	Виконано
2	Аналіз аналогічних систем	26.05.2026	Виконано
3	Розробка структурної схеми	30.05.2026	Виконано
4	Розробка алгоритму роботи	02.06.2026	Виконано
5	Конструкторсько-технологічні розрахунки	04.06.2026	Виконано
6	Розроблення системи керування	09.06.2026	Виконано
7	Охорона праці	10.06.2026	Виконано
8	Подання роботи до ЕК	15.06.2026	

Дата видачі завдання 20.05.2026 р.

Здобувач _____ Євгеній ШЕВЧЕНКО
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ ст. викл. Сергій ТЕСЛЮК
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 87 с., 11 табл., 35 рис., 3 дод., 23 джерела.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДІАГНОСТИКА, КОНТАКТИ, МІКТОКОНТРОЛЕР, НАДІЙНІСТЬ, КОМУТАЦІЯ, ПНЕВМОПРИВОДИ, ФОРМУВАЧ КОРОБІВ.

Об’єкт розробки – процеси автоматизованого керування пакувальним обладнанням на виробництві.

Предмет розробки – системи комутації пневматичних пристроїв, що спрямовані на підвищення надійності та інтелектуалізацію автоматизованого виробництва.

Мета роботи – підвищення надійності спеціалізованого програмно-апаратного комплексу для формувача коробів, що мінімізує час простою, забезпечить діагностику в реальному часі та адаптивність до змін у виробничому процесі.

Методами дослідження у роботі є: системний аналіз процесів роботи формувача коробів; математичне моделювання стійкості комутаційних ланцюгів за критерієм Гурвіца; методи теорії електричних контактів для оцінки зносостійкості комутаційних пристроїв; експериментальне тестування розробленого програмно-апаратного комплексу.

Практичне значення роботи полягає у створенні надійного програмно-апаратного комплексу для керування формувачем коробів, який виключає передчасний вихід з ладу комутаційних елементів.

Отриманий результат кваліфікаційної роботи, відноситься цілей сталого розвитку № 9, а саме 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньо-високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво».

Результати кваліфікаційної роботи апробовані на конференції [1].

THE ABSTRACT

The explanatory note contains: 87 p., 11 tab., 35 fig., 3 app., 23 sources.

AUTOMATION, BOX FORMER, COMMUNICATION, CONTACTS, DIAGNOSTICS, MICTOCONTROLLER, PNEUMATIC ACTUATORS, RELIABILITY.

The object of development is the processes of automated control of packaging equipment in production.

The subject of development is the switching systems of pneumatic devices, which are aimed at increasing the reliability and intellectualization of automated production.

The purpose of the work is to increase the reliability of a specialized software and hardware complex for a box former, which minimizes downtime, provides real-time diagnostics and adaptability to changes in the production process.

The research methods in the work are: system analysis of the box former's work processes; mathematical modeling of the stability of switching circuits according to the Hurwitz criterion; methods of the theory of electrical contacts for assessing the wear resistance of switching devices; experimental testing of the developed software and hardware complex.

The practical significance of the work is to create a reliable software and hardware complex for controlling the box former, which eliminates premature failure of switching elements.

The obtained result of the qualification work refers to topic number 9. Namely 9.4 “To promote the accelerated development of high- and medium-high-tech sectors of the processing industry, which are formed on the basis of the use of the chains “education - science - production”.

The results of the qualification work were approved at the conference [1].

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз об’єкта автоматизації та обґрунтування технічних вимог до системи 12
1.1 Аналіз технічного завдання та призначення пристрою 12
1.2 Аналіз причин низької надійності аналогічних систем керування 16
1.3 Аналіз процесів зносу та деградації контактних поверхонь 20
2 Розробка структурної схеми та алгоритму системи керування автоматичного формування коробів 30
2.1 Розробка структурної схеми модуля вводу-виводу дискретних сигналів 30
2.2 Розробка алгоритму роботи програми контролера формувача коробів 32
2.3 Вибір мікроконтролера для схеми контролера 35
2.4 Вхідний каскад узгодження сигналів 37
2.5 Вихідний каскад керування виконавчими механізмами 45
2.6 Розробка вузла розширення вихідних портів керування на базі регістрів зсуву 54
2.7 Комплектація контролера системи керування формувача коробів 56
3 Розроблення модулю системи керування автоматичного формування коробів 60
3.1 Розрахунки друкованої плати пристрою 60
3.2 Вхідні канали модулю керування 64
3.3 Вихідні канали модулю керування 69
3.4 Розрахунок надійності пристрою за раптовими відмовами 73
3.5 Перевірка стійкості системи управління за критерієм Гурвіца 76
4 Охорона праці 79
4.1 Вимоги безпеки перед початком роботи 79

4.2 Вимоги безпеки під час виконання роботи 80
4.3 Вимоги безпеки після закінчення роботи 80
4.4 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях 81
Висновки 82
Перелік джерел посилання 84
Додаток А Апробація результатів кваліфікаційної роботи 88
Додаток Б Схеми електричні принципові 97
Додаток В Демонстраційний матеріал 102

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕРС – електрорушійна сила;

МК – мікроконтролер;

МРС – магнітнорушійна сила;

DIP – Dual In-line Package (корпус із двома рядами виводів);

GPIO – General Purpose Input Output (вхід/вихід загального призначення);

I_C – струм колектора;

SMD – Surface Mount Device (понад малі деталі);

THT – Through-Hole Technology (технологія монтажу в отвори);

$T_{ср}$ – середній час у годинах.

ВСТУП

Сучасний стан розвитку пакувальної індустрії вимагає від обладнання не лише високої продуктивності, а й максимальної автономності та безвідмовності. Формувач коробів є важливою ланкою в логістичному ланцюжку будь-якого виробництва. Автоматизація цього процесу дозволяє значно скоротити частку ручної праці, мінімізувати вплив людського фактора та забезпечити стабільну якість пакування. Проте надійність всієї лінії безпосередньо залежить від надійності системи керування її окремими вузлами.

Основними виконавчими механізмами у формувачах коробів є пневматичні циліндри, що керуються соленоїдними клапанами (пневморозподільниками). Робота цих механізмів характеризується високою частотою циклів – до декількох десятків спрацювань за хвилину. Це створює специфічне навантаження на керуючий контролер. При використанні постійної напруги 24 В для живлення котушок клапанів виникає явище високої індуктивності. У моменти розмикання ланцюга енергія, накопичена в магнітному полі котушки, спричиняє виникнення електричної дуги на контактах реле.

Штатні контролери бюджетного та середнього цінового сегментів часто проектуються за принципом максимальної компактності. Це змушує використовувати мініатюрні електромагнітні реле, які впаяні безпосередньо в друковану плату контролера. Такі реле мають обмежений комутаційний ресурс (кількість циклів) і малу площу контактів.

Постійне іскріння призводить до поступового вигорання металу контактів, що збільшує перехідний опір і спричиняє перегрів. Під дією високої температури дуги контакти можуть «зваритися» між собою, що призводить до неконтрольованого спрацювання пневматики, а це вже є критично небезпечним для механічних частин машини. Через утворення нагару ланцюг перестає замикатися, що зупиняє лінію та потребує втручання технічного персоналу.

Заміна всього контролера через вихід з ладу одного дешевого реле є економічно недоцільною, проте часто необхідною через складність демонтажу та впаювання нових елементів у багатошарові плати. Більше того, термін служби у «один сезон» вказує на системну помилку у проектуванні силової частини. Модернізація системи керування шляхом впровадження напівпровідникової комутації дозволяє практично повністю позбутися проблем механічного зносу в логічній частині контролера.

Об’єкт розробки – процеси автоматизованого керування пакувальним обладнанням на виробництві.

Предмет розробки – системи комутації пневматичних пристроїв, що спрямовані на підвищення надійності та інтелектуалізацію автоматизованого виробництва.

Мета роботи – підвищення надійності спеціалізованого програмно-апаратного комплексу для формувача коробів, що мінімізує час простою, забезпечить діагностику в реальному часі та адаптивність до змін у виробничому процесі.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

– провести аналіз технічного завдання та обґрунтування технічних вимог до системи;

– провести аналіз причин низької надійності аналогічних систем керування;

– розробити структурну схему та алгоритм системи керування.

– провести обґрунтування вибору елементної бази;

– розробити систему керування;

– виконати збірку системи керування на базі контролера;

– провести конструкторсько-технологічні розрахунки;

– провести розрахунок надійності пристрою за раптовими відмовами;

– перевірка стійкості системи управління;

– розглянути питання пов’язані з охороною праці;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [2], а також з використанням навчально-методичних матеріалів [3-6] та згідно положень [7-12].

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО СИСТЕМИ

1.1 Аналіз технічного завдання та призначення пристрою

На сучасному етапі розвитку промислового виробництва, автоматизація пакувальних процесів є критично важливою для забезпечення безперебійної роботи підприємства. Автоматизація формування тари – це критична ланка. Навіть невеликі підприємства зараз переходять з ручної праці на автомати.

Формувачі коробів – це складні електромеханічні системи, що працюють у режимі високої інтенсивності. Це ідеальне рішення для оптимізації трудомістких процесів складання та склеювання картонних заготовок.

Системи можуть інтегруватися в автоматичну лінію або оснащуватися додатковими автоматизованими пристроями, які сприяють укладанню та/або дозуванню товару. Додатково формувальники можна дообладнати механізмами етикетування та маркування. Налаштувати роботу машин просто згідно з програмою встановленого автоматичного комплексу.

Оператор на панелі керування вибирає формат ящика, який йому потрібно формувати, та інші параметри роботи з лотками. Формувальник подає заготівлю з магазину, складає її, формуючи необхідний формат ящика, та склеює у потрібному місці. В результаті виходить готовий лоток, який надходить до зони видачі. Весь цикл операцій система виконує автоматично на високих швидкостях та з мінімумом відходів.

Автоматичні лінії з формування та склеювання відрізняються високим рівнем продуктивності та стабільною якістю. Механізми та пристрої формувальників виготовлені із міцних та надійних компонентів. Моделі безпечні для операторів, дозволяють швидко змінювати формат тари (за потреби) з можливістю індивідуальних гнучких налаштувань, мають низькі експлуатаційні витрати та мінімальні відходи.

Формувачі картонних ящиків формують тару із спеціальних картонних заготовок для подальшого наповнення. Залежно від моделі обладнання, картонки можуть завантажуватися як вручну, так і в автоматичному режимі. Таке обладнання самостійно складає короб і склеює нижні клапани, внаслідок чого формувач коробів віддає тару готову до наповнення товаром. При цьому розміри заготовок, що подаються, можна налаштувати вручну.

Усі моделі формувальників сумісні із заклеювачами. Завдяки такому обладнанню, яке підібрано та правильно встановлено у виробничій лінії, можна гарантувати суттєве прискорення процесу пакування. У лоток формувальника в залежності від моделі можна помістити до 300 картонок, які після формування одразу потрапляють у заклеювач.

Виділяють два види формувальників за їх рівнем автоматизації – напівавтоматичні та повністю автоматичні.

На рисунку 1.1 наведено напівавтоматичний формувальник F105 – напівавтоматичний формувальник коробів з простою і при цьому неймовірно ефективною конструкцією [13].



Рисунок 1.1 – Напівавтоматичний формувальник F-105

Напівавтоматичні формувальники коробів – це частково автоматизоване обладнання для формування коробів, що працює з допомогою оператора.

Подача гофрокороба та налаштування машини здійснюються вручну. Напівавтоматичні формувальники – це надійні машини для складання різнотипних коробів та їх склеювання. Відмінно підійдуть для малих та великих виробництв [14].

Повністю автоматизовані формувальники підходять для всіх популярних розмірів коробок і є швидким і простим рішенням для автоматичної пакувальної лінії.

Автоматичний формувач коробів – це високопродуктивне обладнання для формування картонного чотириклапанного короба з гофрозаготівель, яке може працювати автономно або вбудовано в пакувальну лінію. Етап формування короба дуже важливий, тому що від нього залежатиме, наскільки міцно і правильно він складений і чи витримає навантаження під час транспортування та зберігання.

На рисунку 1.2 наведено автоматичний формувальник коробів RPK-09 призначений для формування короба і подальшого склеюванням скотч-стрічкою його нижнього клапана [15].

Автоматичні формувальники коробів легко інтегруються у виробничі лінії та виготовлені із високоміцних компонентів. Формувальники відрізняються продуктивністю до 2000 лотків на годину (залежно від моделі). Навіть найпростіша машина за потреби може бути дооснащена опціями та аксесуарами будь-якої миті після покупки.

Окрім автоматизації складання коробів, важливою особливістю є метод їх запечатування. Існує два основних методи запечатування коробів це за допомогою липкої стрічки або гарячого клею.

Один із ключових аспектів автоматизації виробничих процесів - це впровадження технологій, які допомагають зменшити ручну працю та оптимізувати виконання рутинних завдань. У цьому контексті формувальники коробів відіграють важливу роль, забезпечуючи швидке і надійне складання коробів, які використовуються для пакування продукції.



Рисунок 1.2 – Автоматичний формувальник коробів RPK-09

Формувальники зі стрічковим запечатуванням: ці машини використовують липку стрічку для запечатування нижньої частини короба. Це простий і швидкий метод, який дозволяє знизити витрати на матеріали. Стрічкове запечатування ідеально підходить для коробів, які не потребують високої герметичності.

Формувальники з гарячим клеєм: ці машини використовують термоклей для склеювання дна коробів. Метод гарячого запечатування забезпечує міцніше та герметичніше заклеювання, що робить його оптимальним для коробів, які будуть транспортуватися на великі відстані або використовуватись для важкої продукції.

Процес функціонування формувача коробів базується на послідовному виконанні технологічних операцій над картонною заготовкою. На першому етапі механізм захоплення вилучає заготовку з магазину та подає її в робочу зону, де відбувається її розкриття (формування) – перехід з плаского стану в об’ємну прямокутну конструкцію.

Наступним етапом є формування дна короба, що реалізується шляхом послідовного згинання малих (поперечних) та великих (повздовжніх) клапанів за допомогою пневматичних приводів. На завершальній стадії здійснюється фіксація

сформованих клапанів адгезивною стрічкою (скотчем). Для цього короб виштовхується через вузол заклеювання на вихідну лінію, набуваючи кінцевої жорсткості та готовності до наповнення продукцією.

1.2 Аналіз причин низької надійності аналогічних систем керування

За штатною схемою використано програмований контролер OMRON SYSMAC CP1E, який наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Програмований контролер OMRON SYSMAC CP1E

Компанія Omron випустила модернізовані моделі популярних програмованих контролерів серії CP1E, які спеціально розроблені, щоб надати гнучкі та універсальні рішення у простих сферах застосування. Серія CP1E представлена двома типами пристроїв: пристрій CP1E-E є найбільш економічним, тоді як CP1E-N передбачає вбудований годинник реального часу, функції управління рухом та послідовний порт для підключення HMI, пристрої зчитування штрих-коду або іншого пристрою з послідовним інтерфейсом. Оскільки серія CP1E має однакову будову із серіями CP1L, CP1H, CJ та CS, її програми сумісні для розподілу пам'яті та команд [16].

Технічні характеристики наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики контролера OMRON SYSMAC CP1E

Модель	CP1E-N14DR-A
Вбудовані порти вводу/виводу	14
Загальна пропускна здатність введення/виводу	14
Напруга живлення	від 120 В до 240 В змінного струму
Тип введення	Постійний струм
Тип виводу	Реле
Комунікації	USB, RS-232C

В вихідних ланцюгах у схемі цього контролера використовуються реле Omron G6DN-1A-L. На рисунку 1.4 наведено вигляд плати контролера OMRON SYSMAC CP1E, із зазначеними реле в комутації виходів.

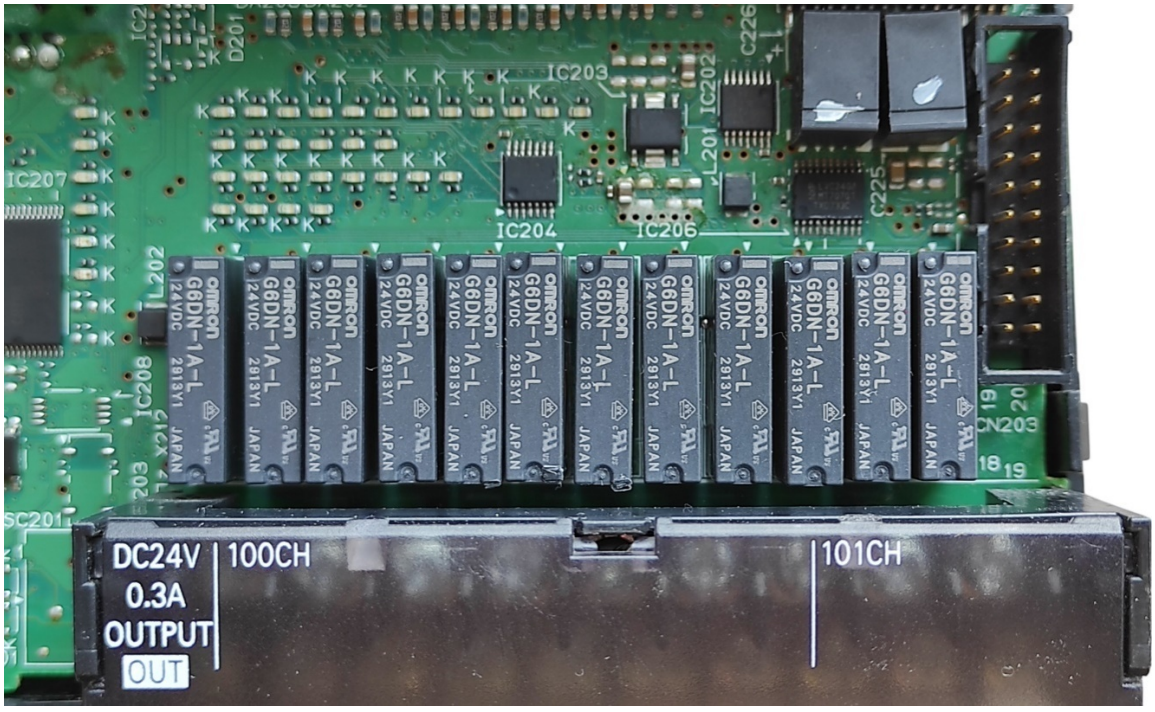


Рисунок 1.4 – Блок виходів контролера OMRON SYSMAC CP1E

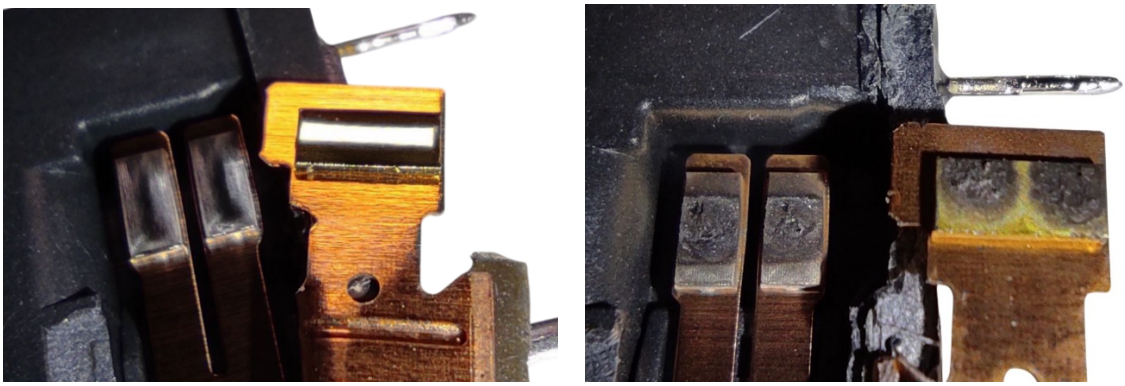
Використані реле Omron G6DN-1A-L наведено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Реле Omron G6DN-1A-L

Результати практичної експлуатації досліджуваного контролера підтверджують невідповідність характеристик штатних реле реальним умовам індуктивного навантаження.

На рисунку 1.6 наведено порівняльну характеристику станів контактів реле.



а) б)

а) контакти до початку експлуатації (чиста дзеркальна поверхня);

б) спостерігаються сліди ерозії, нагару та локального сплавлення металу

Рисунок 1.6 – Контакти нового реле Omron G6DN-1A-L

Аналіз стану контактних груп продемонстрував, що основною причиною збоїв в роботі обладнання є деградація комутаційних елементів, спричинена електричною дугою.

Це візуальне підтвердження доводить, що застосовані в штатному блоці керування реле не мають достатнього запасу електричної міцності для надійної роботи в даній схемі автоматизації.

Вермее-Чаб-система фасування особливим чином інтегрує компоненти подачі продукту, протяг плівки (плоска плівка з рулону) і кліпсування без включення для отримання точних за вагою продуктів. Вертикальна, безперервна та компактна система наповнення (не Старт та Стоп) досягає 160 упаковок за хвилину (залежно від ваги та довжини упаковки). Автоматизована система спрощує та робить більш ефективною масове виробництво та інноваційні рішення на пілотних лініях для невеликих обсягів при зниженні виробничих витрат.

На рисунку 1.7 наведено зовнішній вигляд Вермее-Чаб-системи фасування.



Рисунок 1.7 – Система фасування Вермее-Чаб

Автоматизований процес наповнення продуктивністю до 60 тактів за хвилину, залежно від ваги пакета, усуває необхідність у небезпечному ручному наповненні та виробляє пакети без увімкнення повітря з фіксованою вагою. Кінцеві споживачі цінують стандартизований продукт, який можна розплавити повністю, безвідходна технологія. Керується централізовано через панель

управління та взаємодіє з периферійними пристроями, такими як змішувач, екструдер, продуктовий насос, продуктовий фільтр тощо.

ЧАБ система застосовується для упаковки практично всіх пастоподібних продуктів у плівку для виробництва точних за вагою та герметичних продуктів [17].

Аналіз кінематики та алгоритму роботи системи фасування типу ЧАБ дозволяє зробити висновок про високий ступінь уніфікованості її виконавчих операцій. Попри високу продуктивність (до 60 одиниць на хвилину), функціональний цикл машини базується на обмеженій кількості циклічних дій.

Система керування такою системою є ідентичною до розробленого у даному проєкті контролера, оскільки вона вимагає:

– високої точності часових затримок для синхронізації вузла наповнення та механізму кліпсування;

– надійної комутації індуктивних навантажень, якими є електропневматичні клапани приводів витіснювачів та відрізання;

– взаємодії з периферийними пристроями через дискретні сигнали.

З огляду на те, що архітектура розробленого мікропроцесорного модуля побудована за модульним принципом, його програмне та апаратне забезпечення може бути адаптоване для керування автоматами типу ЧАБ. Це підтверджує універсальність запропонованого технічного рішення та можливість цього масштабування для автоматизації широкого спектра пакувального обладнання в харчовій та хімічній промисловості.

1.3 Аналіз процесів зносу та деградації контактних поверхонь

На сучасному етапі розвитку промислового виробництва автоматизація пакувальних процесів є критично важливою для забезпечення безперебійної роботи підприємства. Проте бюджетні рішення часто комплектуються універсальними контролерами з релейними виходами. Практика експлуатації показує, що при частоті циклів від 10 до 12 одиниць на хвилину, механічний та

електричний ресурс реле вичерпується надзвичайно швидко. Навіть застосування проміжних реле не вирішує проблему повністю, оскільки електромагнітні завади та індуктивні викиди продовжують впливати на внутрішні ланцюги керування.

Електричним контактом називається стикання двох електричних провідників, що створює умови прохідності струму, а також місце такого стикання. Дотичні провідники називаються контактами або контакт-деталями.

Електричне контактування – вельми складне явище. Контактні поверхні завжди мають деяку шорсткість і, як правило, завжди покриті плівками, які утворюються під впливом кисню повітря, озону, азоту та інших хімічних реагентів. Плівки мають товщину приблизно від 10 см до 6 см і питомий опір ρ = 105 Ом/см. Металеве контактування здійснюється не по всій поверхні, а лише в небагатьох точках. Плівка, що є на поверхні металу, може бути в одних випадках продавлена силою, що стискає контакти, в інших – пробита під впливом різниці електричних потенціалів. У місці пробою може утворитися металевий перешийок, що проводить електричний струм.

Явище пробою плівки при деякій напрузі називається фріттінгом. Воно полягає в тому. що при деякому (пороговому) значенні напруги, залежному від вигляду і товщини плівки, опір її різко падає. Відбувається електричний пробій плівки, що завершується утворенням в ній тонкого металевою провідника, який може залишитися після зняття напруги.

У місцях чисто металевого контактування розвиваються великі сили міжмолекулярних і міжатомних зв'язків. Чисто металеве контактування – явище рідкісне. Ймовірно, чисто металеве контактування можемо спостерігатися лише в місцях дуже вузьких металевих перешийків, які можуть утворитися при пробої плівок і розвиватися, наприклад, під впливом електростатичних сил. Явища електричного контактування остаточно ще не вивчені.

З уточненнями на підставі дослідних даних величина перехідного опору визначається виразом

$$R_{пер} = e\ p\ n, \qquad (1.1)$$

де ε – деяка величина, що залежить від матеріалу і форми контакту, способу обробки і стану контактної поверхні;

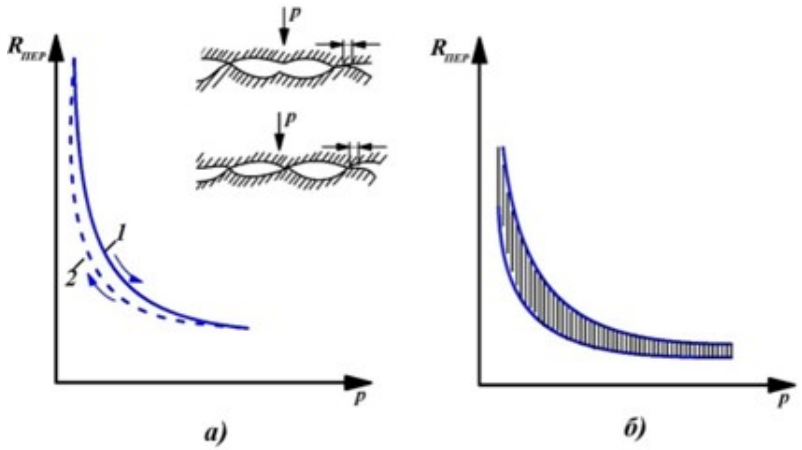
P – сила, що стискує контакти;

n – показник ступеня, що характеризує число точок стикання.

Із збільшенням числа точок стикання двох контактів перехідний опір зменшується. У виразі (1.1) показник ступеня приймають: для одноточкового контакту $n = 0{,}5$; для багатоточкових від 0,7 до 1, для лінійного контакту.

Залежність перехідного опору від контактного натиснення відповідно до рівняння представлена на рисунку 1.8, а. Крива 1 відповідає процесу зростання контактного натиснення, крива 2 – зниженню натиснення. Різний хід кривих пояснюється наявністю залишкових деформацій окремих горбиків, по яких відбувалося стикання.

Слід зазначити, що при одному й тому ж натисненні перехідний опір одного і того ж контакту при кожному замиканні може бути різним і відрізнятися в досить широких межах: у великих при малих натисненнях і в менших при великих натисненнях (>100 Н). Пояснюється це тим, що кількість і розмір площадок контакту при кожному замиканні можуть бути різними. Величина перехідного опору залежно від натиснення практично виражається не якоюсь кривій, а областю, обмеженою двома кривими, як це показано на рисунку 1.8, б.



а) залежність перехідного опору від контактного натиснення;

б) величина перехідного опору залежно від натиснення

Рисунок 1.8 – Залежність перехідного опору контакту від сили натиснення

Залежність перехідного опору від температури. Як вказано вище, перехідний опір контакту є опір металу провідника, тому він повинен у тій же мірі залежати від температури. Проте із збільшенням температури міняється структура горбиків і площадок стикання за рахунок зміни величини питомого опору зім'яттю σ. Тому температурний коефіцієнт тут буде меншим. Для міді:

$$R_{ПЕР.Г} = R_{ПЕР.ХОЛ}(1+\frac{2}{3}\alpha\theta), \quad (1.2)$$

де α – температурний коефіцієнт опору.

Із зростанням температури перехідний опір спочатку зростає (ділянка I кривої на рисунку 1.9). Потім при деякій температурі (для міді й срібла при від 200 °С до 300 °С) відбувається різке падіння механічних властивостей (твердості, опору розриву) матеріалу. При тому ж натисненні збільшується контактна площадка, перехідний опір (ділянка II) різко падає. Надалі (ділянка III) він знову зростає лінійно із зростанням температури, при температурі плавлення матеріалу контакти зварюються, перехідний опір падає майже до нуля (ділянка IV).

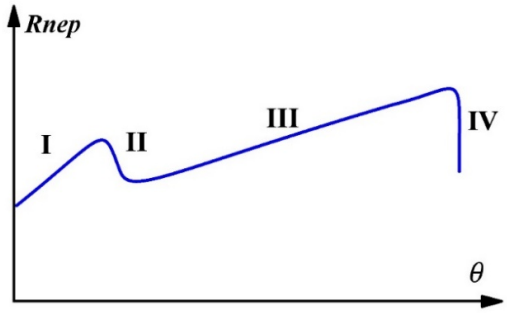


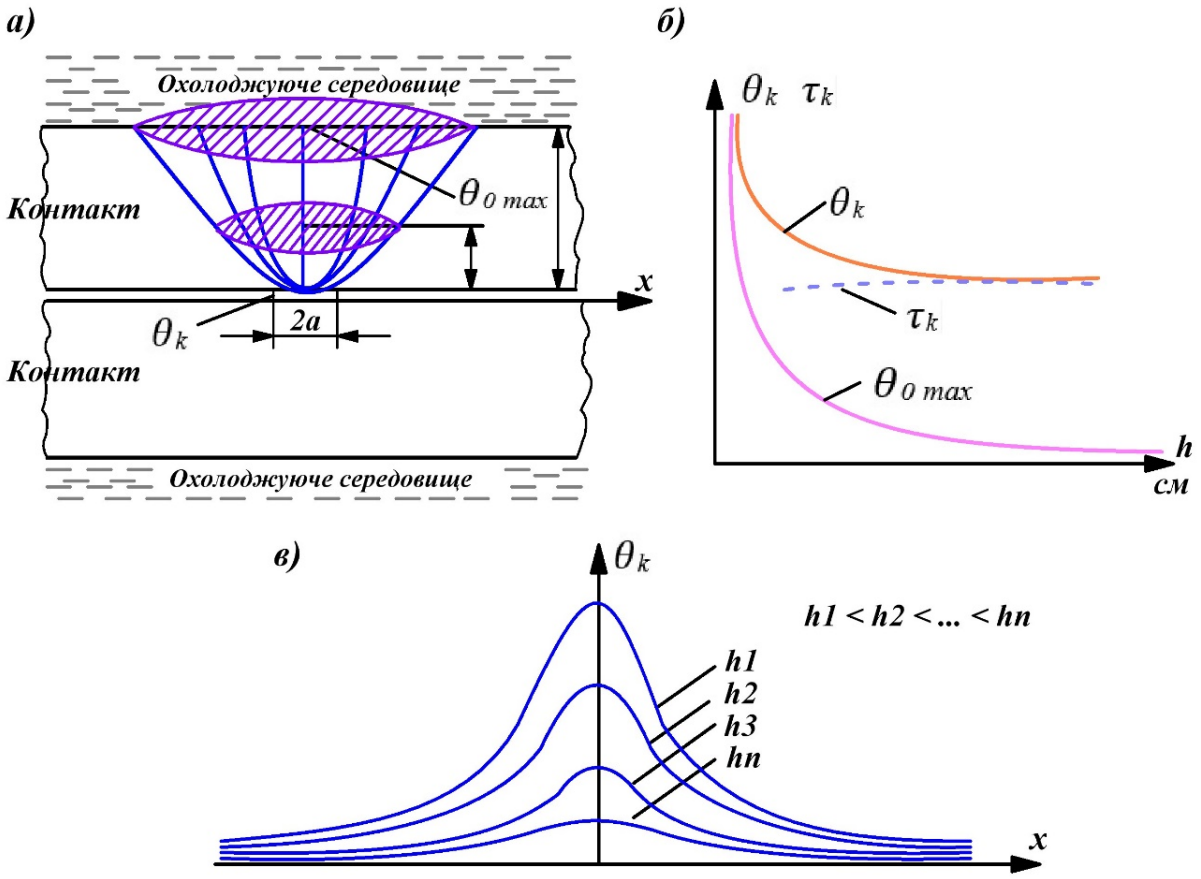
Рисунок 1.9 – Залежність перехідного опору контакту від температури

Шліфовка поверхонь не зменшує, а, навпаки, збільшує перехідний опір порівняно з обробкою напилком. При шліфуванні горбики на поверхні стають пологішими і зім'яття їх ускладнюється.

Перехідний опір надзвичайно чутливий до окислення поверхні з огляду на те, що оксиди багатьох металів (зокрема, мідь) є поганими провідниками. У

мідних відкритих контактах унаслідок їх окислення з часом перехідний опір може зрости в тисячі разів.

При проходженні струму в контактній площадці через наявність перехідного опору виділятиметься енергія $I^2R_{пер}dt$, рисунок 1.10, а. Оскільки ця енергія набагато більше енергії I^2Rdt, що виділяється в матеріалі контакту рисунок 1.10, б, а тепловіддача в навколишнє середовище здійснюється з поверхні контакту, рисунок 1.10, в, то температура контактної площадки буде вища за середню температуру контакту.



а) проходження струму в контактній площадці;

б) температури контактної площадки над температурою тепловіддавальної поверхні;

в) тепловіддача в навколишнє середовище

Рисунок 1.10 – Схема тепловідведення і розподілу температур в районі контактування

Перевищення температури контактної площадки над температурою тепловіддавальної поверхні контакту буде:

$$\theta_K - \theta_П = \tau_K = \frac{I^2 \rho \pi \sigma}{32 \lambda P}, \tag{1.3}$$

де ρ – питомий опір матеріалу контакту;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу контакту;

σ – часовий опір зім'яттю;

P – сила контактного натискання.

Коли прийняти, що перехідний опір контакту:

$$R_{ПЕР} = \frac{\rho}{2a}, q = \frac{\rho}{\sigma} = \pi a^2, \tag{1.4}$$

де a – радіус контактної площадки (вважаємо, що то рівняння (1.3) зводиться до вигляду:

$$\tau_K = \frac{1}{8} \cdot \frac{U^2 пер}{\lambda \rho}, \tag{1.5}$$

де $Uпер$ – падіння напруги в перехідному опорі контакту.

На рисунку 1.11 наведені криві, що виражають згідно із залежністю $\tau_к$ контактної площадки срібних і мідних контактів від падіння напруги $U_{пер}$ в них. При природному охолодженні падіння напруги в перехідному опорі контакту при номінальному струмі звичайно від 10 мВ до 20 мВ. Перевищення температури контактної площадки над середньою температурою контакту при цьому складає декілька градусів (не більше 10 °С) і при нормуванні температури контакту до уваги не береться.

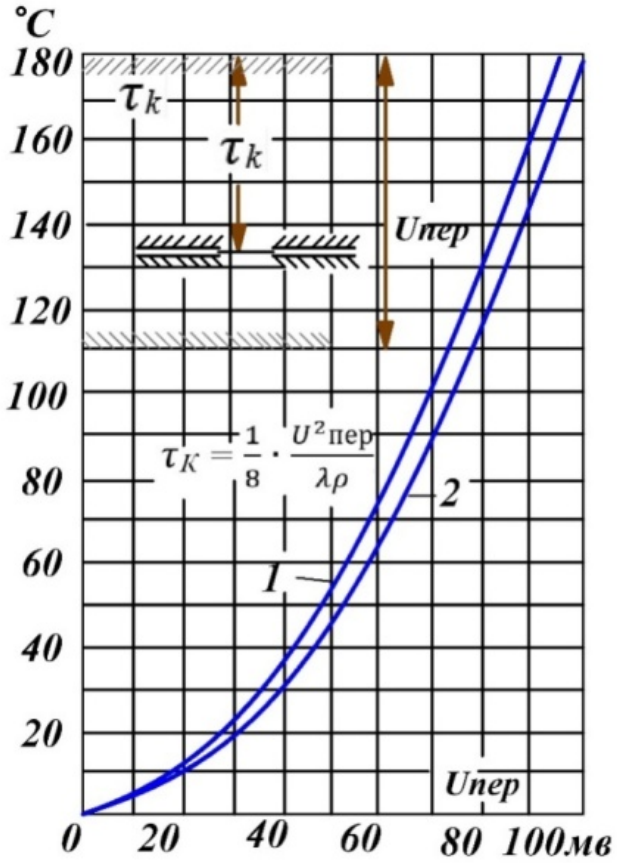


Рисунок 1.11 – Залежність перевищення температури контактної площадки від падіння напруги $U_{пер}$ в контактному з'єднанні

Знос контактів при розмиканні є наслідком дугового розряду і залежить від багатьох змінних чинників. До теперішнього часу немає аналітичного виразу для розрахунку величини зносу.

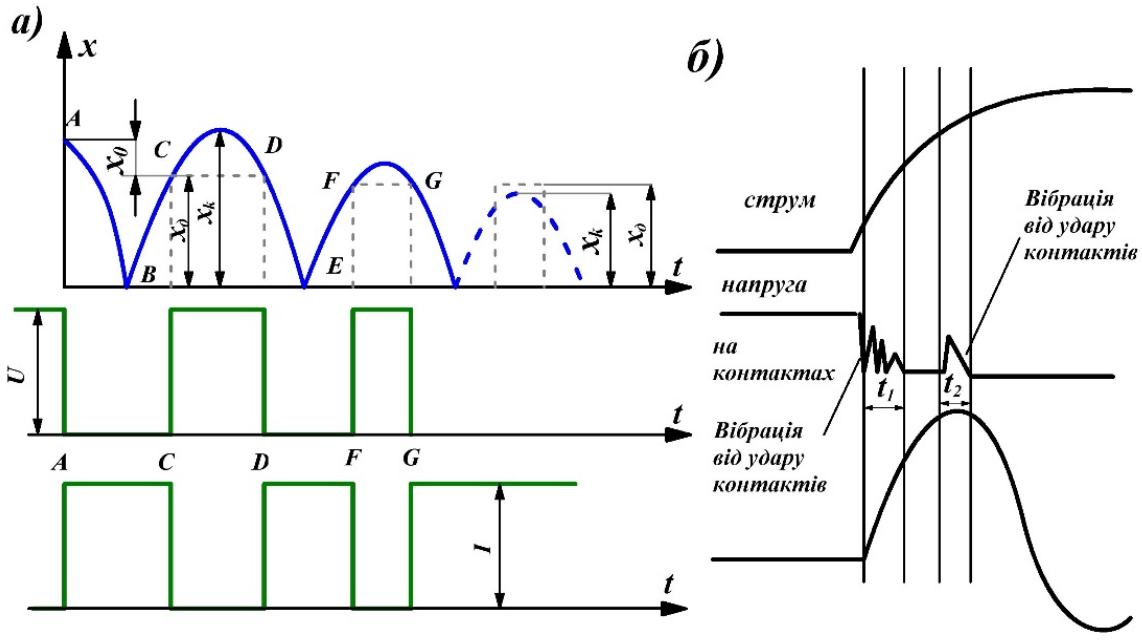
Знос контактів має місце і при замиканні ланцюгів. При замиканні відбувається удар рухомого контакту об нерухомий, перекочування і прослизання контактів. Це приводить до розклепування і стирання контактних поверхонь, тобто до механічного їх зносу, що, як правило, відносно невеликий і не відіграє істотної ролі в роботі апарата.

При замиканні має також місце електричний знос, який у ряді випадків перевершує знос при розмиканні. Він викликається вібрацією контактів, що виникає при замиканні. Рухомий контакт підходить до нерухомого з певною швидкістю. При зіткненні відбувається пружна деформація матеріалу обох контактів. Пружна деформація приводить до відкиду рухомого контакту – він

відскакує від нерухомого на деяку відстань, вимірювану сотими й десятими долями міліметра (іноді до 1 мм). Під дією контактної пружини відбувається повторне замикання контактів. Цей процес може повторюватися кілька разів із затухаючою амплітудою, як показано на рисунку 1.12, а. При кожному відкиді між контактами виникає електрична дуга, що викликає їх знос.

Вібрація при замиканні можлива унаслідок удару при притяганні якоря. При цьому знос може бути більшим, ніж від удару самих контактів, оскільки тут вібрація контактів відбувається при набагато більших миттєвих значеннях струму, рисунок 1.12, б.

Нижче наводяться одержані дослідним шляхом залежності величини зносу контактів при замиканні від ряду чинників.



а) повторне замикання контактів;

б) вібрація контактів

Рисунок 1.12 – Вібрація контактів при замиканні

Швидкість руху контактів визначається співвідношенням між механічною (крива 1) і тяговою (криві 2, 3 і 4) характеристиками рисунок 1.13.

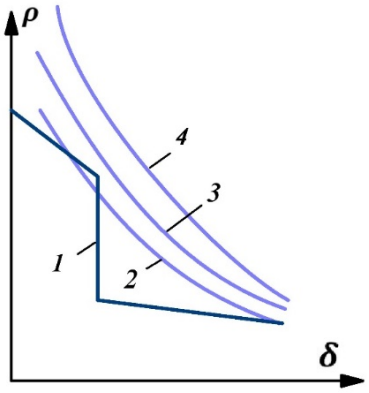
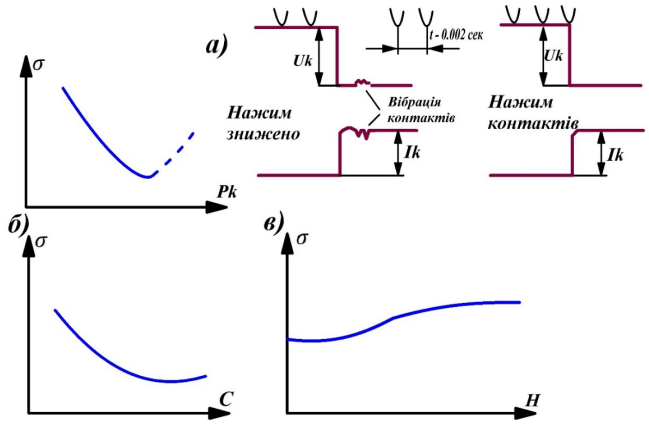


Рисунок 1.13 – Тягові й механічні характеристики

Чим більший запас тягового зусилля (крива 4), тим більшою буде швидкість, а, отже, великими будуть удар і вібрація контактів. При недостатньому тяговому зусиллі (крива 2) відбуватиметься зупинка рухомої системи в момент зіткнення контактів (двотактне включення), що також приведе до підвищення зносу. Для забезпечення мінімального зносу тягова характеристика повинна забезпечувати чітке включення апарату і не мати надмірних запасів (крива 3).

Залежність зносу від початкового натиснення $P_н$ й жорсткості контактної пружини. Початкове натиснення на контакти в момент їх зіткнення – це та сила, яка протидіє відкиду контактів при їх зіткненні. Природно, що чим більша ця сила, тим менше будуть відкид і вібрація, а, отже, і знос (рисунок 1.14, а).



а) – від початкового натиснення; б) – від жорсткості контактної пружини;
в) – від напруженості магнітного поля

Рисунок 1.14 – Залежність зносу контактів при замиканні

На рисунку показаний характер вібрації контактів при зниженому й підвищеному натисненнях. Крива $U_к$ зображає напругу на контактах, крива $I_к$ – струм через контакти.

Як видно з графіків, при пониженому натисненні контакти розмикалися кілька разів. При підвищеному натисненні розмикання не було.

Підвищення початкового натиснення обмежене тяговою характеристикою. Якщо початкове натиснення перевершує деяке значення, при якому МРС втягуючої котушки стає недостатньою для деформації тугої пружини і має місце відкид усієї рухомої системи, знос контактів починає зростати (штрихова частина кривої на рисунку 1.14, а.

Залежність зносу від жорсткості контактної пружини характеризується кривою на рис. 1.14, б. При більшій жорсткості відкид контактів буде дещо меншим, а отже, знос дещо знизиться.

Залежність зносу від напруженості магнітного поля рисунок 1.14, в. При кожному розмиканні між контактами утворюється місток з розплавленого металу. Магнітне поле прагне викинути його звідти. Таким чином, знос зростає із зростанням напруженості. При деякому значенні напруженості викидатиметься весь розплавлений метал, і подальше збільшення напруженості вже не приводить до зростання зносу.

Залежність зносу від числа замикань і ширини контакту. Як і при розмиканні, знос контактів при замиканні пропорційний числу замикань і обернено пропорційний ширині контакту [18].

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА АЛГОРИТМУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ КОРОБІВ

2.1 Розробка структурної схеми модуля вводу-виводу дискретних сигналів

На основі проведеного аналізу технічного процесу розроблено структурну схему мікропроцесорної системи керування. Центральним вузлом системи є мікроконтролер архітектури ARM – STM32F103C8T6, висока продуктивність якого дозволяє реалізувати складні алгоритми керування у реальному часі. Структурну схему наведено на рисунку 2.1.

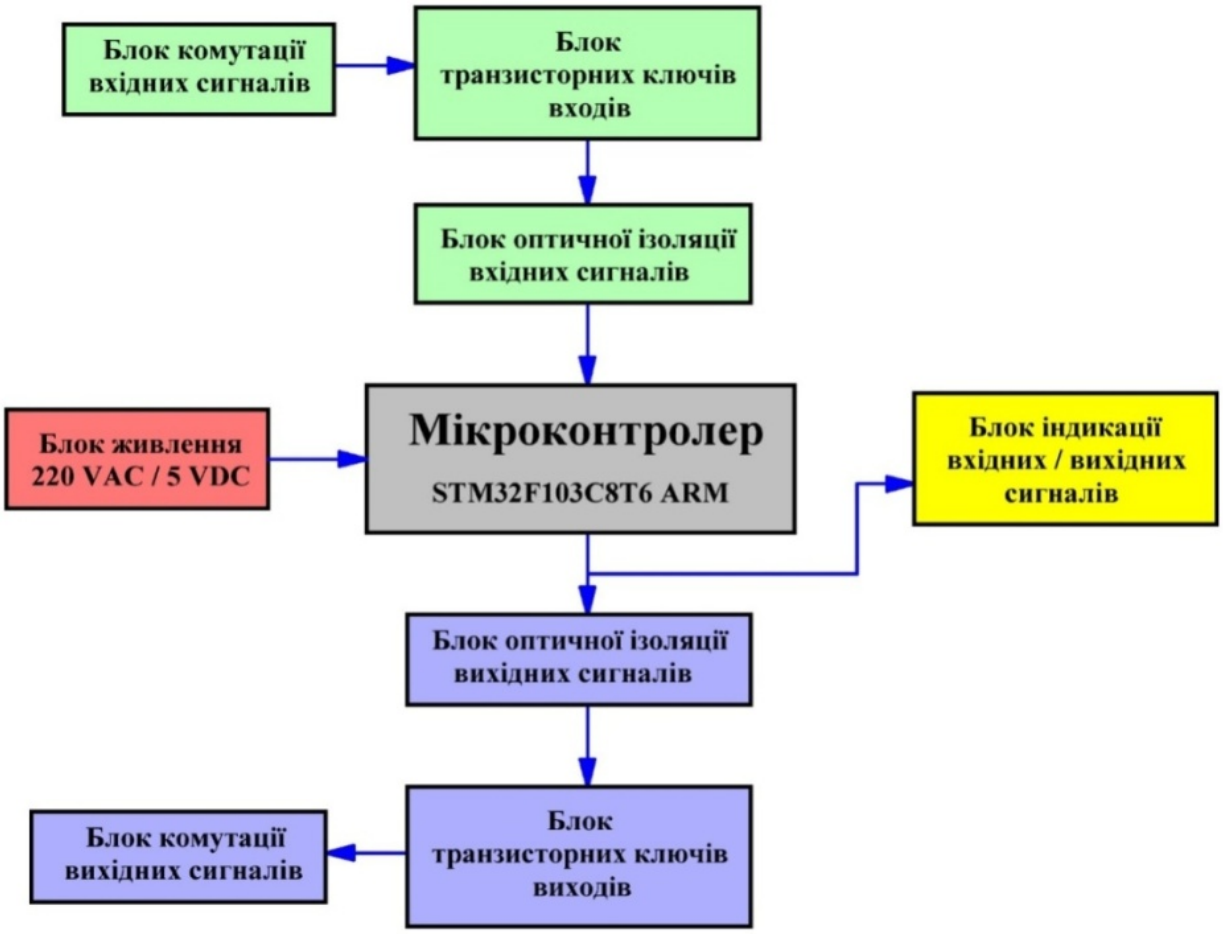


Рисунок 2.1 – Структурна схема мікропроцесорної системи

До складу модуля вводу-виводу дискретних сигналів входять такі блоки:

– блок комутації вхідних сигналів;

– блок транзисторних ключів входів;

– блок оптичної ізоляції вхідних сигналів;

– мікроконтролер;

– блок індикації вхідних / вихідних сигналів;

– блок оптичної ізоляції вихідних сигналів;

– блок транзисторних ключів виходів;

– блок комутації вихідних сигналів;

– джерело живлення.

Блок вхідних сигналів призначений для отримання даних від датчиків положення та кнопок керування. Для узгоджування промислових рівнів напруги 24 В з логічними рівнями контролера застосовано двокаскадну схему:

– блок транзисторних ключів входів. Побудований на базі біполярних транзисторів 2N5551. Це дозволяє стабілізувати вхідний струм та забезпечити надійне спрацювання системи при наявності довгих ліній зв’язку та промислових завад;

– блок оптичної ізоляції. Реалізований на оптопарах EL817A. Це рішення гарантує повну гальванічну розв’язку між силовими колами датчиків та чутливою цифровою частиною контролера, запобігаючи пошкодження мікроконтролера (МК) у разі виникнення перенапруги.

Вихідна частина контролера відповідає за безпосередню комутацію соленоїдних пневмоклапанів та виконавчих механізмів. Враховуючи високу частоту перемикань, замість традиційних реле впроваджено напівпровідникову систему:

– блок оптичної ізоляції вихідних сигналів. Також базується на EL817A, що ізолює керуючі порти МК від силових каскадів;

– силовий каскад. Блок транзисторних ключів виходів. Для посилення сигналу та забезпечення необхідної потужності комутації після оптопари встановлено транзисторні пари з використанням PNP транзисторів 2N5401. Така

конфігурація дозволяє надійно керувати індуктивними навантаженняим з робочим струмом, достатнім для спрацювання промислових пневморозподільників;

– блок живлення. Забезпечує перетворення напруги мережі або промислової шини у стабільні 5 В DC для живлення цифрової частини;

– блок індикації. Реалізований на базі світлодіодних індикаторів, підключених до регістрів зсуву 74HC595N.112, вхідних та вихідних ліній. Це дозволяє оператору візуально контролювати проходження сигналів та діагностувати стан системи без додаткових вимірювальних приладів.

2.2 Розробка алгоритму роботи програми контролера формувача коробів

Розроблений алгоритм реалізує логіку керування формувачем коробів у трьох режимах підготовка, автоматичний та покроковий. Програма побудована за принципом циклічного опитування датчиків та послідовного виконання технологічних команд. Алгоритм наведено на рисунку 2.2.

З метою підвищення читабельності основного логічного циклу, алгоритм обробки переривання за сигналом «Аварійна кнопка» винесено у підпрограму і не відображено на загальній схемі.

Після увімкнення живлення система переходить у стан очикування натискання кнопки «Підготовка». При її активації вмикаються допоміжні агрегати ремінний виштовхувач та транспортери. Алгоритм передбачає перевірку вихідного стану присосок. Якщо вони знаходяться у правильному положенні, система дозволяє перехід до виконання основного циклу.

Захоплення заготовки. Висуваються присоски. Після підтвердження висування присосок, вмикається вакуум-ежектор, механізм повертається у вихідний стан, розкриваючи картонну заготовку.

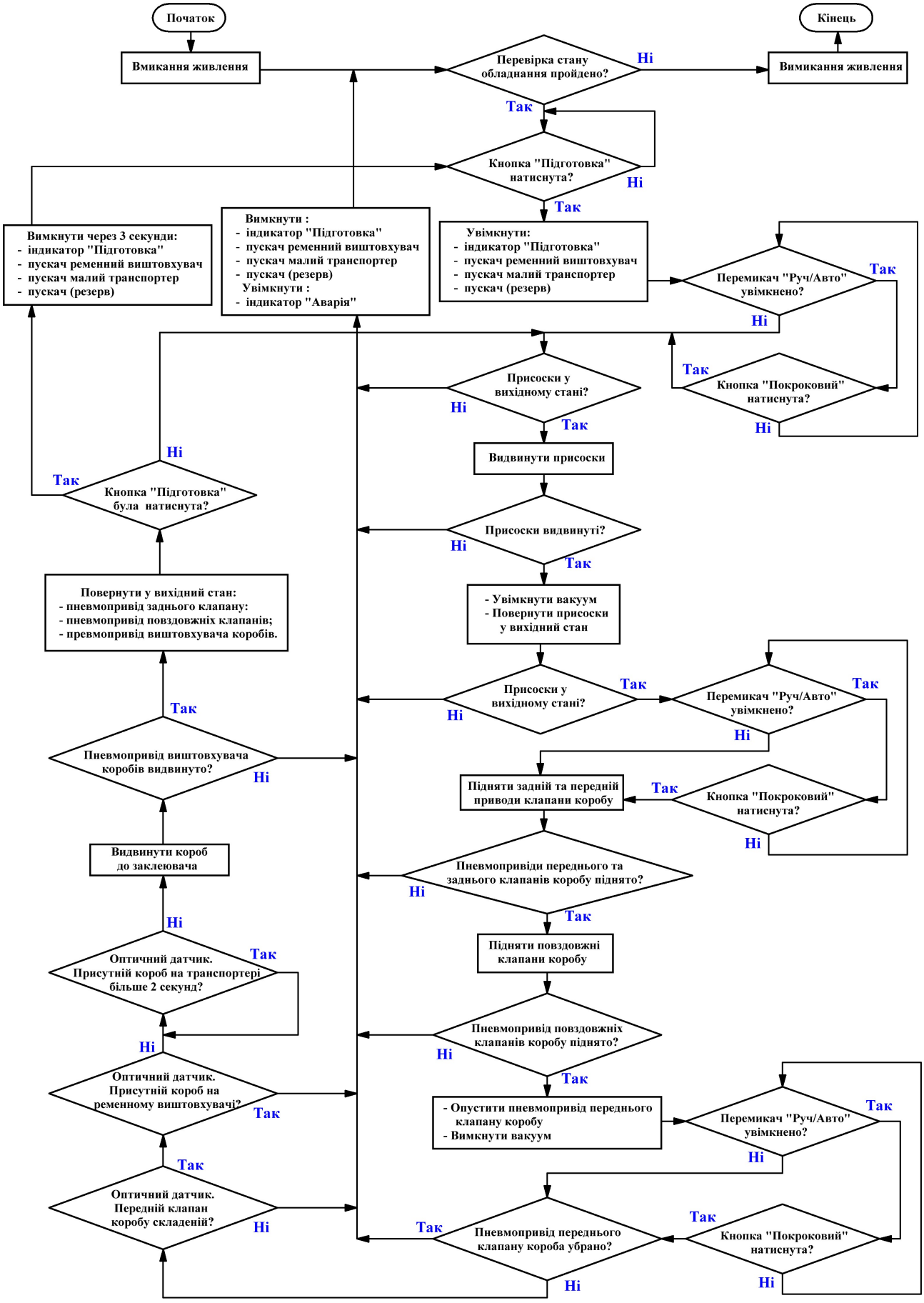


Рисунок 2.2 – Алгоритм роботи програми формувача коробів

Формування клапанів. Алгоритм реалізує сувору послідовність згинання. Спочатку піднімаються приводи переднього та заднього клапанів короба. Після отримання сигналу від датчиків положення про успішне завершення операції, активуються приводи поздовжніх клапанів.

Завершення циклу. Вакуум вимикається, пневмопривод переднього клапана повертається у початковий стан.

Особливістю алгоритму є використання оптичних датчиків для верифікації кожного кроку.

Програма перевіряє:

– чи складений передній клапан? Не складений передній клапан може перешкоджати виштовхуванню зібраного короба та пошкодити його;

– чи присутній короб на ремінному виштовхувачі? Якщо відбулося зминання попереднього коробу на ремінному виштовхувачі, це може спричинити пошкодження обох коробів. Також причиною може стати вихід зі строю самого ремінного виштовхувача;

– чи знаходиться короб на транспортері більше 2 секунд? Коли короб на транспортері знаходиться більше 2 секунд, це підказує про те, що транспортер заповнено коробами. І формувач має виконати затримку, паузу. Як тільки короб зникне з полю зору оптичного датчика, робота формувача відновиться автоматично.

Якщо всі умови виконані, спрацьовує пневмопривід виштовхувача, який подає готовий короб до заклеювача.

Алгоритм підтримує два основні режими:

– автоматичний. Цикл збірки коробів повторюється безперервно;

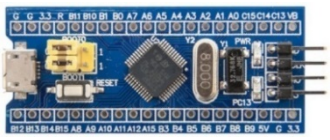
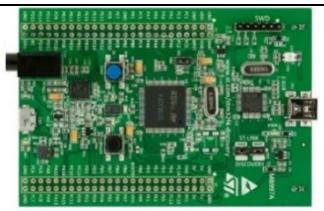
– покроковий. Кожна наступна операція виконується лише після повторного натискання кнопки користувачем, що важливо для налагодження машини.

2.3 Вибір мікроконтролера для схеми контролера

Для визначення з типом мікроконтролера, потрібно враховувати такі параметри як продуктивність швидкодії процесора, наявності якнайбільшої пам'яті як оперативної так і постійно запам'ятовуючої. Важлива наявність достатньої кількості портів входів та виходів, а також вільні порти для команди скидання програми та виводів для завантаження програми. Також в значній мірі є важливими розміри мікроконтролера та його вартість.

В таблиці 2.1 наведені порівняння характеристик мікроконтролерів.

Таблиця 2.1 – Варіанти мікроконтролерів

Модель	STM8S103F3P6	STM32F103C8T6	STM32F407G-DISC1
1	2	3	4
Зовнішній вигляд			
Ядро	STM8	ARM 32 Cortex-M3	ST-LINK/V2-A
Робоча частота	16 МГц	72 МГц	до 168 МГц
Кількість виводів GPIO	16	37	82
Кількість портів	4	4	9
Пам’ять програм	8 КБ	64 КБ	1 МБ
Оперативна пам’ять	1 КБ	20 КБ	192 КБ
Напруга живлення	від 2,0 В до 3,6 В	від 2,0 В до 3,6 В	від 3,3 В до 5 В
Кварцовий резонатор	–	8 МГц та 32768 кГц	–

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
Кварцовий резонатор	–	8 МГц та 32768 кГц	–
Аудіо	–	–	ЦАП CS43L22
Розмір	3,0 см х 1,9 см	5,3 см х 2,2 см	6,6 см х 9,7 см
Вартість	82 грн	179 грн	1344 грн

Плата розробника мінімальної конфігурації із 8-бітним мікроконтролером STM8S103F3P6. На платі зібрані всі необхідні мінімальні елементи, для початку роботи з цим сімейством мікроконтролерів. Для програмування контролера потрібне застосування програматора ST-Link. Зручне розміщення висновків дозволяє застосовувати її зі спайковими макетними платами та програмувати не виймаючи її з макетної плати [19].

Плата розробника мінімальної конфігурації із мікроконтролером ARM Cortex-M3 STM32F103C8T6. На платі зібрані всі необхідні елементи для початку роботи з цим сімейством мікроконтролерів. Для програмування контролера потрібне застосування програматора ST-Link [20].

Плата розробника STM32F407G-DISC1 побудована на базі контролера STM32F407VGT6 із ядром Cortex-M4F, яке можна розігнати до 168 МГц. Об'єм оперативної пам'яті становить 192 кб, яку можна збільшити, допаявши зовнішню мікросхему пам'яті. Флеш пам'ять програм 1 Мб. Є підтримка USB, причому контролер може бути як пристроєм, так і хостом. Існує апаратний генератор випадкових чисел. Крім звичних інтерфейсів DAC, ADC, SPI, I2C, PWM, RTC у чіпа є ще DCMI для підключення камери та SDIO для підключення карт SD. Є підтримка Ethernet [21].

На борту розміщений вбудований цифровий мікрофон MP45DT02, стереофонічний 24-бітний ЦАП CS43L22 і вбудований підселювач класу D з регулюванням гучності, тембру і т. д. Це дає можливість розробнику побудувати на цій платі непогану звукову карту.

Серед наведених мікроконтролерів, найвищу обчислювальну потужність має налагоджувальна плата STM32F407G-DISC1. Однак для даного проєкту її функціональні можливості є надлишковими, а значні габарити та висока вартість її використання економічно недоцільним.

Найбільш компактною є плата розробника мінімальної конфігурації із 8-бітним мікроконтролером STM8S103F3P6. Проте вона має лише 16 висновків загального призначення GPIO (General Purpose Input Output), чого недостатньо для реалізації повної системи керування та підключення всіх необхідних датчиків і виконавчих механізмів.

Оптимальним вибором для проєкту є мікроконтролер архітектури ARM Cortex-M3 STM32F103C8T6. При габаритах, наближених до STM8, вона має чотири порти вводу-виводу. Наявність повноцінних 16-бітних портів дозволяє ефективно реалізувати механізми переривань для групового контролю вхідних сигналів, що забезпечує мінімальний час реакції системи на зовнішні події.

2.4 Вхідний каскад узгодження сигналів

Наступним етапом розробки є проєктування вхідного каскаду узгодження. Оскільки контролер працює в умовах промислового цеху, його входи піддаються впливу високого рівня електромагнітних завад. Крім того, існує необхідність перетворення рівнів напруги. Зовнішні цифрові сигнали від датчиків мають амплітуду 24 В, тоді як вхідні порти мікроконтролера STM32 розраховані на логіку 3,3 В (або 5 В).

Схематичне рішення вхідного каскаду базується на комбінованому використанні оптичної розв'язки та транзисторного ключа.

При надходженні сигналу 24 В від датчика, резистор обмежує струм через світлодіод оптопари EL817A, виходячи з номінального струму світлодіода 10 мА. Оптопара EL817A забезпечує фізичний розрив електричного кола, що виключає пошкодження мікроконтролера при випадковому потраплянні високої напруги на вхідні клеми.

На рисунку 2.3 представлена принципова схема одного каналу вводу.

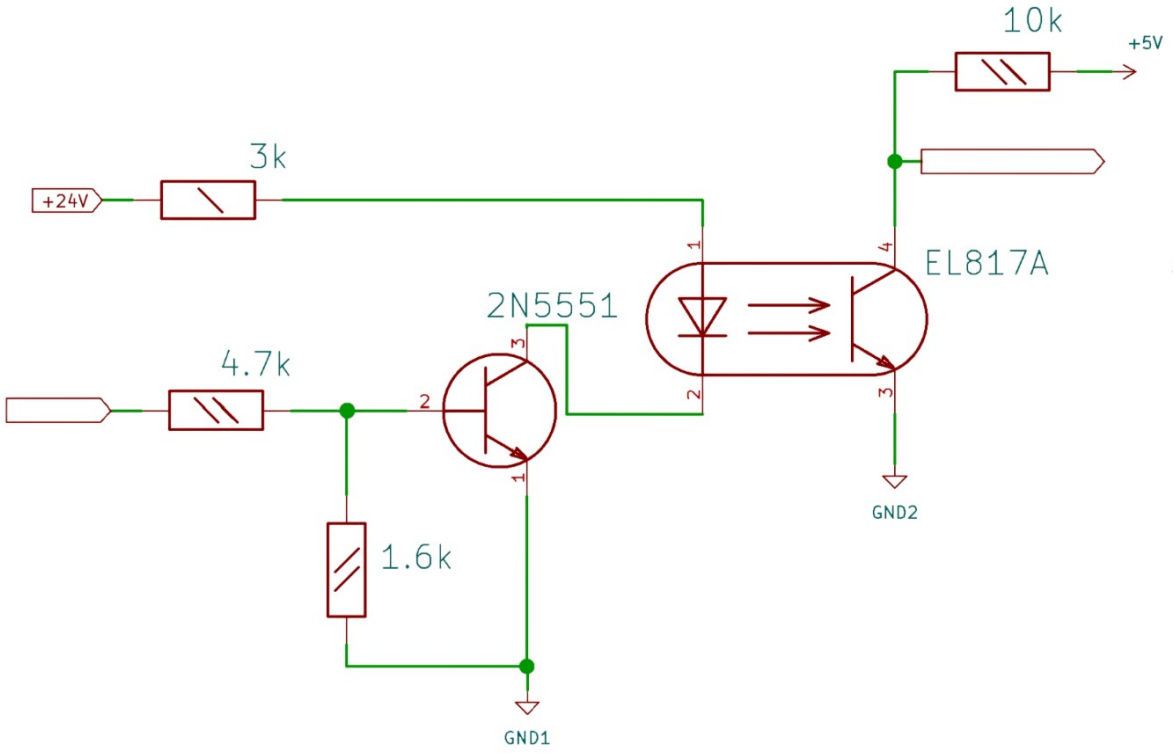


Рисунок 2.3 – Схема вхідного каскаду

Для формування чіткого логічного рівня використано транзистор 2N5551. Його висока напруга пробою 160 В та стабільний коефіцієнт підсилення дозволяють працювати в режимі насичення, забезпечуючи круті фронти сигналу для порту мікроконтролера.

2.4.1 Обгрунтування вибору оптопари гальванічної розв’язки

Для забезпечення надійної взаємодії між логічною частиною контролера 5 В та зовнішніми виконавчими механізмами й датчиками 24 В обрано оптопару EL817A. Вибір даного компонента обумовлений необхідністю реалізації повної гальванічної ізоляції, що дозволяє вирішити узгодження рівнів напруги.

Оптопара виступає в ролі перехідного містка, що дозволяє безпечно передавати сигнали від датчиків з напругою 24 В на входи мікроконтролера, та

навпаки керувати вихідними 24-вольтовими каскадами за допомогою слабкострумових сигналів МК.

Оскільки зовнішні лінії формувача коробів проходять поруч із силовими колами двигунів та пневмоклапанів, існує високий ризик виникнення індуктивних викидів. EL817A має напругу ізоляції до 5000 В, що гарантує захист мікроконтролера STM32 від виходу з ладу при виникненні аварійних ситуацій у зовнішніх мережах. На рисунку 2.4 наведено зовнішній вигляд оптопари EL817A.



Рисунок 2.4 – Оптопара EL817A

Напруга колектор-емітер V_{CEO} складає 80 В, що забезпечує стабільну роботу в 24-вольтових ланцюгах навіть при наявності невеликих пульсацій напруги живлення. Струм колектора I_C. Максимальне значення у 50 мА є цілком достатнім для керування базами вхідних та вихідних транзисторів 2N5551 та 2N5401 з великим запасом, що мінімізує тепловиділення на самій оптопарі.

Використання EL817A як для вхідних, так і для вихідних каналів дозволило уніфікувати елементну базу контролера та підвищити його завадостійкість, що є критично важливим для промислового середовища.

2.4.2 Обґрунтування вибору транзистора 2N5551

Для вхідних каскадів узгодження сигналів обрано кремнієвий епітаксіально-планарний *npn*-транзистор 2N5551. Хоча номінальна напруга зовнішніх сигналів становить 24 В, вибір даної моделі обумовлений тим що транзистор має напругу колектор-емітер V_{CEO} до 160 В. Це у понад 6 разів перевищує робочу напругу системи 24 В. Такий значний запас необхідний для стабільної роботи в умовах промислових завад та можливих сплесків напруги, що виникають при комутації індуктивних навантажень на лінії. На рисунку 2.5 наведено зовнішній вигляд транзистора 2N5551.

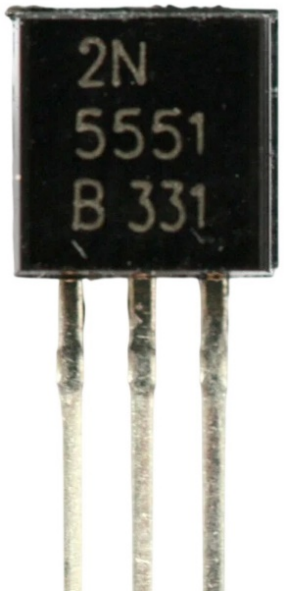


Рисунок 2.5 – Транзистор 2N5551

При максимальному струмі колектора I_C у 600 мА, реальний струм у вхідному каскаді не перевищує 10 мА. Робота в режимі малої потужності (нижче 5% від максимальної) гарантує відсутність нагріву та високу довговічність компонента. Висока гранична частота передачі струму f_T = 100–300 МГц забезпечує чіткі фронти імпульсів при передачі сигналів від датчиків. Коефіцієнт передачі струму h_{FE} у діапазоні від 80 до 250 дозволяє надійно відкривати транзистор навіть при слабких вхідних сигналах через обмежувальні резистори великого номіналу.

2.4.3 Розрахунок обмежувального резистора

Обмежити струм через світлодіод оптопари необхідно таким чином, щоб він світився достатньо для відкриття фототранзистора, але не перегорів.

Вихідні дані:

– напруга сигналу $U_{вх}$ = 24 В;

– пряме падіння напруги на діоді EL817 $U_f \approx$ 1,2 В;

– оптимальний робочий струм I_f = 10 мА.

Формула розрахунку:

$$R = \frac{U_{вх} - U_f}{I_f}, \tag{2.1}$$

де U_f – пряме падіння напруги на діоді;

I_f – робочий струм.

$$R1 = \frac{24 - 1,2}{0,01} = \frac{22,8}{0,01} = 2280 \text{ Ом} = 2,28 \text{ кОм}.$$

З таблиці стандартних номіналів резисторів, обрано резистор 3 кОм, більший за номіналом.

Перевірка струму кола світлодіода оптопари:

$$I = 22,8 / 3000 = 7,6 \text{ мА}.$$

Оптопара впевнено спрацює їй потрібно від 5 мА, а світлодіод буде працювати в щадному режимі, що збільшує термін його служби.

Визначення потужності:

$$P = I^2 \cdot R, \tag{2.2}$$

де I – струм;

R – опір.

$$P = 0{,}0076^2 \cdot 3000 = 0{,}173 \text{ Вт}.$$

Резистора на 0,25 Вт вистачить, але він може бути теплим. Для промислового пристрою використання резистора на 0,5 Вт буде надійніше. З таблиці потужностей SMD-елементів (Surface Mount Device) обрано резистор в корпусі 1210, який наведено на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Резистор SMD типарозміру 1210

2.4.4 Розрахунок ланцюга бази транзистора

Навантаженням транзистора є ланцюг живлення світлодіода оптопари джерело 24 В, резистор 3 кОм, світлодіод EL817A, колектор транзистора. Раніше визначено, що для стабільного світіння світлодіода потрібен струм близько $I_c \approx 10$ мА. Для розрахунків приймається максимальний струм колектора $I_c = 10$ мА.

Щоб транзистор працював як ключ, в режимі глибокого насичення і на ньому не падала зайва напруга, струм бази повинен бути достатнім для відкриття при найгірших умовах. Мінімальний статичний коефіцієнт передачі струму для 2N5551 за даташитом становить $h_{FE(min)} = 80$. Мінімальний струм бази:

$$I_{b(min)} = \frac{I_C}{h_{FE(\min)}}, \tag{2.3}$$

де I_C – струм колектора;

$h_{FE(\min)}$ – коефіцієнт передачі струму.

$$I_{b(\min)} = \frac{10\,mA}{90} = 0{,}125 = 0{,}125 \text{ мА}.$$

Щоб гарантувати насичення при будь-яких температурах та розкидах параметрів у 2N5551, застосовується коефіцієнт перевантаження (зазвичай від 10 до 20). Приймаємо бажаний струм бази з великим запасом I_b від 4 мА до 5 мА.

Розрахуємо опір вхідного резистора, який забезпечить струм бази ≈5 мА при подачі сигналу 24 В. На відкритому переході база-емітер падає напруга U_{be} ≈ 0,7 В.

$$R_{вх} = \frac{U_{вх} - U_{бе}}{I_б}, \tag{2.4}$$

де $U_{бе}$ – напруга між базою та емитером транзистора;

$I_б$ – струм бази транзистора.

$$R_{вх} = \frac{24 - 0{,}7}{0{,}005} = \frac{23{,}3}{0{,}005} = 4660 \text{ Ом}.$$

У стандартному ряду номіналів резисторів, найближчим стандартним і легкодоступним значенням є 4,7 кОм.

Визначення потужності резистора виконується за формулою (2.2).

$$P = 0{,}005^2 \cdot 4700 = 0{,}1175 \text{ Вт}.$$

Резистора на 0,25 Вт вистачить. З таблиці потужностей SMD-елементів (Surface Mount Device) обрано резистор в корпусі 1206, який наведено на рисунку 2.7. Це доволі зручний типарозмір елемента, для ручного монтажу.



Рисунок 2.7 – Резистор SMD типарозміру 1206

2.4.5 Розрахунок підтягуючого резистора бази транзистора 2N5551

Тепер необхідно забезпечити завадостійкість. У промислових кабелях часто наводяться паразитні напруги. Якщо залишити базу без підтяжки до землі, наведення у 1-2 Вольта може випадково відкрити транзистор. Введемо поріг нечутливості. Схема не повинна реагувати на завади амплітудою до $U_{пор} \approx 2{,}4$ В.

Кремнієвий транзистор починає відкриватися при напрузі на базі $U_b \approx 0{,}6$ В. Резистор 4,7 кОм та шуканий резистор R_{be} утворюють подільник напруги. Знайдемо R_{be} з рівняння подільника для порогової напруги 2,4 В:

$$U_{бе} = U_{пор} \cdot \frac{R_{бе}}{R_{вх} + R_{бе}}, \tag{2.5}$$

де $U_{бе}$ – напруга між базою та емітером транзистора;

$U_{пор}$ – напруга порогу нечутливості, на базі транзистора;

$R_{бе}$ – резистор між базою та емітером транзистора;

$R_{вх}$ – резистор бази транзистора.

$$0,6 = 2,4 \cdot \frac{R_{бе}}{4700 + R_{бе}},$$

$$0,6 \cdot (4700 + R_{be}) = 2,4 \cdot R_{бе},$$

$$2820 + 0,6 \cdot R_{be} = 2,4 \cdot R_{бе},$$

$$2820 = 1,8 \cdot R_{бе},$$

$$R_{be} = \frac{2920}{1,8} = 1622 \text{ Ом}.$$

Найближчим значенням зі стандартного ряду є 1,6 кОм.

Визначення потужності резистора виконується за формулою (2.2).

$$P = 0,005^2 \cdot 1600 = 0,1175 \text{ Вт}.$$

Резистора на 0,25 Вт достатньо. З таблиці потужностей SMD-елементів (Surface Mount Device) обрано резистор в корпусі 1206.

2.5 Вихідний каскад керування виконавчими механізмами

Вихідний каскад призначений для перетворення слабкострумових логічних сигналів мікроконтролера 5 В у потужні сигнали керування промисловими реле або пневмоклапанами з робочою напругою 24 В та струмом споживання до 40 мА. Основними завданнями схеми є підсилення за потужністю, забезпечення струму, необхідного для спрацювання електромагнітної котушки реле. Гальванічна ізоляція, захист обчислювального ядра від високовольтних викидів, що виникають в індуктивних навантаженнях реле. Комутація позитивного сигнала,

подача напруги «+24 В» на навантаження, що є стандартом промислової безпеки. Схема вихідного каскада наведена на рисунку 2.8.

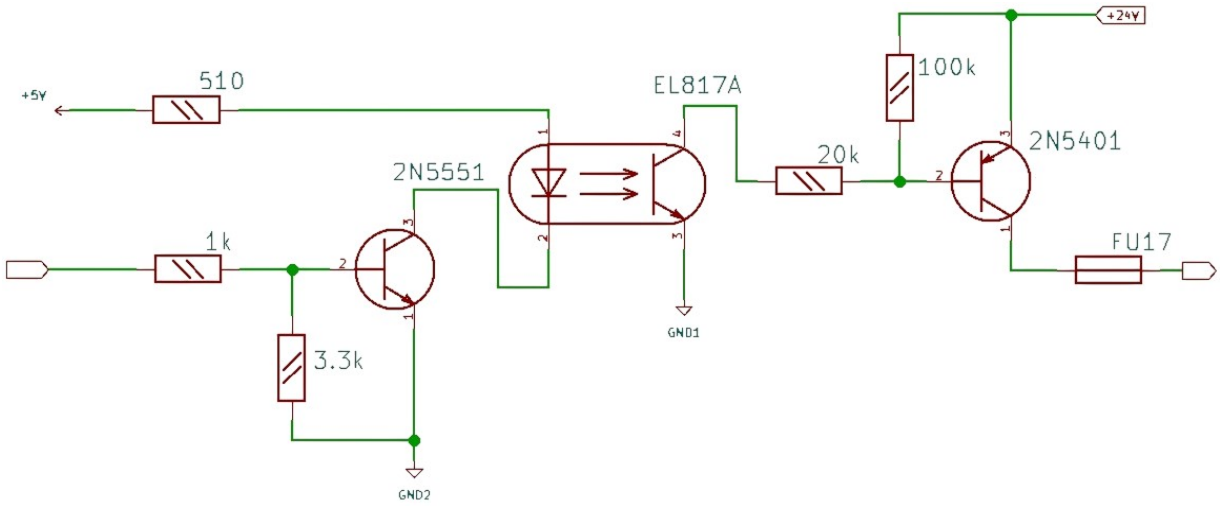


Рисунок 2.8 – Схема вихідного каскада

Робота каскаду відбувається у три етапи. При появі високого рівня на виході МК, транзистор 2N5551 відкривається. Він працює як попередній підсилювач, він розвантажує вихід МК замикаючи коло живлення світлодіода оптопари EL817A. Резистор 510 Ом обмежує струм через діод на рівні ~7,3 мА.

Світловий потік від діода відкриває фототранзистор усередині оптопари. Оскільки емітер фототранзистора з'єднаний із базою вихідного транзистора через резистор 20 кОм, він починає витягувати струм із бази 2N5401.

Транзистор 2N5401 (pnp-типу) переходить у стан насичення, з’єднуючи шину +24 В із вихідним терміналом. Навантаження отримує живлення. При зникненні сигналу резистор 100 кОм надійно закриває транзистор, запобігаючи витокам.

2.5.1 Обґрунтування вибору транзистора 2N5551

Використаний у вхідній частині як ключ керування оптопарою. Він має високу напругу колектор-емітер 160 В. Хоча в цій частині схеми напруга лише 5 В, використання високовольтного транзистора забезпечує виняткову надійність та уніфікацію елементної бази. Його струму 600 мА, з величезним запасом

вистачає для живлення світлодіода 10 мА. Його низька вартість та малогабаритність дозволяє в даній схемі використовувати цей транзистор як уніфікований елемент.

Використання однотипних елементів у різних вузлах пристрою дозволяє скоротити кількість позицій у специфікації (BOM – Bill of Materials). Це спростить процес закупівлі, знизить ризик помилок при монтажі та полегшить технічне обслуговування контролера.

2.5.2 Обґрунтування вибору транзистора 2N5401

Це ключовий елемент вихідного каскаду, що безпосередньо комутує навантаження. Висока робоча напруга V_{CEO} = 150 В. Це критично важливо при роботі з реле. В момент вимкнення реле виникає зворотна ЕРС (елекстрорушійна сила), яка може в рази перевищувати 24 В. Запас у 150 В дозволяє транзистору витримувати ці мікросплески без пробою. Зовнішній вигляд транзистора 2N5401 наведено на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 – Транзистор 2N5401

При робочому струмі навантаження 40 мА, максимальний струм транзистора 600 мА задіяний лише на 7%. Це гарантує, що транзистор практично не нагрівається і не потребує додаткового охолодження.

2.5.3 Обґрунтування захисту виходу

Наявність самовідновлювального запобіжника обґрунтована специфікою промислової експлуатації: При випадковому короткому замиканні в лінії реле (наприклад, пошкодження ізоляції дроту), струм різко зросте. Запобіжник збільшить свій опір, обмеживши струм на безпечному рівні, що врятує транзистор 2N5401 від термічного руйнування. Після усунення замикання система повернеться до робочого стану автоматично, що підвищує показник готовності системи.

Запобіжник MF-PPTC-1206-0.05A уявляє собою SMD елемент типурозміру 1206, який наведено на рисунку 2.10. Призначені вони захисту електричних ланцюгів від перевантажень – після появи перевантаження, внаслідок проходження збільшеного струму, зростає їх температура і відбувається різке зростання резистансу, що обмежує струм. В нашому випадку більше 50 мА. Це на 10 мА більше, ніж споживають виконавчі реле.

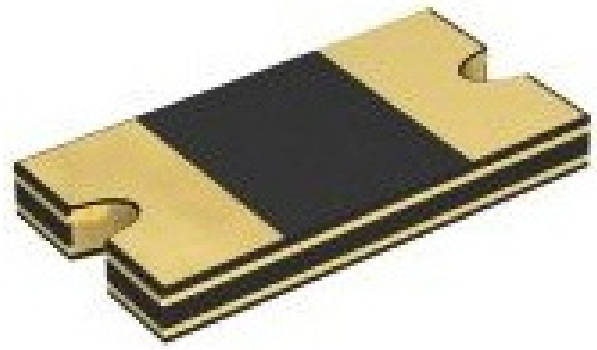


Рисунок 2.10 – Запобіжник MF-PPTC-1206-0.05A

Після охолодження самостійно повертаються у стан провідності. Існують у версіях призначених для наскрізного та поверхневого монтажу.

2.5.4 Розрахунок обмежувального резистора світлодіода оптопари

Резистор номіналом 510 Ом виконує функцію обмеження прямого струму світлодіода оптопари. Розрахунок проведено виходячи з необхідності забезпечення струму 7,25 мА при напрузі живлення 5 В. Даний режим забезпечує

впевнене спрацювання оптичної розв'язки при мінімальному тепловиділенні та високому ресурсі роботи компонентів. Цей резистор стоїть у колекторному ланцюзі транзистора 2N5551 і послідовно зі світлодіодом оптопари EL817A.

Вихідні дані для розрахунку. Напруга живлення логічної частини схеми U_{cc} 5 В. Пряме падіння напруги на світлодіоді U_f для EL817A це стандартно 1,2 В. Напруга насичення транзистора 2N5551 $U_{ce(sat)}$ коли транзистор повністю відкритий, на ньому падає приблизно 0,1 В. Цільовий робочий струм I_f. Для надійної передачі сигналу через оптопару зазвичай обраноть струм у діапазоні від 5 мА до 10 мА.

Потрібно відняти від напруги живлення всі падіння напруги на напівпровідниках і поділити на бажаний струм.

$$R = \frac{U_{cc} - U_f - U_{ce(sat)}}{I_f}, \tag{2.6}$$

де U_{cc} – напруга живлення;

U_f – пряме падіння напруги на світлодіоді;

$U_{ce(sat)}$ – напруга насичення транзистора;

I_f – цільовий робочий струм.

$$R = \frac{5 - 1,2 - 0,1}{0,0075} = \frac{3,7}{0,0075} \approx 493 \text{ Ом.}$$

Згідно зі стандартним рядом резисторів, найближчим більшим номіналом є 510 Ом. Світлодіод працюватима лише на 15% від своєї максимальної потужності, що практично виключає його перегрів та деградацію з часом.

Визначення потужності резистора виконується за формулою (2.2).

$$P = 0,00725^2 \cdot 510 \approx 0,011 \text{ Вт.}$$

Навіть найменший резистор типорозміру 0603 (0,1 Вт) або 1206 (0,25 Вт) буде працювати без нагріву, оскільки реальна потужність менша за номінальну.

2.5.5 Розрахунок резистора бази транзистора 2N5551

Навантаженням для першого транзистора 2N5551 є світлодіод оптопари. Струм через світлодіод задається резистором 510 Ом. Щоб пропустити 7,2 мА, базовий струм має бути:

$$I_b = I_c / h_{FE}, \tag{2.7}$$

де I_c – струм колектора;

h_{FE} – коефіцієнт передачі транзистора.

Для 2N5551 h_{FE} = 80, мінімальний струм бази $I_{b(\min)}$ = 0,1 мА. Для надійного відкриття 2N5551 при струмі колектора ~10 мА достатньо струму бази 0,5 мА. Напруга від мікроконтролера STM32 складає 3,3 В. На переході база-емітер втрачається 0,7 В. Для роботи в режимі ключа використовують коефіцієнт запасу від 10 до 30. Візьмемо середнє значення, щоб отримати струм бази I_b від 2 мА до 3 мА. Це гарантує, що транзистор буде повністю відкритий.

$$R_b = \frac{U_{mcu} - U_{be}}{I_b}, \tag{2.8}$$

де U_{mcu} – напруги логічного сигналу, з виводу мікроконтролера;

U_{be} – напруга між базою та колектором транзистора;

I_b – струм бази транзистора.

$$R_b = \frac{3,3 - 0,7}{0,026} = \frac{2,6}{0,026} = 1000 \text{ Ом}.$$

Найближчий стандартний номінал 1 кОм. Він забезпечує чітке і швидке насичення транзистора.

Визначення потужності резистора виконується за формулою (2.2).

$$P = 0{,}0026^2 \cdot 1000 = 0{,}00676 \text{ Вт.}$$

Навіть найменший резистор типорозміру 0603 (0,1 Вт) буде працювати без нагріву, оскільки реальна потужність менша за номінальну. Обрано резистор в корпусі 1206.

2.5.6 Розрахунок резистора-шунта транзистора 2N5551

Знаючи номінал базового резистора 1 кОм, можна розрахувати шунт, який захистить схему від завад. Потрібно щоб транзистор ігнорував будь-яку напругу на вході, яка нижче за 0,8 В, стандарт логічного нуля. Транзистор починає фізично відкриватися при напрузі на базі 0,6 В.

Напругу між базою та колектором транзистора розраховується за формулою (2.5).

$$0{,}6 \cdot (1000 + R_{be}) = 0{,}8 \cdot R_{be},$$

$$600 + 0{,}6 \cdot R_{be} = 0{,}8 \cdot R_{be},$$

$$600 = 0{,}2 \cdot R_{be},$$

$$R_{be} = 3000 \text{ Ом.}$$

Оскільки 3 кОм – це граничне значення, обираємо наступний за номіналом резистор 3,3 кОм. Це дає невеликий додатковий запас по завадостійкості.

Розрахунок потужності резистора R_{be} 3,3 кОм. Коли транзистор 2N5551 відкритий, напруга на його базі і відповідно, на резисторі 3,3 кОм, який підключений паралельно переходу база-емітер фіксується на рівні падіння напруги на переході $U_{be} \approx 0{,}7$ В.

Найзручніше використовувати формулу потужності через напругу та опір:

$$P = \frac{U^2}{R}, \tag{2.9}$$

де U – напруга;

R – опір.

$$P = \frac{0,7^2}{3300} = \frac{0,49}{3300} = 0,000148 \text{ Вт} = 0,148 \text{ мВт}.$$

Обрано резистор в корпусі 1206.

2.5.7 Розрахунок резистора бази транзистора 2N5401.A

Навантаженням для транзистора 2N5401 є реле 24 В, 40 мА. Струм колектора I_c = 40 мА. Коефіцієнт підсилення 2N5401 при такому струмі h_{FE} від 50 до 60. Необхідний струм бази для насичення:

$$I_b = (I_c / h_{FE}) k_{зап}, \tag{2.10}$$

де I_c – струм колектора;

h_{FE} – коефіцієнт підсилення;

$k_{зап}$ – коефіцієнт запасу.

$$I_b = (40 / 50) \cdot 1,5 = 1,2 \text{ мА}.$$

При напрузі 24 В, опір резистора:

$$R = (24 – 0,7) / 0,0012 \approx 19,4 \text{ кОм}.$$

Обрано номінал 20 кОм. Це гарантує повне відкриття транзистора і мінімальний його нагрів.

Для визначення потужності резистора, спочатку знайдемо напругу падіння на цьому резисторі. Від напруги живлення 24 В, віднімається падіння напруги на переході база-емітер транзистора 2N5401 $U_{be} \approx 0{,}7$ В та падіння напруги на відкритому фототранзисторі оптопари $U_{ce_opt} \approx 0{,}2$ В.

$$U_R = U_{живл} - U_{be} - U_{ce_opt}, \tag{2.11}$$

де $U_{живл}$ – напруга живлення;

U_{be} – напруга бази – колектора транзистора;

U_{ce_opt} – напруга колектора – емітера оптопари.

$$U_R = 24 - 0{,}7 - 0{,}2 = 23{,}1 \text{ В}.$$

Використовуємо стандартну формулу потужності через напругу та опір:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{23{,}1^2}{2000} = \frac{533{,}61}{2000} \approx 0{,}0267 \text{ Вт} \approx 26{,}7 \text{ мВт}.$$

Обрано резистор в корпусі 1206.

2.5.8 Розрахунок підтягуючого резистора бази транзистора 2N5401

Цей резистор утримує транзистор 2N5401 закритим, коли фототранзистор оптопари вимкнений.

Навіть коли оптопара EL817A вимкнена, через її фототранзистор протікає мізерний струм, який називається струмом витоку I_{ceo}. Згідно з документацією, він може сягати 1 мкА.

Напруга на резисторі від струму витоку не повинна перевищувати напругу порогу відкриття транзистора U_{be} ≈ 0,5 В. Розрахунок максимального опору:

$$R_{\max} = \frac{U_{be_off}}{I_{ceo}}, \tag{2.12}$$

де U_{be_off} – напруга порогу відкриття транзистора;

I_{ceo} – струм витоку.

$$R_{\max} = \frac{0,5}{0,000001} = 500 \text{ кОм}.$$

Будь-який резистор менше 500 кОм впорається з цим завданням. Номінал 100 кОм обрано для забезпечення 5-кратного запасу по струму витоку.

Номінал 100 кОм є стандартним вибором, він досить малий, щоб нейтралізувати витоки, і досить великий, щоб не витрачати зайву енергію під час відкритого стану.

Оскільки він підключений паралельно переходу база-емітер, напруга на ньому ніколи не перевищить 0,7 В.

Розрахунок потужності резистора виконується за формулою (2.9).

$$P = \frac{0,7^2}{100000} = 0,0000049 \text{ Вт}.$$

Обрано резистор в корпусі 1206.

2.6 Розробка вузла розширення вихідних портів керування на базі регістрів зсуву

Для керування великою кількістю пристроїв релейні модулі та світлодіодна індикація, виникла потреба у значній кількості дискретних виходів. З метою

раціонального використання ресурсів мікроконтролера STM32 та мінімізації кількості задіяних GPIO-портів, впроваджено вузол розширення на базі восьмирозрядних регістрів зсуву 74HC595N із вихідною засувкою.

Призначення виводів мікросхеми 74HC595N наведено на рисунку 2.11.

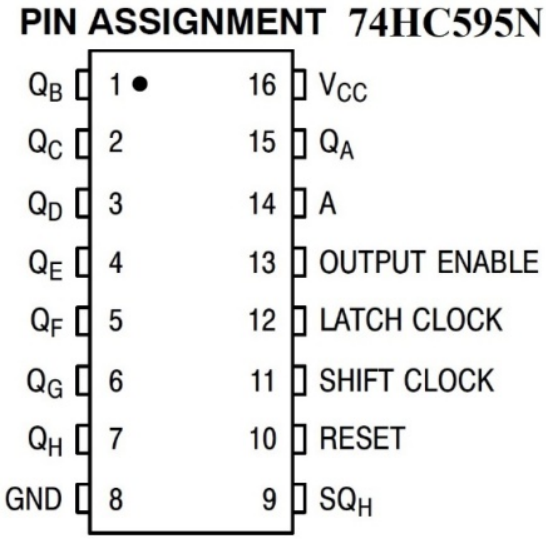


Рисунок 2.11 – Призначення виводів мікросхеми 74HC595N

Керування будь-якою кількістю каскадованих регістрів здійснюється лише за допомогою трьох сигнальних ліній (Serial Data, Shift Clock, Latch Clock).

Завдяки наявності внутрішнього буфера, стан на виходах QA-QH змінюється лише після завершення повного циклу передачі даних, що виключає «мигтіння» або помилкові спрацювання пристроїв під час зсуву бітів. Схема дозволяє легко збільшувати кількість виходів шляхом додавання нових мікросхем у каскад без використання додаткових пінів контролера.

У проекті застосовано послідовне (каскадне) з'єднання двох мікросхем, що забезпечує 16 вихідних каналів, як наведено на рисунку 2.12. Дані передаються послідовно через вхід SER (14 пін) першої мікросхеми. Вихід QH' (9 пін) першого регістру з’єднаний із входом SER другого. Це дозволяє 8-му біту першої мікросхеми при наступному такті «переходити» у другу мікросхему. Сигнали синхронізації SRCLK (Shift Clock) та RCLK (Latch Clock) подаються паралельно на обидві мікросхеми, що забезпечує їхню одночасну та злагоджену роботу.

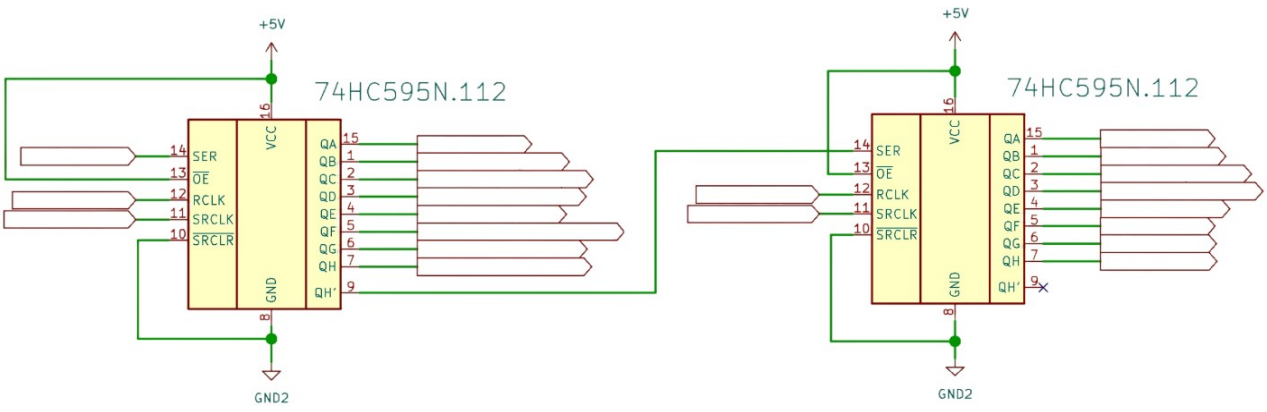


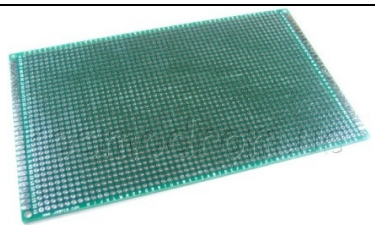
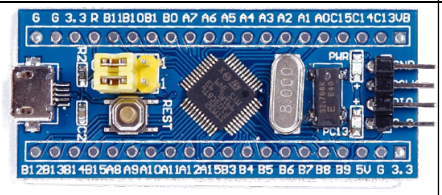
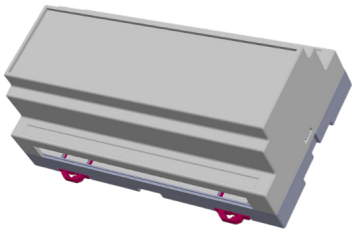
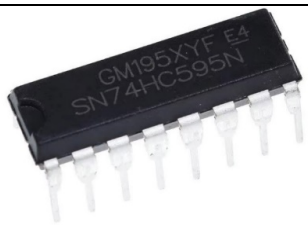
Рисунок 2.12 – Послідовне (каскадне) з'єднання двох мікросхем 74HC595N

Вивід OE підключено до шини GND, що забезпечує постійну активність виходів. SRCLR підключено до +5 В для запобігання випадковому скиданню даних під час роботи. Мікросхеми живляться від напруги +5 В, що забезпечує сумісність рівнів для керування силовими ключами та індикацією.

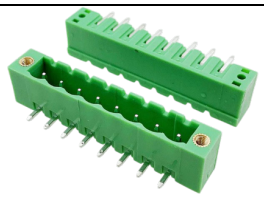
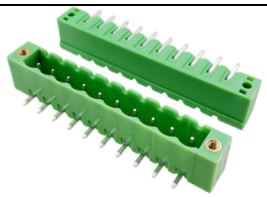
2.7 Комплектація контролера системи керування формувача коробів

При виборі елементної бази особлива увага приділялася надійності роботи в умовах промислових завад та забезпеченню високого комутаційного ресурсу. Вибір транзисторів 2N5551-B та 2N5401 обумовлений їх високою напругою пробою до 160 В, що створює необхідний запас міцності при роботі з індуктивним навантаженням. Використання оптопар EL817A дозволило повністю відокремити силові кола від обчислювального ядра STM32F103C8T6 ARM, що є стандартом для промислових контролерів. Окрім забезпечення гальванічної розв'язки, підбір елементної бази спрямований на мінімізацію габаритів модуля при збереженні високої ремонтопридатності. Вибрані мікросхеми драйверів та дискретні напівпровідникові прилади характеризуються широким температурним діапазоном роботи, що є критично важливим для стабільної експлуатації обладнання у цехових умовах. Повний перелік комплектуючих наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Перелік основних компонентів контролера

Зовнішній вигляд	Назва та тип елемента	Функціональне призначення
1	2	3
	PCB-2L-G-9X15	Макетна плата друкована
	HLK-15M05C	Джерело живлення на плату Потужність: 15 Вт Вхідна напруга: 220 В Вихідна напруга: 5 В Вих. струм: 3 А ном.
	STM32F103C8T6 ARM	Обробка вхідних сигналів згідно з алгоритмом та формування команд керування вихідними каскадами
	JG4-04	Корпус на DIN рейку світло-сірого кольору, з ABS пластику. Габаритні розміри становлять: за довжиною 158 мм, шириною 88 мм і за висотою 59 мм
	74HC595N.112	Регистр зсуву
	2N5551-B 2N5401	Транзистор: NPN, біполярний, 180 В, 600 мА, 625 мВт Транзистор: PNP, біполярний, 150 В, 600 мА, 625 мВт
	0034.1516	Запобіжник: плавка вставка, швидкий, 1 А, 250 ВАС, 5 мм х 20 мм, FSF

Продовження таблиці 2.2

1	2	3
	2EDGRM-5.08-2P	Клемник роз'ємний, однорядний, 2-х контактний
	2EMGRM-5.08-8P	Клемник роз'ємний, однорядний, 8-х контактний
	2EDGRM-5.08-10P	Клемник роз'ємний, однорядний, 10-х контактний
	FYL-3014UBC	Світлодіод 3 мм: синій, прозорий, 470 нм, 2800 мкд. 25 градусів
	FYL-3004SUGC1L	Світлодіод 3 мм: Жовтозелений, 568 нм, 1500 мкд, 30 град.
	FYL-3014SURC1A	Світлодіод 3 мм: Червоний, прозорий, 630 нм, 2200 мкд. 30 градусів
	MF-PPTC-1206-0,05A-60V	Запобіжник SMD для захисту електричних кіл від перевантажень
	SMD-резистори (1206)	Постійні резистори для поверхневого монтажу
	EL817A	Оптопара транзисторна

Для забезпечення зворотного зв’язку між виконавчим механізмом та мікроконтролером STM32F103C8T6 використано систему зовнішніх датчиків. Вхідні каскади розробленого контролера адаптовані для роботи з промисловими сенсорами напругою 24 В. Перелік та призначення зовнішніх пристроїв, що інтегруються в систему керування формувачем, наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Перелік основних зовнішніх пристроїв

Зовнішній вигляд	Назва та тип елемента	Функціональне призначення
1	2	3
	D-A93	Герконовий магнітний Напруга живлення від 5 В до 120 В DC/AC до 40 mA
	GR18S	Фотоелектричний датчик напруга живлення від 10 В DC до 30 В DC, дистанція роботи, макс. від 3 мм до 115 мм відстань спрацьовування від 5 мм до 100 мм
	G10	Фотоелектричний датчик напруга живлення від10 В DC до 30 В DC, дистанція роботи, макс. від 0,15 м до 12 м, відстань спрацьовування від 0,3 м до 9,5 м
	MY2	Реле проміжне АСКО-УКРЕМ MY2 (24 В DC 5А), для комутації виконавчими елементами в системах автоматики.

3 РОЗРОБЛЕННЯ МОДУЛЮ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ КОРОБІВ

3.1 Розрахунки друкованої плати пристрою

Першим кроком ми визначаємо умови, в яких буде працювати пристрій, та обираємо основу для плати.

Для пристроїв на базі мікроконтролерів, метою мінімізації габаритних розмірів пристрою та оптимізації розводки сигнальних ліній обрано двосторонню друковану плату на основі склотекстоліту FR-4. Він має високу механічну міцність та добрі діелектричні властивості.

Виходячи з використання SMD-компонентів резистори 1206 та мікросхем у DIP-корпусах, обираємо 3-й клас точності. Це стандартний вибір, що забезпечує баланс між щільністю монтажу та вартістю виробництва.

Електричний розрахунок параметрів провідників.

Розраховуємо мінімальну ширину доріжок, щоб вони не перегрівалися під час роботи:

$$W = \frac{I_{\max}}{i \cdot h}, \tag{3.1}$$

де $I_{\max}$ – максимальний струм у колі;

i – допустима щільність струму (для міді на зовнішніх шарах зазвичай приймають 20 … 30 А/мм^2);

h – товщина мідної фольги (стандартно 35 мкм або 0,035 мм).

$$W = \frac{1}{20 \cdot 0,035} = \frac{1}{0,7} = 1,42 \text{ мм.}$$

Мінімальна ширина доріжок для ліній живлення 1,42 мм.

Для всіх компонентів, що монтуються в отвори (THT – Through-Hole Technology), розрахунок проводиться за єдиним принципом. Діаметр отвору повинен бути дещо більшим за діаметр виводу компонента, щоб забезпечити вільне встановлення та затікання припою. Розраховуємо діаметри за формулою:

$$D = d + \Delta d, \tag{3.2}$$

де d – діаметр виводу компонента;

Δd – різниця між діаметром отвору та виводу зазвичай від 0,1 мм до 0,4 мм для забезпечення якісної пайки.

Розрахунки параметрів монтажних отворів та площадок, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунок параметрів монтажних отворів та площадок

Назва компонента	Діаметр виводу (d), мм	Розрахунковий отвір (D), мм	Прийнятий отвір, мм	Діаметр площадки ($D_{пл}$), мм
Мікроконтролер ATmega8535	0,5	0,7	0,7	0,96
Транзистор 2N5551	0,407	0,607	0,7	0,96
Транзистор 2N5401	0,39	0,59	0,7	0,96
Клемник	1	1,2	1,2	1,46
Блок живлення	0,58	0,78	0,8	1,06

Також розраховуємо діаметр контактної площадки ($D_{пл}$):

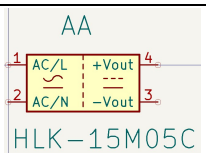
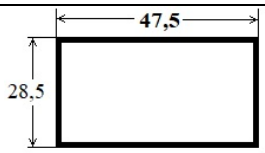
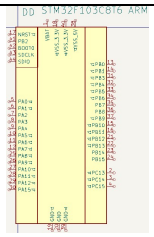
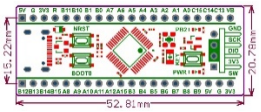
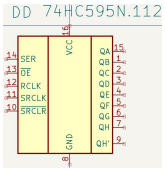
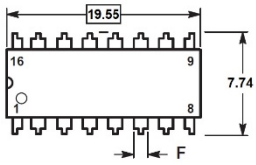
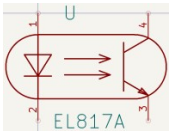
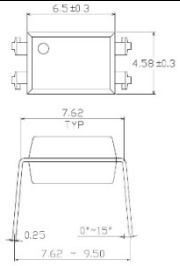
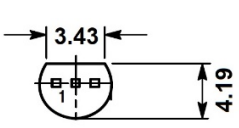
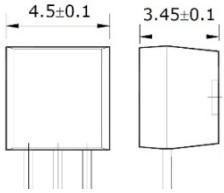
$$D_{пл} = D + 2 \cdot b + \Delta p, \tag{3.3}$$

де Δp – технологічний допуск на відхилення (зазвичай від 0,1 мм до 0,2 мм).

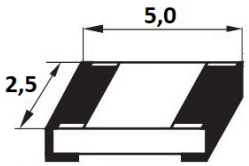
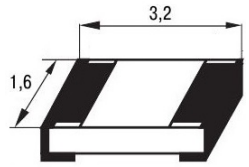
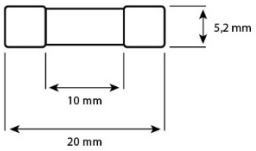
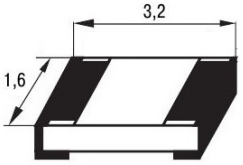
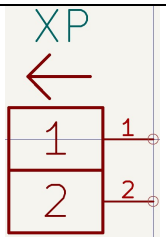
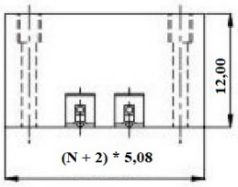
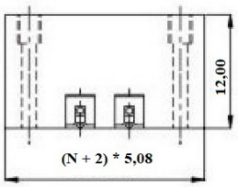
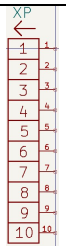
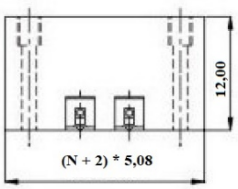
b – мінімальна ширина гарантованого металевого кільця навколо отвору (для 3-го класу від 0,05 мм до 0,1 мм).

Розрахунок площі та габаритів друкованої плати. В таблиці 3.2 наведено конструктивні та схемотехнічні параметри ЕРЕ схеми.

Таблиця 3.2 – Конструктивні та схемо технічні параметри ЕРЕ

Найменування елемента	Тип елемента	Схемний символ	Корпус, установлювальне місце, мм	К-сть ел., шт.	Площа, мм^2
1	2	3	4	5	6
Джерело живлення на плату	HLK-15M05C			1	47,5 · 28,5 = 1 353,8
Плата розробника	STM32F103C8T6 ARM			1	53,34 · 22,86 = 1 219,4
Регістр зсуву	74HC595N.112			2	19,55 · 7,74 = 151,3 151,3 · 2 = 302,6
Оптопара транзисторна	EL817A			2	4,58 · 7,62 = 35 35 · 32 = 1 120
Транзистор: NPN, біполярний	2N5551-B			2	3,43 · 4,19 = 14,4 14,4 · 32 = 460,8
Транзистор: PNP, біполярний	2N5401			6	4,5 · 3,45 = 15,5 15,5 · 16 = 248

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6
SMD-резистор (1210)	Резистор (1210)			2	5 · 2,5 = 12,5 12,5 · 32 = 400
SMD-резистор (1206)	Резистор (1206)			12	3,2 · 1,6 = 5,12 5,12 · 112 = 573,44
Запобіжник: плавка вставка, швидкий, 1А, 250ВАС, 5х20мм, FSF	0034.1516			1	5,2 · 20 = 104
Запобіжник SMD	MF-PPTC-1206-0.05A-60V			6	3,2 · 1,6 = 5,12 5,12 · 16 = 81,92
Клемник роз'ємний, однорядний, 2-х контактний (тато)	2EDGRM-5.08-2P			1	12 · 20,3 = 243,6
Клемник роз'ємний, однорядний, 8-х контактний (тато)	2EMGRM-5.08-8P			3	12 · 50.8 = 609,6 609,6 · 3 = 1 828,8
Клемник роз'ємний, однорядний, 10-х контактний (тато)	2EDGRM-5.08-10P			1	12 · 60.9 = 731,5
Разом				60	$S_{комп}$ = 8 667,86

Оскільки деталі не можна ставити впритул (потрібне місце для доріжок та зазорів), застосовується коефіцієнт розрідженості. Оскільки монтаж компонентів передбачається з обох сторін друкованої плати, SMD-елементи на нижньому шарі, DIP-компоненти на верхньому, розрахункова площа плати визначається із заниженим коефіцієнтом розрідженості K_p = 1,8:

$$S_{дп} = S_{комп} \cdot K_p, \tag{3.4}$$

де $S_{дп}$ – розрахункова площа плати;

$S_{комп}$ – сумарна площа компонентів;

K_p – коефіцієнт розрідженості.

$$S_{дп} = 8667{,}86 \cdot 1{,}8 = 15\,602{,}15 \text{ мм}^2.$$

Виходячи з отриманої площі, обрано довжину та ширину плати L = 150 мм, B = 82 мм, для стандартного корпусу 158 мм на 87 мм.

3.2 Вхідні канали модулю керування

Для забезпечення надійної роботи в умовах промислових завад, інтерфейси контролера спроектовані з дотриманням принципу повної гальванічної розв’язки. Керуючим ядром виступає мікроконтролер архітектури ARM Cortex-M3, який взаємодіє з периферією через спеціалізовані буферні каскади. Загальний вигляд контролера наведено на рисунку 3.1.

Система живлення пристрою має багаторівневу структуру, що забезпечує стабільну роботу контролера в умовах промислових завад.

Первинне коло 220 В, здійснює живлення імпульсного блока живлення, який перетворює змінну напругу в стабілізовану постійну напругу 5 В.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд проектованого модуля керування

Вторинне коло 5 В, формується внутрішнім стабілізатором для безпосереднього живлення мікроконтролера STM32 та логічних рівнів зсувних регістрів.

Силове коло 24 В, використовується для живлення периферійних пристроїв індуктивних датчиків, електромагнітних клапанів та обмоток реле.

В таблиці 3.3 наведено специфікація ланцюгів живлення модуля.

Таблиця 3.3 – Специфікація ланцюгів живлення модуля

Ланцюг живлення	Номінальна напруга	Позначення	Тип пристрою
AC Input	~220 В (50 Гц)	XS1.1 – L (Line) XS1.2 – N (Neutral)	Мережеве живлення пристрою
DC Input	+24 В	XS4.9 – + 24 В XS4.10 – - 24 В	Живлення периферії

Вхідні канали розраховані на роботу з сигналами рівня 24 В. Кожен вхід захищений оптопарою, що виключає можливість потрапляння високої напруги на порти STM32. Струм вхідного світлодіода оптопари, обмежений резистивним дільником, що забезпечує стабільне спрацьовування.

В таблиці 3.4 наведено призначення вхідних каналів модуля.

Таблиця 3.4 – Специфікація вхідних інтерфейсів модуля

Позначення	Тип пристрою	Призначення	Порт STM32
1	2	3	4
XS2.1	Кнопка з фіксацією	Аварійна зупинка	PA8
XS2.2	Оптичний датчик	Контроль, коробка на ленті	PA9
XS2.3	Оптичний датчик	Контроль, коробка на транспортері	PA12
XS2.4	Датчик хола	Клапан Передній опущено	PA15
XS2.5	Датчик хола	Присоски видвинуто	PA4
XS2.6	Індуктивний датчик	Присоски в вих. становищі	PA5
XS2.7	Датчик хола	Клапан Передній піднято	PA6
XS2.8	Датчик хола	Виштовхувач коробів видвинуто	PA7
XS3.1	Датчик хола	Клапан Задній піднято	PA1
XS3.2	Оптичний датчик	Контроль, малий клапан НЕ ПІДНЯТО	PA2
XS3.3	Датчик хола	Поздовжні клапани піднято	PA3
XS3.4	Кнопка без фіксації	"Підготовка"	PA0
XS3.5	Кнопка з фіксацією	"Режим Авто"	PA10
XS3.6	Кнопка без фіксації	"Ручний покроковий"	PA11

Вхідна частина реалізована для роботи з промисловим стандартом напруги 24 В. Для цього використані два 8-пінові роз’єми XS2 та XS3. Для захисту портів мікроконтролера використані оптопари, що забезпечують гальванічну ізоляцію.

Це виключає пошкодження процесора при виникненні високовольтних завад на лініях датчиків.

На борту плати розташовано джерело живлення 5 В. Воно потребує, для стабільної роботи живлення 220 В. Воно організовано під'єднанням окремим 2-піновим роз'ємом XS1.

Під'єднання вхідних сигналів та живлення контролера розташовано у верхній частині пристрою.

Автомат, формувач коробів, має зовнішнє джерело живлення 24 В. Контролер використовує це живлення, для керування зовнішніми пристроями, наприклад котушками реле. Це живлення приєднується до 10-пінового роз'єму XS4, котрий розташовується в нижній частині контролера.

На рисунку 3.2 наведено розміщення компонентів вхідної групи та блоку гальванічної розв'язки на друкованій платі.

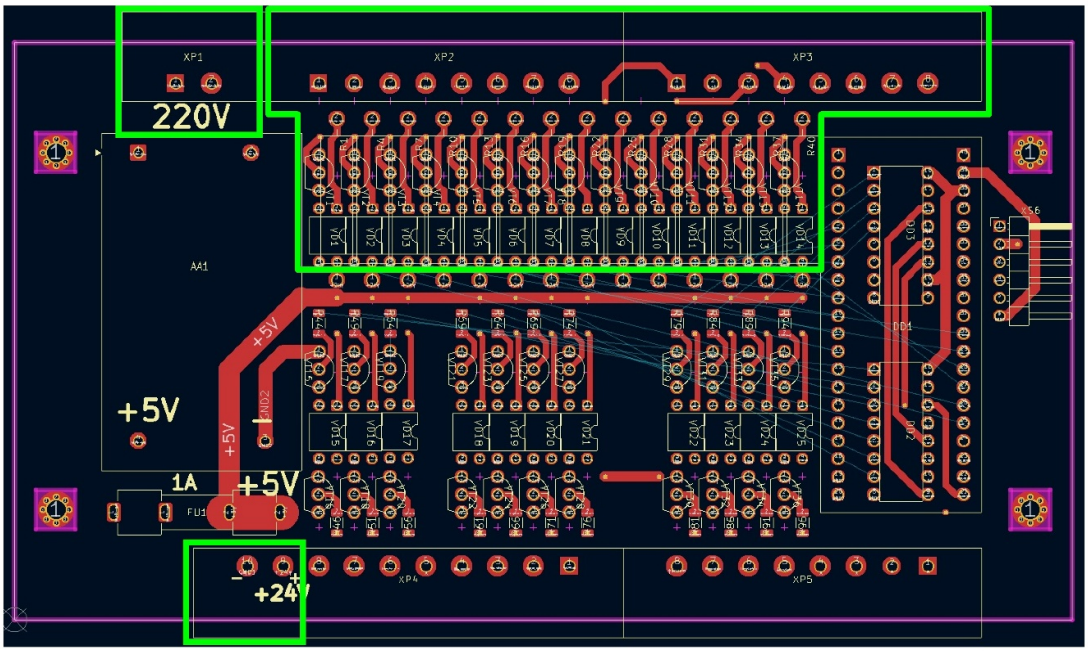


Рисунок 3.2 – Розміщення компонентів вхідної групи та блоку гальванічної розв'язки та живлення на друкованій платі

На рисунку 3.3 наведено зовнішні інтерфейси для підключення інформаційних сигналів 24 В та живлення, на платі взборі.

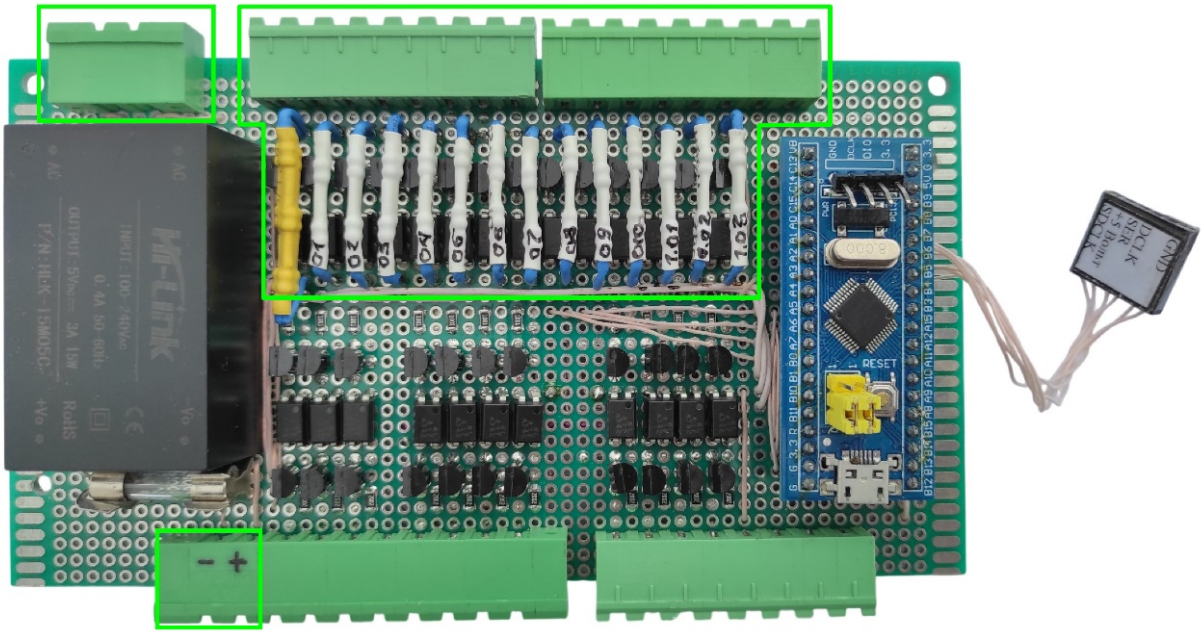


Рисунок 3.3 – Зовнішні інтерфейси для підключення інформаційних сигналів 24 В та живлення

На рисунку 3.4 наведено розташування точок підключення мережевого живлення (~220 В), та низьковольтних ліній керування.



Рисунок 3.4 – Розташування точок підключення мережевого живлення (~220 В) та низьковольтних ліній керування

3.3 Вихідні канали модулю керування

Вихідна частина базується на зсувних регістрах 74HC595. Це дозволило розширити кількість вихідних каналів до 16 та вихід для індикації до 32 каналів. Використовуючи лише по 3 виводи STM32, під кожну задачу. Таке рішення забезпечує масштабованість системи та спрощує розведення плати.

Підключення виконавчих пристроїв до виходів контролера, відбувається за допомогою двох роз’ємів, 10-пінопого XS4 та 8-пінового XS5.

В таблиці 3.5 наведено специфікація міжкомпонентних з’єднань та призначення вихідних каналів керування.

Таблиця 3.5 – Специфікація міжкомпонентних з’єднань та призначення вихідних каналів керування

Порт STM32	Вхід регістру зсуву	Вихід регістру зсуву	Вихідний роз'єм плати	Тип пристрою	Призначення
PB12; PB13; PB14.	14-SER; 12-RCLK; 11-SRCLK.	DD2.QB	XP4.8	Пускач	Ремінний виштовхувач
		DD2.QC	XP4.7	Пускач	Малий транспортер
		DD2.QD	XP4.6	Пускач	Пускач - +
		DD2.QE	XP4.4	Пневмоклапан	Виштовхувач коробів
		DD2.QF	XP4.3	Пневмоклапан	Присоски видвинути
		DD2.QG	XP4.2	Пневмоклапан	Клапан Задній
		DD2.QH	XP4.1	Пневмоклапан	Клапан Передній
		DD3.QB	XP5.8	Пневмоклапан	Вакуум
		DD3.QC	XP5.7	Індикація	Підготовка
		DD3.QD	XP5.6	Пневмоклапан	Поздовжні клапани
		DD3.QE	XP5.5	Індикація	Аварія

На рисунку 3.5 наведено розміщення каскаду зсувних регістрів 74HC595 та вихідних драйверів на платі. Виділена зона демонструє апаратну частину вихідного каскаду. Використання мікросхем 74HC595 дозволяє перетворювати послідовний код від STM32 у паралельні сигнали керування. Праворуч, зона виводів, під'єднання плати індикації.

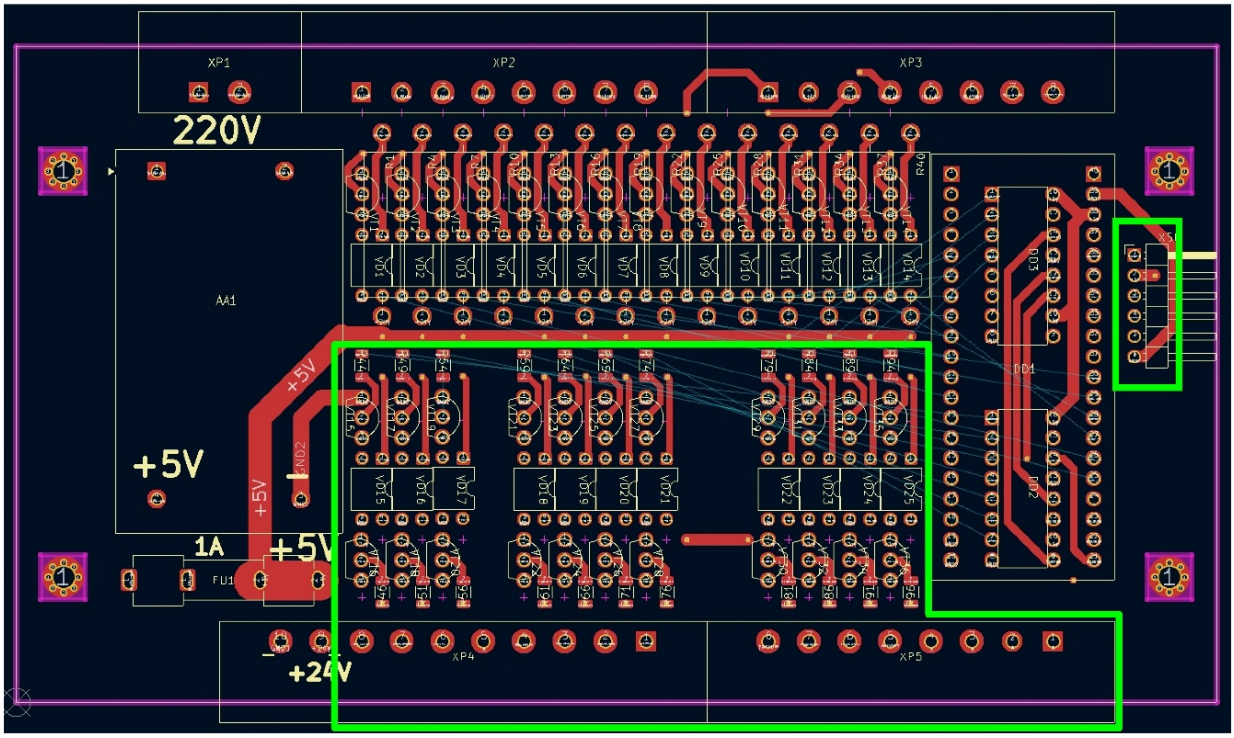


Рисунок 3.5 – Вузол розширення вихідних каналів на базі послідовних регістрів

Нижня група клемників призначена для безпосереднього підключення виконавчих пристроїв, наведено на рисунку 3.6.

Кожен контакт відповідає певному біту зсувного регістра.

Зеленим кольором виділено зону силових виходів. Розташування роз'ємів у нижній частині корпусу є оптимальним для відведення дротів до виконавчих механізмів машини.

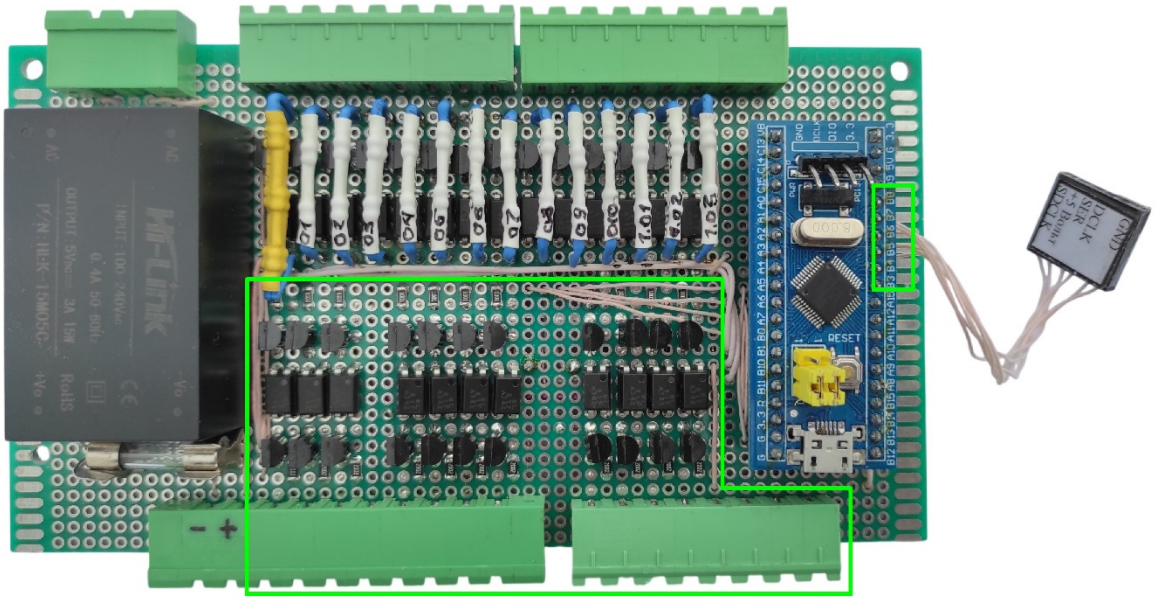


Рисунок 3.6 – Вихідні термінали друкованої плати для комутації навантаження

Конструктивне розташування вихідної групи роз’ємів у корпусі пристрою, наведено на рисунку 3.7.

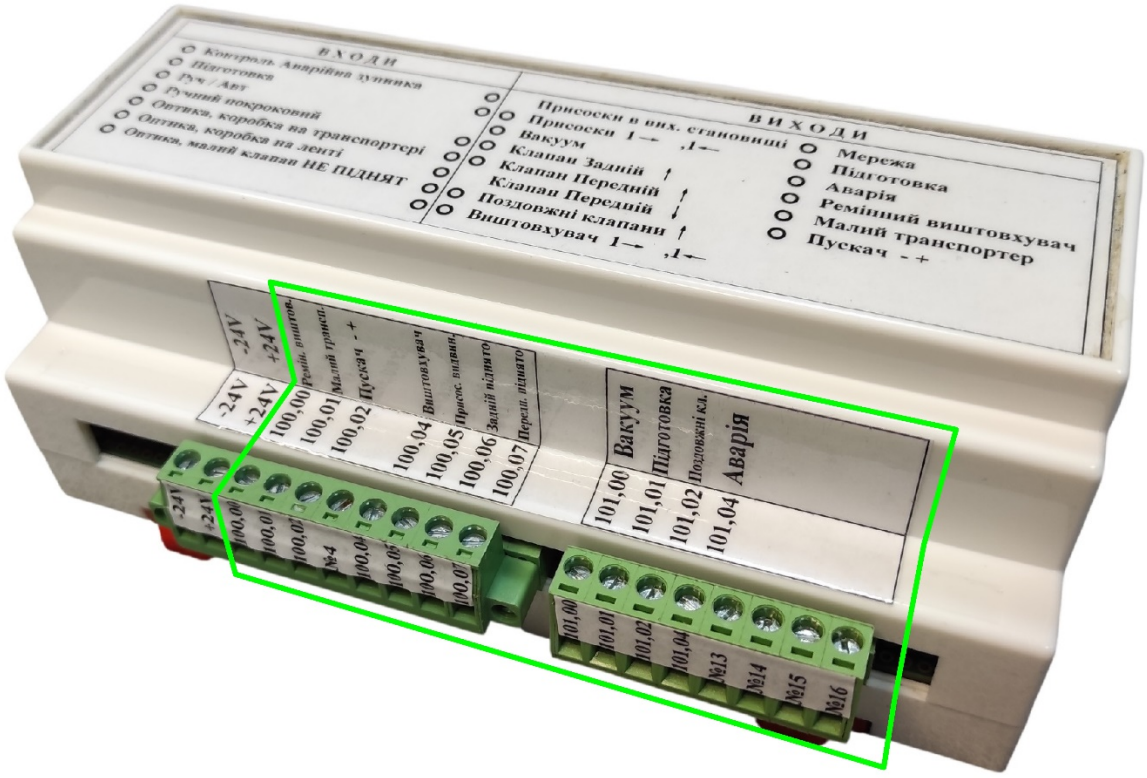


Рисунок 3.7 – Загальний вигляд зони підключення виконавчих механізмів

Вихідні сигнали регістра підсилюються транзисторними ключами, що забезпечує комутацію силових навантажень.

Випробування контролера проведено на автоматі формувач коробів. Як наведено на рисунку 3.8. Контролер працює нормально.

В роботі контролера збоїв не виявлено. На команди користувача реагує миттєво.

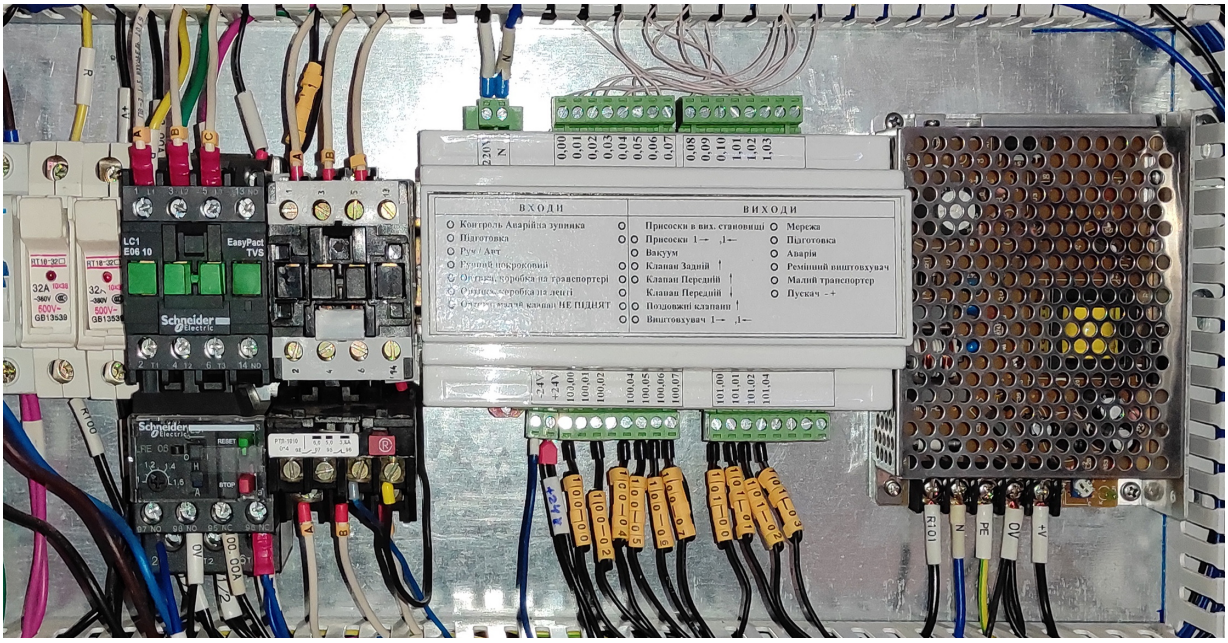


Рисунок 3.8 – Випробування контролера у робочому режимі

В ході випробувань імітовано присутність коробу на транспортері та на заклеювальному механізмі. Робота формувальника призупиняється, до усунення причини зупинки.

Перевірено вимкнення автомата, натисканням аварійної кнопки. Усі механізми вимикаються миттєво.

3.4 Розрахунок надійності пристрою за раптовими відмовами

Розрахунок надійності базується на припущенні, що відмова будь-якого компонента призводить до відмови всього пристрою, послідовна модель

надійності. Розглядаються раптові відмови, які виникають внаслідок внутрішніх дефектів компонентів або критичних навантажень.

Основним показником є інтенсивність відмов λ, яка для радіоелектронних компонентів вважається постійною величиною протягом всього періоду експлуатації.

Для розрахунку необхідно скласти таблицю 3.6, всіх елементів схеми та вказати їхню індивідуальну інтенсивність відмов.

Таблиця 3.6 – Інтенсивність відмов елементів пристрою

Найменування елемента	Кількість *ni*	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$, 1/год	Сумарна $\lambda_{sum} \cdot 10^{-6}$
Мікроконтролер STM 32	1	0,8	0,8
Регістр зсуву 74HC595N	2	0,2	0,4
Транзистор 2N5551-B	32	0,06	1,92
Транзистор 2N5401	16	0,06	0,96
Оптопара EL817	32	0,15	4,8
Резистор SMD	144	0,01	1,44
Запобіжник плавка вставка	1	0,05	0,05
Запобіжник SMD	16	0,02	0,32
Роз'єми та паяні з'єднання	36	0,01	0,36
Разом			11,05

Розрахунок загальної інтенсивності та середнього часу напрацювання. Після заповнення таблиці ми знаходимо загальну інтенсивність відмов пристрою λ:

$$\lambda = \sum_{i=1}^{k} n_i \cdot \lambda_i \cdot K_e, \tag{3.5}$$

де K_e – коефіцієнт.

Для розрахунку прийнято наступні значення поправочних коефіцієнтів, що відповідають умовам експлуатації в промислових приміщеннях:

K_1 = 1,0 (відсутність значних механічних навантажень);

K_2 = 1,2 (урахування впливу температури та вологості повітря);

K_3 = 1,0 (нормальний атмосферний тиск).

$$K_e = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \tag{3.6}$$

$$K_e = 1 \cdot 1{,}2 \cdot 1 = 1{,}2,$$

$$\lambda = 11{,}05 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}2 = 13{,}26 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

Далі розраховуємо середній час напрацювання на відмову ($T_{ср}$) – це час у годинах, протягом якого пристрій працюватиме без поломок у середньому:

$$T_{ср} = \frac{1}{\lambda}, \tag{3.7}$$

$$T_{ср} = \frac{1}{13{,}26 \cdot 10^{-6}} = \frac{1000000}{13{,}26} = 75414{,}7 \text{ год.}$$

Імовірність безвідмовної роботи $P_{(t)}$, найважливіший графічний показник. Він показує шанс того, що пристрій не зламається через 100, 1000 або 5000 годин роботи. Розраховується за експоненціальним законом:

$$P_{(t)} = e^{-\lambda t}, \tag{3.8}$$

де e – основа натурального логарифма;

λ – інтенсивність відмов;

t – час випробувань.

Розраховані результати занесені до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Значення ймовірності безвідмовної роботи

Час роботи t, год	Добуток $\lambda_{пр} \cdot t$	Ймовірність $P_{(t)}$
1	2	3
0	0	1
1	0,00001	0,999987
10	0,00013	0,999867
100	0,00133	0,998675
1000	0,01326	0,986829
10000	0,13260	0,875827
100000	1,32600	0,265574
1000000	13,26000	0,000002
10000000	132,60000	0,000000

Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови від часу напрацювання, побудований на підставі таблиці, наведений на рисунку 3.9.

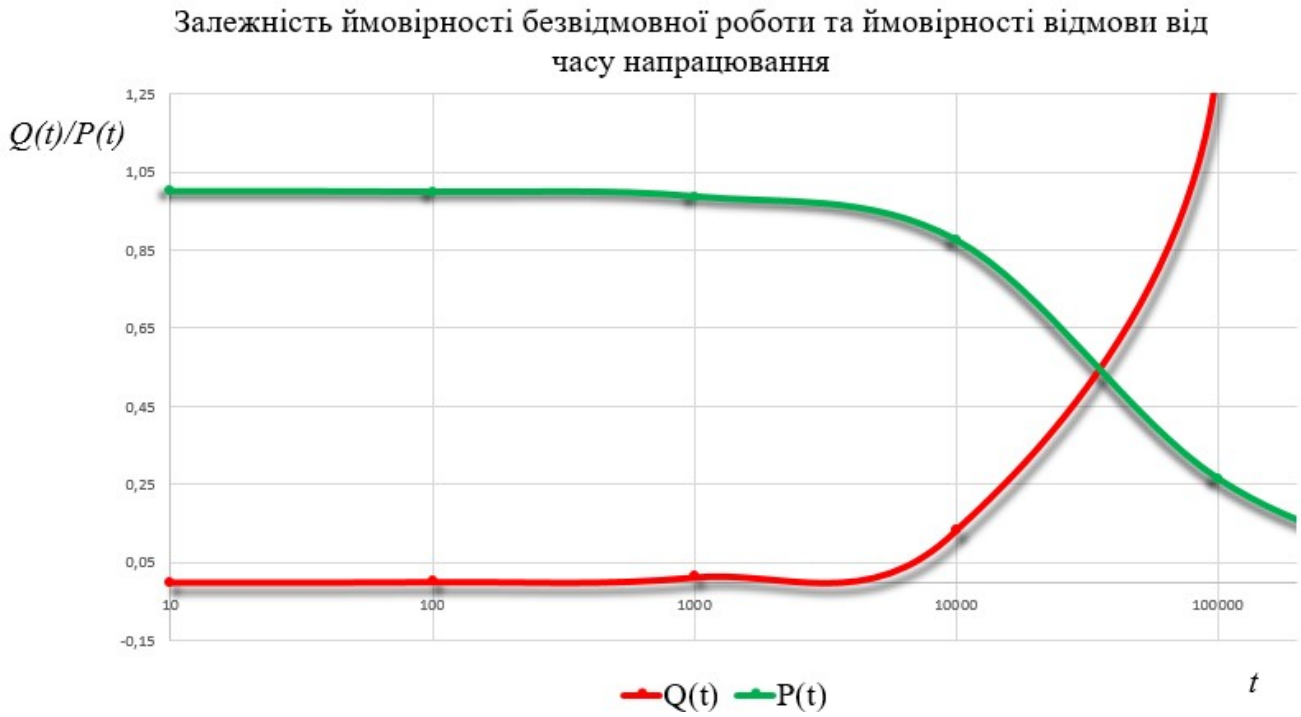


Рисунок 3.9 – Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови від часу напрацювання

Таким чином, виходячи з проведених розрахунків, середній час безперервної роботи, напрацювання на відмову пристрою становить 75414 годин, що є високим показником для засобів промислової автоматики даного класу та свідчить про надійність обраної елементної бази.

3.5 Перевірка стійкості системи управління за критерієм Гурвіца

Для аналізу динамічної стабільності контуру керування виконавчим механізмом, транспортером, обрано алгебраїчний критерій стійкості Гурвіца. Цей метод є оптимальним для систем третього порядку, оскільки дозволяє оцінити стійкість на основі аналізу коефіцієнтів характеристичного рівняння.

Керування двигуном транспортера виконується послідовно через кілька комутаційних ланок, кожна з яких має власну інерційність, сталу часу T. Оскільки точні інструментальні вимірювання мікросекундних затримок на етапі проектування ускладнені, використано номінальні довідкові дані для обладнання:

$T_1 = 0{,}01$ с – стала часу спрацьовування проміжного реле;

$T_2 = 0{,}05$ с – стала часу втягування контактів магнітного пускача;

$T_3 = 0{,}5$ с – електромеханічна стала часу розгону двигуна транспортера;

$K = 2$ – загальний коефіцієнт підсилення контуру керування.

Кожен елемент ланцюжка описується класичною аперіодичною ланкою першого порядку. Замкнена система з урахуванням зворотного зв'язку описується характеристичним рівнянням:

$$(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1) \cdot (T_3 s + 1) + K = 0. \quad (3.9)$$

Після математичного розкриття дужок та зведення подібних доданків, рівняння набуває стандартного вигляду третього порядку:

$$(T_1\ T_2\ T_3)\ s^3 + (T_1\ T_2 + T_1\ T_3 + T_2\ T_3)\ s^2 + (T_1 + T_2 + T_3)\ s + (1 + K) = 0. \quad (3.10)$$

Що відповідає загальному вигляду:

$$a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0. \quad (3.11)$$

Підставивши прийняті значення сталих часу (T_1, T_2, T_3) та коефіцієнта (K), отримуємо числові значення коефіцієнтів:

Коефіцієнт a_3:

$$a_3 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 = 0{,}01 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}5 = 0{,}00025.$$

Коефіцієнт a_2:

$$a_2 = (T_1 \cdot T_2) + (T_1 \cdot T_3) + (\ _2 \cdot T_3) = 0{,}0005 + 0{,}005 + 0{,}025 = 0{,}0305.$$

Коефіцієнт a_1:

$$a_1 = T_1 + T_2 + T_3 = 0{,}01 + 0{,}05 + 0{,}5 = 0{,}56.$$

Коефіцієнт a_0:

$$a_0 = 1 + K = 1 + 2 = 3.$$

Отримане фінальне характеристичне рівняння системи:

$$0{,}00025\ s^3 + 0{,}0305\ s^2 + 0{,}56\ s + 3 = 0.$$

Згідно з критерієм Гурвіца, для системи третього порядку необхідно і достатньо виконання двох умов.

Необхідна умова, усі коефіцієнти рівняння мають бути строго більшими за нуль ($a_i > 0$).

$$0{,}00025 > 0;\ 0{,}0305 > 0;\ 0{,}56 > 0;\ 3 > 0.$$

Умову виконано.

Достатня умова, добуток середніх коефіцієнтів має бути більшим за добуток крайніх коефіцієнтів, що еквівалентно додатній матриці Гурвіца:

$$a_1 \cdot a_2 > a_0 \cdot a_3.$$

Підставимо розраховані числа для фінальної перевірки:

Ліва частина: $0{,}56 \cdot 0{,}0305 = 0{,}01708$.

Права частина: $3 \cdot 0{,}00025 = 0{,}00075$.

Порівняння значень:

$$0{,}01708 > 0{,}00075.$$

Оскільки обидва інженерні критерії Гурвіца виконуються з істотним запасом, проектована система управління пристроєм є абсолютно стійкою. При пуску двигунів транспортерів та спрацьовуванні пневматичних приводів у системі не виникатиме автоколивань, а перехідні процеси матимуть згасаючий характер.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед запуском лінії виробничого департаменту в виробничий цикл потрібно переконатися в тому, що захисні огородження на обладнанні встановлені та справні.

Не дозволяється знімати захисні огородження з рухомих механізмів, блокувати роботу пристроїв безпеки, допускати випуск готової продукції в режимі сервісу, а також залишати ключ перемикання режимів в замку після налагодження устаткування на час випуску готової продукції.

На постійному робочому місці повинні бути встановлені верстаки з закріпленими на них лещатами і іншими пристосуваннями. Верстаки повинні мати жорстку та міцну конструкцію, бути стійкими. Поверхня верстака повинна бути горизонтальною, оббитою листовою сталлю, не мати вибоїн, задирок.

Правильно надіти належний за нормами чистий, справний спецодяг, який не повинен мати решт, що розвиваються, повинен бути застебнутий на всі ґудзики, рукава і комір повинні бути застебнуті (зав'язані), волосся прибране під головний убір.

Перед початком роботи на верстатах необхідно переконатися в кріпленні верстатів, яке повинно бути міцним і надійним, перевірити справність заземлення обладнання. Переконатися в достатньому освітленні робочого місця. Перевірити наявність і справність інструменту.

При ремонті або огляді обладнання необхідно застосовувати ручні світильники напругою не вище 42 В.

4.2 Вимоги безпеки під час виконання роботи

Працювати тільки справними інструментами, пристосуваннями і на справному обладнанні.

Слід уникати потрапляння пальців, кистей рук і інших частин тіла в машини, механізми, не торкатися до рухомих деталей під час роботи, не витягувати з машин пошкоджений або деформований продукт до повного їх відключення від джерела живлення.

На робочому місці повинні лежати тільки ті інструменти і пристосування, які необхідні для виконання даної роботи - наявність сторонніх предметів на робочому місці уповільнює роботу і може призвести до травми.

Не дозволяється проводити змащення, чистку, огляд і ремонт обладнання під час його роботи. Перед ремонтом обладнання повинно бути знеструмлено та відключено від джерела живлення, від продуктопроводів і трубопроводів.

Налагоджувальники повинні виконувати регулярний ремонт закріпленого за ними обладнання, регулювання підшипників, а також ріжучих і інших робочих деталей, перевірку мастильних пристроїв, кріплення станини, правильність установки захисних кожухів та інших огорож.

4.3 Вимоги безпеки після закінчення роботи

Привести у порядок своє робоче місце. Інструменти і пристосування прибрати у відведені місця зберігання.

Встановити на свої місця зняті огородження та запобіжні пристрої.

Інформацію про виявлені в кінці роботи несправності обладнання та захисних пристосувань передати по зміні, зробити запис в журналі та доповісти безпосередньому керівнику.

4.4 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У разі виникнення небезпеки для життя або здоров'я персоналу або в разі потреби негайно зупинити машину необхідно натиснути аварійну кнопку «Стоп» або потягнути за тросовий вимикач аварійної.

При виявленні запаху газу, а також при спрацьовуванні світлової та звукової сигналізації сигналізатора необхідно:

– закрити крани пальників і кран на газопроводі;

– негайно повідомити газовій службі;

– не користуватися відкритим вогнем;

– не вмикати і не вимикати електричні прилади, освітлення та вентилятори;

– провітрити приміщення.

При ураженні електрострумом слід звільнити потерпілого від дії електроструму, привести його до тями, при зупинці дихання зробити штучне дихання і викликати швидку допомогу.

При виникненні пожежі негайно прийняти заходи до гасіння її за допомогою первинних засобів пожежогасіння.

У виробничих приміщеннях встановлена система раннього виявлення та оповіщення персоналу про викид аміаку що стався і необхідність терміново покинути приміщення (в таких випадках включається сирена).

У випадку оголошення сигналу повітряної тривоги пройти до захисної споруди. Якщо поруч немає укриття або немає можливості до нього дістатися, діяти за вказівками керівника чи особи, яка виконує його функції. Найпростіше – сховатися в приміщенні, де працівники/відвідувачі перебувають на момент оголошення повітряної тривоги. При цьому керуватися «правилом двох стін», не перебувати рядом із вікнами.

Перебувати в укритті, доки не надійде сповіщення про відбій / завершення повітряної тривоги [22-23].

ВИСНОВКИ

Встановлено, що заводська комплектація системи керування формувачем коробів не забезпечує належного рівня надійності при роботі в інтенсивних режимах. Аналіз експлуатаційних даних показав, що штатні комутаційні вузли схильні до перегріву та передчасного зносу через невідповідність характеристик електромагнітних реле реальним піковим навантаженням та частоті циклів спрацювання. Зазначена невідповідність призводить до частих зупинок виробництва та необхідності заміни компонентів, що зумовило необхідність розробки модернізованого програмно-апаратного комплексу з інтегрованою системою діагностики У дипломній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення надійності системи автоматизованого керування формувачем коробів.

За результатами аналізу об’єкта автоматизації встановлено, що основним чинником низької надійності існуючих систем є деградація комутаційних вузлів електромагнітних реле. Доведено, що утворення електричної дуги та зростання перехідного опору контактних площадок призводять до їх нагріву та передчасного виходу з ладу. Обґрунтовано доцільність переходу до моніторингу технічного стану комутаційних елементів за фактичним станом, а не за регламентом.

За результатами розробки структурної схеми та алгоритму спроєктовано програмно-апаратний комплекс на базі мікроконтролера, що забезпечує виконання технологічних циклів формування коробів. Розроблено алгоритм, який дозволяє виявляти відхилення в роботі пневмоклапанів на початкових стадіях, що мінімізує ризик аварійних зупинок виробничої лінії.

За результатами розроблення модулю системи керування реалізовано апаратну частину пристрою. Виконано розрахунки друкованої плати з використанням технології наскрізного монтажу (ТНТ), що забезпечує високу стійкість до вібраційних навантажень. Сформовано структуру вхідних та вихідних

каналів на базі портів GPIO, що дозволило інтегрувати функцію зворотного зв’язку для контролю стану комутаційних ланцюгів у реальному часі.

Запровадження розробленого комплексу дозволяє перейти від планово-запобіжних ремонтів до обслуговування за фактичним станом, що значно знижує час вимушеного простою обладнання та подовжує термін експлуатації комутаційної апаратури. Система є адаптивною до змін у виробничих алгоритмах, що дозволяє легко перелаштовувати контролер під різні типи задач за допомогою зміни логіки контролера.

Реалізований програмно-апаратний комплекс успішно пройшов етап промислового тестування у складі формувача коробів. Результати підтвердили, що застосування мікроконтролерного керування в поєднанні з алгоритмами діагностики дозволило підвищити стабільність роботи обладнання, забезпечивши його відповідність сучасним вимогам інтенсивного пакувального виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шевченко Є.В., Теслюк С.І. Розроблення системи керування автоматичного формування коробів / Матеріали XXX Міжнародного молодіжного форуму радіоелектроніка та молодь у XXI столітті / Т.2. Харків: ХНУРЕ. 2026. С. 14-17

2. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарєва, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

4. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

5. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.

6. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: підручник для студентів закладів вищої освіти ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ФОП Панов А.М., 2021. – 604 с. ISBN 978-617-7947-67-6

7. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No 50. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi-chnu-dobrochesnist.pdf.

8. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No 50. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi-chnu-dobrochesnist.pdf.

9. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-diju-rishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf

10. Закон України “Про вищу освіту” від 01.07.2014 No 1556-VII. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text.

11. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 27.11.2020 р. No 400. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-organizaciju -osvitnogo-procesu-v-hnure.pdf.

12. Положення про організацію проведення практики здобувачів вищої освіти Харківського національного університету радіоелектроніки [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 03.05. 2019 р. No 222. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/222-vid-03.05.2019-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf.

13. Формувальники коробів [Електронний ресурс] / URL: https://manupackaging.ua/obladnannya/formuvalniki-korobiv/ (дата звернення: 29.04.2024).

14. Складальна машина для ящиків RPK-09 [Електронний ресурс] / URL: http://casesealing-machine.com/1-3-case-erector-with-bottom-sealer.html (дата звернення: 29.04.2026).

15. Формувальники коробів [Електронний ресурс] / URL: https://oem.skladpack.ua/formuvalnyky-korobiv/ (дата звернення: 29.04.2026).

16. Програмований логічний контролер CP1E [Електронний ресурс] / URL: https://automation.omron.com/en/us/products/family/CP1E (дата звернення: 29.04.2026).

17. Автоматична кліпувальна упаковка (ЧАБ) [Електронний ресурс] / URL: https://vermee.com/en/continuous-filling/ (дата звернення: 29.04.2026).

18. Електричні апарати автоматики та керування / Л. Б. Жорняк, М. В. Антонова, В. В. Василевський. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. 414 с.

19. Плата розробника STM8S103F3P6 https://ardushop.in.ua/arduino/stm8-developer-board-on-stm8s103f3p6 (дата звернення: 29.04.2026).

20. Плата розробника a STM32F103C8T6 ARM https://arduino.ua/prod1328-plata-razrabotchika-stm32f103c8t6-arm-stm32-minimalnaya-konfigyraciya?srsltid=AfmBOophhaE4mBLYvcNpFVD6aPx9hwI3oIp_XjwHRmCtssCXu7tBlN1X (дата звернення: 29.04.2026).

21. Плата розробника STM32F407G-DISC1 https://arduino.ua/prod1122-plata-razrabotchika-stm32f407vg-discovery (дата звернення: 29.04.2026).

22. Інструкція з охорони праці №20 для налагоджувальника устаткування у виробництві харчової продукції ТОВ «ФМ ХЛАДОПРОМ» у відповідності до наказу від 01.04.2024 р. №12ОП.

23. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов. Т. Є. Стиценко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с.